

Kapitel 2

Realität und Determinismus in der Quantentheorie

1 Vorbemerkungen

Ähnlich wie die Relativitätstheorie legt die Quantentheorie einen allgemeinen begrifflichen Rahmen fest, in den sich alle physikalischen Theorien einzuordnen haben. Während Werner Heisenberg und seine Zeitgenossen anfangs noch glaubten, nur eine Theorie der Atome zu entwickeln, sind nach heutigem Wissen *alle* physikalischen Systeme zwecks korrekter Beschreibung zu „quantisieren“ (womit die Anwendung eines bestimmten formalen Schemas gemeint ist). Im Gegensatz zur Relativitätstheorie, deren neues Begriffssystem zu einer klar definierten, ganz neuartigen Raumzeitgeometrie führte, welche die vorher getrennten Begriffe von Raum und Zeit ersetzt, wird die Quantentheorie häufig aber nur als ein Werkzeug zur Berechnung von Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten bestimmter, weiterhin klassisch zu beschreibender Messergebnisse oder anderer, stochastisch auftretender *Ereignisse* verstanden. Anstelle von neuen kinematischen Konzepten zur Beschreibung der mikroskopischen Realität werden sich widersprechende Begriffe, abgeschirmt durch Unbegriffe wie „Dualität“ oder „Komplementarität“, benutzt oder nur Einschränkungen in der Anwendbarkeit eben der klassischen Begriffe (etwa durch die Heisenbergsche Unschärferelation) eingeführt. Auf die Frage, welche der alternativ benutzten Konzepte denn nun „wirklich“ beschreibe, was jeweils vor sich geht, wurde von der *Kopenhagener Interpretation* die Antwort gegeben, dass den mikrophysikalischen Objekten an sich *gar keine* realen Eigenschaften zukämen. Offenbar ist mit dieser Ablehnung einer mikroskopischen „Realität“ also der Verzicht auf eine konsistente Beschreibung der Mikrowelt gemeint. Je nach persönlicher Einstellung haben sich die Physiker mehr oder weniger pragmatisch mit dieser Situation abgefunden (was für die Mehrheit von ihnen zutrifft), oder sie betrachten sie als skandalös oder unhaltbar und somit vorläufig.

Überarbeitete und ergänzte Fassung des zweiten Teils eines Beitrags (mit dem Titel *Bedeutung und Problematik einiger Grundbegriffe der modernen Physik*) zu dem Band *Philosophische Grundlagen der Wissenschaften*, Wolfgang Marx, Hrsg., Klostermann 1990. Einige Bemerkungen beziehen sich auf Spezifika aus Diskussionen, die der ursprünglichen Publikation vorausgingen. Der erste Teil meines damaligen Beitrags betrifft die Relativitätstheorie und ist in diesem Buch als Kap. 15 zu finden.

Da sich zudem große Schwierigkeiten ergeben, das Zustandekommen der in der Alltagswelt und insbesondere in Form von Messergebnissen beobachteten „klassischen“ Eigenschaften aus dem erfolgreichen Formalismus der Quantentheorie zu verstehen, wurde immer wieder versucht, dessen Gültigkeit irgendwie einzuschränken, was jedoch auf erhebliche Konsistenzprobleme führt. Im Verlauf der Entwicklung mussten die Grenzen seiner Anwendung vielmehr mehrfach ausgedehnt werden, so dass man vielleicht eher durch eine radikale Neuinterpretation der erfolgreichen formalen Theorie weiterkommen mag, was in diesem Buch ausführlich diskutiert werden soll.

2 Der Realitätsbegriff in der Quantenmechanik

Obwohl zu Beginn der dreißiger Jahre die formale Entwicklung der Quantenmechanik bereits abgeschlossen war und sich die Kopenhagener Deutung aufgrund des Verlaufs der Bohr-Einstein-Debatte (und vor allem deren Rezeption in den Lehrbüchern) weitgehend durchgesetzt hatte, begann in den Sechzigern erneut eine Diskussion unter einer Gruppe vornehmlich jüngerer Physiker. Um Missverständnissen vorzubeugen sei zunächst angemerkt, dass diese *neue Diskussion um die Quantenmechanik* keinen ernsthaften Einfluss auf die Anwendungen der Theorie durch den praktisch arbeitenden Physiker hatte, sondern außer einigen neuartigen experimentellen Tests nur ihre Interpretation und damit auch die Frage ihrer Extrapolation auf den bisher nicht experimentell zugänglichen Bereich (etwa die Kosmologie) betraf.

Eine zentrale Rolle bei dieser neuen Diskussion spielten zwei von John Bell im Jahr 1964 geschriebene Arbeiten. In der ersten konnte er zeigen, dass ein bis dahin allgemein akzeptierter, auf John von Neumann zurückgehender Beweis der Unmöglichkeit „versteckter Variablen“ zur Beschreibung einer noch unentdeckten Physik hinter der Quantenmechanik, die die Interpretationsprobleme möglicherweise auf einigermaßen traditionelle Weise lösen könnte, auf nicht gerechtfertigten Annahmen beruht. Im zweiten bewies er aber dafür zwingend, dass alle solchen und mit den nachprüfbaren Aussagen der Quantenmechanik verträglichen Theorien sehr ungewöhnliche Eigenschaften haben, nämlich in einem nichttrivialen Sinn „nichtlokal“ sein müssen. Die Beurteilung dieser Beiträge durch die Physikergemeinde variierte zwischen „Jahrhundertentdeckung“ und „nichts Neues“. Ich halte beide Standpunkte für überzogen, den ersten, weil schon die Entdecker der Quantenmechanik – wenn auch mehr intuitiv und in unterschiedlichem Maße – deren Ungewöhnlichkeit erkannten, den zweiten, weil ihre Wortführer mit der Kopenhagener Deutung (vielleicht voreilig) die radikalste, aber ihrem weltanschaulichen Wunschdenken offenbar nächstliegende von drei wesentlich verschiedenen möglichen Konsequenzen zogen.

Der zweite Beitrag Bells wurde besonders populär, weil er eine experimentelle Überprüfung der Quantenmechanik an einer kritischen Stelle erlaubte. Obwohl deren Aussagen in den später durchgeführten Experimenten (für die Mehrheit der

Beteiligten erwartungsgemäß) nur bestätigt wurden, brachte offenbar erst diese Diskussion viele Physiker dazu, sich der fundamentalen Merkwürdigkeiten der Quantenmechanik angemessen bewusst zu werden. Die Grundidee der Bellschen Argumentation wurde in ihrer einfachsten mir bekannten Form in einem Buch des kürzlich auf einer Bergwanderung tödlich verunglückten Heinz Pagels [1] wie folgt beschrieben:

In einem Experiment werden Paare von „quantenmechanischen Objekten“ (in der Praxis irgendwelche Elementarteilchen) erzeugt, deren hierbei ausschließlich gemeinsames Auftreten in einander gegenüber aufgestellten Zählern nachgewiesen werden kann. (Dabei misst man auch näherungsweise den Ort, an dem die Objekte auftreten, weshalb man sie sich hier als „Partikel“ vorstellen darf. Das ist aber nicht immer der Fall – s. Kap. 3). Diesen Zählern können ein oder mehrere „Filter“ vorangestellt werden, die dadurch charakterisiert sind, dass sie jeweils nur einen Teil (normalerweise genau die Hälfte) der Objekte durchlassen. Diese Filter zeichnen durch ihre Struktur und ihre dadurch bedingte Funktion jeweils eine durch Drehung veränderbare Richtung im Raum aus. Als erstes stellt sich nun heraus, dass jedes der Quantenobjekte für sich, wenn es von *einem* Filter durchgelassen wird, *gleichgerichtete nachfolgende* Filter mit Sicherheit ebenfalls passiert (s. Abb. 2.1). In diesem Sinne kann man den einmal durchgelassenen Objekten also die „Eigenschaft des Durchgelassenwerdens“ für die gewählte Richtung der Filter (konkret eine „Polarisation“ oder einen „Spin“) zuschreiben. Wird ein nachfolgender Filter aber gegenüber dem ersten gedreht, so kann ihn ein mit dem Drehwinkel von 0 bis auf 100% zunehmender Teil der ihn noch erreichenden (also durch den ersten Filter selektierten) Quantenobjekte *nicht* mehr passieren.

Die Objektpaare lassen sich nun derart produzieren, dass die beiden Partner (wie sich im Experiment bestätigen lässt) bei entgegengesetzt gerichteten Filtern immer genau paarweise durchgelassen werden. Die Passage *eines* der Objekte selektiert also die Polarisationsrichtung des Partners wie ein diesem selber zugeordneter Filter (s. Abb. 2.2). Auch beim Drehen des zweiten Filters um den gleichen Winkel wie vorher gegenüber dem ersten wird wieder genau der gleiche Anteil von Objektpaaren weniger durchgelassen – gerade so, als ob statt des Partners das betreffende Objekt selber vorher „gemessen“ (selektiert) worden wäre. Auf diese (in etwas anderer Form schon 1935 von Einstein, Podolski und Rosen vorgeschlagene)

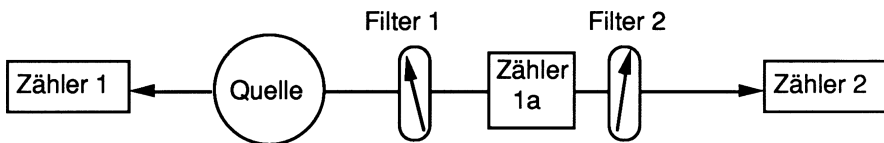


Abb. 2.1 Experiment mit zwei aufeinanderfolgenden Filtern an *einem* Quantenobjekt. Der in allen Fällen zum Zähler 1 gelangende Partner ist hier noch ohne Belang. Der erste Zähler rechts hat die Nummer 1a, weil er die gleiche Funktion hat, wie der Zähler 1 im eigentlichen Bell-Experiment von Abb. 2.2

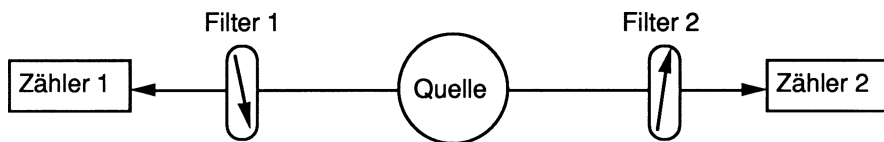


Abb. 2.2 Von Bell vorgeschlagenes Experiment, das die Korrelation zwischen den Partnern ausnutzt, um die Polarisation des einen durch Messung derjenigen des anderen zu bestimmen. Nichttrivial sind erst deren Korrelationen bei nicht mehr genau entgegengesetzt gerichteten Filtern

Weise wird – jedenfalls unter der Annahme rein lokaler Wechselwirkungen – ein beliebiger Erklärungsversuch der Heisenbergschen Unschärferelation ausgeschaltet, wonach die Messung einer Eigenschaft eine nachfolgend am gleichen Objekt zu messende andere Eigenschaften (wie etwa seine Durchlasseigenschaft bezüglich einer anderen Orientierung) auf unkontrollierbare Weise verändert („stört“) [2]. Die drei zuletzt genannten Autoren zogen insbesondere den Schluss, dass eine auf diese Weise störungsfrei messbare Eigenschaft „ein Stück Realität“ beschreiben müsse.

Denkt man sich nun, dass bei der ursprünglichen Messreihe der rechte Filter um einen kleinen Winkel verdreht gewesen wäre, so hätte ein Teil der vorher beide Filter passierenden Paare dort nicht mehr gepasst; die Korrelationsrate wäre also etwas kleiner als 100%. (Letzteres lässt sich an neuen Messreihen auch bestätigen.) Denkt man sich *stattdessen* den linken Filter um den entgegengesetzten Winkel gedreht, so hätte ein anderer, aber aus Symmetriegründen im Mittel gleich großer Anteil von Objekten dort nicht mehr gepasst. Eine Teilmenge dieser beiden jeweils nicht mehr zusammenpassenden Paarereignisse könnte aber zufällig identisch sein (hätte also in *beiden* Fällen nicht mehr zusammengepasst). Wenn nun beide Filter gleichzeitig entgegengesetzt gedreht worden wären (oder nur einer um den doppelten Winkel, was wegen der Rotationsinvarianz des Experiments das gleiche ist), so sollte der Gesamtanteil der nicht mehr gemeinsam durchgelassen Paare nach diesen Vorstellungen kleiner oder höchstens gleich der Summe der beiden nicht mehr passenden Paare bei den Einzeldrehungen sein (s. Abb. 2.3).

Die mathematische Formulierung dieser Erwartung, $F(2\Delta) \leq 2F(\Delta)$, wobei Δ der Winkelunterschied der Filterausrichtung ist, wird als „Bellsche Ungleichung“ bezeichnet. Das Experiment zeigt aber in Übereinstimmung mit der quantenmechanischen Vorhersage, dass sie nicht zutrifft: *Die anteilige Menge der nicht passenden Paare beim doppelten Winkel ist größer als deren Summe bei den Einzeldrehungen der Filter.* Das ist kein *logischer* Widerspruch, da verschiedene Stellungen desselben Filters nicht in einer Messreihe zu realisieren sind. Die Sperrfunktionen der Filter scheinen jedoch nicht unabhängig voneinander zu sein – so, als ob der Vorgang an einem Filter etwas davon wüsste, was am anderen passiert. Das muss nach den Vorhersagen der Quantentheorie auch dann gelten, wenn die beiden Filter astronomisch weit von der Quelle entfernt sind und wenn ihre Orientierungen erst im letzten Moment vor dem Eintreffen der Objekte eingestellt werden.

Eine konventionelle Beschreibung einer solchen Situation bestünde darin, eine unbekannte Wechselwirkung zwischen den beiden Teilsystemen „links“ und

(a)	L: - + + - - - + - + - + + + - - + - - R: - + + - - - + - + - + + + - - + - -	F=0
(b)	L: - + + - - <u>±</u> + - + - + + + - <u>±</u> - - + - - R: - + + - - - + - + - + + + - - + - -	F=3
(c)	L: - + + - - - + - + - + + + - - + - - R: - + + <u>±</u> - - + - + - + + + - <u>±</u> - - + - -	F=3
(d)	L: - + + - - <u>±</u> + - + - + + + - <u>±</u> - - + - - R: - + + <u>±</u> - - + - + - + + + - <u>±</u> - - + - -	F=4

Abb. 2.3 Beispiel einer Messreihe für das Bellsche Experiment für zwei exakt entgegengerichtete Filter (a) sowie die nach klassischen Vorstellungen zu *erwartenden* Abweichungen (\pm unterstrichen), falls die Richtung der Filter links oder rechts (b) bzw. (c) oder aber beide (d) eine etwas andere gewesen *wäre*. \pm steht für „durchgelassen“ oder „nicht durchgelassen“. F ist die Zahl der „Fehler“, also der Abweichungen von der Korrelation. Nach diesen Vorstellungen hätten im Fall (d) die Veränderungen der Reihen (b) und (c) gemeinsam auftreten müssen – die „Fehlerzahlen“ sich also höchstens addieren (einige aber auch aufheben) können

„rechts“ anzunehmen. Den unvoreingenommenen Nichtphysiker dürfte es dabei auch kaum beeindrucken, dass diese mit Überlichtgeschwindigkeit wirksam werden müsste, um der quantenmechanischen Vorhersage zu entsprechen, doch ergibt sich aus den Betrachtungen zur relativistischen Raumzeit-Struktur (s. Kap. 15), dass dann Ursache und Wirkung für verschieden bewegte Beobachter ihre Rollen vertauschen müssten. Die Kopenhagener Deutung der Quantentheorie nimmt – wie schon erwähnt – statt dessen entgegen aller physikalischen Tradition an, dass mikroskopische Objekte gar keine „realen“ Eigenschaften (wie hier eine sie zum Durchgelassenwerden prädestinierende) unabhängig von deren Messung „besitzen“. So konstatierte schon Heisenberg: „Die Bahn des Teilchens entsteht erst dadurch, dass wir sie beobachten.“ Dann ist die oben benutzte Argumentation nämlich nicht mehr anwendbar. Eine dritte Möglichkeit der Erklärung (statt der Aufgabe von Lokalität oder Realität) bestünde in der Annahme, dass die Orientierung der Filter gar nicht unabhängig voneinander (etwa durch freie Willensentscheidung) gewählt werden kann, sondern beispielsweise durch eine geheimnisvolle gemeinsame Ursache in der Vergangenheit oder auf sonstige „konspirative Weise“ immer mit den Zuständen der Objektpaare korreliert sind. Keine der Möglichkeiten dieses sich empirisch ergebenden Trilemmas kann bereits deshalb als „nicht weiter erstaunlich“ angesehen werden, weil sie nicht a priori auszuschließen ist. Die Physiker würden sicher ein hinreichend einfaches Erklärungsmodell (eine hypothetische Realität) sofort akzeptieren, wenn es sich anböte.

Die Väter der Quantentheorie wurden für die von ihnen gezogenen Konsequenzen zunächst durch andere, ähnlich erstaunliche aber nicht so klar zu analysierende Experimente geleitet (s. insbesondere das Doppelspalt-Experiment in Kap. 3). Zwingen uns diese deutlicher zu einer radikalen Lösung im Sinne der Kopenhagener Interpretation? Mit anderen Worten: Widerlegen irgendwelche Experimente, auf denen die Quantentheorie beruht, die *Annahme* (die „Fiktion“) der von ihrer Beobachtung unabhängigen Existenz physikalischer Eigenschaften, wie häufig behauptet wird?

Zu erkennen, dass das keineswegs der Fall ist, war die entscheidende Motivation für Bells erstgenannte Arbeit. Er entnahm diese Erkenntnis einer damals wenig beachteten Theorie von David Bohm aus dem Jahre 1952, die der Quantenmechanik in ihren Vorhersagen vollständig äquivalent ist, die Annahme einer von der Beobachtung unabhängigen physikalischen Realität explizit beibehält (indem sie ein Modell dieser Realität konstruiert) und dafür Wechselwirkungen von dem schon erwähnten „nichtlokalen“ Typ einführt. Um die Äquivalenz mit der Quantentheorie sicherzustellen, betrachtet Bohm die traditionell nur als Hilfsmittel für probabilistische Vorhersagen angesehene Wellenfunktion als ein physikalisches Objekt (Teil der Realität). Seine Theorie enthält aber auch lokale Elemente – nämlich einfach die klassischen Teilchen und Felder, die nun aber von der nichtlokalen Wellenfunktion „gelenkt“ werden. Ihre Bewegung kann aber nicht kontinuierlich beobachtet werden; daher sind diese lokalen Elemente völlig willkürlich und genauso gut durch etwas anderes ersetzbar. (Sie erscheinen nur unter klassischen Vorurteilen plausibel.)

Es gibt demnach viele Modelle einer „physikalischen Wirklichkeit“, die alle Aussagen der Quantenmechanik reproduzieren, aber nicht experimentell zu bestätigen oder voneinander zu unterscheiden sind. Keineswegs widerlegt die Quantenmechanik also zwingend die Annahme einer beobachterunabhängigen Realität in der Mikrophysik – nur hat sich bisher keines der Modelle als besonders nützlich (als eine *heuristische* Fiktion) erwiesen. Es ist also derzeit eine Geschmacksfrage ob man die (ja vielleicht nur vorläufige) Vieldeutigkeit bei der Modellierbarkeit physikalischer Vorgänge schon zum Anlass einer endgültigen Verzichtserklärung auf *irgendein* Modell, also auf den Realitätsbegriff in der Naturbeschreibung überhaupt, nimmt. Es gibt zudem noch einen Ausweg im Rahmen der nichtlokalen Wellenfunktion, der nicht die Beschreibung der beobachteten Objekte, sondern die der Beobachter betrifft, ohne dazu *irgendwelche* willkürlichen Elemente in die Theorie einführen zu müssen (s. Abschn. 6 und weitere Beiträge in diesem Buch).

3 Weltanschauliche Hintergründe

Es gibt klare Belege dafür, dass die jeweilige (wie es scheint zufällige) Weltanschauung bei den Begründern der Quantentheorie eine große Rolle für ihre eigene Interpretation der hierzu eben nicht zwingenden Experimente und des sie beschreibenden Formalismus gespielt hat (s.a. die im Vorwort genannte Literatur hierzu): Der junge Heisenberg „schwärmte“ vom platonischen Idealismus und suchte die ästhetische Schönheit der Beschreibung der Natur durch rein formale Ideen (z. B. Symmetrien). Bohr war vom dänischen Irrationalismus Kierkegårds und Sørensens geprägt und empfand die rationale Beschreibbarkeit der Natur als eine Fehlentwicklung. Born sah im Determinismus der klassischen Mechanik eine Bedrohung der Willensfreiheit, weshalb er seine statistische Interpretation als erlösend empfand. Von Neumanns Interpretation enthält deutlich subjektivistische Züge. Viele von ihnen sahen sich anscheinend in der Zeit nach dem ersten Weltkrieg zur Widerlegung des Materialismus herausgefordert. Pauli andererseits, der später auch als „Papst“

der Quantentheorie bezeichnet wurde (Bohr galt als der liebe Gott persönlich), begegnete jedem „naiven“ Lösungsversuch mit beißender Ironie, sympathisierte aber außerhalb seiner wissenschaftlichen Publikationen mit möglichen Erklärungen im psychischen Bereich. In der *neuen Diskussion* fanden sich als Reaktion darauf viele (vor allem italienische und französische) Marxisten. Für einige französische Rationalisten unter den Physikern ist Bohr einfach „der große Nebel aus dem Norden“. Diese unterschiedlichen Einstellungen resultieren nicht immer aus einer intensiven philosophischen Beschäftigung. Deshalb spreche ich von Weltanschauungen. Aber es ist erstaunlich, welchen Einfluss die der Mode unterliegenden Fluktuationen des Zeitgeistes zwischen den Extremen Aufklärung und Romantik (in der Neuzeit mindestens von Schelling bis zum New Age) auf die Vorstellungen der Physiker hatten und haben. So zeigt auch das in den letzten Jahren häufig angeführte Konzept einer fundamentalen, von jeder materiellen Realität unabhängigen *Quanteninformation* („it from bit“) eine erstaunliche Verwandtschaft mit Vorstellungen aus der Homöopathie.

Ich erwähne dies als Ergänzung zu den Bellschen Betrachtungen, um zu betonen, dass nicht alles, was die Physiker behaupten, aus ihren Beobachtungen folgt. Kann man nun sagen, dass sich eine dieser Weltanschauungen (also etwa die Bohrs, der selber gar nichts mehr zum endgültigen Formalismus der Quantentheorie mehr beigetragen hat) als überlegen oder gar einzig möglich erwiesen hätte? Mir scheinen vornehmlich andere Gründe verantwortlich gewesen zu sein: Bohrs frühes Erkennen – resultierend aus seinem vergeblichen Bemühen –, dass „eine einfache Antwort nicht möglich“ sein werde, Einsteins gescheiterte Versuche, die Quantentheorie durch ihre eigenen Konsequenzen zu widerlegen, die Außenseiterrolle Schrödingers unter den Begründern der Theorie, der bereits genannte Zeitgeist und nicht zuletzt die Tatsache, dass Bohr wegen seines alten Atommodells zum „geistigen dänischen Nationalhelden“ aufgestiegen war und über unvergleichbare Mittel und gesellschaftlichen Einfluss verfügte [3].

Bells Analyse beschränkt sich auf die unzweifelhaft realen Resultate der lokalen Messgeräte. Er selber ist wohl als „naiver Realist“ zu bezeichnen (s. den letzten Abschnitt von Kap. 5), der Zweifel an der Realität als völlig absurd betrachtete. Faktisch steht er damit Einstein nahe, den ich aber eher als „kritischen Realisten“ ansehen möchte. In einem Brief an Schrödinger bezeichnet letzterer rein positivistische Haltungen zur Quantenmechanik als „talmudisch“, was wohl soviel wie „sophistisch“ oder „rein formal“ bedeuten soll. Bernard d’Espagnat hat in jüngerer Zeit den Versuch unternommen, sich ohne alle weltanschaulichen Vorurteile mit den möglichen oder notwendigen philosophischen Implikationen der Quantentheorie auseinanderzusetzen [4].

4 Positivismus

Dieser Begriff hat gerade in der Diskussion um die Quantenmechanik unter Physikern eine große Rolle gespielt. In seiner gemäßigten Form, wie sie im Wiener Kreis vertreten wurde, bedeutet er vor allem den Verzicht auf jegliche Metaphysik im Kantschen Sinn. Wenngleich die meisten Naturwissenschaftler (anscheinend

im Gegensatz zur Mehrheit der Philosophen) wenig Schwierigkeiten hatten, sich mit Humes Erkenntniskritik *abzufinden*, wird der Positivismus aber auch von ihnen, unter denen sich traditionell viele Kantianer befanden, unterschiedlich interpretiert. Materialisten betrachten ihn gewöhnlich als verschleierte Idealismus (so etwa auch Lenin in seinem erkenntniskritischen Werk) – und ebenso umgekehrt. Dabei scheint mir gerade eine der stärksten Aussagen des Positivismus diejenige zu sein, dass es zwischen so extremen Standpunkten wie Realismus und Solipsismus keinen *sinnvollen* Unterschied gibt. *Wie soll dann aber eine Widerlegung des Realismus durch das Experiment überhaupt möglich sein*, wie es die häufig sich positivistischer Argumente bedienende Kopenhagener Deutung der Quantentheorie für die Mikrophysik behauptet?

Die Mathematik wird in diesem erkenntnistheoretischen Rahmen als ein System von reinen (wenn auch alles andere als trivialen) Tautologien, also analytischen Urteilen, betrachtet und sagt (so auch Einstein) daher „nichts über die Wirklichkeit“. Aus der Mathematik lassen sich demnach keine inhaltlichen Aussagen gewinnen, die man nicht in lediglich anderer Form hineingesteckt hat [5] – auch wenn Anhänger einer unbefleckten Erkenntnis durch reines Denken sich immer wieder der gegenteiligen Hoffnung hingeben. Inhaltliche Aussagen können dann also nur Substrat der Erfahrung sein – oder konsequenter: des subjektiven Erlebens, das erst „erfahrungsgemäß“ die Zeitrichtung der Erfahrung und Erinnerung auszeichnet. Somit wird es auch nur als eine spezielle Erfahrung angesehen, dass die Wahrnehmung uns zeitlich geordnet erscheint und mit Hilfe der empirischen Ordnungsregeln inter- und extrapolieren lässt. Lassen sich universelle Interpolationsregeln der Beobachtungen (oft auch Kausalität genannt) finden, so kann man das entstehende System aus Erfahrungen und deren Inter- und Extrapolation die Realität *nennen* – auch wenn es überwiegend Hypothese oder „heuristische Fiktion“ bleiben muss. Der „engere“ (und damit schon wieder dogmatische) Positivismus, etwa im Sinne Comptes, bestreitet den Sinn einer solchen Fiktion überhaupt und fühlt sich somit durch die Quantentheorie bestätigt – was den Positivismus in die physikalische Diskussion brachte.

Einsteins kritischer Realismus kann ebenfalls im Sinne des gemäßigten Positivismus verstanden werden. Er erwähnte häufig, wie wichtig die Lektüre Humes für ihn gewesen sei. Dabei *glaubte* er aber offenbar im Gegensatz zum engeren Positivismus, dass diese Fiktion auch bei Erweiterung der physikalischen Erfahrung „heuristisch bleiben“ wird. Der Begriffs-Dualismus der Quantentheorie (zwischen Welle und Teilchen – aber mehr noch zwischen klassischen und quantenmechanischen Konzepten) ist im realistischen Sinne nichts weiter als eine Inkonsistenz der Beschreibung und wäre daher eine Widerlegung dieses Glaubens, wenn er zu überwinden ist. Deshalb sah Einstein darin ein Indiz für die Unvollständigkeit der Quantentheorie. Seine Erwartung, dass sich das bald experimentell erweisen würde, war aber offenbar schlechte Prophetie.

Der „fiktive Realismus“ verlangt auch eine Überwindbarkeit des Operationalismus (s. Abschn. 6). Denn Operationen müssen sich selber als physikalische Vorgänge mit den durch sie erst gewonnenen kinematischen Begriffen und Naturgesetzen beschreiben und somit nachträglich als Teil der fiktiven Realität bestätigen

lassen [6]. Die von Bohr als unumgänglich und fundamental erachtete Beschreibung der Operationen mit den nicht weiter zu erklärenden „Begriffen der Alltagssprache“ muss dagegen auf aus der Alltagserfahrung abgeleiteten Vorurteilen (etwa der Übernahme eines klassischen Partikel- oder Feldbegriffs) beruhen und kann kaum zu einem konsistenten physikalischen Weltbild führen. Diese Alltagsbegriffe sind zwar auch Derivate der Erfahrung, haben sich aber durch die zur Quantentheorie führenden Experimente als nicht universell anwendbar erwiesen. Somit ist Vorsicht geboten, wenn physikalische Grundbegriffe mit ihrer Hilfe „abgeleitet“ werden sollen – auch wenn das mit großem formalem Aufwand geschieht.

5 Der Indeterminismus der Quantentheorie

Wenn eine fiktive Wirklichkeit (ein empirisch begründetes *Weltmodell* unter Einschluss seiner dynamischen Gesetze) gegeben ist, so ist damit auch definiert ob sie deterministisch ist. Ein indeterministisches Modell ließe sich durch Einführung prinzipiell unbeobachtbarer Variablen (die die Rolle *rein* fiktiver Ursachen übernehmen) stets deterministisch vervollständigen. Das tut das erwähnte Modell von Bohm, und deswegen konnte von Neumann solche „versteckten“ Variablen als Ergänzung der Quantentheorie auch nicht ausschließen, wie er es versucht hatte. Die Frage ist nur, ob ein solches Modell unter heuristischen Gesichtspunkten gerechtfertigt ist – die neuen Variablen also zu irgendwelchen spezifischen Konsequenzen oder einer begrifflichen Vereinfachung führen. Daran sind bisher alle Versuche gescheitert, determinierende Ursachen für die quantenmechanischen Messergebnisse zu konstruieren.

Einstein betrachtete zwar in seiner populären Bemerkung über den „würfelnden Gott“, an den er nicht glauben mag, ein indeterministisches Weltmodell auch als Indiz für dessen Vorläufigkeit, hat das aber nie als seinen Haupteinwand gegen die Quantenmechanik erachtet. Die Frage nach einem allgemeinen, nicht auf ein spezifisches Modell bezogenen Determinismus in der Natur erscheint mir dagegen keine sinnvolle (beantwortbare) Frage zu sein. Der Determinismus eines erfolgreichen Weltmodells widerspräche deshalb auch *nicht* dem praktisch relevanten Indeterminismus der *beobachtbaren* Größen (die etwa das Wetter charakterisieren). Dieser phänomenologische Indeterminismus müsste sich dann vielmehr gerade *aus dem Modell* in Form einer sich ergebenden empfindlichen Abhängigkeit der Vorhersagen von den Anfangsbedingungen oder äußeren Einflüssen verstehen lassen, wobei übrigens erst weitere physikalische Bedingungen eine Asymmetrie in der Zeit (also eine Beschränkung des Indeterminismus auf *Vorhersagen*) auszeichnen können [7]. Der Begriff „deterministisches Chaos“ spielt daher eine wichtige Rolle in der Physik. Daher ist der Indeterminismus quantenmechanischer Messungen auch nicht das wesentliche Problem. Die Unschärferelation sagt ebenfalls nichts gegen einen Determinismus in der Natur, sondern nur gegen dessen *Anwendbarkeit* auf angenommene klassische Eigenschaften mikroskopischer Objekte, die aber ohnehin nicht Teil einer konsequenten quantenmechanischen Zustandsbeschreibung sind.

Der Quantenmechanik wird mangels eines deterministischen Modells gewöhnlich ein „fundamentaler“ Indeterminismus zugeschrieben, der nicht einfach auf

unzureichendem Wissen über die Anfangsbedingungen beruht. In der Kopenhagener Deutung macht diese Unterscheidung wegen des Verzichts auf die mikroskopische Realität, über die Wissen bestehen *könnte*, aber gar keinen Sinn. Im Normalfall benutzt die Quantenmechanik für Ihre Dynamik (also modellmäßig) die Schrödingergleichung, die die zeitliche Entwicklung der Wellenfunktion deterministisch (eindeutig) voraus oder zurück zu berechnen gestattet. Zum Beispiel zerfällt ein Radiumkern nicht nach statistischen Gesetzen zu irgendeinem Zeitpunkt (falls dieser nicht irgendwie „gemessen“ wird), sondern deterministisch in *eine* genau bestimmte „Superposition“ (das ist dasselbe wie eine Wellenfunktion) von Zuständen, die *verschiedenen* Zerfallszeiten entsprechen, was in vielen Fällen auch experimentell nachprüfbar ist. Das Interpretationsdilemma besteht hier darin, dass die Wellenfunktion zwar einerseits als „Wahrscheinlichkeitswelle“, also ein Mittel zur Vorherbestimmung der Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten der beobachteten Größen, betrachtet wird, ihr aber andererseits nicht einfach nur ein statistisches Ensemble dieser (und gegebenenfalls noch anderer, „versteckter“) Größen zugeordnet werden kann. Da sie überdies objektiv verstanden werden muss, hat etwa Heisenberg ihr „als Beschreibung menschlichen Wissens eine intermediäre Stufe der Realität“ zugebilligt, was wohl nur als Ausdruck der Verlegenheit anzusehen ist.

Die Antwort auf die Frage, ob der Indeterminismus der Quantentheorie nun phänomenologisch oder fundamental zu verstehen sei, hängt also ganz offensichtlich von deren strittiger Interpretation ab. Nur Größen, deren Existenz man zu jeder Zeit und unabhängig von ihrer Beobachtung annehmen darf, können *in einem Modell* eine wohldefinierte Dynamik besitzen, die dann entweder deterministisch oder indeterministisch sein muss. Weder Realismus noch Determinismus sind also durch die Quantenphysik widerlegt, wenngleich festzuhalten ist, dass die *vorherrschende Interpretation* der Quantenmechanik auf die Anwendung dieser Begriffe verzichtet. Erzwungen ist nur, *eine* der drei in Abschn. 2 genannten Annahmen, die zur Bell-schen Ungleichung führen und zu denen der Determinismus gar nicht gehört, fallen zu lassen.

6 Operationalismus und/oder Fiktionalismus

In den Diskussionen zwischen einigen Physikern und Philosophen, die der ursprünglichen Publikation dieses Textes vorausgingen, standen sich häufig ein operationalistischer und ein fiktionalistischer Aufbau physikalischer Theorien gegenüber. Der letztere entspricht dem konventioneller physikalischer Theorien, der erstere wurde besonders konsequent und systematisch von Günther Ludwig vertreten und steht in vieler Hinsicht der Kopenhagener Interpretation nahe (s.a. Kap. 9).

Bei der Konstruktion physikalischer Theorien sind normalerweise beide Aspekte von Bedeutung und durchaus miteinander vereinbar: Neue Theorien beruhen gewöhnlich auf neuen empirischen Ergebnissen, die mit Hilfe irgendwelcher „Operationen“ durch Experimentalphysiker (aber auch durch passive Beobachtungen,

z. B. durch Astronomen) gewonnen wurden. Für die Konstruktion und Beschreibung der Operationen werden dabei sowohl Begriffe aus bereits bekannten Theorien wie auch solche aus der Alltagswelt benutzt. Aus den Experimenten werden (meistens mit sehr viel Intuition und Phantasie) Eigenschaften der untersuchten Objekte und für sie geltende Gesetzmäßigkeiten abstrahiert und versuchsweise in eine exakte mathematische Form gebracht. Die dazu verwendeten Begriffe sind im allgemeinen nur durch ihre Funktion definiert. Bewähren sie sich, indem sie insbesondere nie zu unzutreffenden Aussagen führen, so werden diese mathematischen, aber häufig noch durchaus anschaulichen Begriffe als „Darstellungen“ von Eigenschaften der physikalischen Objekte betrachtet. Sie sind dann zu heuristischen Fiktionen geworden. So wurde das kopernikanische System schließlich als Bild der Realität anerkannt, weil es besser „funktionierte“ als das vorkopernikanische. Ich bin aber ganz entschieden der Meinung, dass das zwangsläufig Fiktive dieses Bildes der Wirklichkeit (wie wir ja eigentlich seit Descartes und Hume wissen) ebenso für die Alltagsbegriffe gilt, also keineswegs nur für ein *physikalisches* Weltbild charakteristisch ist. Andernfalls könnten wir nicht einmal zwischen realen Phänomenen und Sinnestäuschungen unterscheiden. Ihr fiktiver Charakter widerspricht deswegen keineswegs ihrer *möglichen* Realität; ihre Funktionalität ist andererseits auch kein Beweis. Viele Alltagsbegriffe sind aber, ebenso wie viele Begriffe der klassischen Physik, als nur beschränkt anwendbar erkannt worden, so dass sie nicht mehr als *heuristische* Fiktionen mit universellen Ansprüchen gelten können. Aus einer universellen physikalischen Theorie sollten sie sich *für den Bereich ihrer Anwendbarkeit ableiten* lassen.

Günther Ludwig hat sich in seinen wissenschaftstheoretischen Arbeiten die revolutionäre Aufgabe gestellt, nicht erst die angestrebte Theorie, sondern bereits die auf dem Wege dazu benutzten Operationen auf mathematisch exakte Weise zu formalisieren [8]. Sein Hauptziel ist dabei die „direkte“ Begründung der physikalischen Begriffe aus den Operationen (was im klassischen Bereich häufig funktioniert). Man könnte an diesen Weg vielleicht die Hoffnung knüpfen, dass er wieder zu einer Theorie im konventionellen Sinne *führen* wird, die dann die „klassische“ und die Quantenphysik als zwei Grenzfälle enthalten müsste.

Während die konventionelle Axiomatisierung einer Theorie üblicherweise deren arbeitshypothetischen Anspruch auf allgemeine Gültigkeit zum Ausdruck bringen soll, kann die Formalisierung der Operationen (in einer allgemeinen „Theorie des Experimentierens“ oder „des physikalischen Handelns“) nur im approximativen Rahmen der Gültigkeit der dabei *zu benutzenden* klassischen Begriffe (oder gar Alltagsbegriffe) sinnvoll sein. Gerade eine Mathematisierung kann jedoch aufgrund der dabei auftretenden „Denkautomatismen“ leicht zu einer unkontrollierbaren Extrapolation über genau diesen Rahmen hinaus führen. Ludwig ist daher offenbar bereit, auf ein physikalisches Weltmodell (das von ihm gern als „Märchen“ bezeichnet wird) und damit auf die üblicherweise als Konsistenzbedingung geforderte nachträgliche Ableitbarkeit der Operationen ganz zu verzichten. Dieser Weg erfordert also eine nicht behebbare Aufteilung der Naturvorgänge in „Operationen“ (insbesondere Präparationen und Messungen) und „physikalische Vorgänge“, die es zu untersuchen gilt. Insbesondere ist die Bellsche Argumentation in ihrem Rahmen gar nicht möglich. Ein solcher Aufbau der Theorie verschleiert aber auch die Tatsache,

dass viele seiner dabei gemachten Annahmen erst durch die zur Quantenmechanik führenden Experimente motiviert wurden.

Wenn Herr Ludwig in einem seiner Aufsätze konstatiert [9] „die Katze ist tot“ so ist das (bei entsprechendem Ausgang des von Schrödinger konzipierten Gedankenexperiments) natürlich im operationalistischen oder phänomenologischen Sinne trivialerweise unstrittig. Es ist darüberhinaus auch unproblematisch, wenn man der Meinung ist, dass es keiner realistischen (konsistenten) Beschreibung der Mikrophysik bedarf. Probleme ergeben sich nur, wenn man an den *derzeitigen und erprobten* Formalismus der Quantentheorie weitergehende Erwartungen stellt als Herr Ludwig. Dafür gibt es aber m. E. recht gewichtige Gründe, die in den weiteren Beiträgen dieses Buches diskutiert werden sollen.

7 Die umstrittene Realität der Wellenfunktion

Ich denke nun hinreichend klar gemacht zu haben, in welchem Sinne ich den Begriff Realität verstehe. Genau in diesem Sinn aber ist die Realität der Wellenfunktion, die den Kern der quantenmechanischen Beschreibung bildet, umstritten. Wenn sie aber so erfolgreich zur Vorhersage all der überraschenden Phänomene geführt hat, muss sie dann nicht ganz wesentlich etwas mit einer Realität zu tun haben?

Wie schon bemerkt, müssen wir der Wellenfunktion eine „objektive“ Bedeutung zubilligen. Der Operationalist würde sagen: weil sie einer objektiven „Präparieroperation“ entspricht, die bei realistischer Interpretation ein Ensemble (eine Wahrscheinlichkeitsverteilung) der möglicherweise entstehenden Zustände festlegen würde. Nun ist aber die Beschreibung eines physikalischen Systems durch eine Wellenfunktion nach gegenwärtigem Wissen als *vollständig* zu bezeichnen, worauf sich auch die Kopenhagener Deutung in ihrem „Endgültigkeitsanspruch“ beruft. Alle messbaren Eigenschaften physikalischer Systeme lassen sich durch bestimmte Wellenfunktionen (Eigenfunktionen) beschreiben, und die Menge *aller* Messgrößen, die sich mit Sicherheit vorhersagen lassen, legt die Wellenfunktion fest. Auch die Struktur von Molekülen und Festkörpern kann durch Wellenfunktionen beschrieben werden. Darüberhinaus unterliegt die Wellenfunktion abgeschlossener Systeme der „autonomen Dynamik“ der Schrödinger-Gleichung, durch die sie sich selber eindeutig für alle Zeiten determiniert. Man kann auch *individuelle Systeme* (z. B. einzelne Atome) in Situationen beobachten und verfolgen, bei denen ihr Zustand zu jeder Zeit durch genau eine bestimmte Wellenfunktion beschreibbar ist und dabei unter Umständen einen (nicht determinierten und nicht durch die Schrödinger-Gleichung beschreibbaren) „Quantensprung“ in einen durch eine andere Wellenfunktion beschriebenen Zustand beobachtbar ausführen kann, dessen Natur noch zu diskutieren sein wird. Das sind klar heuristische Aspekte, die die Realität der Wellenfunktion in diesem Sinne stützen. Weiterhin schreibt die moderne Elementarteilchentheorie recht erfolgreich dem Vakuum einen Quantenzustand zu, der sich als Wellenfunktion für die unendlich vielen Freiheitsgrade fundamentaler Felder auffassen lässt (s. Kap. 11), und der sich nicht durch Wahrscheinlichkeitsaussagen, sondern nur durch die Eigenschaften der Elementarteilchen bestätigen

lässt. Selbst der Begriff einer Wellenfunktion des Universums wird in jüngster Zeit im Rahmen der Quantengravitation benutzt, um zu (im Prinzip) nachprüfbareren Aussagen zu kommen. Die Beschreibung von nur solchen Experimenten, die sich aus wiederholbarer Präparation mit nachfolgender Messung zusammensetzen und daher statistische Aussagen erlauben, ist offenbar ein viel zu enger Aspekt der Wellenfunktion.

Die empirisch begründete Dynamik der Wellenfunktionen führt aber zwangsläufig dazu, dass zwei wechselwirkende Systeme nicht einzeln, sondern nur gemeinsam eine solche „besitzen“ können. Genau diese *Nichtlokalität* hat zur Vorhersage der Ergebnisse der Bellschen Experimente geführt. Denn wenn die beiden Quantenobjekte, die ursprünglich in Wechselwirkung standen, nur einen gemeinsamen Zustand (eine gemeinsame Realität) besitzen, so ergibt sich daraus, dass die Messung an einem davon uns auch etwas über das andere Objekt sagt. Man muss also konstatieren, dass die Quantenmechanik bei dem Versuch, die Wirklichkeit zu beschreiben, den Begriff *lokaler* realer Zustände aufgeben muss – nicht aber den einer *global* definierten Realität.

Das neue Problem ist nun, dass offenbar *alle* Objekte dieser physikalischen Welt aus „Quantenobjekten“ aufgebaut sind – also auch Schrödingers hypothetische Katze und der Experimentator selbst. Da bei keiner der vielen Präzisionsmessungen jemals Abweichungen von der Quantentheorie nachgewiesen werden konnten (wie sie bei Existenz einer allgemeineren Theorie zu erwarten gewesen wären), sollte man auch solche komplexen makroskopischen Systeme in die universelle Wellenfunktion einbeziehen. Das scheint nun aber den Realitätsanspruch an die Wellenfunktion *empirisch* zu untergraben, da ja etwa ein Tisch offensichtlich nicht als Wellenfunktion im Raum verteilt ist. Im gleichen Sinne ergäbe sich auch aus der Theorie in dem erwähnten Gedankenexperiment zunächst formal die Konsequenz einer „Superposition“ der toten und lebendigen Katze, also eines Zustands, der weder als tot noch als lebendig zu interpretieren ist. (Wie schon beim radioaktiven Zerfall erwähnt, hat ein solcher quantenmechanischer Zustand eine eigenständige Bedeutung – ist also nicht einfach eine Umschreibung von „entweder tot oder lebendig“ –, so wie eine Wellenfunktion eine Superposition von verschiedenen Orten und nicht nur eine statistische Verteilung von *möglichen* Orten ist.) Daher hat man eine solche, mit traditionellen Begriffen uninterpretierbare und damit jeder Beobachtung widersprechende Konsequenz stets als Widerlegung der allgemeinen Darstellbarkeit der Realität durch Wellenfunktionen angesehen. Wie man sie trotzdem mit der uns zugänglichen Welt der Erscheinungen in Einklang bringen kann, soll also im folgenden diskutiert werden.

Literatur

1. H. Pagels, *Der kosmische Code* (Ullstein, Berlin, 1982), S. 160–169.
2. Eine solche trivialisierende Fehlinterpretation der Heisenbergschen Unschärferelation hat historisch immer wieder eine Rolle gespielt. Für unterschiedliche „Spinkomponenten“, d.h. wohldefinierte Durchlasseigenschaften bzgl. verschiedener Richtungen, gilt nämlich eine ähnliche Unschärferelation wie zwischen Ort und Impuls eines Teilchens.

3. Für Einzelheiten s. M. Jammer, *The Philosophy of Quantum Mechanics* (Wiley, New York, 1974).
4. B. d'Espagnat, *Auf der Suche nach dem Wirklichen* (Springer, Berlin, 1983).
5. Das entspricht auch M. Schlicks Interpretation der Axiome als implizite Definitionen oder Wittgensteins Auffassung von der Substitution als *der* Methode der Mathematik.
6. S. z. B. Einsteins an Heisenberg gerichtete Bemerkung, zitiert in W. Heisenberg, *Der Teil und das Ganze* (Piper, München, 1971), S. 92: „Aber Sie glauben doch nicht im Ernst, dass man in eine Theorie nur beobachtbare Größen aufnehmen kann Erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann.“ Ganz offensichtlich meint Einstein hier *nicht*, dass die Theorie mit Hilfe *zusätzlicher Axiome* zu entscheiden hat, was beobachtet werden kann, sondern dass sich das aus der durch die Theorie zu beschreibenden Dynamik von Beobachtungsvorgängen „bis hin zum Bewusstsein“ zu ergeben hat.
7. H.D. Zeh, *The Physical Basis of the Direction of Time* (Springer, Berlin, 2007).
8. G. Ludwig, *Die Grundstrukturen einer physikalischen Theorie* (Springer, Berlin, 1990).
9. G. Ludwig, *Wie viele Leben hat Schrödingers Katze?* in J. Audretsch und K. Mainzer, *Zur Physik und Philosophie der Quantenmechanik* (BI Wissenschaftsverlag, 1990).

Physik ohne Realität: Tiefsinn oder Wahnsinn?

Zeh, H.D.

2012, XI, 218 S. 25 Abb., Hardcover

ISBN: 978-3-642-21889-7