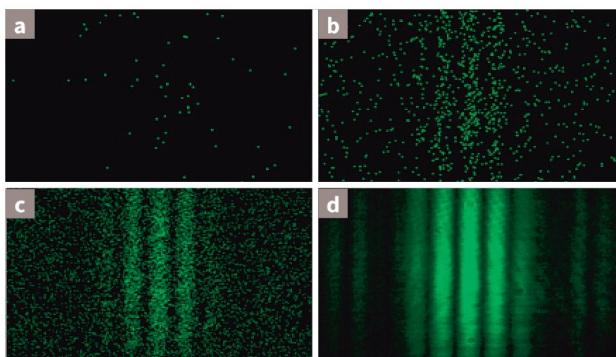
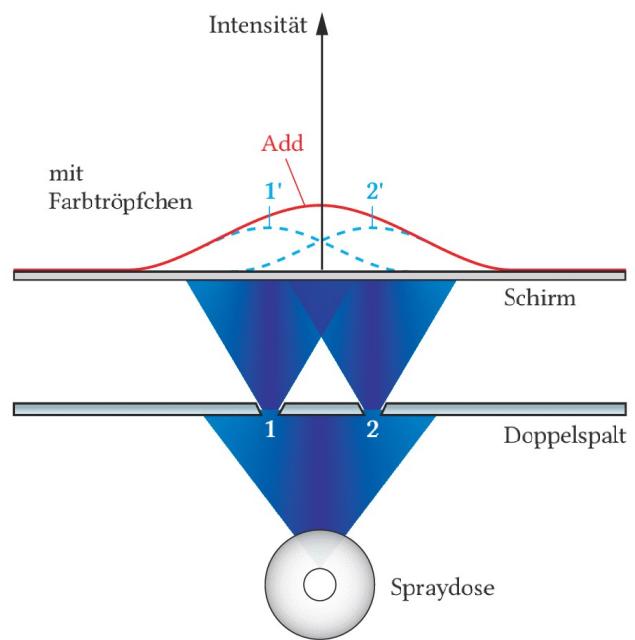


8.5 Quantenobjekt Photon



B1 Einzel-Photon-Aufnahmen analog zu Versuch **V1**: Nach und nach bildet sich ein Interferenzmuster heraus.

Einzelne Photonen am Doppelspalt – Nachdem der Photoeffekt und der Compton-Effekt bei Photonen eindeutig Teilcheneigenschaften nachweisen, stellt sich die Frage, ob sie nicht vollständig als klassische Teilchen beschrieben werden können. Dass bei Licht Interferenzerscheinungen auftreten können, deutet zwar auf eine Welle hin, aber bei Schall beispielsweise schwingen Luftteilchen relativ zueinander und bilden so eine Welle. Besteht also nicht auch die Lichtwelle aus einem Schwarm Photonen, die zueinander schwingen? G. TAYLOR widerlegte dies schon 1909. Er brachte Licht zur Interferenz, das so schwach war, dass sich jeweils höchstens ein Photon im Gerät befand (Versuch **V1**). Trotzdem fügte es sich in das übliche Interferenzbild ein. Bild **B1** zeigt Einzel-Photon-Aufnahmen eines vergleichbaren Experiments. Zunächst beobachtet man nur wenige, stets scharfe Photonentreffer, die keine nachvollziehbare Struktur haben, sondern zufällig verteilt sind (Bild **B1a**). Je mehr Aufnahmen übereinandergelegt werden, desto deutlicher bildet sich ein periodisches Interferenzmuster heraus. Für Bild **B1d** wurden 500000 Aufnahmen der Einzel-Photon-Kamera übereinandergelegt.

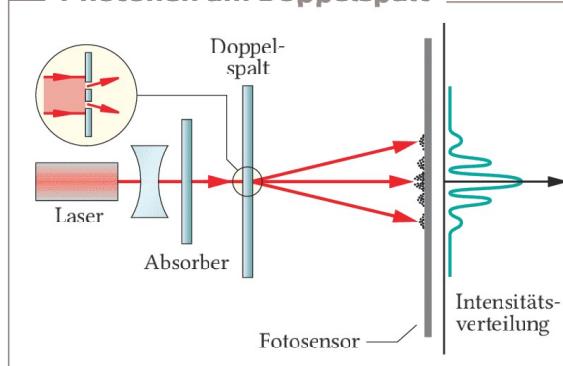


B2 Klassisch: Farbtröpfchen am Doppelspalt erzeugen zwei verschmierte Streifen $1'$ und $2'$, die zusammen Add ergeben.

Interferieren am Doppelspalt auch Teilchen, die der klassischen Mechanik gehorchen, z.B. Farbtröpfchen?

Diese werden aus einer Spraydose durch zwei parallele Schlitze auf einen Schirm gesprüht. Jedes Tröpfchen fliegt entweder durch Spalt 1 oder 2 (Bild **B2**). Ist nur Spalt 1 offen, so entsteht auf dem Schirm der verwischte Fleck $1'$. Ist nur Spalt 2 offen, baut sich Fleck $2'$ auf. Sind beide offen, so addieren sich an jeder Stelle die Teilchenzahlen von Fleck $1'$ und $2'$ zur Kurve Add . Fliegt nämlich ein Tröpfchen durch Spalt 1, so ist es für klassische Teilchen völlig gleichgültig, ob Spalt 2 offen oder geschlossen ist. Sie zeigen keine Interferenz, Photonen aber schon.

V1 Photonen am Doppelspalt



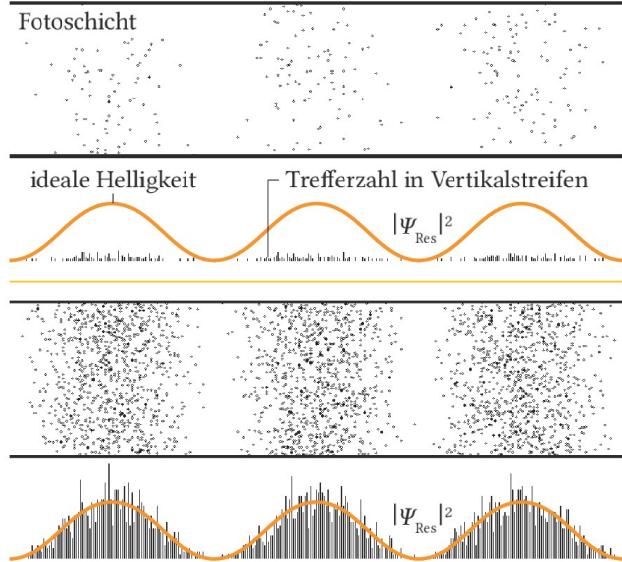
Laserlicht wird durch einen Absorber (Graufilter) so stark abgeschwächt, dass nur noch einzelne Photonen auf den dahinter liegenden Doppelspalt fallen. Das Beugungsbild wird mit einem Fotosensor aufgenommen. Die Auftrefforte der einzelnen Photonen werden als Pixel registriert. Das Experiment wird für verschiedene Belichtungsdauern (von mehreren Minuten bis hin zu drei Monaten) durchgeführt. Je länger die Belichtungsdauer, desto deutlicher ist ein klassisches Interferenzmuster erkennbar (Bild **B1**).

Interferenz mit sich selbst – Für die Lichtquanten scheint es relevant zu sein, ob ein zweiter Spalt existiert und geöffnet ist oder nicht. Auch bei der Wellenbetrachtung ist das der Fall, da die Elementarwellen aus den beiden Spalten sich gegenseitig überlagern und nur so Maxima und Minima ausgebildet werden können. Versuch **V1** ist aber so konzipiert, dass sich immer nur ein einzelnes Photon im Aufbau befindet. Eine Wechselwirkung mit einem Photon, das zur gleichen Zeit den zweiten Spalt passiert, ist also ausgeschlossen. Der englische Quantentheoretiker Paul DIRAC sagte in diesem Zusammenhang: Jedes Photon interferiert mit sich selbst. Um zu verstehen, was DIRAC damit meinte, muss geklärt werden, wie das Wellenverhalten der Photonen in Versuch **V1** beschrieben werden kann.

Der Zufall entscheidet. Bei der Beschreibung von Wellen hat sich das Zeigermodell bewährt; auch das Zustandekommen des Interferenzmusters beim Doppelspalt kann damit sehr gut erklärt werden. Daher sollen auch bei Photonen rotierende Zeiger herangezogen werden, die allerdings neu gedeutet werden müssen. Während die Zeigerlänge bei der Wellenbetrachtung des Lichts der Amplitude entspricht, besitzt ein Photon keine solche Eigenschaft.

Die Amplitude der Lichtwelle, und damit die Zeigerlänge, entscheidet letztendlich darüber, wie viel Energie an einer Stelle auf dem Schirm auftrifft, denn die Intensität verhält sich proportional zum Amplitudenquadrat: $I \sim E^2$.

Beschreibt man das Licht mit Hilfe von Photonen, so bauen sich erst nach und nach aus sehr vielen Photontreffern die bekannten Interferenzbilder auf (Bild **B3**). Niemand kann vorhersagen, wo und wann das nächste Photon auf dem Schirm landen wird. Das bleibt im Einzelfall **unbestimmt** und nur von Zufall beeinflusst. Die Maxima liegen an den Stellen, an denen viele Photontreffer zu verzeichnen sind. Da jedes Photon die Energie $E_{\text{ph}} = hf$ liefert, wird an diesen Stellen auch die meiste Energie frei; sie erscheinen am hellsten. Minima sind hingegen dort zu finden, wo die wenigsten Photontreffer zu verzeichnen sind. Die Wahrscheinlichkeit, dass ein Photon an einer bestimmten Stelle auftrifft, die Antreffwahrscheinlichkeit, entscheidet also über die freiwerdende Energie und die wahrgenommene Lichtintensität. Was bei Wellen durch die Amplitude beeinflusst wurde, muss nun statistisch beschrieben werden.



B3 Zwei Simulationen mit dem Zufallsgenerator zeigen, wie sich die zufallsbedingte Verteilung aus Versuch V1 nacheinander aufbaut. $|\Psi_{\text{Res}}|^2$ entspricht der Antreffwahrscheinlichkeit an jedem Ort.

Wahrscheinlichkeitszeiger – Die mathematische Struktur des Zeigerformalismus soll beibehalten werden, das heißt die Intensität bleibt weiter proportional zum Quadrat der Zeigerlänge. Da diese nun von der Antreffwahrscheinlichkeit und nicht mehr von der Amplitude des elektrischen Feldes abhängt, werden die Zeiger als **Wahrscheinlichkeitsamplituden**, **Wellenfunktionen** oder **Ψ -Zeiger (Psi)** mit der Länge $|\Psi|$ bezeichnet. Das Quadrat $|\Psi|^2$ gibt die Dichte der Photonentreffer an und entspricht damit der Wahrscheinlichkeit, mit der sich Photonen auf dem Beugungsschirm niedersetzen. Treffen viele Photonen auf einen Fleck, so ist $|\Psi|^2$ dort groß (Bild **B3**). Da jeder Ort seinen eigenen Zeiger besitzt, können so also die vom Ort abhängigen **Antreffwahrscheinlichkeiten** veranschaulicht werden. Großes $|\Psi|^2$ bedeutet hohe Antreffwahrscheinlichkeit, kleines $|\Psi|^2$ kleine Antreffwahrscheinlichkeit für Photonen.

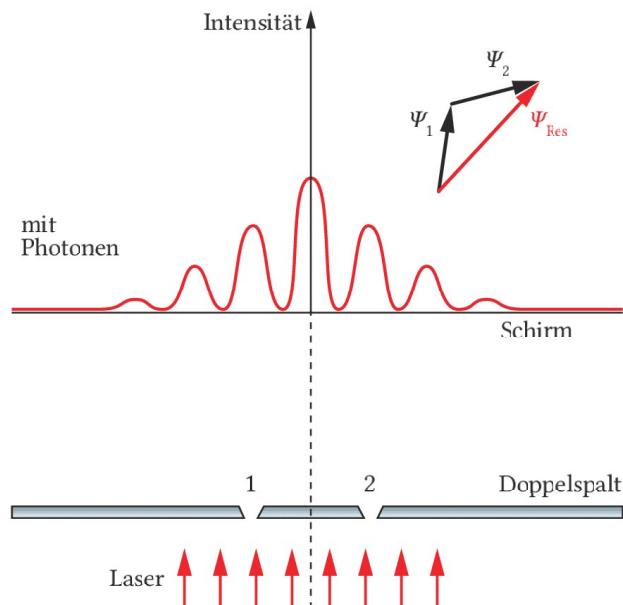
! Merksatz

Auch Photonen, die einzeln einen Doppelspalt passieren, erzeugen ein Interferenzmuster. Für die Beschreibung des Musters wird der Zeigerformalismus mit Wahrscheinlichkeitsamplituden (Ψ -Zeigern (Psi) der Länge $|\Psi|$) verwendet. Deren Quadrat $|\Psi|^2$ gibt die Photonendichte und damit die Antreffwahrscheinlichkeit der Photonen an.

Welle-Teilchen-Dualismus – Auch bei Photonen spielen Frequenz $f = \frac{E_{\text{ph}}}{h}$ und Wellenlänge $\lambda = \frac{h}{p}$ eine Rolle. Deshalb lassen sie sich analog zu Wellen durch Zeiger beschreiben, die pro Wellenperiode λ einmal rotieren. Die Zeiger fungieren als λ -Zähler. Nun können alle für die Interferenz relevanten Welleneigenschaften auch beim Photon gefunden werden. Durch Einführen der Wahrscheinlichkeitsamplitude Ψ hat Max BORN (Nobelpreis 1954) das Wellenbild so weit reduziert, dass es mit einem auf Photonen anwendbaren Teilchenbild vereinbar wurde. Man spricht bei der Zusammenführung dieser beiden Modelle vom „**Welle-Teilchen-Dualismus**“.

Überlagerung von Möglichkeiten – Es stellt sich aber immer noch die Frage, wie beim Doppelspaltversuch ein Interferenzmuster entstehen kann, wenn sich während des Experiments immer nur ein einzelnes Photon im Aufbau befindet. Insbesondere, weil nur noch ein Einzelspaltmuster zu erkennen ist, wenn einer der Spalte verdeckt wird.

Photonen sind unteilbare Lichtquanten, die sich nicht aufteilen und durch beide Spalte gleichzeitig fliegen können. Man darf auch nicht sagen, das Photon fliege z.B. durch den linken Spalt, nur weiß man es nicht so recht. Wäre diese Aussage richtig, so müssten bei zwei offenen Spalten die viel breiteren, überlagerten Beugungsbilder für Einzelspalte sichtbar sein, wie es beispielsweise bei Farbtröpfchen der Fall war.

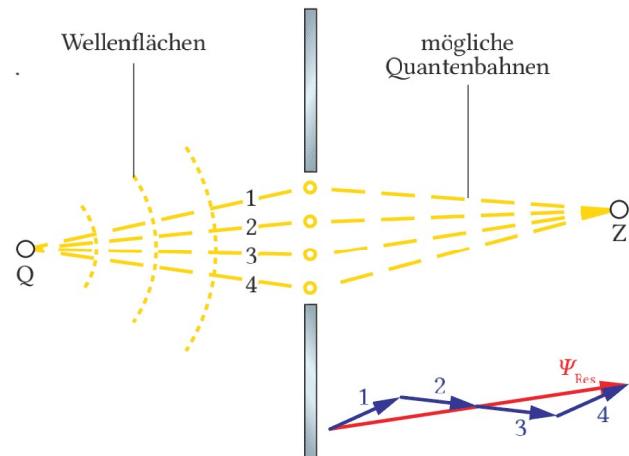


B1 Quanten zeigen Interferenzstreifen, beschreibbar mit der bei Wellen bewährten Zeigeraddition

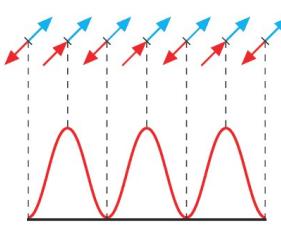
Man sagt vielmehr: Am Doppelspalt stehen jedem Photon zwei mögliche **Pfade** zum Ziel offen, durch jeden Spalt ein Pfad. Für jeden dieser beiden gleichberechtigten Pfade lässt man einen Ψ -Zeiger rotieren – wie bei Wellen. Als λ -Zähler dreht er sich auf der Strecke λ einmal. Die Pfadlänge s bestimmt die Endstellung der Ψ -Zeiger im Ziel (bei $s = 4,25 \cdot \lambda$ macht der Zeiger $4 \frac{1}{4}$ Umdrehungen: seine Endstellung ist 90°). Wie bei Wellen werden im Zielpunkt auf dem Schirm beide Zeiger vektoriell addiert, gemäß (Bild **B1**)

$$\Psi_{\text{Res}} = \Psi_1 + \Psi_2 \quad (\text{statt } \vec{E}_{\text{Res}} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2).$$

Dieses **Superpositionsprinzip** beherrscht die Quantenphysik (Superponieren bedeutet Addieren der Ψ -Zeiger). Damit kann auch das Huygens-Prinzip von Wasserwellen auf Quanten übertragen werden (Bild **B2**): Es müssen nur die tatsächlichen Bahnen der Wellenerregung von der Quelle Q zum Ziel Z in alle möglichen Pfade des Quants umgedeutet werden. Für jede dieser Möglichkeiten lässt man einen Zeiger rotieren und addiert alle Zeiger in Z. Folglich bleibt völlig unbestimmt, wie das unteilbare Photon von Q nach Z gelangt. Es wäre wenig hilfreich anzunehmen, es durchlaufe sie alle zugleich oder nacheinander. Die möglichen Bahnen werden nur als Rechenpfade betrachtet, um die Endstellungen der Ψ -Zeiger zu ermitteln. Man könnte also sagen, es werden alle dem Photon zur Verfügung stehenden Möglichkeiten mathematisch überlagert um Informationen über dessen Antreffwahrscheinlichkeit am Zielort Z zu erhalten.



B2 Die tatsächlichen Wellenbahnen 1...4 werden umgedeutet in mögliche Rechenpfade für die λ -Zähler Ψ_1, \dots, Ψ_4 . Man addiert deren Endstellungen im Ziel Z vektoriell zur Summe Ψ_{Res} . Ihr Quadrat $|\Psi_{\text{Res}}|^2$ gibt die Antreffwahrscheinlichkeit für Photonen in Z an.



① Ebene der Symbole:
Die Zeiger sind gedankliche,
theoretische Hilfsmittel.

② Ebene der Messdaten:
Intensitäts-Kurve

③ Ebene der Realität:
Die Photonentreffer
sind real, tatsächlich.

B3 ③ Wahrnehmung und ② Messung des Doppelspaltversuchs mit einzelnen Photonen werden ① durch ein passendes Modell veranschaulicht.

Alle Möglichkeiten haben Einfluss. Auch beim Umdeuten von Wellen auf Quanten müssen beim Doppelspalt beide Spalte zugleich beachtet werden, die Interferenzanordnung als Ganzes. Das Verhalten eines jeden Photons hängt nämlich trotz seiner Unteilbarkeit von der Position beider Spalte ab. Man beschreibt das mit der Addition $\Psi_{\text{Res}} = \Psi_1 + \Psi_2$ beider Zeigerstellungen. Diese Summe ist zwar exakt bestimmt, man sagt *determiniert*, Einzelereignisse wie Ort und Zeitpunkt der einzelnen Photonenlokalisierung bleiben dagegen dem Zufall überlassen. Man trifft ein Photon wegen seiner Unteilbarkeit nur an einem bestimmten Ort. Dieser hängt von der ganzen Versuchsanordnung wie auch vom Zufall ab. An Interferenzminimas findet man keine Photonen.

Die Aussage von Paul DIRAC, das Photon interferiere mit sich selbst, ist also nicht ganz wörtlich zu nehmen. Es teilt sich nicht auf, so dass beide Teile miteinander wechselwirken können. Stattdessen werden alle Möglichkeiten, die das Photon hat, *als Ganzes* betrachtet. Alle Quantenbahnen, auf denen es sich bewegen kann, werden mathematisch mit Hilfe des Zeigerformalismus überlagert, um für jeden Ort eine Antreffwahrscheinlichkeit für das Photon zu ermitteln. Die Wahrscheinlichkeitsamplituden Ψ sind also ein rein theoretisches Hilfsmittel, um die beobachtbare Realität so zu beschreiben, dass die erfassten Messdaten erklärt werden können (Bild **B3**). Für den tatsächlichen Weg des Photons haben sie keine Bedeutung.

Beim Doppelspaltversuch hat das Photon die Möglichkeit durch den ersten oder den zweiten Spalt zu fliegen, also müssen auch beide Spalte betrachtet werden. Wird einer der Spalte geschlossen, stehen dem Photon auch weniger Möglichkeiten und Quantenbahnen zur Verfü-

gung. Das beeinflusst die Antreffwahrscheinlichkeiten an jedem Ort hinter dem Spalt. An welchem dieser Orte ein einzelnes Photon dann schließlich landet, bleibt als statistischer Vorgang ein Zufallsprodukt.

! Merksatz

- Alle möglichen, gleichberechtigten Pfade des unteilbaren Quants von der Quelle zum Ziel sind zu betrachten. Jedem wird ein Zeiger Ψ_i zugeordnet, der sich als λ -Zähler auf der Strecke λ einmal dreht.
- Superpositionsprinzip: Die Zeiger Ψ_i für alle gleichberechtigten Möglichkeiten werden zur Resultierenden $\Psi_{\text{Res}} = \sum \Psi_i$ addiert: Sie werden superponiert.
- Die Quantengrößen $\Psi_{\text{Res}} = \sum \Psi_i$ und $|\Psi_{\text{Res}}|^2$ sind durch die Zeigeraddition streng bestimmt, determiniert. Erst bei Einzelereignissen gilt der Zufall. Man deutet $|\Psi_{\text{Res}}|^2$ als Antreffwahrscheinlichkeit für Quantenereignisse.

■ Lösen Sie selbst

- 1 Nennen Sie Gemeinsamkeiten und Unterschiede des Zeigermodells in der Wellen- und in der Quantenbetrachtung.
- 2 Nehmen Sie Stellung zur Aussage Diracs, jedes Photon interferiere mit sich selbst.
- 3 Erläutern Sie, warum in der klassischen Physik Teilchen- und Wellenbild unvereinbar sind.
- 4 a) Im Text ist zu lesen, dass man mit der Zeigerdarstellung bei Quanten ein reduziertes Teilchenbild mit einem reduzierten Wellenbild verschmolzen habe. Erklären Sie allgemein und am Beispiel des Doppelspaltexperiments, was dabei jeweils reduziert wurde.
b) Nennen Sie die Bedeutungen, die die Zeiger bei Quanten zusätzlich gewonnen und welche sie verloren haben.
c) Veranschaulichen Sie das Wort „ λ -Zähler“ mit einem Rad, das entlang eines Rechenpfads rollt. Welchen Umfang geben Sie ihm? Was bedeutet das Wort Rechenpfad?