

# 1 Bohmsche Mechanik

Die BOHMsche Mechanik nach David Bohm (1917–1992; [1, 2]) ist eine alternative, deterministische (!) Interpretation der Quantenmechanik, die alle Vorhersagen der konventionellen Quantenmechanik reproduziert (!) [3, 4].

Im Folgenden sollen einige bekannte Beispiele gezeigt werden, deren übliche Interpretationen paradox, ungewöhnlich oder „unzufriedenstellend“ erscheinen [5]. Anschließend soll die BOHMsche Mechanik vorgestellt werden, die diese Konflikte auflöst.

## 1.1 Einige Beispiele und ihre konventionelle Interpretation

### 1.1.1 Interferenz am Doppelspalt [6]

Zur Erinnerung (konventionell interpretiert): Eine elektromagnetische Welle trifft auf einen Doppelspalt. Die beiden Spalte senden HUYGENSsche Elementarwellen aus, welche am Schirm interferieren und so das typische Interferenzmuster erzeugen.

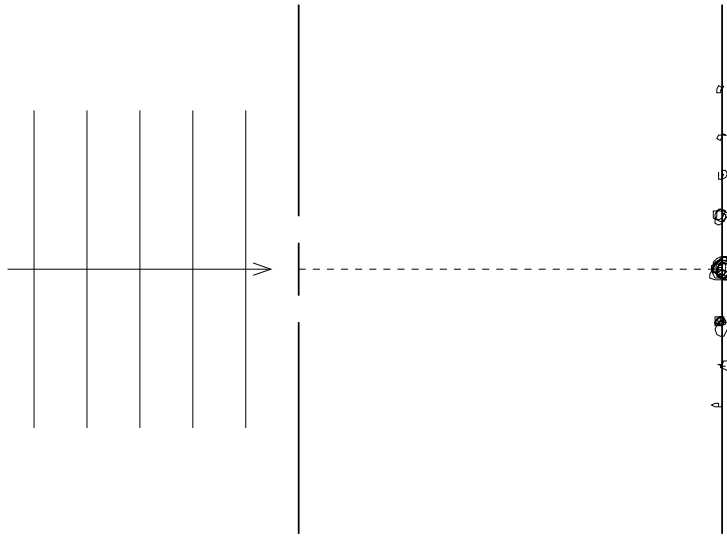
Interessant wird es, wenn man versucht, den Weg, den jedes einzelne Photon der Lichtquelle durch den Doppelspalt nimmt, herauszufinden; man also zusätzlich zum Schirm beide Spalte beobachtet.

Naiv könnte man vermuten, dass eine Beobachtung nichts am betrachteten System ändert und dass deshalb keine Veränderung des Interferenzmusters festzustellen sei. Dies ist aber nicht der Fall; stattdessen **verschwindet** das Interferenzmuster! [6–8]

Erklärt wird dies im Rahmen der konventionellen Quantenmechanik wie folgt: Die Messung, welcher Weg von den Photonen genommen wird, verhindert in diesem Kontext die Interpretation von Licht als Welle; stattdessen seien die Teilcheneigenschaften der Photonen heranzuziehen.

Jedes einzelne Photon bewegt sich also geradlinig durch jeweils einen Spalt; auf dem Schirm sieht man nur zwei Punkte.

Dieser Diskrepanz ist unter dem Namen **Welle-Teilchen-Dualismus** bekannt. Üblicherweise „löst“ man das Problem dadurch, indem man statuiert, dass das zu verwendende Bild – Welle oder Teilchen – je nach eingliederndem Kontext anders zu wählen sei. [9]



### 1.1.2 Schrödingers Katze [10, 11]

Eine Katze befindet sich in einer isolierenden Kiste. Der Zerfall eines radioaktiven Präparats bestimmt, ob ein betäubendes Nervengas innerhalb der Kiste freigesetzt werden soll.

Nach dieser Präparation wartet man einige Minuten. Über das radioaktive Zerfallsgesetz kann man bestimmen, wie groß die Wahrscheinlichkeit ist, dass das radioaktive Präparat zerfiel und somit den Giftstoff freisetzte.

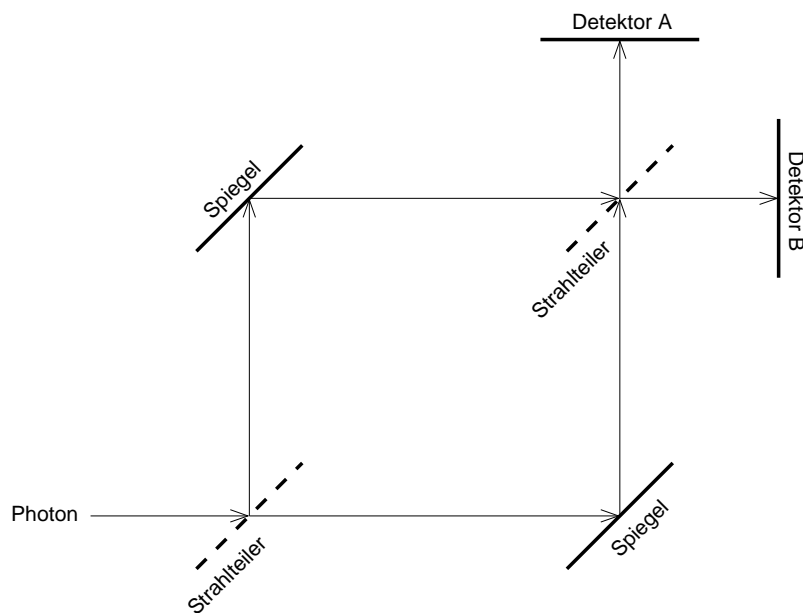
Solange man nicht die Kiste öffnet – man den Zustand der Katze also nicht bestimmt –, befindet sich die Katze in einer Überlagerung (Superposition) zweier Zustände – zum einen **Katze bewusstlos**, zum anderen **Katze lebendig**. Salopp ausgedrückt, ist die Katze „lebendig und bewusstlos zugleich“.



### 1.1.3 Experimente mit verzögerter Entscheidung (delayed-choice-Experimente)

...mittels eines Mach-Zehnder-Interferometers [12]

Gegeben sei ein Mach-Zehnder-Interferometer (nach Ernst Mach und Ludwig Zehnder; [13, S. 275]) und eine Lichtquelle, die nur jeweils ein Photon pro Puls aussendet.

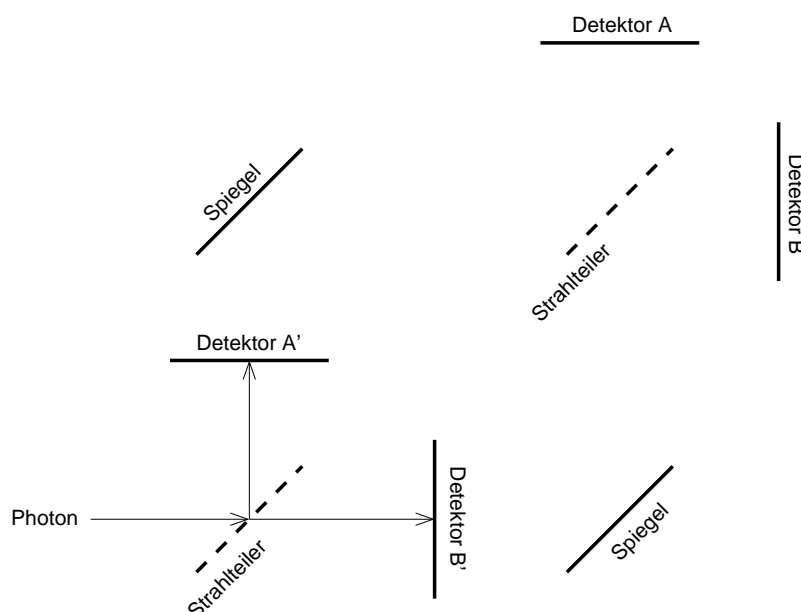


Trifft ein Photon am ersten Strahlteiler ein, dominieren die Welleneigenschaften – wie beim Doppelspaltexperiment, nimmt es „beide Wege zugleich“, genauer: Befindet es sich in einem Überlagerungszustand (**Photon nimmt oberen Weg** vs. **Photon nimmt rechten Weg**).

Trifft es am zweiten Strahlteiler ein, wird der Überlagerungszustand aufgehoben und das Photon wird entweder am Detektor *A* oder am Detektor *B* gemessen.

Soweit gibt es keine Interpretationsprobleme.

Betrachten wir nun ein leicht verändertes Szenario, in dem vor dem zweiten Strahlteiler in beiden Ästen jeweils ein Detektor platziert wird. Trifft in diesem veränderten Aufbau ein Photon am ersten Strahlteiler ein, dominieren die Teilcheneigenschaften (genauer: Ergibt es keinen Sinn, die Welleneigenschaften heranzuziehen) – das Photon nimmt entweder den oberen Ast und wird somit am Detektor *A'* festgestellt, oder nimmt den rechten Ast und wird an *B'* gemessen.



Abgesehen vom Welle-Teilchen-Dualismus gibt es auch im veränderten Versuchsschema keine Interpretationsprobleme.

Problematisch wird es nun, wenn wir das Szenario erneut modifizieren: Sobald das Photon den ersten Strahlteiler passiert, aber

noch bevor es die beiden vorgeschalteten Detektoren erreicht hat, entfernen wir  $A'$  und  $B'$  aus dem Versuchsaufbau (experimentell ist das durchaus möglich). Gemessen wird das Photon schlussendlich entweder an Detektor  $A$  oder an Detektor  $B$ .

Hat sich das Photon nun als Welle (Überlagerungszustand zwischen den beiden Ästen) oder als Teilchen verhalten?

Folgen wir unserem zweiten Versuch, muss sich das Photon wohl als Teilchen verhalten haben – schließlich befanden sich  $A'$  und  $B'$  zu dem Zeitpunkt, als das Photon den ersten Strahlteiler passiert hat, noch im Versuchsaufbau.

Folgen wir allerdings dem ersten Versuch, so muss sich das Photon in einem Überlagerungszustand beider Äste befunden haben – schließlich wurden die Detektoren  $A'$  und  $B'$  entfernt und somit nicht in einem der Äste gemessen und aufgehalten. Diesen Konflikt [14] nennt man **Wheeler's delayed choice experiment**, nach John Wheeler, der es 1983 als Gedankenexperiment vorschlug.

Es gibt im Rahmen der konventionellen Quantenmechanik nun zwei Möglichkeiten, dieses Problem zu lösen [15]. Man könnte vermuten, dass das Photon zu dem Zeitpunkt, als es den ersten Strahlteiler passierte, schon „gewusst“ hat, dass die beiden vorgeschalteten Detektoren entfernt werden würden, und somit in den Überlagerungszustand überging.

Äußerst problematisch bei dieser Interpretation ist, dass das allgemein zugrundegesetztes Axiom der Kausalität verletzt ist: Ein Ereignis aus der Zukunft – die Entfernung der beiden Strahlteiler – würde ein Ereignis aus der Vergangenheit – das Eintreffen des Photons am ersten Strahlteiler – beeinflussen!<sup>1</sup>

Alternativ – und das ist die bevorzugte Interpretation – könnte man das Problem ignorieren und stattdessen die Fragestellung **Welchen Weg hat das Photon genommen?** als nicht sinnvoll verwerfen. (Ähnlich zu **Wo ist mein Geld, wenn ich es von Bank zu einer anderen überweise, es bei der Zielbank noch nicht eingetroffen, am Quellkonto jedoch schon abgebucht ist?** oder **Was passiert mit Elementarteilchen bei  $10^{10^{10}}$  °C?**)

---

<sup>1</sup>Man kann argumentieren, dass die Entscheidung, die beiden vorgeschalteten Detektoren zu entfernen, schon vor Versuchsbeginn durch die Experimentatoren getroffen wurde; somit wäre die Kausalität wiederhergestellt. Dieses Problem nennt man **communication loophole** und kann durch aufwändigere Versuche geschlossen werden [16].

**...mittels Gravitationslinsen [17]**

Ein drastischeres Beispiel soll die Konsequenzen der zuerst aufgeführten Interpretation – der Verletzung der Kausalität – unterstreichen.

Ein weit entfernter Stern sendet ein Photon aus. Auf seinem Weg zur Erde passiert es eine Gravitationslinse – typischerweise einen Sternenhaufen, der durch seine große Gravitation das Licht krümmt. Ähnlich wie beim Doppelspalt gibt es Fälle, bei denen es mehrere mögliche Wege gibt; für eine genauere Beschreibung siehe [18].

Je nach Wahl der Detektoranordnung können wir damit Teilchen- bzw. Welleneigenschaften des Photons erzwingen.

Salopp ausgedrückt, können wir heute, in der Gegenwart, entscheiden, ob ein Photon, das vor Millionen von Jahren ausgesendet wurde, sich die ganze Zeit über wie eine Welle oder wie ein Teilchen verhielt!

**1.2 Auflösung der Konflikte unter der Interpretation nach Bohm**

Die BOHMSche Mechanik ist eine deterministische Interpretation der Quantenmechanik; der in der konventionellen Interpretation fundamentale Vorgang des Messens verliert in der BOHMSchen Mechanik an Bedeutung. Die BOHMSche Mechanik reproduziert alle Vorhersagen der konventionellen Quantenmechanik [3, 4]; somit gestattet sie eine alternative, möglicherweise angenehmere Interpretation, ohne aber die Sicherheit der erprobten Quantenmechanik zu verlassen.



In der BOHMschen Mechanik haben Teilchen eine exakte Position und eine exakte Geschwindigkeit. Auch gibt es keinen Welle-Teilchen-Dualismus: Photonen (und andere Objekte, die sich in der Standardinterpretation wie Wellen verhalten können, beispielsweise Elektronen) sind simple Teilchen.

Der „Trick“ nun, wie die BOHMsche Mechanik die Vorhersagen der Standardinterpretation reproduziert, ist folgender: Zu jedem Teilchen gehört eine Gleichung (eine Wellengleichung), die die Bewegung eines Teilchens „leitet“. [19]

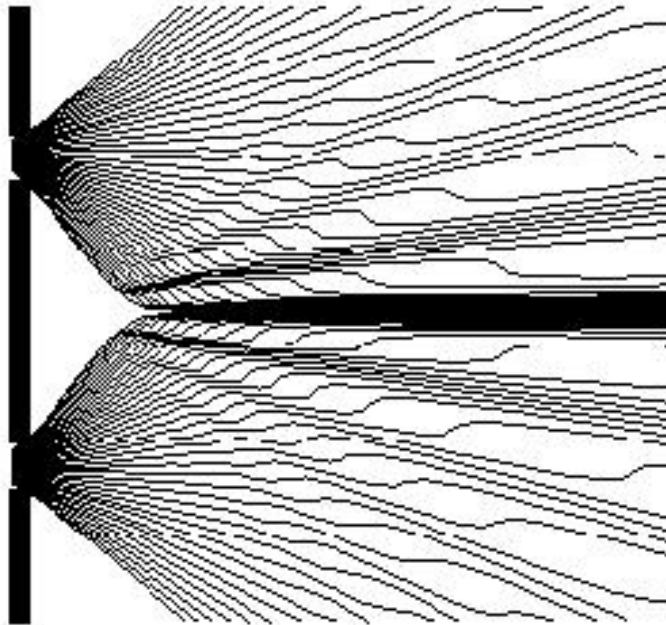
### **1.2.1 BOHMsche Doppelspaltinterferenz**

Die Bedeutung der Führungswellen soll am Beispiel der Interferenz am Doppelspalt verdeutlicht werden.

Wir erinnern uns: In der Standardinterpretation interferieren die Lichtwellen miteinander. Da sich Photonen wie Wellen verhalten können, erhält man auch dann ein Interferenzmuster, wenn man einzelne Photonen durch den Doppelspalt schickt.

In der Interpretation nach Bohm interferieren nicht die Photonen selbst – Teilchen können nicht interferieren –, sondern ihre Füh-

rungswellen. Dabei bleiben die Teilcheneigenschaften der Photonen erhalten. Die interferierten Führungswellen bestimmen den weiteren Bewegungsverlauf der Photonen.



Am Bild (von [19]) gut erkennbar sind die Orte maximaler und minimaler Intensität – oder, in der Standardinterpretation gesprochen – der Intensitätsmaxima und -minima.

Die Photonen bewegen sich auf deterministischen und kontinuierlichen Bahnen. In der BOHMschen Mechanik ist die Frage **Wo ist das Photon nachdem es den Doppelspalt durchquert, den Schirm aber noch nicht erreicht hat?** durchaus sinnvoll und klar beantwortbar.

### 1.2.2 Anfragen an die BOHMsche Interpretation

- **Laut Beschreibung haben Teilchen exakte Positionen und Geschwindigkeiten. Widerspricht dies nicht der HEISENBERG'schen Unschärferelation, die besagt, dass Ort und Geschwindigkeit einer Mindestunschärfe unterworfen sind?**



Nein. Die HEISENBERG'sche Unschärferelation fundamentalisiert lediglich das Problem des Messens: **Niemand** kann Ort und Geschwindigkeit beliebig genau messen.

Dass Ort und Geschwindigkeit nicht beliebig genau messbar sind, bedeutet aber nicht, dass ein Teilchen nicht einen exakt bestimmten Ort und eine exakte bestimmte Geschwindigkeit hat! [15, S. 3]

Da man also Ort und Geschwindigkeit nicht beliebig genau messen kann, sie in der BOHMschen Interpretation aber durchaus exakte Werte annehmen, wuchs der Begriff der **verborgenen Variablen** [20]:

Ort und Geschwindigkeit sind verborgene Variablen; obwohl sie einen exakt definierten Wert haben, kann man sie nicht beliebig genau messen.

Anders als in der Standardinterpretation geht die BOHMsche Mechanik nicht den Schritt von **nicht beliebig genau messbar** zu **nicht existent**.

- **Gibt es ein anschauliches Beispiel für den Begriff verborgene Variable?**

Ja. Nehmen wir an, dass wir nicht scharf sehen können. Nehmen wir weiter an, dass Brillen nicht existieren.

Unter diesen Annahmen ist die Größe **Augenzahl** eines Würfels eine verborgene Variable: Obwohl eindeutig (und diskret) definiert, ist sie uns nicht zugänglich.

Wir können vielleicht erkennen, dass die Oberseite des Würfels „ziemlich schwarz“ ist, und somit schließen, dass die Augenzahl nicht **1** oder **2** sein kann, da die Zahl der schwarzgefärbten Punkte in diesen Fällen nicht ausreichen würde, um das Sehempfinden **ziemlich schwarz** hervorzurufen; wir können aber nicht sagen, ob die Augenzahl nun **3**, **4**, **5** oder **6** ist.

- **Zeigt die BELLSche Ungleichung nicht, dass eine Theorie mit verborgenen Variablen niemals alle Vorhersagen der Quantenmechanik reproduzieren kann?**

Nein. Die BELLSche Ungleichung zeigt, dass eine **lokale** Theorie mit versteckten Variablen niemals alle Vorhersagen der

Quantenmechanik reproduzieren kann [21, 22]. Eine **nicht-lokale** Theorie kann dies durchaus. Die BOHMsche Interpretation der Quantenmechanik ist eine solche nicht-lokale Theorie.

Eine Theorie nennt man **lokal**, wenn in dem von der Theorie aufgestellten Modell kein Objekt auf ein anderes schneller als mit Lichtgeschwindigkeit wirken kann. Objekte einer **nicht-lokalen** Theorie unterliegen dieser Beschränkung nicht. [23]

- **Bedeutet das, dass in der BOHMschen Mechanik Informationsausbreitung schneller als mit Lichtgeschwindigkeit möglich ist?**

Nein. Obwohl Objekte schneller als mit Lichtgeschwindigkeit miteinander wechselwirken können, wird eine Ausnutzung solcher überlichtschnellen Wechselwirkungen verhindert. (Ich weiß nicht, in welcher Form genau das verhindert wird.)

- **Trifft ein einzelnes Photon auf den Doppelspalt auf, so ist der Ort, an dem es auf dem Schirm auftreffen wird, in der Standardinterpretation nicht vorhersagbar; man kann lediglich eine Wahrscheinlichkeit angeben, die von der Amplitude der Interferenzwelle abhängt. Laut Beschreibung sind die Photonenbahnen in der BOHMschen Mechanik aber deterministisch. Ist dies nicht ein Widerspruch?**

Nein. Da man die Anfangsbedingungen (Ort und Geschwindigkeit des Photons) nicht beliebig genau kennt, unterliegt auch die Vorhersage einer Unschärfe. Kleinste Veränderungen in den Anfangsbedingungen können einen großen Unterschied ergeben.

Das Photon hat aber in der Interpretation nach Bohm durchaus einen deterministischen, kontinuierlichen Weg zum Schirm zurückgelegt; in diesem Beispiel könnte man daher auch dem Bewegungsverlauf den Status, eine verborgene Variable zu sein, zusprechen.

- **Wieso ist es ein Vorteil, dass Messen keine fundamentale Bedeutung in der BOHMschen Interpretation hat?**

Messen ist eine komplexe Tätigkeit, die nur schwer mathematisch formulierbar ist.

Vergleichbar wäre ein Grundschulunterricht, in dem nach der Einführung der Addition gleich Potenzierung gelehrt wird. Potenzierung ist natürlich durchaus sinnvoll – nur sollten zuerst grundlegendere Konzepte beigebracht werden.

### 1.2.3 Anfragen über die BOHMsche Interpretation

- **Welchen Sinn hat eine alternative Interpretation, wenn sich ihre Vorhersagen nicht von der Standardinterpretation unterscheiden?**

Das der BOHMschen Mechanik zugrundeliegende Realitätsmodell ermöglicht eine deterministische Interpretation. Mit der BOHMschen Mechanik verfügt man also über eine Theorie, die die Vorhersagen der Standardinterpretation reproduziert – also guten Gewissens angewendet werden kann –, und trotzdem eine deterministische Realität unterstellt.

Je nach subjektivem Empfinden ist dies ein Vorteil.

- **Was ist die allgemeine Einstellung gegenüber der BOHMschen Interpretation?**

Von der Mehrzahl der Physiker wird die BOHMsche Mechanik als unwichtig erachtet, da sie – weil sie ja alle Vorhersagen der Standardinterpretation reproduziert – keine neuen Erkenntnisse liefert. [15, S. 2]

Interessanterweise vertrat auch Einstein, der nie Gefallen an der nicht-deterministischen Natur der Standardinterpretation fand, eine ablehnende Haltung gegenüber der BOHMschen Interpretation: Einstein, als Begründer der Relativitätstheorie, lehnte eine nicht-lokale Theorie verständlicherweise strikt ab. [22, Abschnitt **Lokal realistische Theorien**]

- **Soll ein Modell nicht einfach nur möglichst passend sein? Wieso stellt man weitere Anforderungen? Speziell: Wieso ist Nicht-Lokalität ein solch großer Nachteil? Um in den Bildern von Matrix zu sprechen: Was hindert die Programmierer darin, zu „cheaten“? Oder, in den Bildern von [24, Ijon Tichys Erinnerungen an Professor Corcoran]: Was hindert Ameisen daran, über die Trommel unseres Universums zu laufen?**

Nichts; da aber Vermutungen solcher Art nicht falsifizierbar sind – es kein Experiment gibt, was demonstrieren würde, dass diese Vermutung falsch sind –, sind sie nicht Gegenstand der Physik.

Zusätzliche Forderungen, die man an eine Theorie stellt – wie beispielsweise Lokalität oder die Forderung an ein Modell des Gehirns, dass Gefühle nicht nur Folgen chemischer Reaktionen sind –, sind subjektiver Natur.

### 1.3 Zusammenfassung

Mit der BOHMschen Mechanik hat man ein deterministisches Modell, in dem **Messen** keine grundlegende Bedeutung zukommt. Die teils problematische Beobachterzentrierung der Standardinterpretation (problematisch beispielsweise bei Experimenten mit verzögerter Entscheidung) gibt es in der Interpretation nach Bohm nicht.

Einige wichtige Themen habe ich hier nicht beschrieben, entweder weil ich das betreffende Thema nicht gut genug verstehe oder weil es sich nicht in den Gesamtkontext eingliedern ließ. Dazu gehören quantum eraser experiments [25], eine eingehende Behandlung des Energiebegriffs in der BOHMschen Mechanik (u.a. gibt es ein neues Potenzial, das Quantenpotenzial) und der Trajektorien bzw. Führungswellen [15].

Eine andere, weniger drastische Alternativinterpretation, ist die Viele-Welten-Interpretation [26], derzufolge es statt Überlagerungszuständen jeweils ein Universum für jeden Zustand gibt – in einem Universum lebt Schrödingers Katze, im anderen ist sie bewusstlos. Diese Interpretation ist besonders unter Science-Fiction-Autoren sehr beliebt [27].

### 1.4 Referenzen

1. Will Keeping. Lifework of David Bohm – River of Truth
2. Olival Freire Jr. Science and exile: David Bohm, the hot times of the Cold War, and his struggle for a new interpretation of quantum mechanics. HSPS, 36(1), 1-34, 2005

3. Detlef Dürr. Bohmsche Mechanik als Grundlage der Quantenmechanik Dürr. Springer
4. Gert-Ludwig Ingold. Quantentheorie Grundlagen der modernen Physik. C. H. Beck
5. Anton Zeilinger. Spukhafte Fernwirkung – Die Schönheit der Quantenphysik. Suppose
6. Lord of the Wind Films. What the BLEEP do we know!?
7. Wikipedia, the free encyclopedia. Double-slit experiment (5.9.2006)
8. Wikipedia, die freie Enzyklopädie. Doppelspaltexperiment (5.9.2006)
9. Arndt, Markus, Nairz, Voss-Andreae, Keller, van der Zouw, Zeilinger. Wave-particle duality of C60. Nature 401: 680-682
10. Joos, Zeh, Kiefer, Giulini, Kupsch, Stamatescu. Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory
11. Universität Ulm, Didaktik für Quantenchemie. Grenzen unserer Erkenntnis
12. Florian Hebenstreit. „Delayed Choice“ und Wheelers Paradoxon
13. Ludwig Zehnder. Z. Instrumentenkunde 11 (1891)
14. Quantum Theory and Measurement. Princeton University Press (1983)
15. B. J. Hiley, R. E. Callaghan. Delayed-choice experiments and the Bohm approach
16. Wikipedia, the free encyclopedia. Loopholes in optical Bell test experiments (5.9.2006)
17. Wikipedia, the free encyclopedia. Wheeler's delayed choice experiment (5.9.2006)
18. Joachim Wambsganz. Gravitationslinsen – Universelle Werkzeuge der Astrophysik
19. Wikipedia, die freie Enzyklopädie. Bohmsche Mechanik (5.9.2006)

20. S. Kochen, E. P. Specker. The problem of hidden variables in quantum mechanics. *J. Math. Mech.* (17)
21. A. Aspect. Bell's inequality test: more ideal than ever. *Nature*, vol. 398, 18 March 1999
22. Wikipedia, die freie Enzyklopädie. Bellsche Ungleichung (5.9.2006)
23. Wikipedia, the free encyclopedia. Local hidden variable theory (5.9.2006)
24. Stanisław Lem. *Sterntagebücher*
25. Wikipedia, the free encyclopedia. Quantum eraser experiment (5.9.2006)
26. Wikipedia, die freie Enzyklopädie. Viele-Welten-Interpretation (5.9.2006)
27. Douglas Adams. *Per Anhalter durch die Galaxis*

(Die Skizzen zum Wheeler-Paradoxon habe ich gezeichnet. Alle anderen Bilder sind Wikipedia entnommen.)