

Quantenmechanik und Determinismus

Martin Daumer

Mathematisches Institut der LMU

Theresienstr. 39, 80333 München

e-mail: daumer@rz.mathematik.uni-muenchen.de

Der weitverbreiteten Meinung zum Trotz, Quantenmechanik sei eine mit dem Determinismus unverträgliche Theorie, stellt die “Bohmsche Mechanik” eine ausgearbeitete Theorie zur deterministischen Erklärung aller Phänomene aus dem Bereich der nichtrelativistischen Quantenmechanik dar. Die Grundzüge dieser Theorie und die Gründe, warum sie über 40 Jahre lang von der Mehrheit der Physiker ignoriert wurde, werden in diesem Aufsatz dargestellt¹.

¹Dieser Aufsatz ist eine Ausarbeitung eines gleichnamigen Vortrags, gehalten auf dem Abschiedssymposium zu Ehren von Prof. Dr. Gerd Schaefer „Das Elementare im Komplexen – Neue Wege zu einer transdisziplinären Allgemeinbildung um die Jahrtausendwende“, am 27.5.1995 in Hamburg. In Kenntnis der Grundregel, daß jede Formel die Anzahl der potentiellen Leser halbiert, werde ich einige Formeln verwenden. Es ist aber an keiner Stelle nötig, diese im Detail zu verstehen, wenngleich, so hoffe ich, möglich.

1 Erinnerung an die „klassische Physik“

Bevor wir uns dem eigentlichen Thema widmen, wollen wir uns die Grundzüge der klassischen Physik, insbesondere der Newtonschen Mechanik und des Elektromagnetismus, ins Gedächtnis rufen.

Jeder kennt das Newtonsche Kraftgesetz “ $F = ma$ ”, Kraft ist Masse mal Beschleunigung. Damit ist folgendes gemeint: Newtonsche Mechanik ist eine Theorie der Bewegung von Punktteilchen im Raum. Die Bahnen zu vorgegebenen Anfangsorten und Anfangsgeschwindigkeiten bestimmen sich aus der Gleichung

$$\frac{d^2}{dt^2}x_k(t) = \frac{1}{m_k}F_k(x_1(t), \dots, x_N(t)). \quad (1)$$

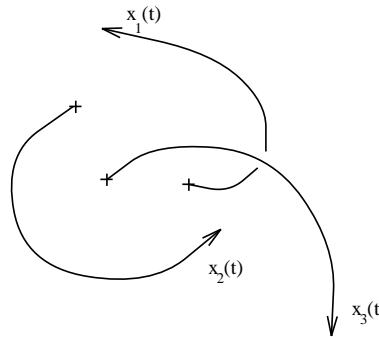
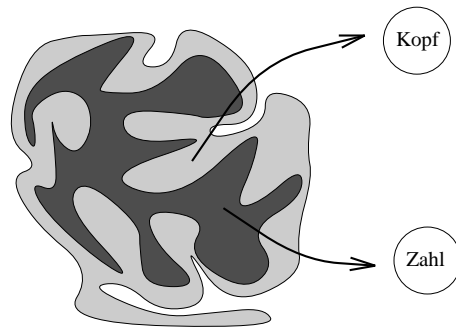


Abbildung 1: Die Bahnen von drei Teilchen im Raum, die sich gemäß der Newtonschen Gleichung bewegen. Die Bahnen hängen von den Anfangsorten und Anfangsgeschwindigkeiten sowie der speziellen Kraftfunktion F ab. Die Pfeilenden stellen die Orte der Teilchen zur Zeit t dar, die Startpunkte sind durch Kreuze gekennzeichnet.

Die Beschleunigung des k -ten Teilchens, die durch $\frac{d^2}{dt^2}x_k(t)$ symbolisiert ist, also die momentane Änderung seiner Geschwindigkeit $v_k(t) = \frac{d}{dt}x_k(t)$ und indirekt damit seines Ortes $x_k(t)$, wird durch seine Masse m_k und die Kraft F_k , die durch die anderen Teilchen bewirkt wird, bestimmt. Was dabei wichtig ist: Aus den Anfangsorten und -geschwindigkeiten aller Teilchen – dem “Zustand”, d.h. der vollständigen Charakterisierung des Systems – folgen aus dieser Gleichung die Orte und Geschwindigkeiten aller Teilchen *für alle Zeiten!* Zukunft und Vergangenheit, die gesamten Bahnen der Teilchen, lägen einem „Laplaceschen Dämon“, der zu einem Zeitpunkt diese Kenntnis hat, auf der Hand. Alles ist in dieser Theorie determiniert! Vieles ist erklärbar und vorhersagbar: Insbesondere im Bereich der Himmelsmechanik, der Bewegungen der Planeten und Gestirne, kann die Newtonsche Mechanik auf eine Fülle von bestätigten Vorhersagen hinweisen; präzise Zeitangaben von Sonnenfinsternissen und Kometenereignissen sind nur die spektakulärsten



: Menge der Anfangsparameter des Münzwurfs für 'Kopf'



: Menge der Anfangsparameter des Münzwurfs für 'Zahl'

$$P(\text{Kopf}) = P(\text{Zahl}) = 50\%$$

Abbildung 2: Der faire Münzwurf

davon. Weiterhin ist wichtig, daß auch „Zufall“ im Rahmen der klassischen Mechanik verstehbar ist. Kennt man Anfangsimpuls und Ort einer Münze genau (also den genauen Punkt im „Phasenraum“ dieses Systems), ist die Seite, auf der sie nach einem Wurf liegen bleibt, *determiniert*. Normalerweise entzieht sich aber die genaue Kontrolle der Anfangsparameter dem Werfer, und typischerweise verlaufen die Bahnen und damit die möglichen Endergebnisse „Kopf“ oder „Zahl“ trotz nur geringer Änderungen der Anfangsparameter völlig verschieden. Beim Münzwurf (Abb. 2) wird etwa die Hälfte aller möglichen Anfangsparameter zu „Kopf“ führen, die andere Hälfte zu „Zahl“. Dieses Verhalten wird auch als „deterministisches Chaos“ bezeichnet: Die zugrundeliegende Theorie ist deterministisch, da aber kleine Unterschiede in den Anfangsparametern große Unterschiede im Endergebnis zur Folge haben, ist das beobachtete Verhalten „chaotisch“, hat aber dennoch statistische Regelmäßigkeiten. Dies ist gemeint, wenn man sagt „Die Wahrscheinlichkeit, beim Werfen einer Münze „Zahl“ zu bekommen, ist $1/2$.“. Wir werden auf diese klassische Erklärung des Zufalls später zurückkommen.

Die „statistische Mechanik“ beschäftigt sich mit einer Analyse dieser statistischen Regelmäßigkeiten unter der Annahme einer statistischen Verteilung der Anfangsorte und -geschwindigkeiten. Boltzmann gelang es gegen Ende des letzten Jahrhunderts, die Ther-

modynamik, also die Lehre von Temperatur, Druck, Entropie, Wärmekapazitäten, Gasgesetzen etc. durch solch eine statistische Analyse aus der klassischen Mechanik abzuleiten. Zusammen mit der ebenfalls deterministischen Theorie des Elektromagnetismus, der Lehre der Ausbreitung von elektromagnetischen Wellen, insbesondere des Lichts, und deren Wechselwirkung mit Teilchen, stand diese „klassische Physik“ gegen Ende des letzten Jahrhunderts in dem Ruf, kurz vor ihrem Abschluß zu stehen.

Doch die klassische ist Physik „falsch“: Es gibt zum einen klassisch unerklärbare Phänomene im Bereich der großen Geschwindigkeiten (z.B. das klassisch nicht verstehbare Michelson-Morely-Experiment, in dem sich die Geschwindigkeit der Erde auf ihrer Bahn um die Sonne nicht wie erwartet zur Geschwindigkeit eines Lichtstrahls addierte, der sich in Bewegungsrichtung der Erde ausbreitete). An diesem Problemkreis entzündete sich die erste Revolution im Weltbild der Physik in diesem Jahrhundert: die spezielle Relativitätstheorie Einsteins. In dieser Theorie bewegen sich Teilchen gemäß einem neuen Gesetz, und es gibt eine größte Geschwindigkeit, die nicht überschritten werden kann: die Lichtgeschwindigkeit, etwa 300.000 Kilometer pro Sekunde. Wirkungen können sich also gemäß dieser Theorie höchstens mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten und man spricht in diesem Zusammenhang von einer „lokalen Struktur“ der Theorie. Das fundamental Neue dabei ist, daß der klassische Begriff der „absoluten Gleichzeitigkeit“ aufgegeben werden muß: Es gibt Ereignispaare, von denen eine Beobachterin sagt, eines sei früher als das andere, während eine andere, dazu bewegte Beobachterin, zum umgekehrten Schluß kommt! Wir werden am Schluß auf die sich daraus ergebenden Rahmenbedingungen für eine relativistische Quantentheorie zurückkommen.

Zum anderen gibt es Schwierigkeiten bei „kleinen Abständen“. Wir wollen dazu ein zentrales Beispiel herausgreifen: das klassische Wasserstoffatom, das ein Proton-Elektron-System als Miniatur-Planetensystem zu beschreiben versucht. Doch das Atom wäre nach den Gesetzen der klassischen Theorie instabil: Alle beschleunigten Ladungen strahlen nach dieser Theorie elektromagnetische Wellen aus, so auch das Elektron auf seiner Bahn um den Kern. Dabei würde es Energie verlieren und nach phantastisch kurzer Zeit in den Kern stürzen (Abb. 3).

Das klassische Atommodell ist ein sicherlich „etwas“ unbefriedigendes Materiemodell. Es kann die für jedermann offenbare Stabilität der Materie nicht erklären. Selbst wenn man dieses Problem mit Zusatzhypothesen („Das Elektron kann nach noch unverständenen Gesetzen nach seinem Sturz einen neuen Sturz beginnen“) retten wollte, stimmte darüber hinaus die sich beim Sturz des Elektrons ergebende kontinuierliche Verteilung der Farben im emittierten Licht – dem „Spektrum“ – nicht mit den Farben überein, die im Experiment an Wasserstoffatomen beobachtet wurden: Nur ganz bestimmte, diskrete Lichtwellenlängen finden sich in diesem gänzlich „unklassischen“ Licht mit „Linienspektrum“ (Abb. 4).

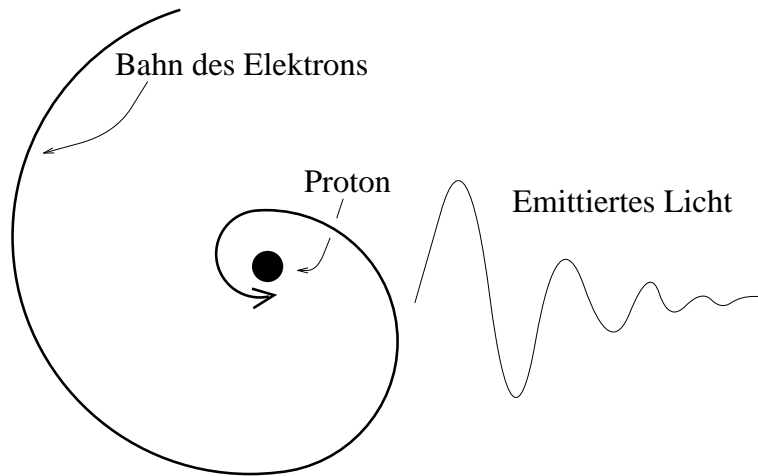


Abbildung 3: Ein Elektron sollte nach den Gesetzen der klassischen Physik in den Kern stürzen. Dabei würde Licht aller Farben (mit „kontinuierlichem Spektrum“) ausgesendet werden.

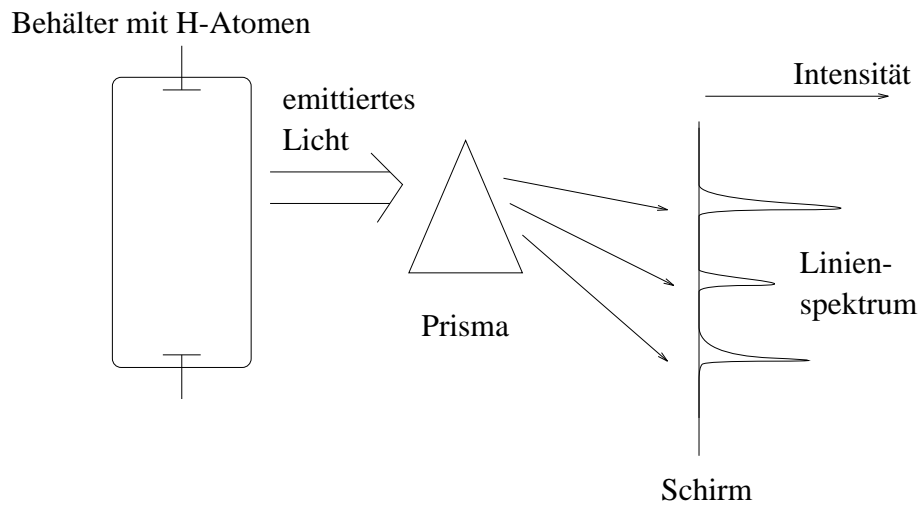


Abbildung 4: Das Licht von ionisiertem Wasserstoff hat nur ganz bestimmte Farbkomponenten („diskretes Spektrum“ oder „Linienspektrum“), das durch ein Prisma in seine „Spektralfarben“ zerlegt und einzeln sichtbar gemacht werden kann.

Eine ähnliche Diskrepanz tritt bei der Strahlung eines „schwarzen Körpers“ auf: das Spektrum des Lichts, das aus dem Inneren eines heißen Hohlkörpers mit kleinem Loch dringt, stimmt nicht mit den klassisch berechneten Verteilungen überein. Damit war das Ende der klassischen Physik als fundamentale Theorie der Materie eingeläutet.

2 Die Quantenmechanik

Um 1900 begannen die Geburtswehen der Quantenmechanik. Es wurden einfache Regeln gefunden, mit denen sowohl das richtige Spektrum eines schwarzen Körpers berechnet werden konnte (Planck, Einstein) als auch das Linienspektrum des Wasserstoffatoms: das „Bohrsche Atommodell“. Das Elektron soll sich *per Postulat* nur auf ganz bestimmten Kreisbahnen um den Kern bewegen. Beim Sprung von einer Bahn auf eine tieferliegende wird ein „Lichtquant“ ausgesendet, dessen Wellenlänge umso kleiner ist, je größer die Energiedifferenz zwischen den Bahnen ist. Ist das Elektron auf der Bahn mit der niedrigsten Energie E_1 angelangt, so ist es dort *per Postulat* stabil.

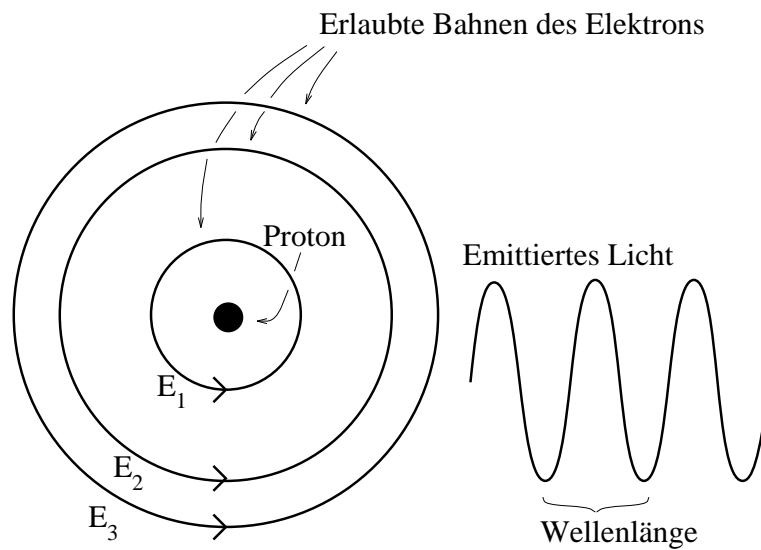


Abbildung 5: Das Bohrsche Atommodell: Das Elektron darf sich nur auf ganz bestimmten Kreisbahnen mit diskreten Energien E_1, E_2, \dots bewegen. Beim Sprung von der Bahn E_2 auf die Bahn E_1 wird Licht mit einer Wellenlänge ausgesandt, die umso kleiner ist, je größer die Energiedifferenz $E_2 - E_1$ ist.

Doch wann genau springt ein Elektron? Wie lange dauert solch ein „Quantensprung“ („quantum jump“) und auf welcher Bahn bewegt es sich während des Sprungs? Solcherlei Fragen können im Bohrschen Atommodell nicht beantwortet werden.

Einigermaßen wohlformulierte Theorien dazu wurden dann von Heisenberg (1925) und

von Schrödinger (1926) vorgeschlagen: Die Matrizenmechanik und die Wellenmechanik. Die Matrizenmechanik und deren Weiterentwicklungen machten es sich zur Aufgabe, einen einheitlichen Formalismus anzugeben, der es gestattet, statistische Vorhersagen über den Ausgang von Messungen, beispielsweise des Spektrums, zu machen. Der „Zustand“ eines Systems, in der klassischen Mechanik die Orte und Geschwindigkeiten aller Teilchen, ist nun durch „ ψ “, einen Vektor in einem abstrakten „Hilbert-Raum“, gegeben. Für jede „Meßgröße“² A gibt es eine Vorschrift, wie für einen gegebenen Zustand ψ die Wahrscheinlichkeitsverteilung \mathbb{P} der Meßgröße zu berechnen ist, die eine Beobachterin mißt.

$$\mathbb{P} = \mathbb{P}(\psi, A). \quad (2)$$

Dieser Formalismus hat sich in vielen Bereichen bewährt, etwa bei der Berechnung der Linienspektren. Für Orts- und Geschwindigkeitsmessungen kann man in diesem Rahmen ableiten, daß es unmöglich ist, einen Zustand ψ zu finden, der gleichzeitig eine beliebig scharfe Ortsverteilung („mit Wahrscheinlichkeit 1 ist das Teilchen an einem bestimmten Ort“) und eine beliebig scharfe Geschwindigkeitsverteilung hat. Es folgt aus den Formeln, daß das Produkt der Breiten dieser Verteilungen eine gewisse fundamentale Schranke, gegeben durch das „Plancksche Wirkungsquantum \hbar “, nicht unterschreiten kann. Dies ist – in Worten – der Inhalt der berühmten „Heisenbergschen Unschärferelation“.

Die matrizenmechanische Formulierung der Quantenmechanik wird allgemein als „intrinsisch indeterministisch“ betrachtet: Wahrscheinlichkeitsverteilungen tauchen ohne Begründung oder Rückführung auf determinierende Elemente auf (im Gegensatz zum Münzwurf).

Der Leser braucht an dieser Stelle keine Sorge zu haben, daß er aus Gründen mangelnder mathematisch-naturwissenschaftlicher Bildung diese abstrakte Sichtweise nicht versteht. Er befindet sich damit in bester Gesellschaft: Noch 1964 sprach der amerikanische Nobelpreisträger Richard Feynman aus (Feynman 1989, S. 129):

On the other hand, I think I can safely say that nobody understands quantum mechanics.

Einen ganz anderen Weg verfolgte Erwin Schrödinger mit seiner Konkurrenztheorie, der „Wellenmechanik“. Die Wellenmechanik beschreibt das zeitliche Verhalten von „Wellen“. Diese Wellen sind für ein System aus N Teilchen Funktionen auf dem sogenannten „Konfigurationsraum“ der Teilchen. Ein „Punkt“ in diesem Raum hat die Form (x_1, x_2, \dots, x_N) , wobei x_k wieder der Ort des k -ten Teilchens ist.

²Diese Meßgrößen sind „Operatoren“ auf dem Hilbertraum und können durch Matrizen, d.h. rechteckige Zahlenschemata, dargestellt werden. Daher der Name „Matrizenmechanik“.

Das zeitliche Verhalten einer solchen Welle – wir wollen uns zunächst auf Systeme mit einem Teilchen beschränken – ist durch die „Schrödingergleichung“ bestimmt,

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi_t(x) = H\psi_t(x). \quad (3)$$

Es genügt hier, von dieser Gleichung abzulesen, daß die Wellenfunktion $\psi_{t_0}(x)$ zu einer bestimmten Zeit t_0 , die Wellenfunktion $\psi_t(x)$ für alle Zeiten t determiniert. Die Wellenmechanik ist also auf dieser Ebene deterministisch.

Auch mit der Wellenmechanik konnte das korrekte Linienspektrum von Atomen berechnet werden und Schrödinger konnte sogar zeigen, daß in Bezug auf die Vorhersagen der statistischen Verteilungen von Meßergebnissen die beiden Theorien äquivalent waren.

Aber es besteht natürlich die Frage, was denn nun diese Wellenfunktion physikalisch bedeutet.

Schrödinger verfolgte anfangs die Idee, daß die Wellenfunktion ein kontinuierliches Materiefeld darstellt. Punktteilchen wären damit einfach sehr scharf lokalisierte „Wellenpakete“ (siehe Abb. 6). Aber diese Möglichkeit scheiterte an der unvermeidlichen Verbreiterung eines anfangs schmalen Pakets, die von der Schrödingergleichung erzwungen wird.

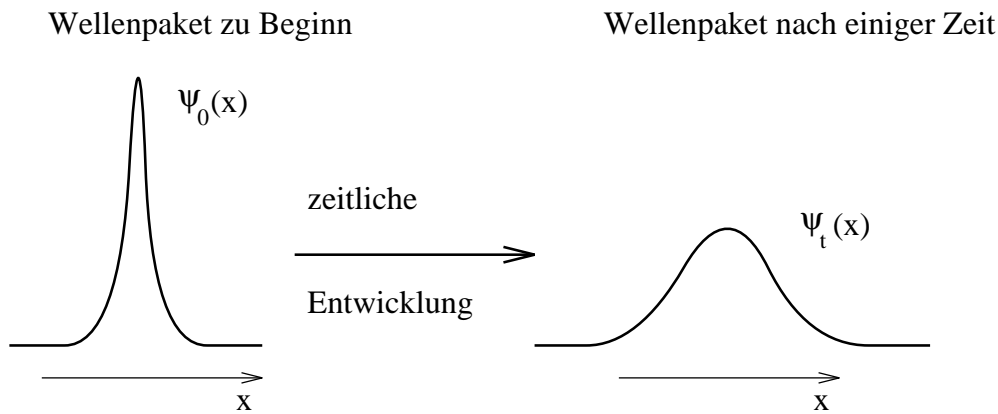


Abbildung 6: Ein anfangs schmales Wellenpaket verbreitert sich bei freier Bewegung.

In den sehr wichtigen Arbeiten von Max Born von 1926 (kurz nach Schrödingers Wellenmechanik), zu einer Zeit als Originalliteratur noch eher lesbar war als heute, wurde die „statistische Interpretation“ der Quantenmechanik formuliert:

Ich möchte versuchen, hier eine ... Interpretation [der Wellenfunktion] zu geben ... Dabei knüpfe ich an eine Bemerkung Einsteins über das Verhältnis von Wellenfeld und Lichtquanten an; er sagte etwa, daß Wellen nur dazu da seien, um den korpuskularen Lichtquanten den Weg zu weisen, und er sprach in diesem Sinne von einem ‘Gespensterfeld’. Dieses bestimmt die Wahrscheinlichkeit dafür, daß ein Lichtquant ... einen bestimmten Weg einschlägt;

...

Und hier [in der Quantenmechanik] liegt es nahe, die de-Broglie-Schrödingerschen Wellen als das ‘Gespensterfeld’ oder besser ‘Führungsfeld’ anzusehen. Ich möchte also versuchsweise die Vorstellung verfolgen: Das Führungsfeld, dargestellt durch eine skalare Funktion ψ der Koordinaten aller beteiligten Partikel und der Zeit, breitet sich nach der Schrödingerschen Differentialgleichung aus Im übrigen wird für das Einschlagen einer bestimmten Bahn nur eine Wahrscheinlichkeit durch die Werteverteilung der Funktion ψ bestimmt. Man könnte das, etwas paradox, etwa so zusammenfassen: Die Bewegung der Partikel folgt Wahrscheinlichkeitsgesetzen, die Wahrscheinlichkeit selbst aber breitet sich im Einklang mit dem Kausalgesetz aus.

und (aus der Nachfolgearbeit)

Schlußbemerkungen: Auf Grund der vorstehenden Überlegungen möchte ich der Meinung Ausdruck geben, daß die Quantenmechanik nicht nur das Problem der stationären Zustände, sondern auch der Übergangsvorgänge zu formulieren und zu lösen erlaubt. Die SCHRÖDINGERSche Fassung scheint dabei der Sachlage bei weitem am leichtesten gerecht zu werden; überdies ermöglicht sie die Beibehaltung der gewöhnlichen Vorstellungen von Raum und Zeit, in denen sich die Ereignisse in ganz normaler Weise abspielen. Dagegen entspricht die vorgeschlagene Theorie nicht der Forderung der kausalen Bestimmtheit des Einzelereignisses. Ich habe in meiner vorläufigen Mitteilung diesen Indeterminismus ganz besonders betont, da er mir mit der Praxis des Experimentators in bester Übereinstimmung zu sein scheint. Aber es ist natürlich jedem, der sich damit nicht beruhigen will, unverwehrt, anzunehmen, daß es weitere, noch nicht in die Theorie eingeführte Parameter gibt, die das Einzelereignis determinieren. In der klassischen Mechanik sind dies die ‘Phasen’ der Bewegung, z.B. die Koordinaten der Teilchen in einem bestimmten Augenblick. Es schien mir zunächst unwahrscheinlich, daß man Größen, die diesen Phasen entsprechen, zwanglos in die neue Theorie einfügen könne; aber Herr FRENKEL hat mir mitgeteilt, daß dies vielleicht doch geht. Wie dem auch sei, diese Möglichkeit würde nichts an dem praktischen Indeterminismus der Stoßvorgänge ändern, da man ja die Werte der Phasen nicht angeben kann; sie muß übrigens zu denselben Formeln führen, wie die hier vorgeschlagene ‘phasenlose’ Theorie.

Was dabei besonders wichtig ist, ist die Frage nach dem Determinismus: Born läßt explizit offen, ob eine tieferliegende deterministische Theorie möglich ist, die den quantenmechanischen „Zufall“ erklären könnte. In diesem Zusammenhang wollen wir nun ein Paradeexperiment der Quantenmechanik besprechen, in dem die Problematik des Wechselspiels

von Welle und Teilchen, dem „Verstehen“, wovon die Theorie handelt, und des Determinismus besonders deutlich wird: das Doppelspaltexperiment (siehe auch Bell (1987) und Feynman (1989)).

Sendet man einen schwachen Strahl von Teilchen, etwa einzelne Elektronen eines Kathodenstrahls, sagen wir im Mittel ein Elektron pro Sekunde, auf einen schmalen Spalt, so erscheint, im Mittel einmal pro Sekunde, ein kleines Pünktchen irgendwo auf einem Schirm hinter dem Spalt. Wartet man längere Zeit, findet man eine Verteilung dieser Pünktchen, die einer Auftreffverteilung der Bleikügelchen aus einer Schrotflinte ähnelt³: viele Einschläge im Zentrum, weniger am Rand (Abb. 7 oben). Das ist nicht weiter erstaunlich. Schließt man nun diesen Spalt und öffnet einen benachbarten Spalt ergibt sich dasselbe Bild, lediglich das Zentrum ist verschoben (Abb. 7 unten). Das ist ebensowenig verwunderlich.

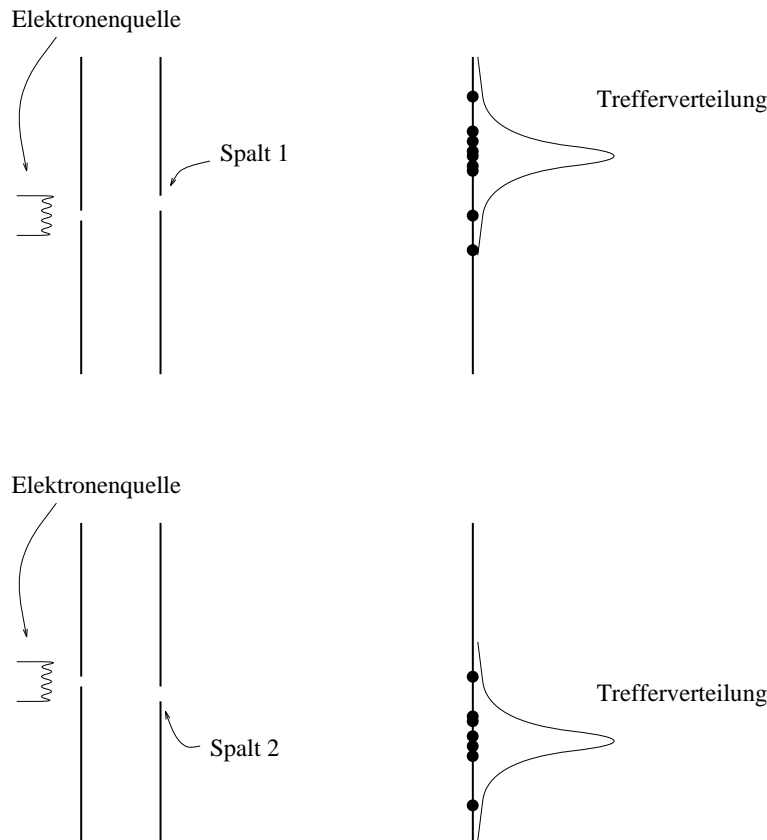


Abbildung 7: Trefferverteilungen für den Fall, daß nur jeweils ein Spalt offen ist.

³Die Analogie wäre noch deutlicher unter Verwendung eines Maschinengewehrs, denn dann kommen die Geschosse einzeln nacheinander an. Ein Maschinengewehr erscheint mir hier aber unnötig brutal.

Was passiert, wenn man beide Spalte öffnet? Man erwartet, daß sich nun die neue Verteilung der Pünktchen im wesentlichen als *Summe* der beiden Häufigkeitsverteilungen zusammensetzt, ähnlich der Einschußverteilung beim Beschuß zweier benachbarter Spalte mit einer Schrotflinte.

Tatsächlich findet man aber eine ganz andere Verteilung (Abb. 8), und zwar sowohl im Experiment als auch in der quantenmechanischen Vorhersage, die ja die Pünktchenverteilung zu berechnen gestattet.

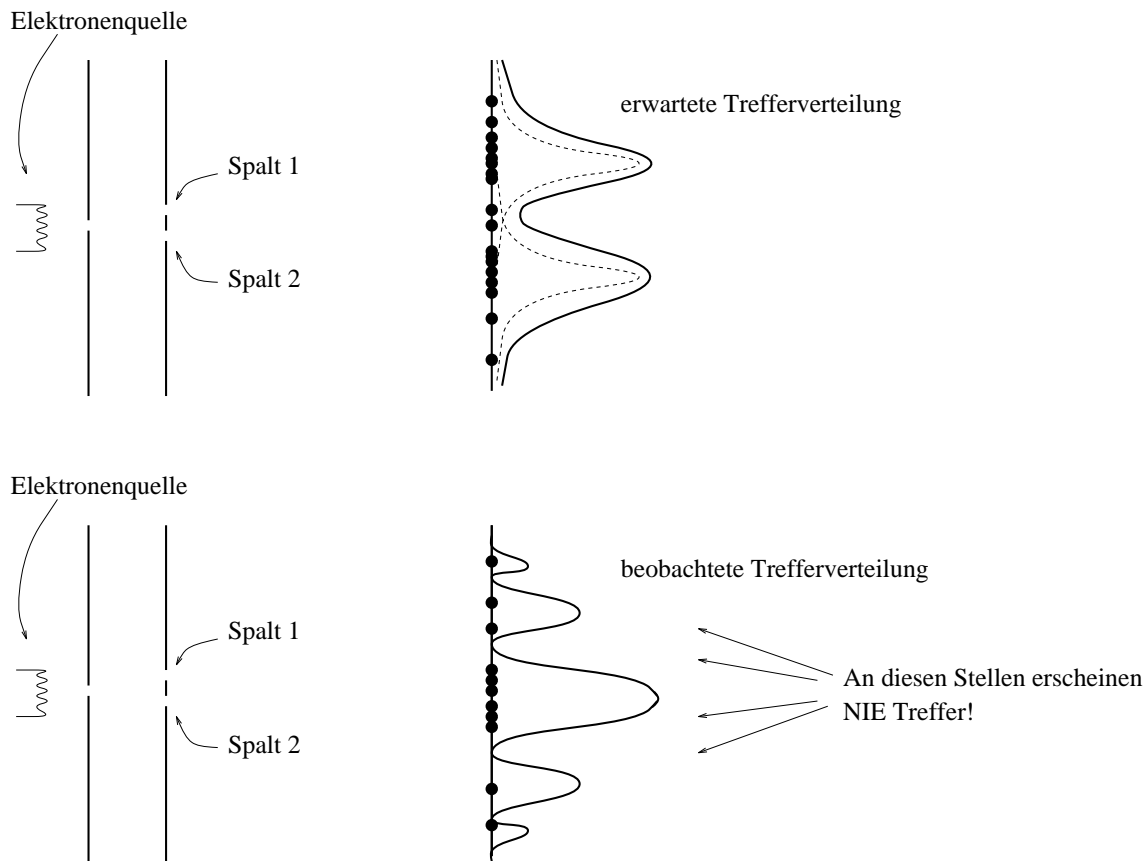


Abbildung 8: Trefferverteilungen für den Fall, daß beide Spalte offen sind. Die „Schrotflintenverteilung“, die man erwarten würde, steht in krassem Widerspruch zu der beobachteten Verteilung.

Insbesondere gibt es Stellen auf dem Schirm, die mit Pünktchen übersät waren, als entweder nur der eine oder nur der andere Spalt offen war, die aber nun *nie* getroffen werden. Dieses Verhalten ist aus der Wellentheorie, etwa bei Wasserwellen, als „Interferenz“ wohlbekannt: Wellenberge und Wellentäler können sich gegenseitig auslöschen. Aber Wasserwellen sind kontinuierliche Objekte und „prasseln“ nicht. Also ist dieses Phänomen höchst bemerkenswert. Woher „weiß“ das Teilchen, das durch einen der Spalte läuft, ob

der andere Spalt offen oder geschlossen ist, um gegebenenfalls „entscheiden“ zu können, welche Stellen gemieden werden müssen?

Das Doppelspaltexperiment gilt als zentrales Beispiel zur Illustration des „Welle-Teilchen-Dualismus“. Es muß aber betont werden, daß nun jeder Leser, der dieses Experiment wie eben *beschreiben* kann, nicht mehr und nicht weniger vom „Welle-Teilchen-Dualismus“ verstanden hat als die allermeisten Physiker (genau das meinte Feynman in dem vorausgegangenen Zitat). Daß wir damit zum Herzen des Problems vorgestoßen sind, macht ein weiteres Zitat von Richard Feynman (1989) zum Doppelspaltexperiment deutlich:

We choose to examine a phenomenon which is impossible, *absolutely* impossible, to explain in any classical way, and which has in it the heart of quantum mechanics. In reality it contains the *only* mystery. We cannot make the mystery go away by ‘explaining’ how it works.

Nun zurück zu den beiden konkurrierenden Sichtweisen der Matrizenmechanik von Heisenberg und der Wellenmechanik von Schrödinger. Was wurde daraus? Es setzte sich die Sichtweise von Bohr und Heisenberg durch, die heute als „Kopenhagener Deutung der Quantenmechanik“ bekannt ist und in der einen oder anderen Version den Studenten gelehrt wird. Diese allerdings nirgends klar formulierte „Deutung“ soll hier nur mit einigen Schlüsselsätzen umrissen werden, die den philosophischen Anspruch dieser „Deutung“ unterstreichen:

- A complete elucidation of one and the same object may require diverse points of view which defy a unique description. Indeed, strictly speaking, the conscious analysis of any concept stands in a relation of exclusion to its immediate application (Bohr 1934, in Jammer 1974, *The philosophy of quantum mechanics*).
- Um die 1S-‘Bahn’ zu messen, müßte nämlich das Atom mit Licht beleuchtet werden, dessen Wellenlänge jedenfalls kürzer als 10^{-8} cm ist. Von solchem Licht aber genügt ein einziges Lichtquant, um das Elektron völlig aus seiner ‘Bahn’ zu werfen (weshalb von einer solchen Bahn immer nur ein einziger Raumpunkt definiert werden kann), das Wort ‘Bahn’ hat also hier keinen vernünftigen Sinn. (W. Heisenberg, *Physik und Philosophie*)
- The idea of an objective real world whose smallest parts exist objectively in the same sense as stones or trees exist, independently of whether or not we observe them... is impossible.... (W. Heisenberg: *Physics and Philosophy*, New York: Harper and Row 1958, S. 129.)
- It is clear that [the result of the double-slit experiment] can in no way be reconciled with the idea that electrons move in paths ... In quantum mechanics there is no

such concept as the path of a particle. (L.D. Landau und E.M. Lifshitz, *Quantum Mechanics: Non-Relativistic Theory*, Addison-Wesley (1958), S. 2)

Auch Max Born, der ja anfangs durchaus die Vorstellung von Teilchenbahnen hatte, die irgendwie durch die Wellenfunktion bestimmt sind, schloß sich später dieser Deutung an:

- No concealed parameters can be introduced with the help of which the indeterministic description could be transformed into a deterministic one. Hence if a future theory should be deterministic, it cannot be a modification of the present one but must be essentially different. (Born, 1949).

Die prominentesten Gegner waren (und blieben) Schrödinger und Einstein („Gott würfelt nicht.“):

- Bohr’s ... approach to atomic problems ... is really remarkable. He is completely convinced that any understanding in the usual sense of the word is impossible” (Brief an Wien, zitiert in W. Moore: *Schrödinger*. Cambridge: Cambridge University Press 1989, S. 228.)
- ...the essentially statistical character of contemporary quantum theory is solely to be ascribed to the fact that this (theory) operates with an incomplete description of physical systems. (in P. A. Schilpp, (Hrsg.), *Albert Einstein, Philosopher-Scientist*. Evanston, Ill.: Library of Living Philosophers 1949, S. 666.)

Was sind die Argumente, die zu diesen, ohne zu übertreiben, radikalen philosophischen Schlußfolgerungen der Kopenhagener Deutung geführt haben? Warum ist die Möglichkeit einer deterministischen Theorie, die ja Born in seiner eingangs auszugsweise zitierten Arbeit noch explizit offenläßt und von deren prinzipieller Möglichkeit auch Schrödinger und Einstein überzeugt waren, unmöglich geworden?

Wir können die Situation noch an einem anderen Beispiel verdeutlichen. Stellen Sie sich vor, Sie können eine Kiste, in die Sie nicht hineinsehen können, von der Seite und von oben beleuchten. Auf zwei Schirmen sehen Sie zwei verschiedene Schattenwürfe: einmal ein Kreis, und einmal ein Quadrat (Abb. 9).

Die Analogie ist nun die folgende: Die Beleuchtung von der Seite entspricht dem Doppelspaltversuch mit nur einem geöffneten Spalt. Das Quadrat soll dann den „Teilchencharakter“ symbolisieren. Die Beleuchtung von oben entspricht dem Versuch, wenn beide Spalte geöffnet sind. Der Kreis soll die Welleneigenschaften symbolisieren. Das „Kreis-Quadrat-Problem“, also eine einheitliche Erklärung für das Auftreten der scheinbar unvereinbaren Schattenwürfe zu finden, entspricht damit dem „Welle-Teilchen-Dualismus“, also dem Problem, eine einheitliche Erklärung für das Auftreten von Welleneigenschaften und Teilcheneigenschaften ein und desselben „Objekts“ zu finden. Der Schlußfolgerung,

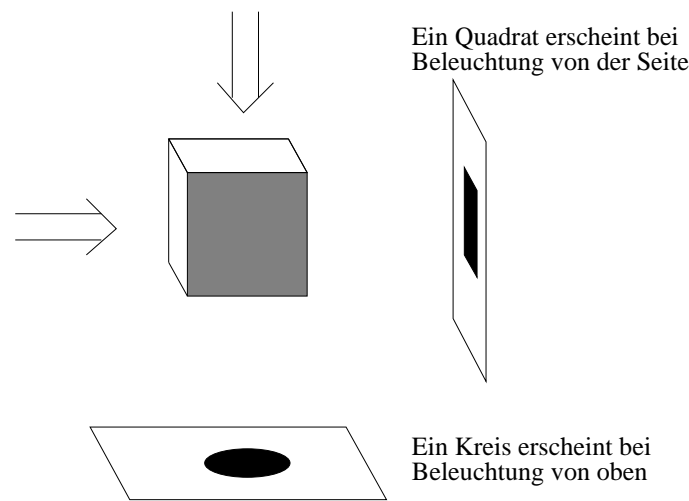


Abbildung 9: Das „Kreis-Quadrat-Paradoxon“

die nun beim Doppelspaltexperiment von den Physikern nach der Kopenhagener Deutung gezogen wird, entspräche für unser Beispiel: „Es gibt kein Objekt, das gleichzeitig rund und eckig ist.“ Aber: Kann man sich sicher sein?

Was sind nun die zusätzlichen Argumente, die im Falle des Doppelspaltversuchs zu dem radikalen Schluß führen, seinem Ergebnis läge keine verstehbare Realität zugrunde? Das damals als schlagend angesehene Argument wurde von dem Mathematiker John von Neumann gegeben.

3 Verborgene Parameter und der Beweis von John von Neumann

Eine Theorie, die zusätzlich zur Wellenfunktion noch Parameter enthält, die insbesondere das tatsächliche Resultat einer Messung festlegen – die Wellenfunktion legt ja nur Wahrscheinlichkeiten fest – nennt man eine Theorie mit „verborgenen Parametern“. Der „intrinsische Zufall“ der Quantentheorie würde ersetzt werden durch den wohlbekanntem Mechanismus, durch den Zufall aus einer deterministischen Theorie folgt – deterministisches Chaos, das wir anfangs besprochen haben. Die „verborgenen Parameter“, die das scheinbar zufällige Ergebnis bei einem Münzwurf determinieren, sind natürlich einfach der Anfangsort und der Anfangsimpuls der Münze.

J. v. Neumann (1932) erbrachte einen mathematischen Beweis, daß es unmöglich ist, die statistischen Vorhersagen der Quantenmechanik mittels irgendwelcher „verborgener Parameter“ zu erklären. Er kommt zu folgendem Schluß:

It is therefore not, as is often assumed, a question of reinterpretation of quantum mechanics – the present system of quantum mechanics would have to be objectively false in order that another description of the elementary process than the statistical one be possible.

Damit schien es, als sei ein für alle Mal die Frage nach der Existenz von verborgenen Parametern, die Quantenmechanik zu einer verstehbaren, deterministischen Theorie machen würden, vom Tisch: Es geht schlichtweg nicht.

4 Bohmsche Mechanik

Wie eine Bombe schlug 1952 die von David Bohm entwickelte „Verborgene-Parameter-Theorie“, die wir heute „Bohmsche Mechanik“ nennen, in diese Überzeugungen ein, obwohl der Titel der Originalarbeit „A suggested interpretation of the quantum theory in terms of ‘hidden’ variables“ recht vorsichtig gewählt war. Viele Jahre zuvor hatte Luis de Broglie (1924) eine ähnliche Idee vorgeschlagen, hatte aber nach scharfer Kritik einiger namhafter Kollegen bald wieder davon abgelassen.

Jahre später schrieb J. Bell (Bell 1987, S. 160):

In 1952 I saw the impossible done. It was in papers by David Bohm. Bohm showed explicitly how parameters could indeed be introduced, into nonrelativistic wave mechanics, with the help of which the indeterministic description could be transformed into a deterministic one.

Bell betonte, daß es ihm noch wichtiger erscheint, daß die „Beobachterin“ und der Begriff der „Messung“, die Aufteilung der Welt in beobachtendes Subjekt und beobachtetes Objekt, in der *Formulierung* dieser Theorie nicht auftreten, ganz im Gegensatz zur üblichen Formulierung der Quantenmechanik. Deren Standard-Probleme – stichwortartig seien Schrödingers Katze und das Kollaps- oder Meßproblem angeführt, die alle nur dadurch entstehen, daß man die Wellenfunktion als *vollständige* Beschreibung eines quantenmechanischen Systems ansieht – sind auf denkbar einfache Weise gelöst.

Bohmsche Mechanik ist, wie Newtonsche Mechanik, eine deterministische Theorie für die Bewegung von Partikeln. Der Zustand, also die vollständige Beschreibung, eines physikalischen Systems von N Teilchen mit Massen m_1, \dots, m_N in Bohmscher Mechanik ist durch die Orte aller Teilchen *und* die Wellenfunktion gegeben, also durch $((x_1, \dots, x_N), \psi)$. Die Orte der Teilchen sind also in dieser Theorie die „verborgenen Parameter“.

Die Dynamik des Systems ist gegeben durch

- die Schrödingergleichung (3) für die Wellenfunktion ψ , wie gehabt,
- und die Bohmsche Gleichung für die Bahnen der Teilchen (eine gewöhnliche Differentialgleichung erster Ordnung)

$$\frac{dx_k}{dt} = v_k^{\psi_t}(x_1, \dots, x_N) \quad \text{mit} \quad v_k^{\psi_t} = \frac{\hbar}{m_k} \operatorname{Im} \frac{\nabla_k \psi}{\psi}. \quad (4)$$

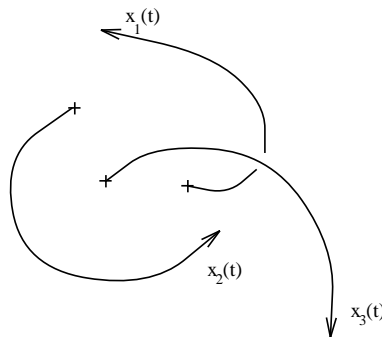


Abbildung 10: Die Bahnen von drei Teilchen im Raum. Die Bahnen hängen nur von den Anfangsorten und der speziellen Wellenfunktion ab. Die Pfeilenden stellen die Orte der Teilchen zur Zeit t dar, die Startpunkte sind durch Kreuze gekennzeichnet.

In der Newtonschen Mechanik wird die Änderung der Geschwindigkeiten, die Beschleunigung, von dem Kraftgesetz festgelegt; in der Bohmschen Mechanik ist es die Wellenfunktion, die die Änderung der Orte, die Geschwindigkeit $v(t) = \frac{d}{dt}x(t)$, festlegt. Die Wellenfunktion bestimmt zu jedem Zeitpunkt die Geschwindigkeit aller Teilchen gemäß der Vorschrift in Gleichung (4), physikalisch gesehen kann sie also als „Führungsfeld“ aufgefaßt werden. So gesehen ist Bohmsche Mechanik sogar einfacher und natürlicher als Newtonsche Mechanik, in der die Kraft die Rolle eines Führungsfeldes für die Geschwindigkeiten hat, und erst indirekt die Veränderung der Orte bestimmt.

Was dabei hier wichtig ist: Die Anfangswellenfunktion und die Anfangsorte bestimmen Wellenfunktion und Orte der Teilchen *für alle Zeiten*. Die Theorie ist also vollständig deterministisch. Der „Zufall“ kommt wie in der klassischen Physik ins Spiel: Verschiedene Anfangsorte des Systems ergeben verschiedene Meßergebnisse. Der „Prozentsatz“ der Anfangsorte, die zu einem bestimmten Meßergebnis führen, ist dann die „Wahrscheinlichkeit“, daß dieses Ergebnis gefunden wird; diese wiederum ist überprüfbar über die relativen Häufigkeiten der Meßergebnisse, die im Experiment gefunden werden. Genauer kann man sagen, daß ein Ensemble von Systemen mit Wellenfunktion ψ zufällige, mit Verteilung $|\psi|^2$ verteilte, Anfangsorte der Teilchen hat (siehe als Beispiel Abb. 11). Die

Streuung der Meßergebnisse erklärt sich aus der Unsicherheit der Anfangsorte. Es folgt aus einer Analyse der Theorie, also aus den beiden Grundgleichungen, daß es *prinzipiell* unmöglich ist, genauere Kenntnis der Anfangsorte zu erlangen, als durch die $|\psi|^2$ -Statistik erlaubt ist. (Das liegt im wesentlichen daran, daß man beim Versuch, den Ort näher zu bestimmen, die Wellenfunktion mit verändert.) Eine sorgfältige Analyse dieser Fragestellungen findet man in „Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty“ von Dürr, Goldstein Zanghí (1992).

Bohm begründete, daß seine Theorie auf der Ebene von Messungen mit den quantenmechanischen Vorhersagen übereinstimmt. Über diese Aussage ist viel diskutiert worden und wird noch viel diskutiert. Mittlerweile geben selbst die meisten Kritiker zu, daß sie richtig ist. Es wird dann oft weiter argumentiert, daß damit Bohmsche Mechanik auch sofort überflüssig wird, denn sie reproduziert ja nur, ohne neue Vorhersagen zu machen. Darauf sollte man folgendes bemerken: Bohmsche Mechanik stellt, im Gegensatz zur Kopenhagener Deutung oder zu verwandten Sichtweisen der Quantenmechanik, eine präzise formulierte fundamentale Theorie dar, aus der sich die Regeln der Quantenmechanik offenbar ableiten lassen. Die Situation ist ähnlich wie in der Thermodynamik, die aus der klassischen Mechanik mit den Methoden der statistischen Mechanik *ableitbar* ist. Doch der „Beweis“, daß es „wirklich“ Atome gibt, wurde dann erst durch Einsteins Arbeiten zur Erklärung der Brownschen Bewegung erbracht, bei der die einzelnen Stöße der Atome direkt sichtbar sind. Dies ist ein weites und interessantes Kapitel, welches ausführlich z.B. von Kuhn (1991) und Feyerabend (1993) diskutiert wird.

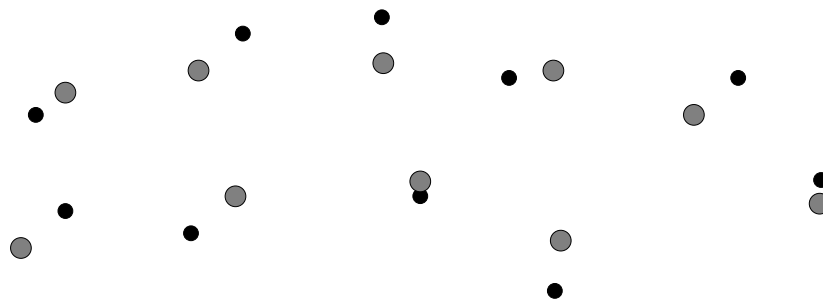
Es ist wohl nicht zu erwarten, daß sich ein ähnlich schlagendes Experiment zur „Falsifizierung“ der Kopenhagener und verwandter Deutungen finden läßt, dazu sind diese zu „flexibel“. Es deutet sich jedoch an, daß Bohmsche Mechanik tatsächlich neue Vorhersagen zu machen gestattet, in Bereichen, in denen der Formalismus der Quantenmechanik zu vage ist, um präzise und eindeutige Aussagen zu treffen. Dies führt aber an dieser Stelle zu weit, und der interessierte Leser sei auf die diesbezüglich angegebene Literatur verwiesen.

Wir wollen hier nur einige der schon angeführten Paradebeispiele im Lichte der Bohmschen Mechanik betrachten und dabei bereits bekannte aber „unverstandene“ Phänomene „verstehen“: Das Wasserstoffatom, Wellenpakete und der Doppelspaltversuch.

4.1 Das Wasserstoffatom im Grundzustand

Wie bewegt sich ein Elektron im Grundzustand des Wasserstoffatoms? Es folgt aus den Bohrschen Gleichungen⁴, daß das Elektron in einer festen Entfernung vom Kern ruht! Das neue dynamische Gesetz sagt also voraus, daß das Elektron nicht in den Kern stürzt (und muß nicht ad hoc postuliert werden, wie etwa im Bohrschen Atommodell). Wie kommt es dann zur $|\psi|^2$ -Statistik, der „Wahrscheinlichkeitswolke“ im Orbitalmodell der Chemiker? Die „Wahrscheinlichkeitswolke“ sagt nichts anderes aus, als daß man bei Ortsmessungen an einer Vielzahl von Wasserstoffatomen mit Wellenfunktion ψ eine statistische Verteilung findet, die sich der $|\psi|^2$ -Statistik annähert, genau wie man beim Münzwurf nach vielen Versuchen typischerweise gleiche Häufigkeiten von „Kopf“ und „Zahl“ findet, die sich also einer Gleichverteilung annähert.

Ensemble von H-Atomen (Elektronen: ● Protonen: ●)



Verteilung:

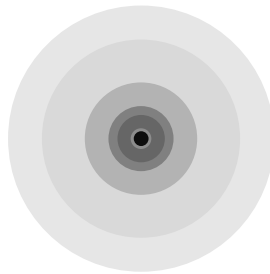


Abbildung 11: Ein Ensemble von Wasserstoffatomen im Grundzustand. Die Aufenthaltswahrscheinlichkeit des Elektrons ist durch die $|\psi|^2$ -Statistik gegeben.

⁴Da der Ortsanteil der Wellenfunktion reell ist, gilt für die Geschwindigkeit $v^\psi = \text{Im} \frac{\nabla \psi}{\psi} = 0$.

4.2 Das Wellenpaket

Schrödinger hatte versucht, den Teilchencharakter durch schmale Wellenpakete zu beschreiben, was aber an der Verbreiterung dieser Pakete im Laufe der Zeit (vergleiche dazu Fig. 2) scheiterte. Nun, in Bohrscher Mechanik gibt es zusätzlich zur Wellenfunktion noch das Teilchen, das natürlich immer einen festen Ort hat, und nicht „zerfließt“.

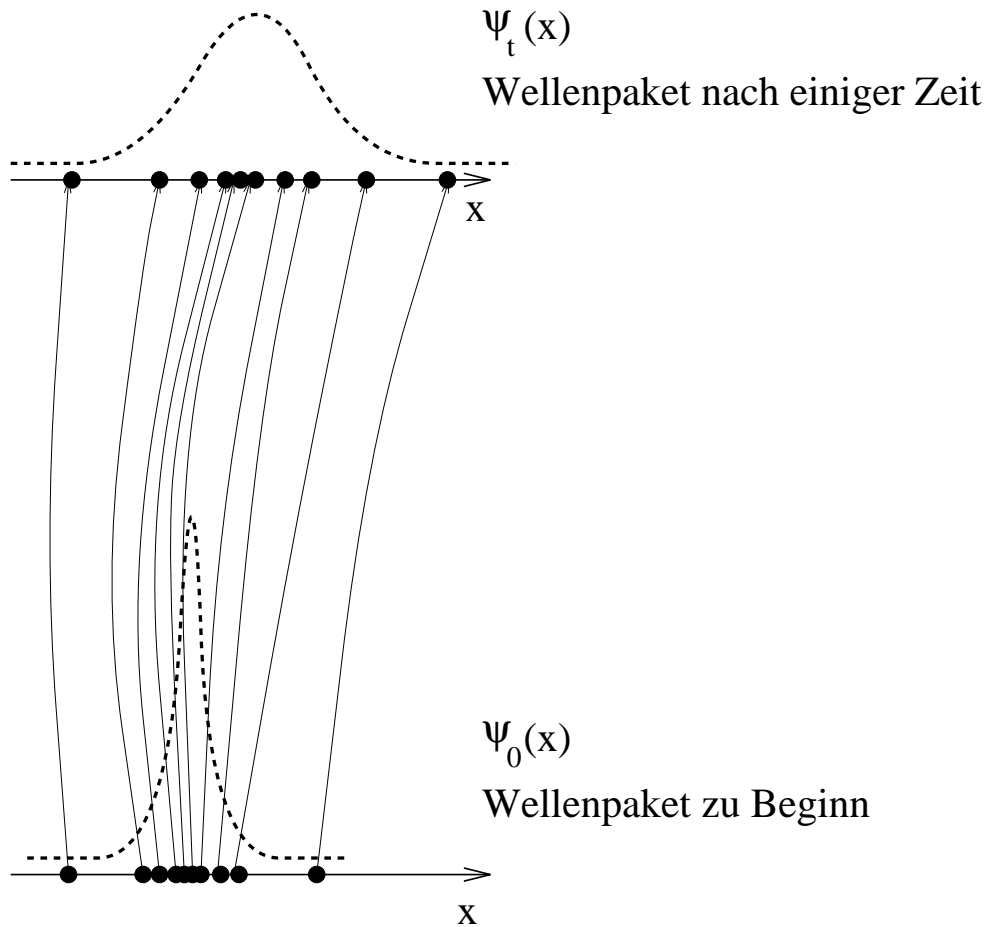


Abbildung 12: Die Wellenfunktion bestimmt die Bewegung des Teilchens. Verschiedene Anfangsorte ergeben verschiedene Bahnen. Die Anfangsorte sind $|\psi_0(x)|^2$ -verteilt, d.h. je größer $|\psi_0(x)|^2$ ist, umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, daß sich dort das Teilchen befindet. Die Teilchenorteorte nach der Zeit t sind $|\psi_t(x)|^2$ -verteilt.

4.3 Der Doppelspaltversuch

Nun kommen wir zum Herzstück des Welle-Teilchen-Dualismus: dem Doppelspaltexperiment. Wir zeigen hier nun gleich die numerisch nach den Bohmschen Gleichungen berechneten möglichen Bahnen der Teilchen, wenn beide Spalte geöffnet sind.

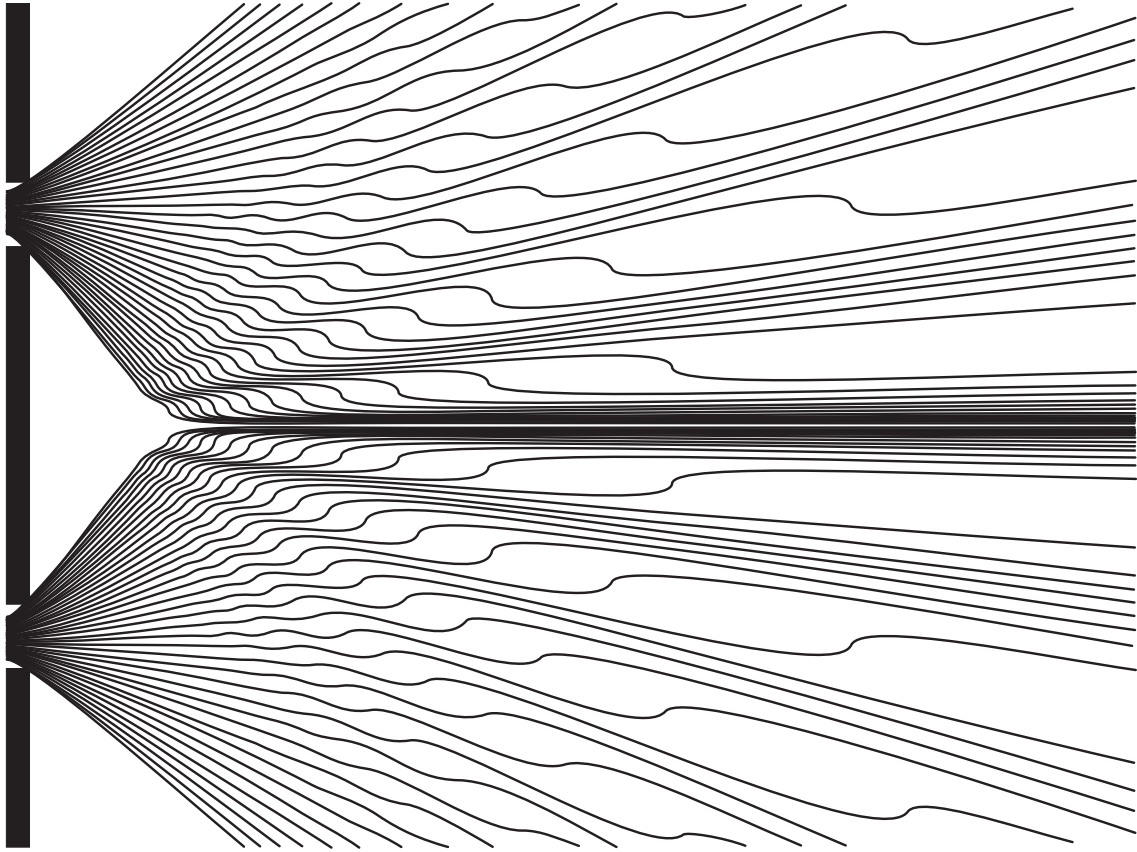


Abbildung 13: Mögliche Bahnen beim Doppelspaltversuch (C. Philippidis, C. Dewdney, B. J. Hiley, *Nouvo Cimento* **52B**, 15 (1979))

Dabei ist wichtig, daß jede Linie eine mögliche Bahn des Teilchens darstellt. Pro Durchlauf wird also, je nach Anfangsbedingung, eine der Bahnen durchlaufen. Falls nur ein Spalt geöffnet ist, findet man gleichmäßig auffächernde Bahnen. Woher „weiß“ das Teilchen, das durch einen der Spalte läuft, ob der andere Spalt offen oder geschlossen ist?

Die Wellenfunktion, die die Bewegung der Teilchen bestimmt, ist in beiden Fällen verschieden! Kann man sich eine einfachere Auflösung des „Welle-Teilchen-Paradoxons“ vorstellen? Wir wollen an dieser Stelle nun auch das „Quadrat-Kreis-Problem“ auf ähnlich simple Weise auflösen:

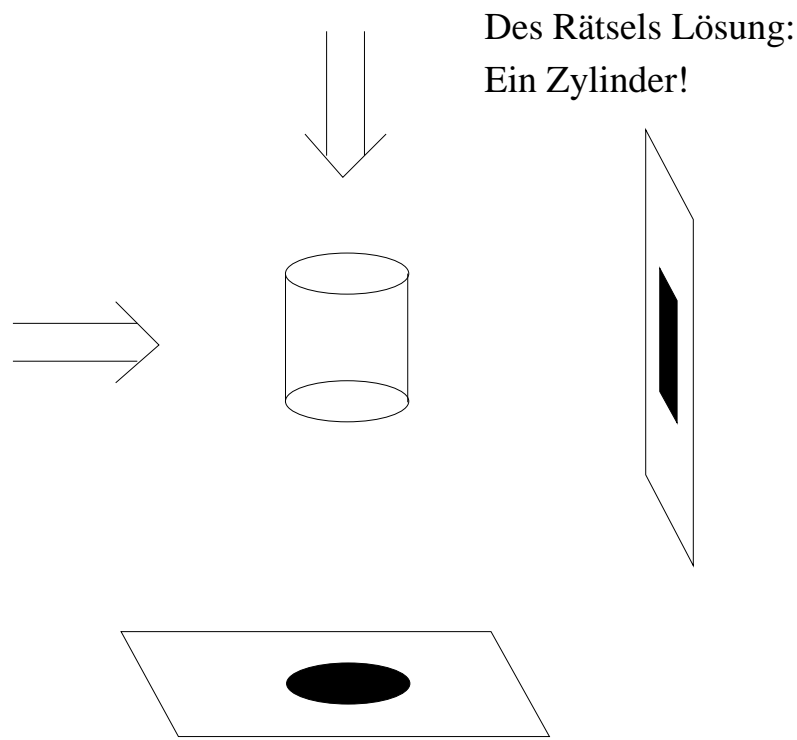


Abbildung 14: Die Auflösung des „Kreis-Quadrat-Paradoxons“

Wenn Sie die Kiste öffnen, erblicken Sie einen Zylinder, dessen Durchmesser gerade so groß ist wie seine Höhe. Das ist des Rätsels Lösung. Die Bohmschen Bahnen, die von der Wellenfunktion geführt werden, entsprechen also dem Zylinder in der Auflösung des „Quadrat-Kreis-Problems“!

Man sollte sich nicht irreleiten lassen durch das „komische“ Verhalten der Trajektorien nach dem Doppelspalt. „Komisch“ erscheinen sie deswegen, weil sie der durch die klassische Mechanik entwickelten „Intuition“ widersprechen, in der kräftefreie Teilchen auf geradlinigen Bahnen laufen. Doch klassische Mechanik ist ja ohnehin nicht allgemein gültig und muß daher ersetzt werden. Bohmsche Mechanik ist eine ganz anders geartete Theorie, in der ja auch das Konzept der Kraft gar nicht auftaucht. Trotzdem kann gezeigt werden, daß im makroskopischen Bereich die Bohmschen Bahnen näherungsweise den klassischen Gesetzen genügen, in denen das Konzept „Kraft“ zur Beschreibung des Verhaltens der Bahnen sinnvoll ist.

Wir zitieren noch Bell (S. 191) zum Doppelspaltversuch:

Is it not clear from the smallness of the scintillation on the screen that we have to do with a particle? And is it not clear, from the diffraction and interference patterns, that the motion of the particle is directed by a wave? De Broglie showed in detail how the motion of a particle, passing through just one of two holes in screen, could

be influenced by waves propagating through both holes. And so influenced that the particle does not go where the waves cancel out, but is attracted to where they cooperate. This idea seems to me so natural and simple, to resolve the wave-particle dilemma in such a clear and ordinary way, that it is a great mystery to me that it was so generally ignored.

5 Die Rolle von J.S. Bell

5.1 Der Beweis von von Neumann

Nun, wie kann das „Unmögliche“ aber sein? Gab es nicht physikalische und mathematische Argumente, die eine Theorie wie die Bohmsche Mechanik als Grundlage der Quantenmechanik ausschließen? Entweder muß doch etwas faul sein an dieser Theorie, oder an dem „Beweis“, der gegen ihre Existenz spricht.

Erst etwa 10 Jahre nach der Veröffentlichung von Bohms Arbeiten konnte J.S. Bell diesen Umstand aufklären: Die Annahmen in von Neumanns Beweis, aus denen er einen Widerspruch ableitet, treffen für Bohmsche Mechanik nicht zu, und man findet eigentlich auch keinen guten Grund dafür, warum diese Annahmen überhaupt von einer „Verborgene-Parameter-Theorie“ erfüllt sein sollten⁵.

Bell geht sogar soweit, zu sagen „The proof of von Neumann is not merely false, but *foolish*.“ (Interview in *Omni*, Mai 1988, S. 88, zitiert bei Mermin).

5.2 Nichtlokalität

Doch es bleibt ein weiteres „Problem“ der Bohmschen Mechanik bestehen: Sie ist „nicht-lokal“, wie Bohm in seinen Originalarbeiten deutlich betont hatte.

Die Bewegung eines Teilchens hängt von den Orten aller anderen Teilchen ab! Das sieht man an der Grundgleichung (4): Die Geschwindigkeit des k -ten Teilchens zur Zeit t hängt vom Ort aller Teilchen *zu diesem Zeitpunkt t* , also instantan, ab, egal wie weit diese entfernt sind.

Diese Abhängigkeit nimmt noch dazu nicht einmal mit dem Abstand ab (wie etwa bei der ebenfalls nichtlokalen Gravitationskraft in der Newtonschen Mechanik, die ja bekanntlich mit dem Quadrat des Abstands abfällt)! Damit wird klar, daß die Frage nach der Existenz

⁵Von Neumann fordert im wesentlichen, daß eine eindeutige Zuordnung zwischen den „verborgenen Parametern“ und den quantenmechanischen Operatoren (Matrizen) bestehen soll, was sich schnell als unmöglich herausstellt. Aber in der Bohmschen Mechanik tauchen Operatoren in der Formulierung der Theorie überhaupt nicht auf, sondern sind abgeleitete Größen, ähnlich dem Druck und der Temperatur in der statistischen Mechanik. Eine eindeutige Zuordnung der „verborgenen Parameter“, also der Orte der Teilchen, zu Operatoren ist weder gegeben noch ist die Forderung danach physikalisch motivierbar.

von *Untersystemen* alles andere als trivial ist, denn jeder Teil hängt vom Ganzen ab. Das Verhalten des Ganzen läßt sich *nicht* aus dem Verhalten der Teile ableiten! Wir wollen hier auf diese Frage nicht weiter eingehen, sondern auf die ausführliche Analyse dieser Fragestellungen in der bereits genannten Arbeit von Dürr, Goldstein und Zanghí (1992) hinweisen.

Bell ging nun weiter und untersuchte die physikalisch interessante Frage, ob es eine *lokale* Theorie geben kann, die wie die Bohmsche Mechanik die Quantenmechanik umfaßt, d.h. deren Statistiken reproduziert, aber keine instantanen Fernwirkungen beinhaltet.

Die in meinen Augen eigentliche „Revolution“, die sich für das Weltbild der Physik ergibt, besteht nun in der klaren Antwort, die er auf seine Frage findet: *NEIN!* Das ist der Inhalt der sogenannten Bellschen Ungleichung: Die Korrelationen zwischen Meßergebnissen an verschiedenen Orten können für eine lokale Theorie (ohne Fernwirkungen) eine bestimmte Grenze nicht überschreiten. Die quantenmechanisch vorhergesagten Korrelationen für bestimmte Experimente respektieren diese Schranke aber im allgemeinen *nicht!* Damit war die scheinbar „philosophische“ Frage nach der Lokalität der Natur in den Bereich der experimentellen Überprüfbarkeit gerückt: Wenn die quantenmechanischen Korrelationen in einem Experiment bestätigt werden, so daß die Bellsche Ungleichung verletzt ist, dann gibt es instantane Fernwirkungen. Die Experimente wurden gemacht (Aspect 1983 und mittlerweile viele andere), und die quantenmechanischen Vorhersagen wurden bestätigt. Das ist nicht nur eine phantastische Bestätigung der Quantenmechanik und damit der Bohmschen Mechanik als deren Grundlage, sondern eine Aussage, die von der speziellen Theorie sogar unabhängig ist: Natur ist nichtlokal, es gibt instantane Fernwirkungen!

Es entbehrt nun nicht einer gewissen Groteskheit, daß selbst in jüngerer Zeit (z.B. E. Wigner (1976) „In my opinion, the most convincing argument against the theory of hidden variables was presented by J.S. Bell“, oder der Leserbrief zum Artikel von D. Albert im „Spektrum der Wissenschaft“, Mai 1995, und die Antwort der Redaktion) das weitverbreitete Mißverständnis besteht, daß Bells Arbeit, als Nachfolgearbeit von von Neumann, endgültig die Existenz von verborgenen Parametern ausschließt.

Was Bell gezeigt hat, ist, daß es keine *lokalen* verborgenen Parameter gibt, also keine lokale Theorie für die quantenmechanischen Statistiken. Darüber hinaus war Bells Ausgangspunkt die Einsicht, daß Bohmsche Mechanik, in diesem Kontext eine „nichtlokale Verborgene-Parameter-Theorie“, auf alle Fälle die quantenmechanischen Statistiken reproduziert. Jede Theorie, die solches leistet, *muß* nichtlokal sein!

Die Nichtlokalität ist das wahrlich Revolutionäre an der Quantenmechanik. Wir erinnern uns, daß das Revolutionäre an dem anderen Grundpfeiler der heutigen Physik, der Relativitätstheorie, die Aufgabe der absoluten Gleichzeitigkeit war. Die eine Theorie hat ganz klar instantane Fernwirkungen und scheint es daher zu ermöglichen, dies zur Bestimmung der Gleichzeitigkeit zweier Ereignisse zu verwenden. In der anderen Theorie

gibt es solch eine Gleichzeitigkeit nicht. Aus diesen beiden scheinbar so verschiedenen Theorien ein einheitliches Gebäude zu errichten, ist eine höchst interessante – wenn nicht *die* – Aufgabe für die zukünftige Physik.

6 Moral

- Die scheinbare Spannung zwischen Quantenmechanik und Determinismus wird durch die Bohmsche Mechanik aufgelöst: Bohmsche Mechanik ist eine vollständig deterministische Theorie, die die Phänomene der nichtrelativistischen Quantenmechanik umfaßt. Doch das eigentlich Wichtige besteht darin, daß Bohmsche Mechanik die quantenmechanischen Phänomene erklärt ohne auf eine unpräzise Aufspaltung Subjekt-Objekt, Beobachterin-System etc. zurückgreifen zu müssen. Die große Aufgabe der heutigen (und wohl auch zukünftigen) Physik wird wohl darin bestehen, eine ebenso klare relativistische Quantentheorie zu finden. Dabei werden die Nichtlokalität der Quantenmechanik und die lokale Struktur und die fehlende absolute Gleichzeitigkeit der Relativitätstheorie die Rahmenbedingungen sein.
- Die Geschichte der Quantenmechanik und die Unterdrückung der Bohmschen Mechanik stellt ein Paradebeispiel für die Thesen von Kuhn und Feyerabend zur Struktur wissenschaftlicher Revolutionen dar: Ausschlaggebend für die Akzeptanz einer Theorie sind nicht immer rationale Argumente, sondern oft vorherrschende Dogmen und Schulen. Dazu noch einmal Bell (1987), S. 160:

„But why then had Born not told me of this ‘pilot wave’? If only to point out what was wrong with it? Why did von Neumann not consider it? More extraordinarily, why did people go on producing ‘impossibility’ proofs, after 1952, and as recently as 1978? When even Pauli, Rosenfeld, and Heisenberg, could produce no more devastating criticism of Bohm’s version than to brand it as ‘metaphysical’ and ‘ideological’? Why is the pilot wave picture ignored in text books? Should it not be taught, not as the only way, but as an antidote to the prevailing complacency? To show that vagueness, subjectivity, and indeterminism, are not forced on us by experimental facts, but by deliberate theoretical choice?“

Das Bemerkenswerte an dieser Geschichte ist aber, meines Erachtens, daß selbst in einer gesellschaftlich so hoch angesehenen Naturwissenschaft wie der Physik (auch der Mathematik, als „Königin“ aller Wissenschaften) subjektive Elemente wie Autoritätenhörigkeit, Axiomengläubigkeit und die Bereitschaft, Regeln zu befolgen, ohne sie mit „gesundem Menschenverstand“ zu hinterfragen, selbst wenn sie jedem gutem Geschmack und Gefühl widerstreben, eine derart beachtliche Rolle spielen. Dies sollte sowohl den Naturwissenschaftler als auch den Laien nachdenklich

7 Literatur

Ich will hier für die verschiedenen Interessen eine kleine, natürlich unvollständige Auswahl zusammenstellen.

Eine allgemeinverständliche Einführung in Grundfragen der modernen Physik, insbesondere der Quantenmechanik, gibt Richard Feynman in „The Character of a physical law“, MIT press, 1989¹⁵, Roger Penrose, *The Emperor's new Mind*, Oxford University Press, New York-Oxford (1989) (und deren deutsche Übersetzungen) als auch Nick Herbert, *Quantenrealität: jenseits der neuen Physik*, Birkhäuser Verlag, Basel (1987).

Eine sehr gute Darstellung der Bohmschen Mechanik und der wissenschaftspolitischen Umstände ihrer Nichtbeachtung findet sich in *Scientific American*, Mai 1994, „Bohm's Alternative for Quantum Mechanics“ von D. Albert und die entsprechende Übersetzung im *Spektrum der Wissenschaft*, Juli 1994. Der Bezug zum Beweis von von Neumann wird vorzüglich dargestellt bei T.J. Pinch, „What does a proof do if it does not prove?“, in *The Social Production of Scientific Knowledge*, Sociology of sciences, Vol. I, D. Reidel Publishing Company, Dordrecht-Holland (1977). Sehr lesenswert ist auch „Against measurement“, *Phys. World* **3**, 33 (1990), eine der letzten Arbeiten von John S. Bell.

In allgemeinerem Rahmen, aber jeweils auch mit Bezug zur Bohmschen Mechanik, sind noch die Standardwerke zur Wissenschaftstheorie

- P. Feyerabend, *Wider den Methodenzwang*, Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft **597**, (1993⁴).
- T.S. Kuhn, *Die Struktur wissenschaftlicher Revolutionen*, Suhrkamp Taschenbuch Wissenschaft **25** (1991¹¹).

zu nennen. Weitere, eher für das Fachpublikum geeignete Arbeiten sind

- A. Aspect, Experiments on Einstein-Podolsky-Rosen-type correlations with pairs of visible photons, in *Quantum Concepts in Space and Time*, R. Penrose und C.J. Isham (Hrsg.), Oxford University Press (1986).
- J.S. Bell, *Speakable and Unsayable in Quantum Mechanics*, Cambridge University Press (1987).
- D. Bohm and B. J. Hiley, *The Undivided Universe: An Ontological Interpretation of Quantum Theory*, Routledge & Kegan Paul, London, (1993)
- D. Dürr, S. Goldstein, and N. Zanghí, Quantum equilibrium and the origin of absolute uncertainty, *Jour. Stat. Phys.*, **67**, 843 (1992)
- P. Holland, *The quantum theory of motion*, Cambridge University press, (1993)

- D. Mermin, Hidden variables and the two theorems of John Bell, *Rev. Mod. Phys.* **65**, 803 (1993).

Die wichtigsten Originalarbeiten (viele davon sind in *Quantum Theory and Measurement*, J.A. Wheeler, W.H. Zurek (Hrsg.), Princeton series in physics, Princeton University Press, Princeton, New Jersey (1983), abgedruckt) finden sich in

- D. Bohm, A suggested interpretation of the quantum theory in terms of "hidden" variables I+II, *Phys. Rev.* **85**, 166 (1952).
- M. Born, Quantenmechanik der Stoßvorgänge, *Z. f. Physik* **37**, 863 (1926).
- M. Born, Quantenmechanik der Stoßvorgänge, *Z. f. Physik* **38**, 233 (1926).
- L. de Broglie, A tentative theory of light quanta, *Philos. Mag.* **47**, 446 (1924).
- W. Heisenberg, Über die quantentheoretische Umdeutung kinematischer und mechanischer Beziehungen, *Z. f. Physik* **33**, 879 (1925).
- J.v. Neumann, *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik*, Springer Verlag, Berlin, (1932).
- E. Schrödinger, Quantisierung als Eigenwertproblem, *Ann. Phys.* **79**, 361 (1926).

Wenn die derzeit als aussichtsreichsten Alternativen zur Bohmschen Mechanik behandelten Theorien interessieren, wird vielleicht bei „GRW“, bzw. „GRWP“ fündig: G.C. Ghirardi, A. Rimini, and R. Weber, Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems, *Phys. Rev. D* **34**, 470-491 (1986) sowie G.C. Ghirardi, P. Pearle, and A. Rimini, *Phys. Rev. A* **42**, 78 (1990). Ein anderer Zugang hat sich um die Namen Griffiths, Omnes, Gell-Mann und Hartle unter dem Namen „Consistent histories“ oder „Decoherent histories“ kristallisiert, und dieses Programm wird etwa von M. Gell-Mann in *The Quark and the Jaguar* New York: W. H. Freeman and Company (1994), dargestellt.

In der Arbeit „Can quantum mechanics be put to a test?“, die zusammen mit Dürr, Goldstein und Zanghí in Vorbereitung ist, diskutieren wir die Frage nach neuen Vorhersagen der Bohmschen Mechanik. In der Arbeit in Vorbereitung „EPR-Bell nonlocality and realistic deterministic Lorentz invariant quantum theory“ von Berndl, Dürr, Goldstein und Zanghí wird das untersucht, was der Titel vermuten läßt. Ein Buch, das ausschließlich diesem Themenkreis gewidmet ist: „Quantum Non-locality and Relativity“, Blackwell, Cambridge (1993), von Tim Maudlin. Fritz Erbschäuser untersucht in seiner Zulassungsarbeit „Quantenmechanik im Schulunterricht“ LMU, München (1994), die Möglichkeit einer Darstellung der Bohmschen Mechanik in der Oberstufe. Für diejenigen, die an dem Beweis der globalen Existenz von Lösungen oder an Streutheorie im Rahmen Bohmscher Mechanik interessiert sein sollten, erlaube ich mir, auf die Dissertation „Zur Existenz

der Dynamik in Bohmschen Systemen“ von K. Berndl und meine Dissertation *Streutheorie aus der Sicht Bohmscher Mechanik*, beide erschienen im Wissenschaftsverlag Mainz, Aachen (1995), hinzuweisen.

Weiter möchte ich den langjährigen Mitgliedern unserer Arbeitsgruppe, Frau Dr. Karin Berndl, Herrn Prof. Sheldon Goldstein und Herrn Prof. Nino Zanghí, sowie insbesondere meinem Doktorvater Herrn Prof. Detlef Dürr an dieser Stelle sehr herzlich danken.