

Das Doppelspaltexperiment

EXPERIMENT · SCHRITT FÜR SCHRITT

Richard Feynman hat seinen Studenten in Caltech einmal gesagt, man könne alles Rätselhafte der Quantenmechanik an einem einzigen Versuch zeigen. Dieser Versuch sei „unmöglich, absolut unmöglich, auf klassische Weise zu erklären“, und er enthalte „das Herz der Quantenmechanik“^[1]. Gemeint war das Doppelspaltexperiment. Als die Zeitschrift Physics World ihre Leser 2002 nach dem schönsten Experiment der Physikgeschichte fragte, landete der Doppelspalt mit Elektronen auf Platz eins^[2].

Dabei ist der Aufbau denkbar schlicht: eine Quelle, eine Wand mit zwei schmalen Schlitzen, dahinter ein Schirm. Wir gehen ihn in vier Durchgängen durch, so wie Feynman es in seinen Vorlesungen getan hat, und ändern jedes Mal nur eine Sache, nämlich das, was wir durch die Spalte schicken.

Erster Durchgang: Kugeln

Stellen Sie sich eine Ballwurfmaschine vor, die Tennisbälle in zufällige Richtungen ungefähr nach vorn schießt. Vor ihr steht eine Wand mit zwei Öffnungen, dahinter eine Reihe von Kästen, in denen die Bälle landen. Nach ein paar hundert Bällen zählen wir nach. Hinter jeder Öffnung hat sich ein Häufchen gebildet, die beiden überlappen in der Mitte ein wenig, und das war es (Abb. 1, links).

Das Wichtige daran ist so selbstverständlich, dass man es leicht übersieht: Jeder Ball ist durch genau eine Öffnung geflogen. Macht man die linke zu, bleibt das rechte Häufchen übrig und umgekehrt. Mit beiden offen kommt einfach die Summe heraus. Bei Kugeln addieren sich die Möglichkeiten.

Zweiter Durchgang: Wellen

Jetzt ersetzen wir die Maschine durch eine Wanne mit Wasser und einen Stab, der auf und ab wippt. Die Wellen laufen auf die Wand zu, und hinter jeder Öffnung breitet sich eine neue, halbkreisförmige Welle aus. Wo sich die beiden Wellen treffen, überlagern sie sich. Treffen zwei Wellenberge aufeinander, wird die Welle doppelt so hoch, trifft ein Berg auf ein Tal, heben sie sich auf. Am Rand der Wanne entsteht so ein Muster aus Stellen mit starkem und Stellen mit fast keinem Wellengang (Abb. 1, rechts).

Das Auffällige ist die Mitte: Genau dort, wo bei den Kugeln die Häufchen nur ein wenig überlappten, schwappt bei den Wellen am meisten. Und es gibt Stellen, an denen mit zwei

offenen Spalten weniger ankommt als mit nur einem. Bei Wellen addieren sich nicht die Mengen, sondern die Ausschläge, samt Vorzeichen.

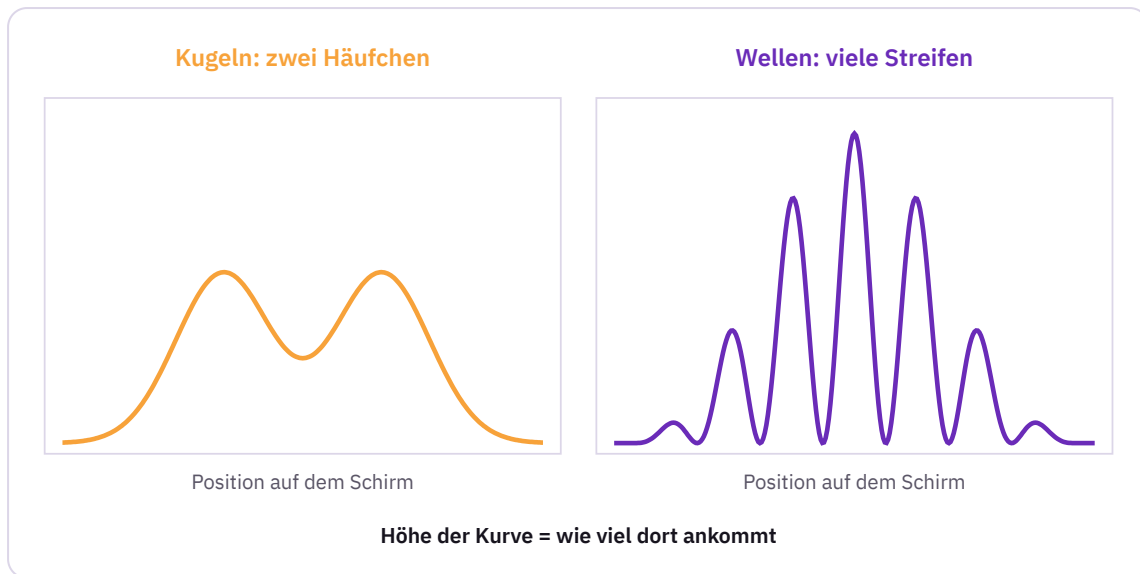


Abb. 1: Was hinter zwei Spalten ankommt. Kugeln bilden zwei Häufchen, Wellen ein Streifenmuster mit dem stärksten Streifen in der Mitte. Eigene schematische Darstellung.

Mit Licht hat Thomas Young genau das schon um 1800 gezeigt. In seiner Vorlesung vor der Royal Society im November 1803 beschrieb er, wie er einen dünnen Sonnenstrahl, der durch ein Loch im Fensterladen fiel, mit einer schmalen Karte in zwei Hälften teilte. Auf der Wand dahinter erschienen farbige Streifen, die verschwanden, sobald er eine der beiden Hälften abdeckte ^[3]. Für die meisten Physiker war damit entschieden, dass Licht eine Welle ist.

Wo genau die hellen Streifen liegen, hängt vom Abstand d der beiden Spalte und von der Wellenlänge λ ab. Hell wird es überall dort, wo der Weg von einem Spalt genau eine ganze Zahl von Wellenlängen länger ist als der vom anderen:

$$d \cdot \sin\theta = m \cdot \lambda \quad (m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots) \quad (1)$$

Für den Schirm in der Entfernung L folgt daraus, solange die Winkel klein sind, ein gleichmäßiger Streifenabstand:

$$\Delta y \approx \frac{\lambda \cdot L}{d} \quad (2)$$

Ein Rechenbeispiel, das man mit einem grünen Laserpointer selbst nachprüfen kann: Wellenlänge 532 Nanometer, Spaltabstand 0,25 Millimeter, Schirm in 2 Meter Entfernung. Dann liegen die Streifen $532 \cdot 10^{-9} \text{ m} \cdot 2 \text{ m} / 0,25 \cdot 10^{-3} \text{ m} \approx 4,3 \text{ Millimeter}$ auseinander.

Gut sichtbar an einer weißen Wand, und ein schöner Weg, die Wellenlänge eines Lasers mit einem Lineal zu messen.

Dritter Durchgang: Licht, ganz schwach

Seit 1905 wusste man aber, dass Licht aus einzelnen Portionen besteht, den Photonen, und dass ein Detektor sie einzeln registriert. Wie passt das zu Streifen? Der junge Geoffrey Ingram Taylor in Cambridge wollte es 1909 wissen und machte das Licht so schwach, dass die Fotoplatte für ein Bild bis zu drei Monate belichtet werden musste. Die Streifen waren trotzdem da, genauso scharf wie bei hellem Licht ^[4].

Heute macht man den Versuch mit Einzelphotonenquellen und Kameras, die jeden Treffer als Punkt anzeigen. Das Ergebnis ist das, was Abb. 2 zeigt. Die ersten Punkte erscheinen scheinbar wahllos, mal hier, mal da. Niemand kann vorhersagen, wo der nächste landet. Nach einigen hundert Treffern deutet sich eine Ordnung an, nach einigen tausend sind die Streifen unverkennbar. Und das, obwohl immer nur ein Photon gleichzeitig unterwegs ist und kein anderes da ist, mit dem es sich überlagern könnte.

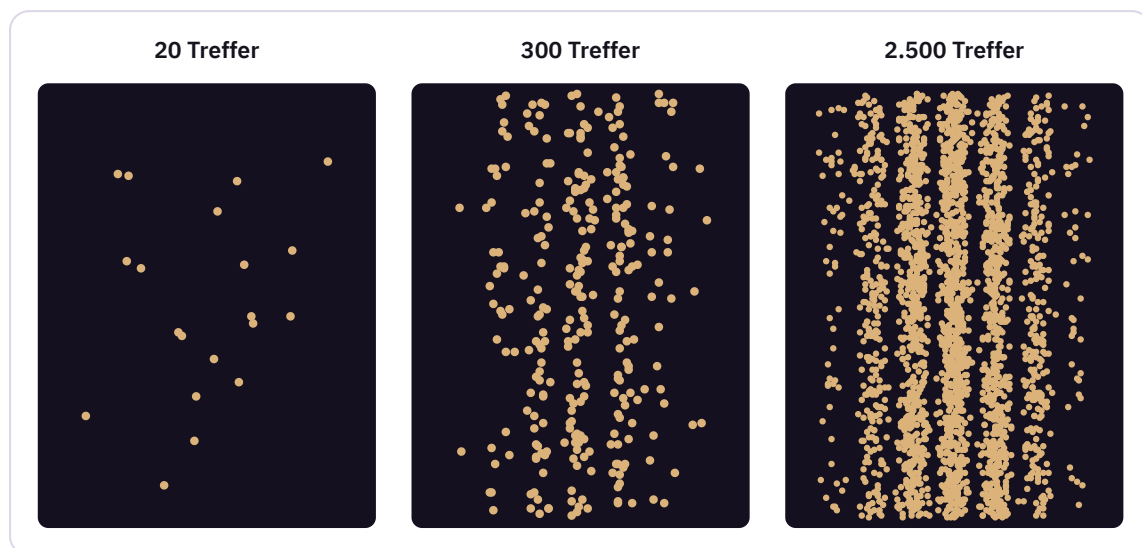


Abb. 2: So baut sich das Muster aus einzelnen Treffern auf. Jeder Punkt ist ein Teilchen, das zufällig, aber nach der Wellenverteilung aus Abb. 1 gelandet ist. Eigene Simulation.

Max Born hat 1926 die Deutung vorgeschlagen, mit der Physiker seitdem arbeiten: Die Welle sagt nicht, wo das Teilchen ist, sondern mit welcher Wahrscheinlichkeit es wo gefunden wird ^[5]. Jedes Photon interferiert gewissermaßen mit sich selbst. Was sich überlagert, sind die Möglichkeiten, durch den einen oder den anderen Spalt zu gehen.

Vierter Durchgang: Elektronen

Bis hierhin könnte man noch sagen, Licht sei eben ein Sonderfall. Elektronen aber sind ohne Zweifel Teilchen, sie haben eine Masse und eine Ladung, man kann sie zählen. Claus

Jönsson in Tübingen schnitt 1961 in eine Metallfolie Spalte von etwa einem halben Mikrometer Breite und schickte einen Elektronenstrahl hindurch. Auf dem Schirm erschienen Interferenzstreifen, mit zwei, drei, vier und fünf Spalten jeweils so, wie es die Wellenrechnung verlangt^[6].

1989 folgte der Versuch, der die Physik-World-Umfrage gewann. Akira Tonomura und seine Kollegen bei Hitachi schickten Elektronen so selten auf den Weg, dass sich nie zwei gleichzeitig im Gerät befanden, und filmten den Schirm. Auf dem Film sieht man genau das, was Abb. 2 zeigt: erst verstreute Lichtpunkte, dann Streifen^[7]. Tonomura verwendete statt zweier Spalte ein elektrisches Biprisma, einen feinen geladenen Draht, der den Elektronenstrahl in zwei Hälften teilt. Am Prinzip ändert das nichts.

Und wenn man nachsieht, durch welchen Spalt?

Die naheliegende Frage lautet: Durch welchen Spalt ist das einzelne Elektron denn nun gegangen? Man kann nachsehen, etwa indem man hinter einen der Spalte Licht schickt, an dem vorbeifliegende Elektronen streuen. Das funktioniert, man erfährt den Weg. Aber in dem Moment, in dem die Information über den Weg vorhanden ist, verschwinden die Streifen, und auf dem Schirm bilden sich wieder zwei Häufchen wie bei den Tennisbällen.

Das ist keine Ungeschicklichkeit der Experimentatoren. Jede Methode, den Weg zu bestimmen, zerstört die Interferenz, und zwar genau in dem Maß, in dem sie den Weg verrät. Niels Bohr nannte das Komplementarität: Wellenbild und Teilchenbild schließen sich im selben Versuch aus, und welches man zu sehen bekommt, hängt davon ab, wonach man fragt. Es braucht dafür übrigens keinen Menschen, der zuschaut. Es genügt, dass die Weginformation irgendwo in der Welt festgehalten ist, in einem Detektor, einem gestreuten Photon, einem Atom.

Wie weit das geht, zeigen die sogenannten Quantenradierer. 2002 markierte eine Gruppe in Brasilien die beiden Wege von Photonen über deren Polarisation, sodass keine Streifen entstanden. Dann löschten sie die Markierung an einem zweiten, verschränkten Photon wieder aus, und in den passend ausgewählten Messdaten tauchten die Streifen wieder auf^[8]. Das klingt nach Zeitreise, ist es aber nicht. Die Streifen zeigen sich erst, wenn man die Daten beider Photonen nachträglich zusammenführt, und dafür braucht es eine gewöhnliche Übertragung.

Wie groß darf das Teilchen sein?

Seit Jahrzehnten versuchen Physiker herauszufinden, ob es eine Größe gibt, ab der der Doppelspalt-Effekt aufhört. Die Gruppe um Anton Zeilinger und Markus Arndt in Wien hat 1999 Interferenz mit Fullerenen gezeigt, fußballförmigen Molekülen aus 60 Kohlenstoffatomen^[9]. 2019 waren es in Arndts Labor Moleküle mit einer Masse von über 25 000 atomaren Masseneinheiten, das sind rund 2000 Atome^[10]. Eine Grenze ist bisher nicht in Sicht.

Warum sieht man dann bei Tennisbällen nichts? Weil ihre Wellenlänge um mehr als zwanzig Größenordnungen kleiner ist als jeder Spalt, den man bauen könnte, und weil ein Ball auf seinem Flug mit unzähligen Luftmolekülen zusammenstößt, die alle den Weg „verraten“. Mehr dazu in unseren Artikeln über den [Welle-Teilchen-Dualismus](#) und über [Schrödingers Katze](#).

Zum Weiterlesen

QED. Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie

Richard P. Feynman · Piper, 2018 · ISBN 978-3-492-31316-2

Feynman erklärt die Wahrscheinlichkeitspfeile, mit denen man den Doppelspalt und fast die ganze Optik ausrechnen kann, ohne eine einzige Gleichung.

Bei Amazon ansehen*

Einsteins Spuk. Teleportation und weitere Mysterien der Quantenphysik

Anton Zeilinger · Pantheon, 2024 · ISBN 978-3-570-55502-6

Zeilinger, in dessen Wiener Gruppe die Fulleren-Interferenz gelang, schreibt aus erster Hand über Interferenz, Verschränkung und Teleportation.

Bei Amazon ansehen*

* Werbelink: Kaufen Sie über diesen Link, erhalten wir von Amazon eine kleine Provision, am Preis ändert sich für Sie nichts. Mehr Empfehlungen auf unserer Seite [Bücher zur Quantenphysik](#).

Quellen

1. R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands: *The Feynman Lectures on Physics, Band III: Quantum Mechanics*. Kapitel 1, „Quantum Behavior“. Addison-Wesley, Reading 1965. Online: [feynmanlectures.caltech.edu/III_01.html](https://www.feynmanlectures.caltech.edu/III_01.html).
2. R. P. Crease: *The most beautiful experiment*. In: *Physics World* 15 (2002), Heft 9, S. 19–20.
3. T. Young: *The Bakerian Lecture: Experiments and Calculations Relative to Physical Optics*. In: *Philosophical Transactions of the Royal Society of London* 94 (1804), S. 1–16, [doi:10.1098/rstl.1804.0001](https://doi.org/10.1098/rstl.1804.0001).

4. G. I. Taylor: *Interference fringes with feeble light*. In: Proceedings of the Cambridge Philosophical Society 15 (1909), S. 114–115.
5. M. Born: *Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge*. In: Zeitschrift für Physik 37 (1926), S. 863–867, [doi:10.1007/BF01397477](https://doi.org/10.1007/BF01397477).
6. C. Jönsson: *Elektroneninterferenzen an mehreren künstlich hergestellten Feinspalten*. In: Zeitschrift für Physik 161 (1961), S. 454–474, [doi:10.1007/BF01342460](https://doi.org/10.1007/BF01342460).
7. A. Tonomura, J. Endo, T. Matsuda, T. Kawasaki, H. Ezawa: *Demonstration of single-electron buildup of an interference pattern*. In: American Journal of Physics 57 (1989), S. 117–120, [doi:10.1119/1.16104](https://doi.org/10.1119/1.16104).
8. S. P. Walborn, M. O. Terra Cunha, S. Pádua, C. H. Monken: *Double-slit quantum eraser*. In: Physical Review A 65 (2002), 033818, [doi:10.1103/PhysRevA.65.033818](https://doi.org/10.1103/PhysRevA.65.033818).
9. M. Arndt, O. Nairz, J. Vos-Andreae, C. Keller, G. van der Zouw, A. Zeilinger: *Wave-particle duality of C_{60} molecules*. In: Nature 401 (1999), S. 680–682, [doi:10.1038/44348](https://doi.org/10.1038/44348).
10. Y. Y. Fein, P. Geyer, P. Zwick, F. Kiałka, S. Pedalino, M. Mayor, S. Gerlich, M. Arndt: *Quantum superposition of molecules beyond 25 kDa*. In: Nature Physics 15 (2019), S. 1242–1245, [doi:10.1038/s41567-019-0663-9](https://doi.org/10.1038/s41567-019-0663-9).

Zitiervorschlag

quanten.de: *Das Doppelspaltexperiment*. Stand: Oktober 2026. URL:
<https://quanten.de/doppelspalt.html> (PDF:
<https://quanten.de/pdf/doppelspalt.pdf>)

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: [Welle-Teilchen-Dualismus](#) · [Der Fotoeffekt](#) · [Die Unschärferelation](#) · [Schrödingers Katze](#)

Online-Fassung mit aktualisierten Quellen: <https://quanten.de/doppelspalt.html>