Beobachtereffekt und Kopenhagener Deutung

MESSUNG UND WIRKLICHKEIT

So seltsam es klinge, Interferenz könne nur entstehen, wenn niemand hinschaut. So stand es sinngemäß in einer Pressemitteilung, mit der das Weizmann-Institut in Israel 1998 ein Experiment vorstellte. Die Überschrift lautete übersetzt: Beobachtung beeinflusst die Wirklichkeit[1]. Die Forscher hatten Elektronen durch einen winzigen Doppelspalt geschickt und daneben einen Detektor platziert, der verraten konnte, durch welche Öffnung ein Elektron gegangen war. Je genauer der Detektor hinsah, desto schwächer wurde das typische Streifenmuster[2],[1].

Das ist der berühmte Beobachtereffekt der Quantenphysik. Er wird oft so erzählt, als würde das menschliche Bewusstsein die Welt verändern. Mit Bewusstsein hat er aber nichts zu tun. Was dahintersteckt und wie die Kopenhagener Deutung, die bekannteste Lesart der Quantenmechanik, damit umgeht, erklärt dieser Artikel.

Was ist der Beobachtereffekt?

Im Alltag kennt man den Beobachtereffekt aus der Messtechnik. Wer den Reifendruck prüft, lässt dabei ein wenig Luft entweichen, und ein Thermometer nimmt etwas Wärme auf. Jede Messung greift ein wenig in das ein, was sie misst. In der Quantenphysik geht der Effekt tiefer. Ein Elektron, ein Photon oder ein Atom kann sich in einer Überlagerung befinden, also gewissermaßen mehrere Möglichkeiten zugleich verwirklichen. Am deutlichsten zeigt sich das im Doppelspaltexperiment: Ein einzelnes Teilchen läuft scheinbar durch beide Spalte und erzeugt zusammen mit vielen anderen ein Streifenmuster auf dem Schirm (Abb. 1).

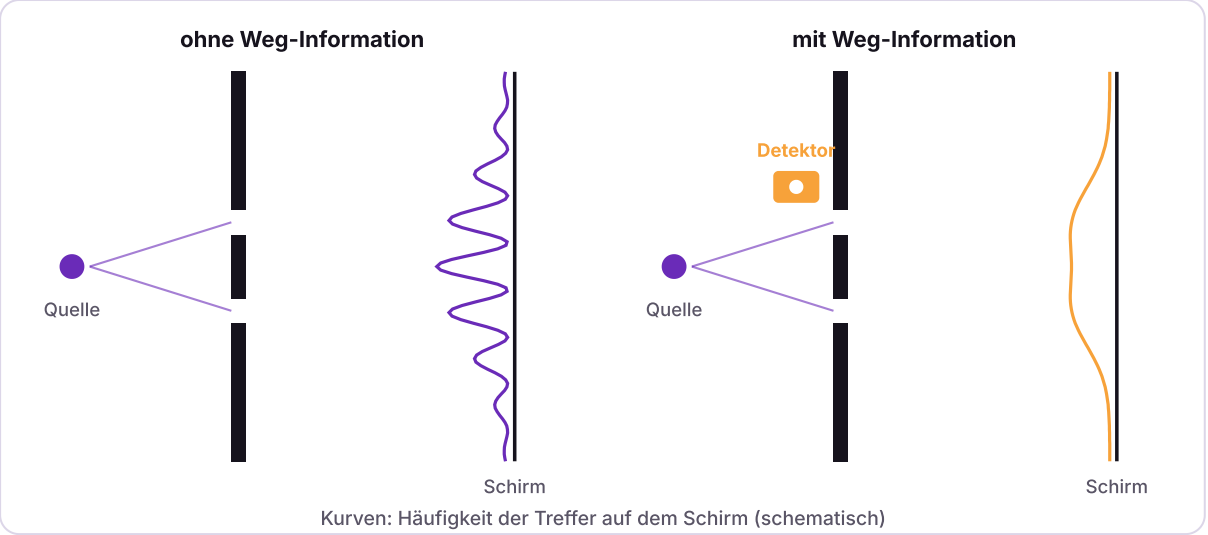


Abb. 1: Ohne Information über den Weg entsteht hinter dem Doppelspalt ein Streifenmuster. Hinterlässt der Weg eine Spur in einem Detektor, verschwinden die Streifen. Eigene Darstellung, schematisch, nach [2],[3].

Sobald aber irgendetwas festhält, durch welchen Spalt das Teilchen gegangen ist, verschwindet das Muster. Übrig bleiben zwei breite Flecken, wie man sie von kleinen Kugeln erwarten würde. Im Experiment am Weizmann-Institut ließ sich das sogar stufenweise einstellen: Machte man den Detektor unempfindlicher, kehrten die Streifen zurück[1].

Die Kopenhagener Deutung

Die Quantenmechanik entstand 1925 und 1926 in wenigen Monaten. Was ihre Formeln über die Wirklichkeit sagen, war von Anfang an umstritten. Die Antwort, die später Kopenhagener Deutung hieß, geht auf Niels Bohr in Kopenhagen und seinen Mitarbeiter Werner Heisenberg zurück. Mehr über die beiden steht in den Porträts Niels Bohr und Werner Heisenberg. Drei Bausteine sind besonders wichtig.

Der erste stammt von Max Born. Er schlug 1926 vor, die Wellenfunktion als Angabe von Wahrscheinlichkeiten zu lesen[4]. Sie sagt nicht, wo ein Elektron ist, sondern wie wahrscheinlich es ist, es bei einer Messung an einem bestimmten Ort zu finden. Born erhielt dafür 1954 den Physik-Nobelpreis[5].

Der zweite ist Heisenbergs Arbeit von 1927, in der er die Unschärferelation aufstellte. Darin denkt er sich ein Mikroskop, das ein Elektron mit Licht sehr

kurzer Wellenlänge beleuchtet. Je genauer man den Ort bestimmen will, desto härter stößt das Licht das Elektron an und desto ungenauer wird sein Impuls[6]. Aus diesem Bild stammt die verbreitete Vorstellung, die Messung störe das Teilchen einfach mechanisch.

Der dritte ist Bohrs Prinzip der Komplementarität, das er im September 1927 in Como vorstellte. Wellen- und Teilchenbild schließen sich gegenseitig aus, gehören aber beide zur vollständigen Beschreibung. Welches man sieht, hängt von der ganzen Versuchsanordnung ab, und deren Ergebnis muss man in der Sprache der klassischen Physik beschreiben können[7]. Mehr zu diesem Doppelcharakter im Artikel über den Welle-Teilchen-Dualismus.

Den Namen Kopenhagener Deutung gab es damals noch nicht. Der Wissenschaftshistoriker Don Howard hat gezeigt, dass er erst Mitte der 1950er-Jahre aufkam, vor allem durch Heisenberg. Bohrs eigene Auffassung unterscheidet sich in wichtigen Punkten von dem, was heute oft darunter verstanden wird. Bohr sprach nicht von einem Zusammenbruch der Wellenfunktion und gab dem subjektiven Beobachter keine besondere Rolle[8].

Woher kommt dann der berühmte „Kollaps“? Die Vorstellung, dass sich die Wellenfunktion bei einer Messung sprunghaft auf das gefundene Ergebnis zusammenzieht, hat vor allem John von Neumann 1932 ausformuliert. Neben der stetigen Entwicklung nach der Schrödinger-Gleichung führte er für die Messung einen zweiten, sprunghaften Vorgang ein[17]. Für Bohr dagegen hatte die Wellenfunktion nur eine symbolische Bedeutung und stellte nichts Wirkliches dar. Dann gibt es aber auch nichts, das physikalisch zusammenbrechen könnte[16]. Offen lässt die Kopenhagener Deutung allerdings, wo genau das Quantensystem endet und das klassisch beschriebene Messgerät beginnt. Kritiker halten das für ihren schwächsten Punkt[16]. Am anschaulichsten hat Erwin Schrödinger dieses Messproblem 1935 mit seiner Katze vorgeführt.

Der Streit mit Einstein

Albert Einstein hielt diese Deutung für unvollständig. 1935 argumentierte er mit Boris Podolsky und Nathan Rosen, die Quantenmechanik könne nicht die

ganze Wirklichkeit beschreiben, wenn zwei weit entfernte Teilchen so eng verbunden sein können, wie es die Theorie verlangt[9]. Bohr antwortete im selben Jahr unter demselben Titel[10]. Wie diese Debatte Jahrzehnte später im Labor entschieden wurde, erklären die Artikel über die Quantenverschränkung und die Bellsche Ungleichung.

Warum verschwindet das Muster wirklich?

Lange erklärte man den Beobachtereffekt mit Heisenbergs Mikroskop: Die Messung schubst das Teilchen, und dadurch verwischt das Muster. Ein Experiment von Stephan Dürr, Tilman Nonn und Gerhard Rempe zeigte 1998, dass das nicht der eigentliche Grund ist. In ihrem Atominterferometer war der Stoß, den die Weg-Markierung den Atomen versetzte, viel zu klein, um das Verschwinden der Streifen zu erklären. Entscheidend war vielmehr, dass der Zustand des Atoms mit dem Zustand des Detektors verknüpft wurde[3]. Es kommt also nicht auf den Stoß an, sondern auf die Information.

Diese Einsicht steckt hinter dem Begriff Dekohärenz, für den der Physiker H. Dieter Zeh 1970 die Grundlagen gelegt hat[11]. Ein Quantensystem ist nie ganz allein. Jedes Photon, jedes Luftmolekül, das mit ihm in Kontakt kommt, nimmt ein wenig Information mit. Dadurch verteilt sich die Überlagerung auf unzählige Freiheitsgrade der Umgebung und wird praktisch unbeobachtbar. Wojciech Zurek hat diese Idee 1991 einem breiten Publikum erklärt[12].

Wie das aussieht, zeigte 2004 eine Gruppe um Anton Zeilinger und Markus Arndt. Sie schickte Fullerene, fußballförmige Moleküle aus 70 Kohlenstoffatomen, durch ein Interferometer und brachte sie vorher auf hohe Temperaturen. Heiße Moleküle senden Wärmestrahlung aus, und diese Strahlung verrät ihren Weg. Je heißer die Moleküle waren, desto mehr verloren sie ihr Quantenverhalten[13]. Niemand hat hingeschaut. Die Moleküle haben sich gewissermaßen selbst beobachtet.

Wer viel misst, hält auf

Eine besonders verblüffende Folge ist der Quanten-Zeno-Effekt. Prüft man sehr oft, ob ein Atom von einem Zustand in einen anderen gewechselt ist,

unterdrückt man den Wechsel. Wayne Itano, David Wineland und Kollegen haben das 1990 an Beryllium-Ionen in einer Falle gezeigt. Die kurzen Lichtpulse, mit denen sie nachsahen, hielten die Ionen im Ausgangszustand fest[14].

Erzeugt das Bewusstsein die Wirklichkeit?

Aus dem Beobachtereffekt wird oft gefolgert, unser Bewusstsein erschaffe die Wirklichkeit, oder man könne mit Gedanken die Materie formen. Die Experimente geben das nicht her. Der Beobachter ist in der Physik jedes System, in dem eine Spur des Messergebnisses zurückbleibt: ein Detektor, ein Atom, ein Photon, die Wärmestrahlung eines Moleküls. Ob ein Mensch das Ergebnis später liest, spielt für das Muster keine Rolle[13],[3]. Auch Bohr selbst gab dem subjektiven Beobachter keine Sonderrolle[8]. Er hielt es für „sicher nicht möglich“, dass der Beobachter die Ereignisse beeinflusst, die unter den von ihm geschaffenen Bedingungen auftreten (eigene Übersetzung)[16]. Wie die Behauptung vom erschaffenden Beobachter etwa bei Joe Dispenza auftaucht, prüft der Artikel Joe Dispenza, das Quantenfeld und die Physik. Ob das Bewusstsein umgekehrt selbst ein Quanteneffekt sein könnte, untersucht der Artikel Ist unser Bewusstsein ein Quanteneffekt?

Die Konkurrenz im Vergleich

Die Kopenhagener Deutung ist nicht die einzige Lesart. Alle gängigen Deutungen rechnen mit denselben Formeln und sagen für heute machbare Experimente dieselben Ergebnisse voraus. Nur die objektiven Kollapsmodelle verändern die Theorie selbst und lassen sich deshalb im Prinzip im Labor prüfen[21]. Der Streit dreht sich darum, was hinter den Formeln steckt.

Deutung	Was ist die Wellenfunktion?	Gibt es einen Kollaps?	Schrödingers Katze vor dem Öffnen
Kopenhagener Deutung (Bohr,	ein Rechenwerkzeug für	in der Lehrbuchfassung	keine sinnvolle Frage ohne

Deutung	Was ist die Wellenfunktion?	Gibt es einen Kollaps?	Schrödingers Katze vor dem Öffnen
Heisenberg)	Wahrscheinlichkeiten	ja, bei Bohr kein physikalischer Vorgang	Messanordnung
Viele-Welten-Deutung (Everett, 1957) [18]	beschreibt die gesamte Wirklichkeit	nein	lebt in einem Zweig, ist tot in einem anderen
Bohmsche Mechanik (Bohm, 1952) [19]	ein Führungsfeld für Teilchen mit genauen Orten	nein	entweder lebendig oder tot
Ensemble-Interpretation (Ballentine, 1970) [20]	beschreibt viele gleich präparierte Systeme, nicht ein einzelnes	nein	in der Hälfte vieler Kammern lebt sie
Objektiver Kollaps (Ghirardi, Rimini, Weber, 1986) [21]	beschreibt das System wirklich	ja, spontan und für große Körper sehr schnell	entweder lebendig oder tot

Vereinfachte Übersicht. Innerhalb jeder Deutung gibt es Spielarten, die in einzelnen Punkten abweichen.

Wie viele Physiker folgen der Kopenhagener Deutung?

Hundert Jahre nach der Quantenmechanik ist die Frage immer noch offen. In einer Umfrage der Zeitschrift Nature unter mehr als 1100 Forschern nannten 2025 rund 36 Prozent die Kopenhagener Deutung als ihre bevorzugte. 17 Prozent wählten erkenntnistheoretische Deutungen wie den QBismus, nach denen die Wellenfunktion unser Wissen beschreibt, 15 Prozent die Viele-

Welten-Deutung und 7 Prozent die Bohmsche Mechanik. Nur 24 Prozent waren sich sicher, dass ihre Wahl stimmt[15]. Was die Viele-Welten-Deutung anders macht, erklärt der Artikel über das Multiversum.

Für die Praxis ist das kein Hindernis. Die Quantenmechanik selbst funktioniert hervorragend, einen Widerspruch zwischen ihren Vorhersagen und einem Experiment kennt man nicht[12]. Gestritten wird darüber, was ihre Formeln bedeuten. Der Satz aus der Pressemitteilung von 1998 stimmt also, nur muss man „niemand“ weit fassen. Interferenz entsteht nur, wenn nichts auf der Welt hinschaut, auch kein Detektor, kein Photon und kein Luftmolekül.

Fragen zur Kopenhagener Deutung

Was ist die Kopenhagener Deutung einfach erklärt?

Die älteste und verbreitetste Lesart der Quantenmechanik, zurückgehend auf Niels Bohr und Werner Heisenberg. Die Wellenfunktion liefert Wahrscheinlichkeiten für Messergebnisse, aber kein Bild davon, was ein Teilchen zwischen zwei Messungen tut. Welches Ergebnis eine einzelne Messung bringt, ist echter Zufall.

Was ist der Beobachtereffekt in der Quantenphysik?

Das Streifenmuster etwa am Doppelspalt verschwindet, sobald irgendetwas festhält, welchen Weg ein Teilchen genommen hat. Entscheidend ist nicht ein Mensch, der hinschaut, sondern dass eine Spur dieser Information in einem Detektor oder in der Umgebung zurückbleibt.

Wer hat die Kopenhagener Deutung entwickelt?

Vor allem Niels Bohr und Werner Heisenberg, aufbauend auf Max Borns Wahrscheinlichkeitsdeutung von 1926. Den Namen „Kopenhagener Deutung“ gibt es erst seit Mitte der 1950er-Jahre, und die beiden waren sich in wichtigen Punkten nie ganz einig.

Was ist der Kollaps der Wellenfunktion?

Die Lehrbuchvorstellung, dass sich die Wellenfunktion bei einer Messung sprunghaft auf das gefundene Ergebnis zusammenzieht. Sie geht vor allem auf John von Neumann zurück. Bohr selbst sah in der Wellenfunktion nur ein Rechenwerkzeug, für ihn brach dabei nichts Wirkliches zusammen.

Braucht die Kopenhagener Deutung einen bewussten Beobachter?

Nein. Bohr lehnte die Vorstellung ausdrücklich ab, der Beobachter beeinflusse das Ergebnis. Eine Messung ist bei ihm ein Messgerät, das ein Ergebnis registriert. Die Rolle des Bewusstseins wurde später von anderen ins Spiel gebracht.

Was ist der Unterschied zur Viele-Welten-Deutung?

Die Viele-Welten-Deutung nach Hugh Everett kommt ohne Kollaps aus: Alle möglichen Ergebnisse treten ein, jedes in einem eigenen Zweig der Wirklichkeit. Die Kopenhagener Deutung sagt dagegen, dass bei einer Messung genau ein Ergebnis auftritt, und macht keine Aussage über eine Wirklichkeit hinter den Messergebnissen.

Quellen

1. Weizmann Institute of Science: *Quantum Theory Demonstrated: Observation Affects Reality.* Pressemitteilung, ScienceDaily, 27. Februar 1998, sciencedaily.com.
2. E. Buks, R. Schuster, M. Heiblum, D. Mahalu, V. Umansky: *Dephasing in electron interference by a 'which-path' detector.* In: Nature 391 (1998), S. 871–874, doi:10.1038/36057; Preprint arXiv:quant-ph/9709022.
3. S. Dürr, T. Nonn, G. Rempe: *Origin of quantum-mechanical complementarity probed by a 'which-way' experiment in an atom interferometer.* In: Nature 395 (1998), S. 33–37, doi:10.1038/25653; Zusammenfassung bei RePEc.
4. M. Born: *Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge.* In: Zeitschrift für Physik 37 (1926), S. 863–867, doi:10.1007/BF01397477.
5. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 1954.* nobelprize.org.
6. W. Heisenberg: *Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen Kinematik und Mechanik.* In: Zeitschrift für Physik 43 (1927), S. 172–198, doi:10.1007/BF0139728

0.

7. N. Bohr: *The Quantum Postulate and the Recent Development of Atomic Theory.* In: Nature 121 (1928), S. 580–590, doi:10.1038/121580a0.
8. D. Howard: *Who Invented the „Copenhagen Interpretation“? A Study in Mythology.* In: Philosophy of Science 71 (2004), S. 669–682, doi:10.1086/425941.
9. A. Einstein, B. Podolsky, N. Rosen: *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?* In: Physical Review 47 (1935), S. 777–780, doi:10.1103/PhysRev.47.777.
10. N. Bohr: *Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?* In: Physical Review 48 (1935), S. 696–702, doi:10.1103/PhysRev.48.696.
11. H. D. Zeh: *On the interpretation of measurement in quantum theory.* In: Foundations of Physics 1 (1970), S. 69–76, doi:10.1007/BF00708656.
12. W. H. Zurek: *Decoherence and the Transition from Quantum to Classical.* In: Physics Today 44 (1991), Nr. 10, S. 36–44, doi:10.1063/1.881293.
13. L. Hackermüller, K. Hornberger, B. Brezger, A. Zeilinger, M. Arndt: *Decoherence of matter waves by thermal emission of radiation.* In: Nature 427 (2004), S. 711–714, doi:10.1038/nature02276; Preprint arXiv:quant-ph/0402146.
14. W. M. Itano, D. J. Heinzen, J. J. Bollinger, D. J. Wineland: *Quantum Zeno effect.* In: Physical Review A 41 (1990), S. 2295–2300, doi:10.1103/PhysRevA.41.2295.
15. E. Gibney: *Physicists disagree wildly on what quantum mechanics says about reality, Nature survey shows.* In: Nature 643 (2025), S. 1175–1179, doi:10.1038/d41586-025-02342-y; Zahlen nach M. Swayne, The Quantum Insider, 2. August 2025, thequantuminsider.com.
16. J. Faye: *Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics.* In: E. N. Zalta, U. Nodelman (Hrsg.): Stanford Encyclopedia of Philosophy, überarbeitete Fassung vom 31. Mai 2024, plato.stanford.edu.
17. J. von Neumann: *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik.* Springer, Berlin 1932. Nachdruck Springer, Berlin/Heidelberg 1996, doi:10.1007/978-3-642-61409-5.
18. H. Everett: *„Relative State“ Formulation of Quantum Mechanics.* In: Reviews of Modern Physics 29 (1957), S. 454–462, doi:10.1103/RevModPhys.29.454.
19. D. Bohm: *A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of „Hidden“ Variables. I.* In: Physical Review 85 (1952), S. 166–179, doi:10.1103/PhysRev.85.166.
20. L. E. Ballentine: *The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics.* In: Reviews of Modern Physics 42 (1970), S. 358–381, doi:10.1103/RevModPhys.42.358.
21. G. C. Ghirardi, A. Rimini, T. Weber: *Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems.* In: Physical Review D 34 (1986), S. 470–491, doi:10.1103/PhysRevD.34.470.

Zitiervorschlag

```
quanten.de: Beobachtereffekt und Kopenhagener Deutung. Stand:
November 2026. URL: https://quanten.de/kopenhagener_deutung.html
```

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

Weiterlesen: Doppelspaltexperiment · Unschärferelation · Schrödingers Katze · Multiversum