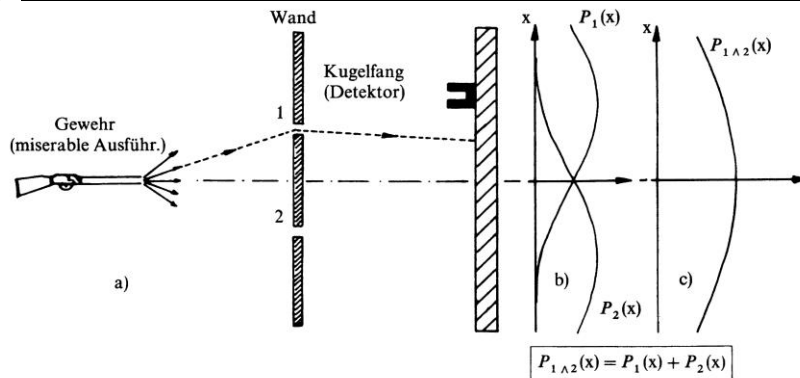


1.3 Beschreibung von Quantenobjekten

1.3.1 Dualismus von Licht bzw. Elektronen

(1) Doppelspaltversuch mit klassischen Teilchen, z.B. Schrotkugeln



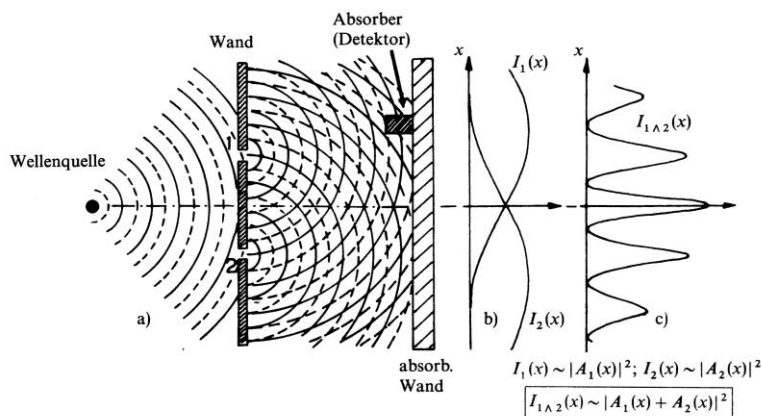
Schießt man Schrotkugeln, die über einen weiten Winkelbereich streuen, gegen einen Doppelspalt, dann gelangen die Kugeln **entweder durch Spalt 1 oder durch Spalt 2** und werden dabei eventuell abgelenkt.

Öffnet man nur den Spalt 1, so stellt sich bezüglich des Auftreffens auf der Detektorwand die Wahrscheinlichkeitsverteilung $P_1(x)$ für die "Intensität" des Kugelhagels ein; beim alleinigen Öffnen von Spalt 2 erhält man $P_2(x)$.

Sind beide Spalte offen, beobachtet man die Wahrscheinlichkeitsverteilung $P_{1\wedge 2}(x)$. Offenbar sind $P_1(x)$ und $P_2(x)$ unabhängig davon, ob der jeweils andere Spalt geöffnet ist oder nicht, und es gilt:

Bei klassischen Teilchen erhält man die Gesamtintensität durch Addition der Intensitäten der Einzelspalte. Makroskopische Objekte zeigen keine Interferenzeigenschaften.

(2) Doppelspaltversuch mit klassischen Wellen



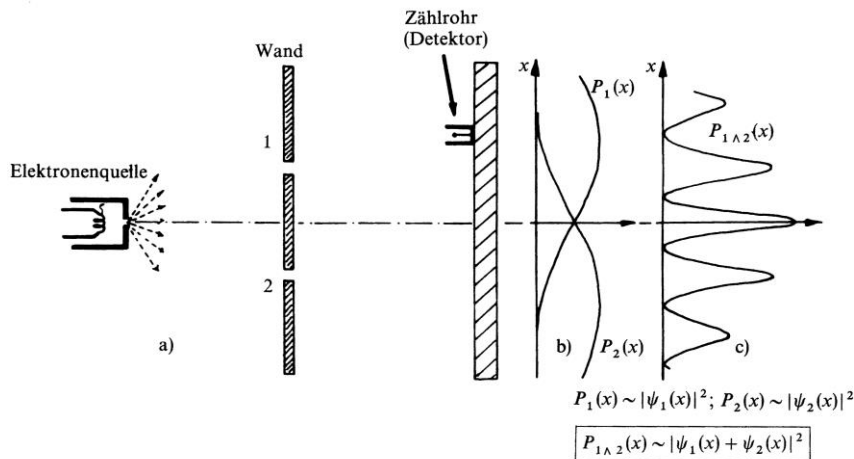
Analog zu (1) schickt man Wasserwellen auf einen geeigneten Doppelspalt ($B \ll \lambda$, b in der GO von λ). Der Absorber misst die in einer festen Messzeit auftreffende Energie, die proportional zur Intensität bzw. zum Amplitudenquadrat ist.

Öffnet man nur Spalt 1, erhält man die Intensitätsverteilung $I_1(x) \sim |A_1(x)|^2$ bzw. analog für Spalt 2 $I_2(x) \sim |A_2(x)|^2$. Sind jedoch beide Spalte geöffnet, ergibt sich nicht etwa eine Addition der Einzelintensitäten, sondern das bekannte Doppelspalt-Interferenzmuster $I_{1\wedge 2}(x) \sim |A_1(x) + A_2(x)|^2$, wobei $A_1(x)$ bzw. $A_2(x)$ sowohl die Amplitude als auch die Phasenlage der Schwingung kennzeichnet. Also gilt:

Bei klassischen Wellen erhält man die Gesamtintensität als Betragsquadrat der Gesamtamplitude, die durch (vektorielle) Addition der Einzelamplituden unter Berücksichtigung der Phasendifferenz entsteht.

Makroskopische Wellen zeigen keinen Teilchencharakter.

(3) Doppelspaltversuch mit Elektronen

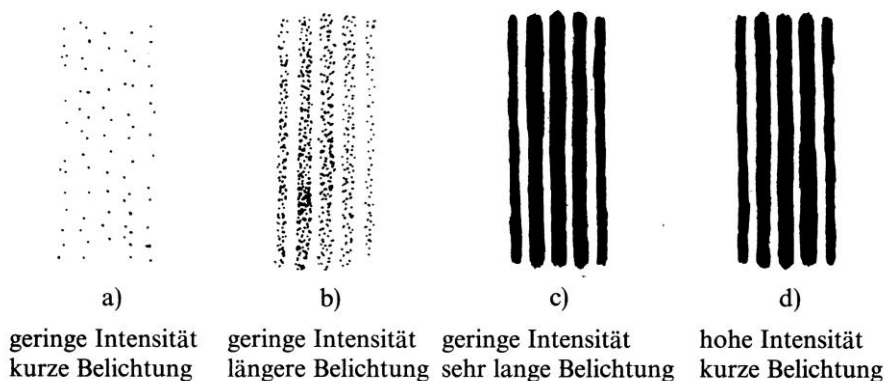


Ein Elektron müsste nach der klassischen Teilchenvorstellung entweder durch Spalt 1 oder Spalt 2 gehen. Für alle Elektronen, die durch Spalt 1 gehen, könnte der Spalt 2 auch geschlossen sein und umgekehrt. Damit müssten sich wie beim Kugelexperiment die Zählraten und damit die Wahrscheinlichkeiten einfach addieren. Das Experiment von Jönsson mit dem gezeichneten Intensitätsverlauf widerspricht diesem Teilchenmodell jedoch eindeutig.

(4) Der Versuch von TAYLOR (1909)...

... untersucht die von Licht erzeugte Interferenzerscheinung beim Doppelspalt in Abhängigkeit von unterschiedlichen Beleuchtungsstärken und Belichtungsdauern. Dabei werden auch so extrem schwache Lichtquellen verwendet, dass sich sicher nur wenige Photonen gleichzeitig in der Versuchsanordnung befinden und die Belichtungszeit u.U. mehrere Monate betragen muss, um das Interferenzbild mit dem einer starken Lichtquelle vergleichbar zu machen.

Idealisiert erhält man z.B. folgende Schwärzungsverteilungen auf dem Beobachtungsschirm:



Bei geringer Intensität und

- a) (sehr) kurzer Belichtung befinden sich nur an einzelnen Stellen des Schirms Schwärzungs-„Punkte“, d.h. die Lichtenergie ist auf diskrete Raumpunkte konzentriert.
- b) längerer Belichtung erkennt man, dass die Auftrefforte nicht gleichmäßig, sondern einer Wahrscheinlichkeitsverteilung gehorchend über den Schirm verteilt sind.
- c) sehr langer Belichtung ergibt sich schließlich das gleiche Schwärzungsbild wie bei hoher Lichtintensität und kurzer Belichtung (d)).

Dies beweist, dass die Interferenz nicht durch das gleichzeitige Vorhandensein vieler Photonen in der Versuchsanordnung bedingt ist, sondern dass es auf einen hohen Wert des Produkts von Intensität und Belichtungszeit (also eine möglichst große Anzahl nachgewiesener Photonen) ankommt.

Völlig analoge experimentelle Befunde lassen sich mit Elektronen erzielen.

(5) Statistische Deutung nach BORN für beliebige Quantenobjekte

Weder das Wellen- noch das Teilchenmodell beschreibt die physikalische Natur von Licht bzw. Elektronen umfassend und vollständig.

Den Zusammenhang zwischen den **Photonen** eines Lichtbündels und der damit verbundenen elektromagnetischen Welle bzw. zwischen **anderen Quantenobjekten**, d.h. Elektronen, Neutronen, Protonen, Atomen, Molekülen,...) und der damit assoziierten De-Broglie-Welle beschreibt die

Statistische Deutung nach Max BORN (GER, 1882-1970, NP 1954):

Die **Photonendichte** (bzw. **Teilchendichte**) in einem Raumelement dV um einen Punkt P ist **direkt proportional zum Amplitudenquadrat der zugehörigen elektromagnetischen Welle (bzw. De-Broglie-Welle)** in P , d.h. das Amplitudenquadrat der entsprechenden Welle ist **proportional zur Wahrscheinlichkeit, das Photon bzw. Quantenobjekt in P anzutreffen**.

Die **Energie eines Quantenobjekts** wird also grundsätzlich nicht entsprechend der Wellenvorstellung auf eine größere Fläche zur Interferenzfigur verteilt, sondern dieses **trifft an irgendeiner Stelle des Schirms auf, an der das Amplitudenquadrat der assoziierten Welle nicht den Wert Null hat**.

Der **genaue Auftreffort kann dabei grundsätzlich nicht vorausgesagt werden**, sondern man kann **nur gewisse Wahrscheinlichkeitsaussagen** machen, wie sie der Intensitätsverteilung der klassischen Wellentheorie entsprechen. Diese Intensitätsverteilung (also das Interferenzmuster) wird dann sichtbar, wenn man viele solche Quantenobjekte betrachtet.

Ebenso ist **aus dem gemessenen Auftreffort prinzipiell kein Rückschluss auf den Weg des einzelnen Photons durch die Doppelspaltanordnung** (Spalt 1 oder 2) möglich.

Es gibt bei einem Doppelspaltexperiment für Quantenobjekte also Bereiche auf dem Nachweisschirm, in denen unabhängig von der Bestrahlungsintensität kein solches Quantenobjekt auftritt. Die Lage dieser Bereiche hängt im Wesentlichen vom Spaltmittenabstand b , der Wellenlänge λ sowie dem Abstand a zwischen Spalt und Schirm ab und berechnet sich, indem das Quantenobjekt als Welle beschrieben wird, die gleichzeitig durch beide Spalte tritt:

Solange ein einzelnes Quantenobjekt nicht registriert wird, muss es als Welle beschrieben werden, die beispielsweise durch beide Öffnungen eines Doppelspalts gleichzeitig geht.

Wird der Ort eines Quantenobjekts, z.B. auf einem Nachweisschirm, bestimmt, tritt es als punktförmiges Teilchen auf.

Ein wirklich umfassendes, anschauliches Modell für das Verhalten von Licht bzw. Mikroteilchen gibt es bis heute nicht. Seit den fünfziger Jahren des 20. Jahrhunderts existiert allerdings eine einheitliche und umfassende mathematische Theorie für die Physik der Mikroteilchen, die sog. **Quantenmechanik** (begründet u.a. von Erwin SCHRÖDINGER, Werner HEISENBERG, Paul DIRAC, Max BORN sowie Wolfgang PAULI).

Darin wird das Verhalten eines Teilchens in einer gegebenen Versuchsanordnung durch eine orts- (bzw. zeit-)abhängige sog. **Wellenfunktion** $\Psi(x;t)$ beschrieben. Diese ergibt sich als Lösung einer Differentialgleichung, der sog. **SCHRÖDINGER-Gleichung**. Die Wellenfunktion $\Psi(x;t)$ besitzt i.A. komplexe Werte und sie selbst hat keine konkrete physikalische Bedeutung, aber $|\Psi(x;t)|^2$ ist ein Maß für die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Teilchens am Ort x zur Zeit t .

Die Materiewelle hat hier die Bedeutung einer „Führungswelle“, mit deren Hilfe man die Aufenthaltswahrscheinlichkeit an jedem Ort der Versuchsanordnung angeben, aber nicht vorhersagen kann, wie sich ein einzelnes Teilchen konkret bewegen wird.

So verliert strenggenommen z.B. auch der Begriff „Bahn“ eines Teilchens im atomaren Bereich seinen Sinn.