

## Der Doppelspalt-Versuch mit Licht

“Ist Licht eine Welle oder ein Teilchen?”

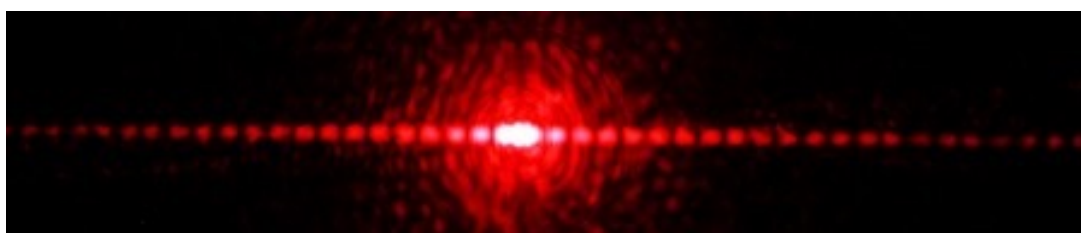
Die einfachste Antwort ist zunächst, dass die Beobachtung selbst zeigen muss, was denn nun tatsächlich zutrifft. Aber genau an dieser Stelle wird es eben vertrackt, denn Licht scheint manchmal Eigenschaften aufzuweisen, die wir grundsätzlich mit dem Verhalten von Wellen in Verbindung bringen, in anderen Momenten scheint sich Licht hingegen als Teilchen zu verhalten. Letztlich ist Licht aber *ein einziges* Phänomen und wir sollten gut verstehen, was es mit diesem oft zitierten **Welle-Teilchen-Dualismus** auf sich hat.

Kein Phänomen kann die Verbindung zwischen Wellen- und Teilchenverhalten besser verdeutlichen als das **Doppelspalt-Experiment**, mit dem **Thomas Young** bereits im Jahr 1802 die Wellennatur des Lichtes nachwies.

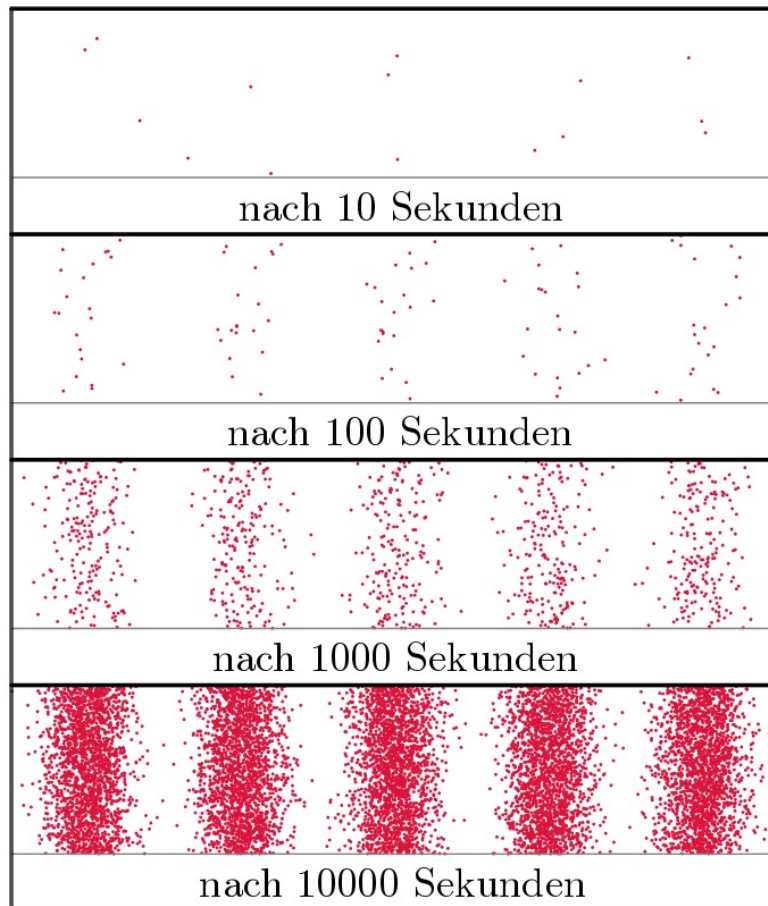


Thomas Young (1773 – 1829)

Stellen wir uns monochromatisches Licht vor, das auf einen Doppelspalt trifft, wobei das hindurchtretende Licht dahinter auf einen Schirm (= Fläche) trifft oder auf einem fotografischen Film festgehalten wird. Für uns heute ist dieser Versuch sehr einfach durchführbar, denn mit dem Laser haben wir wie selbstverständlich eine hervorragende monochromatische Lichtquelle zur Verfügung. Bei normaler Lichtintensität beobachten wir ein typisches **Interferenzmuster** (= Überlagerungsmuster), bei dem die Intensität von einem Maximum (**konstruktive Interferenz**) im Zentrum des Films auf null (**destruktive Interferenz**) abfällt, danach wieder ein Maximum erreicht usw. Das Licht verhält sich ganz nach der klassischen Erwartung als Welle, denn Teilchen interferieren nicht miteinander. Das machen nur Wellen, wie uns von der Akustik her bestens bekannt ist.



Nehmen wir nun an, dass die Intensität ganz drastisch reduziert wird – Young konnte dies noch nicht bewerkstelligen und einen Film hatte er auch noch nicht zur Verfügung – sodass auf dem Schirm kein Muster mehr zu beobachten ist. Der Film registriert immer noch das auf ihn einfallende Licht, nun allerdings sporadisch an ganz unterschiedlichen Orten. Ganz offensichtlich wird *ein Lichtteilchen nach dem anderen* registriert. Das Licht wird offenbar in Portionen (= Energiepakete = Teilchen = Photonen) von der Lichtquelle ausgesendet und kommt auch in Portionen auf dem Schirm an. Das Licht ist quantisiert. Die nachfolgende Abbildung oben auf der nächsten Seite zeigt das Ergebnis, bei dem jedes eintreffende Teilchen als Punkt dargestellt wird. Obwohl die Verteilung der Punkte zu Beginn völlig unvorhersehbar wirkt, können wir allmählich ein regelmäßiges Muster erkennen.



Intensität hinter dem Doppelspalt  
zeigt Interferenzmuster



Das Verständnis der Verbindung zwischen Wellen und Teilchen beruht auf zwei wesentlichen Beobachtungen:

- Erstens ist der genaue Ort, an dem das nächste Photon auftrifft, nicht vorhersagbar. Prinzipiell sollte die **Wahrscheinlichkeit**, es in einem bestimmten Gebiet zu entdecken, proportional zur Dichte der dort befindlichen Punkte sein – ist die Punktdichte hoch, dann ist auch die Wahrscheinlichkeit groß, ist die Punktdichte klein, dann ist auch die Wahrscheinlichkeit gering. Steckt also in der Punktdichte ein Muster, dann steckt dieses auch in der *Wahrscheinlichkeit*.
- Zweitens zeigen sorgfältige Untersuchungen, dass die Punktdichte in einem bestimmten Gebiet direkt proportional zur **Intensität** der klassischen Wellentheorie in diesem Bereich ist. Diese ist wiederum proportional zur quadrierten Amplitude  $E_0$  der elektromagnetischen Welle. Insbesondere werden nie Photonen an den Orten beobachtet, an denen die Wellentheorie Gebiete mit destruktiver Interferenz vorhersagt. *Obwohl ein Photon nach dem anderen beobachtet wird, ist die Wellennatur des Lichts somit immer noch an der Intensität erkennbar.*

Kombinieren wir beide Beobachtungen miteinander, so finden wir: Die Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen in einem bestimmten (kleinen) Gebiet auf dem Fotofilm zu registrieren, ist proportional zur Intensität des Lichts an dieser Stelle. Diese wiederum ist proportional zum Amplitudenquadrat der Welle. Das bedeutet: Die Teilchenwahrscheinlichkeit ist proportional zum Amplitudenquadrat der zugehörigen Welle. Diese Verbindung von Wellen- und Teilcheneigenschaft ist der Eckpfeiler der Quantenmechanik:

### **Welle-Teilchen-Dualismus und Quantenmechanik**

Wenn wir die *Teilchennatur* eines Phänomens beobachten, können wir nicht mit Bestimmtheit vorhersagen, wo ein gegebenes Teilchen zu finden sein wird. Wir können lediglich die Wahrscheinlichkeit angeben, es in einem bestimmten Gebiet anzutreffen. Diese Wahrscheinlichkeit ist proportional zum Amplitudenquadrat der zugehörigen *Welle* in dieser Region:

$$\text{Wahrscheinlichkeit, ein Teilchen in einem Gebiet zu beobachten} \sim \left( \text{Amplitude der Welle in einem Gebiet} \right)^2$$

Nennen wir die Dinge beim Namen: Ist die fragliche Welle das elektromagnetische Feld, dann ist das "dazugehörige Teilchen" das Photon. Ist umgekehrt das fragliche Teilchen das Photon, dann ist die "zugehörige Welle", sein Alter Ego, das elektromagnetische Feld. Die Amplitude dieses Feldes, resp. ihr Quadrat, gibt die Wahrscheinlichkeit an, das zugehörige Teilchen – das Photon – an einem bestimmten Ort zu finden. Dies ist unser neues Verständnis für die Intensität einer elektromagnetischen Welle.

### **Ein Ausblick**

Wir werden nun erfahren, dass auch das Verhalten massebehafteter Teilchen, wie z.B. Elektronen, durch Wellen beschrieben werden. Auch die Amplitudenquadrate dieser Wellen stehen für die Aufenthaltswahrscheinlichkeiten der Teilchen an verschiedenen Orten. Allerdings gibt es hier kein erkennbares Alter Ego. Die Wellen repräsentieren offenbar "nur" Wahrscheinlichkeiten, sonst nichts.

### **Und noch eine Anmerkung zum Doppelspalt-Versuch**

Wir wollen unsere Betrachtung zum Doppelspalt-Experiment nicht beenden, ohne auf einen darin enthaltenen zentralen Punkt der Quantenmechanik anzusprechen. . .

Es ist nämlich sinnlos zu fragen: "Durch welchen Spalt ist das siebzehnte Photon hindurchgegangen?" Ein Experiment kann diese Frage nicht beantworten. Würden wir es so verändern, dass wir ein bestimmtes Teilchen auf seinem Weg durch einen Spalt verfolgen könnten – was ein eigenständiges Experiment wäre, das in einem einzelnen Spalt die Wechselwirkung mit Licht erkunden würde – würden wir genau das Verhalten beeinflussen, das wir eigentlich beobachten wollen. Weil die Interferenz zwei kohärente – d.h. miteinander in Verbindung stehende Wellen – benötigt, würde das Interferenzmuster gestört werden. Wir können nicht beides haben. Wellenartige Interferenzen können nur beobachtet werden, indem wir jedem Teilchen erlauben, sich als Welle zu verhalten – und gleichzeitig beide Spalte zu durchqueren.

Wir werden dieses anspruchsvolle Konzept später weiter diskutieren.

## Quellenangabe

Obige Ausführungen entstammen in Teilen dem Abschnitt 3.6 aus dem Buch:

**Harris, Randy:** *Moderne Physik*, Lehr- und Übungsbuch (2. Aufl.), Pearson (München 2013).

Die Inhalte wurden einerseits marginal ergänzt, um die verständliche Lektüre auf gymnasialem Niveau zu unterstützen, und andererseits wurden eigene Erläuterungen eingefügt, sodass der Text gut an das bereits erarbeitete Vorwissen anknüpft.