

Welle-Teilchen-Dualismus

GRUNDLAGEN · GESCHICHTE EINER DEBATTE

Ist Licht eine Welle oder ein Strom von Teilchen? Diese Frage haben kluge Leute über dreihundert Jahre lang gestellt, und die Antwort ist in dieser Zeit mehrmals hin und her gekippt. Jedes Mal gab es ein Experiment, das die Sache endgültig zu entscheiden schien, und jedes Mal kam ein paar Jahrzehnte später ein anderes, das sie wieder aufriss. Am Ende stellte sich heraus, dass die Frage selbst falsch gestellt war. Das ist die Geschichte, die man meint, wenn man vom Welle-Teilchen-Dualismus spricht.

Huygens gegen Newton

Um 1700 standen sich zwei Bilder gegenüber. Der Niederländer Christiaan Huygens beschrieb Licht als Welle, die sich in einem unsichtbaren Medium ausbreitet, ähnlich wie Schall in der Luft. Damit konnte er Spiegelung und Brechung erklären. Isaac Newton dagegen dachte sich Licht als Strom winziger Körperchen, die von leuchtenden Gegenständen ausgeschleudert werden. Dass Licht scharfe Schatten wirft und sich geradlinig ausbreitet, schien eher zu Teilchen zu passen, denn Schall kommt bekanntlich auch um die Ecke.

Newtons Ansehen war so groß, dass sein Bild das 18. Jahrhundert beherrschte. Ganz eindeutig war es übrigens auch bei ihm nicht, in seiner „Opticks“ von 1704 ließ er seinen Körperchen periodische „Anwandlungen“ zukommen, um die farbigen Ringe dünner Schichten zu erklären. Ein gewisses Wellengefühl hatte also schon Newton.

Ein Fleck, der nicht sein durfte

Den ersten großen Umschwung brachte Thomas Young, ein Arzt, der nebenbei Hieroglyphen entzifferte. 1803 teilte er einen Sonnenstrahl mit einer schmalen Karte und sah dahinter helle und dunkle Streifen, die verschwanden, sobald er eine Hälfte abdeckte ^[1]. Zwei Lichtstrahlen konnten sich also gegenseitig auslöschen. Für Körperchen ist das schwer vorstellbar, für Wellen ganz natürlich. Den Versuch und seine heutige Form beschreiben wir ausführlich im Artikel zum [Doppelspaltexperiment](#).

Überzeugt waren damit noch lange nicht alle. Als die Pariser Akademie einen Preis für eine Theorie der Beugung ausschrieb, reichte Augustin Fresnel 1818 eine ausgearbeitete Wellentheorie ein. Siméon Denis Poisson, Mitglied der Jury und Anhänger der Teilchentheorie, rechnete sie durch und fand eine scheinbar absurde Folgerung: Im Schatten einer kleinen runden Scheibe müsste genau in der Mitte ein heller Punkt erscheinen. François Arago machte den Versuch, und der Punkt war da ^[2]. Fresnel bekam

den Preis, und der Fleck heißt bis heute Poissonscher Fleck, nach dem Mann, der die Theorie damit widerlegen wollte. Manche nennen ihn gerechterweise Arago-Fleck.

1865 setzte James Clerk Maxwell den Schlussstein. Aus seinen Gleichungen für Elektrizität und Magnetismus folgten Wellen, die sich mit einer Geschwindigkeit ausbreiten, die genau der gemessenen Lichtgeschwindigkeit entsprach ^[3]. Licht war eine elektromagnetische Welle. Heinrich Hertz wies solche Wellen 1888 im Labor nach. Die Frage schien erledigt.

Die Teilchen kommen zurück

Ausgerechnet bei den Versuchen von Hertz fiel nebenbei ein Effekt auf, der sich mit Wellen nicht erklären ließ. Licht schlägt aus Metall Elektronen heraus, aber deren Energie hängt nur von der Farbe des Lichts ab und nicht von seiner Helligkeit. Albert Einstein erklärte das 1905 mit der Annahme, Licht bestehe aus Quanten der Energie hf ^[4]. Die ganze Geschichte erzählen wir im Artikel über den [Fotoeffekt](#).

Einstein war sich bewusst, wie unbequem das war. Die Interferenz ließ sich ja nicht wegdiskutieren. 1909 sagte er auf der Naturforscherversammlung in Salzburg voraus, die nächste Phase der theoretischen Physik werde eine Theorie des Lichts bringen, die sich als eine Art Verschmelzung von Wellen- und Emissionstheorie auffassen lasse ^[5]. Er sollte recht behalten, auch wenn ihm die Form, die diese Verschmelzung später annahm, nie ganz gefiel.

Den letzten Zweifel an den Lichtteilchen räumte Arthur Compton 1923 aus. Er schoss Röntgenstrahlen auf Graphit und stellte fest, dass die gestreute Strahlung eine größere Wellenlänge hatte als die einfallende, und zwar umso mehr, je stärker sie abgelenkt wurde ^[6]. Eine klassische Welle würde ihre Wellenlänge beim Streuen nicht ändern. Behandelt man die Röntgenstrahlung dagegen als Strom von Photonen, die jeweils Energie und Impuls tragen,

$$E = hf \quad p = \frac{h}{\lambda} \quad (1)$$

dann ist die Streuung ein Stoß zwischen einem Photon und einem Elektron, mit Energie- und Impulserhaltung wie beim Billard. Daraus folgt für die Änderung der Wellenlänge beim Streuwinkel θ

$$\Delta\lambda = \frac{h}{m_e c} (1 - \cos\theta) \quad (2)$$

Der Vorfaktor $h/m_e c$ heißt Compton-Wellenlänge des Elektrons und beträgt 2,43 Pikometer ^[7]. Bei sichtbarem Licht mit Wellenlängen um 500 Nanometer ist diese Verschiebung kaum messbar, bei Röntgenstrahlen von wenigen hundertstel Nanometern dagegen deutlich. Compton bekam dafür 1927 den Nobelpreis.

Ein Prinz dreht die Frage um

Wenn Licht, das man für eine Welle gehalten hatte, sich auch wie ein Teilchen verhält, müsste dann nicht auch ein Teilchen sich wie eine Welle verhalten? Diese Frage stellte 1924 Louis de Broglie in seiner Doktorarbeit in Paris, ein Physiker aus altem französischem Adel, der eigentlich Geschichte studiert hatte. Er schlug vor, jedem Teilchen mit dem Impuls p eine Wellenlänge zuzuordnen ^[8]:

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (3)$$

Die Prüfer waren unsicher, was sie davon halten sollten. Paul Langevin, einer von ihnen, schickte eine Abschrift an Einstein, und der fand die Arbeit bemerkenswert. Drei Jahre später lagen zwei unabhängige Bestätigungen vor. In New York schossen Clinton Davisson und Lester Germer Elektronen auf einen Nickelkristall und fanden Beugungsmaxima, genau wie bei Röntgenstrahlen, an den Stellen, die de Broglies Formel vorhersagte ^[9]. In Aberdeen schickte George Paget Thomson Elektronen durch dünne Metallfolien und fotografierte Beugungsringe ^[10].

An dieser Stelle hat die Geschichte eine hübsche Pointe. George Paget Thomson ist der Sohn von Joseph John Thomson, der 1906 den Nobelpreis für seine Arbeiten über die Leitung von Elektrizität in Gasen bekommen hatte ^[11], jene Untersuchungen, mit denen er das Elektron als Teilchen nachgewiesen hatte. 1937 bekam der Sohn zusammen mit Davisson den Nobelpreis für den Nachweis, dass Elektronen gebeugt werden wie Wellen ^[12]. Der Vater hat erlebt, wie sein Sohn dafür ausgezeichnet wurde.

Wie groß die Wellenlänge ist, hängt nur vom Impuls ab, und weil h so winzig ist, bleibt sie für alles, was wir anfassen können, unvorstellbar klein:

Objekt	Masse	Wellenlänge	zum Vergleich
Elektron, 54 eV (Davisson und Germer)	$9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	0,17 nm	Atomabstand im Kristall
Elektron, 30 keV (Elektronenmikroskop)	$9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}$	7 pm	kleiner als ein Atom
Neutron aus einem Reaktor, 0,025 eV	$1,7 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$	0,18 nm	Atomabstand im Kristall
Fulleren C ₆₀ , 220 m/s	$1,2 \cdot 10^{-24} \text{ kg}$	2,5 pm	messbar, aber schwierig
Tennisball, 57 g, 50 m/s	0,057 kg	$2 \cdot 10^{-34} \text{ m}$	unmessbar klein
Mensch, 70 kg, gemütlicher Schritt	70 kg	$7 \cdot 10^{-36} \text{ m}$	unmessbar klein

Eigene Berechnung nach Gleichung (3); für das 30-keV-Elektron mit relativistischer Korrektur.

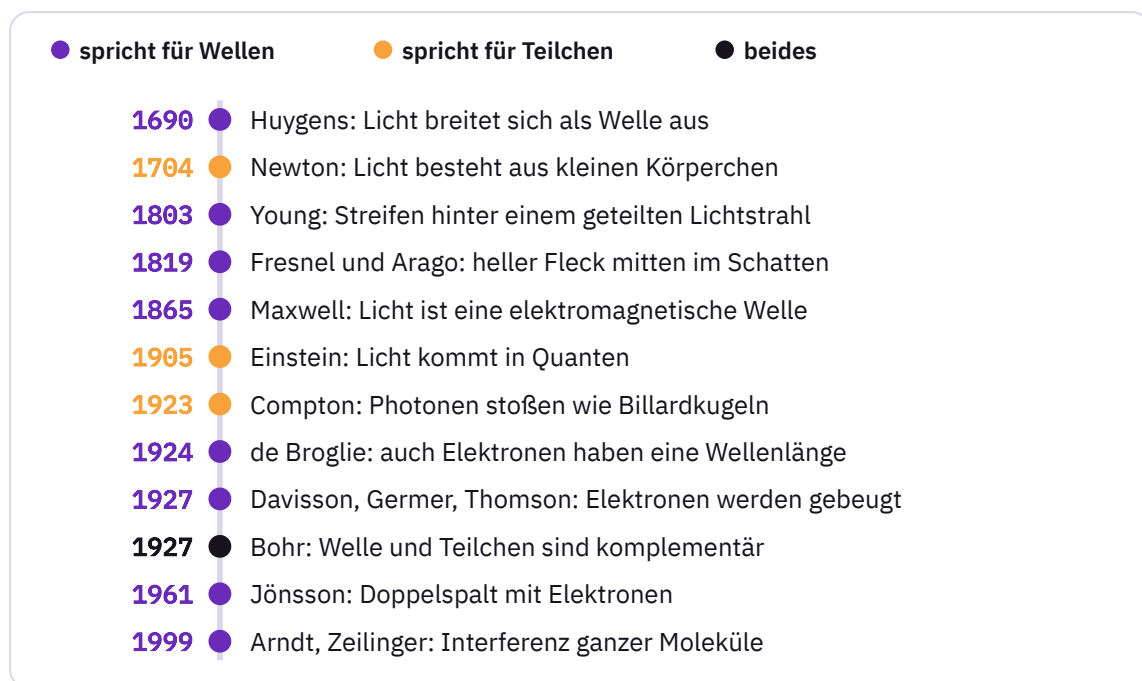


Abb. 1: Dreihundert Jahre Hin und Her. Eigene Darstellung nach den im Text genannten Quellen.

Weder noch, und beides

Was ist ein Elektron denn nun? Niels Bohr gab 1927 in Como eine Antwort, die viele zunächst als Ausweichen empfanden: Wellen- und Teilchenbild seien komplementär ^[13]. Beide sind nötig, um alle Erfahrungen zu beschreiben, aber in einem einzelnen Versuch zeigt sich immer nur eines. Wer den Weg eines Elektrons durch einen Doppelspalt misst, sieht ein Teilchen und keine Streifen. Wer die Streifen sehen will, darf den Weg nicht kennen.

Heute würden die meisten Physiker es etwas nüchterner sagen. Ein Elektron ist weder eine kleine Kugel noch eine Welle im Wasser, sondern ein Quantenobjekt, für das unsere Alltagsbegriffe nicht gemacht sind. Seine Ausbreitung beschreibt man mit einer Wellenfunktion, und wo es ankommt, entscheidet sich erst beim Nachweis, an einem einzigen Punkt. Das Wort „Dualismus“ ist eigentlich ein Überbleibsel aus der Zeit, als man noch dachte, man müsse sich zwischen zwei Bildern entscheiden. Dass Ort und Impuls dabei nicht zugleich scharf festliegen können, folgt aus derselben Mathematik und heißt [Unschärferelation](#).

Wie hartnäckig sich die Quantenobjekte jeder klassischen Erklärung entziehen, zeigt ein Versuch, den John Wheeler sich 1978 ausgedacht hat. Man entscheidet erst dann, ob man nach Welle oder Teilchen fragt, wenn das Photon den Aufbau schon fast durchlaufen hat. Hätte das Photon sich vorher „festgelegt“, müsste das Ergebnis davon abhängen. Alain Aspect und Kollegen haben das 2007 mit einzelnen Photonen gemacht, die Entscheidung traf ein Zufallsgenerator erst, als das Photon schon unterwegs war. Die Photonen verhielten sich jedes Mal so, wie es zur gestellten Frage passte ^[14].

Wofür man das braucht

Der Wellencharakter der Materie ist keine Kuriosität aus dem Labor. Weil Elektronen bei hoher Spannung Wellenlängen von wenigen Pikometern haben, kann man mit ihnen viel feinere Details abbilden als mit Licht. Ernst Ruska baute 1933 das erste Elektronenmikroskop, das das Lichtmikroskop übertraf, und bekam dafür 1986 einen späten Nobelpreis ^[15]. Heute zeigen Elektronenmikroskope einzelne Atome.

Neutronen aus Forschungsreaktoren haben Wellenlängen im Bereich der Atomabstände und werden in Kristallen gebeugt. Damit untersuchen Forscher Werkstoffe, Batterien und Proteine. Und die Interferenz ganzer Moleküle, die in Wien gelungen ist ^[16], nutzt man inzwischen, um Eigenschaften von Molekülen sehr genau zu vermessen. Der erste Doppelspalt mit Elektronen gelang übrigens 1961 in Tübingen ^[17].

Zum Weiterlesen

Quanten. Einstein, Bohr und die große Debatte über das Wesen der Wirklichkeit

Manjit Kumar · Berlin Verlag, 2011 · ISBN 978-3-8270-1019-3

Die Geschichte der Quantenphysik als Erzählung, von Plancks Verzweiflungstat bis zum Streit zwischen Einstein und Bohr. Wer diesen Artikel mochte, wird das Buch mögen.

Bei Amazon ansehen*

QED. Die seltsame Theorie des Lichts und der Materie

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

Wie man Licht und Elektronen beschreibt, ohne sich zwischen Welle und Teilchen entscheiden zu müssen, erklärt Feynman in vier Vorlesungen ohne Formeln.

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. 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).
2. J. Z. Buchwald: *The Rise of the Wave Theory of Light. Optical Theory and Experiment in the Early Nineteenth Century*. University of Chicago Press, Chicago 1989.
3. J. C. Maxwell: *A Dynamical Theory of the Electromagnetic Field*. In: Philosophical Transactions of the Royal Society of London 155 (1865), S. 459–512, [doi:10.1098/rstl.1865.0008](https://doi.org/10.1098/rstl.1865.0008).
4. A. Einstein: *Über einen die Erzeugung und Verwandlung des Lichtes betreffenden heuristischen Gesichtspunkt*. In: Annalen der Physik 17 (1905), S. 132–148, [doi:10.1002/andp.19053220607](https://doi.org/10.1002/andp.19053220607).
5. A. Einstein: *Über die Entwicklung unserer Anschauungen über das Wesen und die Konstitution der Strahlung*. In: Physikalische Zeitschrift 10 (1909), S. 817–825.

6. A. H. Compton: *A Quantum Theory of the Scattering of X-rays by Light Elements*. In: Physical Review 21 (1923), S. 483–502, [doi:10.1103/PhysRev.21.483](https://doi.org/10.1103/PhysRev.21.483).
7. E. Tiesinga, P. J. Mohr, D. B. Newell, B. N. Taylor: *CODATA Recommended Values of the Fundamental Physical Constants: 2018*. In: Reviews of Modern Physics 93 (2021), 025010, [doi:10.1103/RevModPhys.93.025010](https://doi.org/10.1103/RevModPhys.93.025010).
8. L. de Broglie: *Recherches sur la théorie des quanta*. In: Annales de Physique 10 (3) (1925), S. 22–128, [doi:10.1051/anphys/192510030022](https://doi.org/10.1051/anphys/192510030022).
9. C. Davisson, L. H. Germer: *Diffraction of Electrons by a Crystal of Nickel*. In: Physical Review 30 (1927), S. 705–740, [doi:10.1103/PhysRev.30.705](https://doi.org/10.1103/PhysRev.30.705).
10. G. P. Thomson, A. Reid: *Diffraction of Cathode Rays by a Thin Film*. In: Nature 119 (1927), S. 890, [doi:10.1038/119890a0](https://doi.org/10.1038/119890a0).
11. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 1906*. nobelprize.org/prizes/physics/1906/summary.
12. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 1937*. nobelprize.org/prizes/physics/1937/summary.
13. N. Bohr: *The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory*. In: Nature 121 (1928), S. 580–590, [doi:10.1038/121580a0](https://doi.org/10.1038/121580a0).
14. V. Jacques, E. Wu, F. Grosshans, F. Treussart, P. Grangier, A. Aspect, J.-F. Roch: *Experimental Realization of Wheeler’s Delayed-Choice Gedanken Experiment*. In: Science 315 (2007), S. 966–968, [doi:10.1126/science.1136303](https://doi.org/10.1126/science.1136303).
15. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 1986*. nobelprize.org/prizes/physics/1986/summary.
16. 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).
17. 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).

Zitiervorschlag

quanten.de: *Welle-Teilchen-Dualismus*. Stand: Oktober 2026. URL: https://quanten.de/welle_teilchen_dualismus.html (PDF: https://quanten.de/pdf/welle_teilchen_dualismus.pdf)

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

Weiterlesen: [Das Doppelspaltexperiment](#) · [Der Fotoeffekt](#) · [Was sind Quanten?](#) · [Die Unschärferelation](#)

Online-Fassung mit aktualisierten Quellen: https://quanten.de/welle_teilchen_dualismus.html