Philosophen in der Mikrowelt – ratlos?

Zum gegenwärtigen Stand des Grundlagenstreits in der Quantenmechanik

MANFRED STÖCKLER

Summary

In this report on the present state of the discussion about the interpretation of quantum mechanics an attempt is made to provide an idea of the philosophical relevance of the foundations of physics. A simplified model of the measuring process is given which shows the difficulties in the interpretation of quantum mechanics. It is argued against Bohr's solution (also in a version of H. Putnam). Two examples show possible philosophical consequences of quantum mechanics: The variety of quantum logics challenges the foundations of logic, the paradox of Einstein, Podolsky and Rosen (with Bell's inequality) may be interpreted along the lines of holism. Against alleged refutations of realism by means of quantum mechanics, a realist standpoint is maintained. A proper interpretation of quantum mechanics from an epistemological point of view seems still to be lacking.

> *In my childhood the legend was current, that only twelve men in the World understood Einstein's theory. Nowadays, relativity is quite tame; but I shall argue presently that* nobody *yet understands the quantum theory.*
>
> Howard Stein[1]

Die Quantenmechanik ist eine außerordentlich erfolgreiche Theorie, die so unterschiedliche Phänomene wie Atomspektren und Wärmestrahlung, wie Supraleitung und kosmische Hintergrundstrahlung auch in ihren quantitativen Details mit Hilfe eines einheitlichen theoretischen Rahmens erklären kann. Dennoch steht diese Theorie auch heute noch im Mittelpunkt von umfangreichen und heftigen philosophischen Auseinandersetzungen. Die Quantenmechanik hat von Anfang an philosophische Diskussionen herausgefordert,[2] an denen zunächst meist Physiker sozusagen nebenberuflich beteiligt waren. Die Debatte in der Frühzeit der Quantentheorie wurde zuerst stark von weltanschaulichen Fragen geprägt. Man sah in ihr eine geistesgeschichtliche Wende, ein Argument gegen Materialismus und Atheismus, einen Beweis der Willensfreiheit, oder man schrieb ihr einen neuen Wirklichkeitsbegriff und die Überwindung der Trennung von Subjekt und Objekt zu.

Die gegenwärtige Diskussion um die Interpretation der Quantenmechanik ist nüchterner geworden, sie ist, im Guten wie im Schlechten, von der analytischen Philosophie und einer empiristischen Wissenschaftstheorie geprägt. Diese Nüchternheit soll hier übernommen werden, deswegen bleiben

[1] Stein (1972) S. 367–368.

[2] Schon im Jahre 1927 wurde in Gießen bei Ernst von Aster eine Dissertation geschrieben mit dem Thema „Zur Erkenntnistheorie der quantentheoretischen Grundbegriffe" (Vogel 1928).

Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie XVII/1 (1986)
© Franz Steiner Verlag Wiesbaden GmbH, Sitz Stuttgart

spekulative und exotische Deutungsversuche von der Untersuchung ausgeschlossen.[3]

Aber selbst mit diesen Einschränkungen kann hier kein vollständiger Überblick über das Interpretationsproblem der Quantenmechanik gegeben werden. Das liegt erstens an der Fülle der Literatur, die zu diesem Thema erschienen ist. Ein neuerer Überblick über den Teilbereich der Quantenlogik referiert z. B. fast 600 Titel.[4] Eine ähnliche Fülle gibt es auch zu anderen Spezialthemen, etwa zu dem Paradoxon von Einstein, Podolsky und Rosen. Es ist aber nicht nur die Literaturflut, die einen Bericht über den Diskussionsstand schwierig macht, sondern auch die Zersplitterung der Themen und die mangelnde Konvergenz der Auffassungen. In der Grundlagendiskussion sind Logiker wie Ernst Specker, Physiker wie Günther Ludwig und Philosophen wie Hilary Putnam beteiligt. Hier treffen sich Denkauffassungen, die einen ganz unterschiedlichen Wissenshintergrund und auch ein ganz unterschiedliches Problembewußtsein haben. Gerade Logiker und Physiker stürzen sich zuweilen mit einer bewundernswerten Naivität in den Grundlagenstreit, ohne sich vorher um die schon vorhandene Literatur zu diesem Thema zu kümmern. Die Hauptschwierigkeit scheint mir allerdings darin zu liegen, daß man sich nicht einmal einig ist, worin denn nun die Probleme bei der Interpretation der Quantenmechanik bestehen.

Dies hat damit zu tun, daß schon die Lokalisation der philosophischen Schwierigkeiten bei der Deutung der Quantenmechanik vom erkenntnistheoretischen Standpunkt des jeweiligen Interpreten abhängt. Da dies natürlich auch für die vorliegende Arbeit zutrifft, möchte ich gleich zu Anfang bemerken, daß sie in einer realistischen Tradition steht. Die folgenden Ausführungen haben demnach zwei Ziele: Sie sollen einen Eindruck vom Stand der Diskussion geben und gleichzeitig zeigen, wie weit auch angesichts der Quantenmechanik eine realistische Erkenntnistheorie haltbar ist. In unserem Kontext heißt „Realismus" einmal allgemein, daß Theorien nicht nur Beobachtungen wiedergeben, sondern auch Erklärungen liefern sollen (u. U. mit Hilfe von Unbeobachtbarem), zum anderen heißt Realismus speziell, daß die Zustände physikalischer Systeme unabhängig von Versuchsanordnungen und Meßmöglichkeiten charakterisierbar sein sollen (und in diesem Sinn unabhängig vom Beobachter sein sollen).

Zunächst werden drei Beispiele untersucht (der Meßprozeß, die Quantenlogik, das EPR-Paradoxon), wobei in verschiedenen Zusammenhängen das gleiche grundlegende Problem zum Vorschein kommt. Anschließend werden

[3] Ich werde auch nur kurz darauf eingehen, ob das Bewußtsein des Physikers eine besondere Rolle im Meßprozeß spielt, und ich werde nicht auf die sogenannte „Many-Worlds-Interpretation" der Quantenmechanik eingehen, bei der grob gesagt jeder Meßprozeß (anschaulich: „jeder Würfelwurf") die Welt vervielfacht, so daß in jeder der Teilwelten eines der möglichen Ergebnisse vorliegt (beim Würfeln in jeder der sechs Teilwelten eine andere Zahl fällt). Zur kritischen Diskussion dieser in vielerlei Hinsicht aufschlußreichen Interpretationen vgl. Kanitscheider (1979) S. 264 f., S. 308 ff. und Kanitscheider (1981) S. 183 ff.

[4] Holdsworth/Hooker (1983); vgl. auch die Bibliographien von Nilson (1976) und Beehner (1980).

die erkenntnistheoretischen Voraussetzungen diskutiert, unter denen die untersuchten Fragen überhaupt erst sinnvoll werden. Dabei wird gezeigt, daß der Realismus durch die Quantenmechanik allein, d. h. ohne zusätzliche philosophische Voraussetzungen, nicht erschüttert werden kann. Alle Versuche, den Realismus (bzw. eine bestimmte Variante des Realismus) mit Hilfe der Quantenmechanik zu widerlegen, brauchen erkenntnistheoretische Prämissen, die selbst schon mit dem Realismus unvereinbar sind.

Vor allem möchte ich durch die folgenden Untersuchungen deutlich machen, daß die Diskussion um die Grundlagen der Quantenmechanik durchaus spannend und nicht nur für Spezialisten von Bedeutung ist.

1. DER QUANTENMECHANISCHE MESSPROZESS

a) Ein einfaches Modell des Meßprozesses

Man muß sich immer wieder ins Gedächtnis rufen, daß die Grundlagenprobleme der Quantenmechanik ihre Ursache in der Struktur des mathematischen Formalismus haben. Aber auch dann, wenn man kein Spezialist in Sachen Algebra und Funktionalanalysis ist, kann man sich doch eine gewisse Vorstellung von der Art der Schwierigkeiten verschaffen. Deshalb möchte ich im folgenden ein vereinfachtes Modell eines Experimentes skizzieren. Wir wollen das Licht als einen Wellenvorgang ansehen, bei dem man eine Schwingungsebene auszeichnen kann. Schickt man Licht z. B. durch ein Turmalinkristall, so schwingt alles austretende Licht in der gleichen Ebene. Man sagt, das Licht ist polarisiert. Ein zweiter Kristall (Analysator) läßt alles Licht durch, wenn die Schwingungsebene und die Ebene des Analysators übereinstimmen (Abb. 1a). Verdreht man die Ebenen gegeneinander, wird die Intensität des Lichtes hinter dem Analysator immer geringer (Abb. 1c). Wenn die Schwingungsebene des Lichts und des Analysators aufeinander senkrecht stehen, so wird überhaupt kein Licht mehr durchgelassen (Abb. 1b). Den gleichen Sachverhalt kann man auch in der Teilchensprache ausdrücken. Stehen die Schwingungsebene des polarisierten Lichtes und der Analysator parallel, so wird jedes ankommende Photon durchgelassen (Abb. 2a). Stehen die Ebenen senkrecht aufeinander, wird kein Photon durchgelassen (Abb. 2b). Kompliziert wird der Fall, wenn die Ebenen zueinander geneigt sind. Man kann aufgrund der Theorie nicht mehr voraussagen, ob ein heranfliegendes Photon durchgelassen wird oder nicht. Bei ein und derselben gegenseitigen Neigung der Ebenen kann ein Photon durchgelassen werden und das nächste unter Umständen nicht. Für einzelne Photonen kann man nur noch Wahrscheinlichkeitsaussagen machen. Schickt man etwa in einem Experiment 1000 Photonen mit gleichem Winkel der Polarisationsebene auf einen Analysator und wiederholt dann das Experiment bei anderen Winkeln, so wird man feststellen, daß von den 1000 Photonen im Schnitt um so weniger durchgehen, je mehr die Ebenen zueinander geneigt sind (der Topf in der Abb. 2 soll einen Zähler darstellen, der die durchgehenden Photonen zählt).

EIN MODELL DES QUANTENMECHANISCHEN MESSPROZESSES

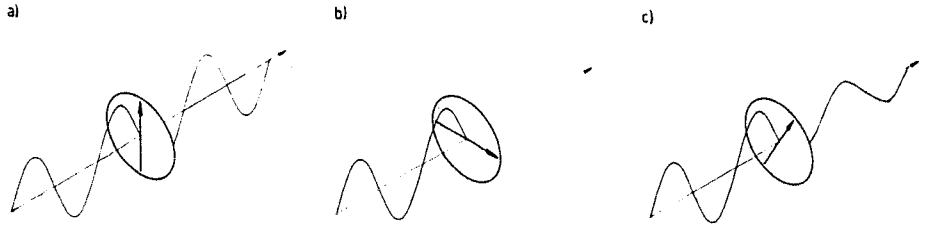

Abb. 1: Das klassische Wellenbild
a) Stehen Polarisationsebene und Analysator parallel, so wird *alles* Licht durchgelassen.
b) Stehen die Polarisationsebene und die Ebene des Analysators aufeinander senkrecht, wird *kein* Licht durchgelassen.
c) Mit zunehmender Neigung der Ebenen nimmt die Intensität des durchfallenden Lichtes ab.

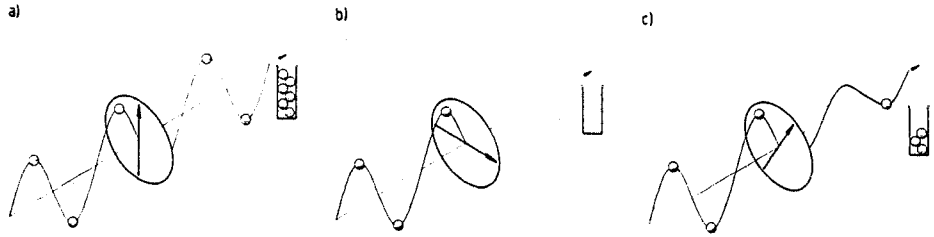

Abb. 2: Die Quantenmechanik
a) Stehen Materiewellen und Analysator parallel, werden *alle* Photonen durchgelassen.
b) Stehen die Ebenen senkrecht, wird kein Photon durchgelassen.
c) Je mehr die Ebenen zueinander geneigt sind, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, daß ein Photon durchgelassen wird.

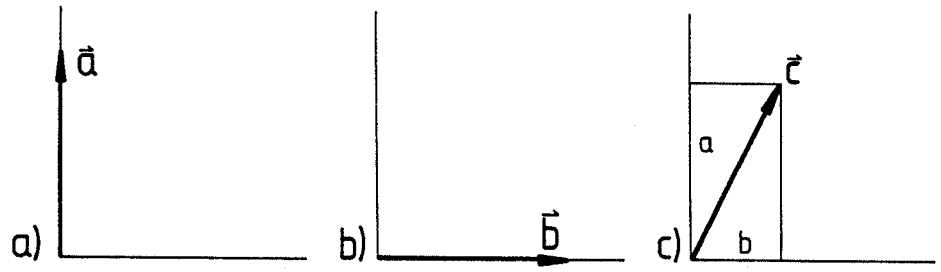

Abb. 3: Das mathematische Bild (Vektoren [Pfeile] im Hilbertraum [Ebene])
a) Fall a wird durch $\vec{a}$ repräsentiert.
b) Fall b wird durch $\vec{b}$ repräsentiert.
c) Fall c wird durch $\vec{c}$ repräsentiert.

Ich möchte jetzt zu dem mathematischen Bild dieses Sachverhalts übergehen. Mathematiker und mathematische Physiker beschreiben die Situationen a) („Teilchen geht durch") durch einen senkrechten Pfeil. Die Situation b) („Teilchen geht nicht durch") wird durch einen waagrechten Pfeil abgebildet (vgl. Abb. 3). Schwierigkeiten machen nun Zustände der Sorte c), deren Existenz sowohl in der Theorie gefordert wird (als eine Folge der linearen Struktur der grundlegenden Gleichungen) als auch experimentell bestätigt ist.

Das System ist demnach in beliebigen Zuständen der Form $\vec{c} = a\vec{a} + b\vec{b}$ präparierbar. Mögliche Ergebnisse der Polarisationsmessung sind aber nur Situationen wie a) oder b), d. h. nach der Messung liegt entweder der Zustand $\vec{a}$ oder der Zustand $\vec{b}$ vor. Durch die Messung geht $\vec{c}$ in den Zustand $\vec{a}$ oder $\vec{b}$ über, das ist der berühmt-berüchtigte „Zusammenbruch des Wellenpakets" bzw. die „Reduktion der Wellenfunktion". Im allgemeinen interpretiert man dies so, daß das System nach der Messung in einem anderen Zustand als vor der Messung ist. Der Meßprozeß ist deshalb bei bestimmten Messungen prinzipiell nicht vernachlässigbar. Man sagt, das System habe in bezug auf eine Meßgröße einen scharfen Wert („ist in einem Eigenzustand"), wenn es sich in den Basiszuständen $\vec{a}$ oder $\vec{b}$ befindet, denn dann verändert die Messung den Zustand nicht. In der klassischen Mechanik kommen nur solche Zustände vor. Neu in der Quantenmechanik sind Zustände von der Art $\vec{c}$ („Superpositionen"), d. h. Zustände, die nicht Ergebnis der Messung einer bestimmten Größe sein können, da sie keine Eigenzustände dieser Größe sind. Hierin zeigt sich, daß die Quantentheorie andere mathematische Werkzeuge benutzt als die klassische Physik.

Besonders wichtig wird das für Meßgrößen wie Ort und Impuls, deren Operatoren nicht kommutieren (d. h. wenn man zuerst den Impuls und dann den Ort mißt, erhält man ein anderes Ergebnis als bei umgekehrter Reihenfolge). Für diese „inkommensurablen" Größen existieren keine Systemzustände, in denen beide Größen gleichzeitig einen scharfen Wert haben (mathematisch gesprochen: es gibt kein gemeinsames System von Eigenvektoren bei nicht vertauschbaren Operatoren). Das ist der Kern der Heisenbergschen Unschärferelationen aus dem Jahre 1927: Es gibt keinen Zustand, der gleichzeitig eine scharfe Orts- und eine scharfe Impulsangabe zuließe. Im Gegensatz dazu ist in der klassischen Mechanik die Angabe eines scharfen Ortes und eines scharfen Impulses immer möglich (und auch ausreichend, um den Zustand des Systems zu kennzeichnen). Soweit zu unserem vereinfachten Meßmodell.

b) Schwierigkeiten bei der Interpretation des Meßprozesses

Folgende Punkte werden für die weitere Diskussion wichtig sein:

1. Anders als in der klassischen Physik hat eine bestimmte Größe (also eine physikalische Eigenschaft wie Ort und Impuls) nicht in allen Zuständen, sondern nur in Basiszuständen einen eindeutig definierten Wert.

2. Es ist nicht möglich, daß der gleiche Zustand zugleich Ergebnis einer Ortsmessung und Ergebnis einer Impulsmessung sein kann. Wenn z. B. ein Impuls-Eigenzustand vorliegt (anschaulich eine ebene Welle), dann kann man einem Teilchen in diesem Zustand die Eigenschaft „lokalisiert im Punkt x" nicht zusprechen.

3. Dennoch kann eine durchgeführte Ortsmessung als Ergebnis genau die Lokalisation im Punkt x ergeben (ein Zähler spricht an, ein Zähler in der unmittelbaren Nachbarschaft jedoch nicht). Dieses Phänomen nennt man Zustandsreduktion oder Zusammenbruch des Wellenpakets. Bildlich gesprochen ist die ebene Welle in eine Wellenfunktion übergegangen, die nur noch „an einem Punkt" von Null verschieden ist. Deswegen kann man dem Impuls-Eigenzustand die Eigenschaft „lokalisiert im Punkt x" auch nicht ohne weiteres absprechen.

4. Das Problem ist, in welcher Weise die Eigenschaft „lokalisiert im Punkt x" in der Superposition der ebenen Welle enthalten ist: als „latente" Eigenschaft, als Element eines Ensembles, als Propensität (d. h. als Entwicklungstendenz)? In dieser Frage unterscheiden sich nun die verschiedenen Positionen im Interpretationsstreit der Quantenmechanik.

Der Kern des Meßproblems ist mit anderen Worten die Frage, wie die „Drehung" des Zustandsvektors, d. h. der Übergang in einen Basiszustand, zustande kommt. Umstritten ist allerdings schon, ob es sich dabei um einen realen Vorgang oder um einen Artefakt der Statistik handelt (Margenau, Popper)[5]. Die Versuche, die die Zustandsreduktion (den Zusammenbruch des Wellenpakets) durch die quantenmechanische Beschreibung des Meßgeräts und die detaillierte Verfolgung der Meßwechselwirkung zwischen System und Meßapparat zu verstehen, haben sich bisher als erfolglos erwiesen.[6] J. von Neumann hatte die Reduktion des Zustandsvektors als instantanen, akausalen Prozeß aufgefaßt, der nicht durch die übliche Bewegungsgleichung beschrieben werden kann. Wenn es gelänge, diesen Vorgang als einen „normalen" Prozeß zu verstehen, der durch die Schrödingergleichung beschrieben werden kann, dann wäre das natürlich die eleganteste Lösung des Grundlagenproblems.

2. DIE KOPENHAGENER INTERPRETATION

Der Standardausweg aus diesen Schwierigkeiten wird von der Kopenhagener Interpretation (Bohr/Heisenberg) gewiesen, die auch heute noch von den meisten Physikern als maßgeblich angesehen wird. Ich möchte zunächst einen vereinfachten Grundriß der Position von Niels Bohr aufzeichnen.[7]

1. Alle Experimente und ihre Ergebnisse müssen letztlich in der Sprache der klassischen Physik beschrieben werden.

[5] Details und Quellenangaben in Jammer (1974) S. 448 ff. und S. 486 ff.

[6] Vgl. Jammer (1974) S. 519. Max Jammer schildert die Auseinandersetzungen um den Meßprozeß in Kap. 11, die Theorie von J. von Neumann ab S. 474.

[7] Wie bei jeder Zusammenfassung von Bohrs schwankenden und oft gewundenen Äußerungen geht es dabei nicht ganz ohne Gewaltsamkeiten ab. Ausführliche Diskussionen der Bohrschen Gedanken finden sich in Meyer-Abich (1965), Hooker (1972) ab S. 132, Scheibe (1973) Kap. 1, Jammer (1974) Kap. 4, Honner (1982).

2. Die Anwendbarkeit der klassischen Begriffe ist abhängig von den natürlichen Bedingungen der Untersuchungssituation. Speziell erfordert die eindeutige Beschreibung der Atomphänomene, daß die Experimentalanordnung in die Beschreibung mitaufgenommen wird. Wenn zwei zu verschiedenen Beschreibungsweisen gehörende Experimente nicht zusammen ausführbar sind (wie es z. B. bei der Orts- und Impulsmessung der Fall ist), dann schließen diese Beschreibungsweisen einander aus.

3. Es gibt eine unaufhebbare Verknüpfung von Mikrosystem und Meßgerät. Dies wird symbolisiert durch das Auftreten der Planckschen Konstante h und bringt ein Element der Diskontinuität ins Spiel. Innerhalb der klassischen Physik ist die Wechselwirkung zwischen Meßgerät und beobachtetem System vernachlässigbar. In der Quantenmechanik ist sie weder vernachlässigbar noch bestimmbar. Vielmehr ist diese Wechselwirkung prinzipiell unkontrollierbar, so daß man den Einfluß des Meßgerätes weder berechnen noch überhaupt das Verhalten des Mikrosystems von den Wechselwirkungen mit dem Meßgerät abtrennen kann. Es ist dann nicht mehr ohne weiteres möglich, dem Mikroobjekt allein eine physikalische Eigenschaft zuzusprechen. Das Mikrosystem und das Meßgerät sind nur zusammen als sogenanntes Quantenphänomen der Erfahrung zugänglich.

Es gibt also eine innere Grenze der gleichzeitigen Anwendbarkeit von klassischen Beschreibungsweisen. Welche Begriffe im Einzelfall anwendbar sind, hängt von der physischen Situation ab (die z. B. das Meßgerät einschließt). Beschreibungsweisen, die einander ausschließen, aber dennoch für ein vollständiges Bild der Situation beide notwendig sind, nennt Bohr komplementär.

Innerhalb des Ansatzes von Bohr ist es nicht mehr möglich, nach den Details des Meßprozesses zu fragen. Wenn man den Kopenhagener Voraussetzungen zustimmt, ist die Grundlagenfrage der Quantenmechanik gelöst. Es bleibt dann nur noch das psychologische und didaktische Problem, sich von den liebgewonnenen klassischen Vorstellungen und erkenntnistheoretischen Voraussetzungen zu trennen.

Die jetzt folgende Kritik der Kopenhagener Interpretation wird ihr nicht eine subjektivistische Erkenntnistheorie unterstellen, nach der das Bewußtsein eine besondere Rolle im Meßprozeß spielt (die entsprechenden Angriffe von M. Bunge[8] waren hier wohl eine hilfreiche Provokation, sie erwiesen sich aber bei genauer Exegese als nicht zutreffend). Nach dieser Ehrenrettung möchte ich aber auf zwei andere Schwierigkeiten von Bohrs Position hinweisen:[9]

1. Die Schlüsselstellung der klassischen Beschreibung scheint nicht ausreichend gerechtfertigt. Hierdurch kommt ein anthropozentrischer Zug in die Physik, der nicht dem üblichen Vorgehen der Wissenschaft entspricht. Als Angehörige des nachkuhnschen Zeitalters sind wir an Revolutionen gewöhnt, und so fragt man sich, warum es nicht neue Beschreibungsweisen geben soll, die den Quantenobjekten angepaßt sind und die ohne klassische Wurzeln

[8] Vgl. Bunge (1973) S. 87–105.

[9] Vgl. Audi (1973) S. 18–27, Hooker (1972) S. 193–208 und Kanitscheider (1981) S. 174–194.

auskommen. Das genaue Verhältnis von Mikro- und Makrophysik, von Quantenmechanik und klassischer Physik ist nicht hinreichend geklärt.

2. Es ist wohl voreilig, auf die detaillierte Verfolgung der Wechselwirkung von Objekt und Meßgerät zu verzichten. Wieso führt das Auftreten des Wirkungsquantums h zu einem Element der Diskontinuität, wo doch die Schrödingergleichung eine „klassische" kontinuierliche Bewegungsgleichung ist, nach der Zustandsänderungen deterministisch vor sich gehen?[10]

Die Komplementaritätsphilosophie ist sicher ein respektabler Lösungsvorschlag. Man kann ihr aber den Vorwurf machen, daß sie den Meßprozeß nicht erklärt, sondern die Festschreibung eines fehlenden Wissens legitimiert.

Unter einem erkenntnistheoretischen Blickwinkel ist die Kopenhagener Interpretation höchstens mit einer abgeschwächten Form des Realismus vereinbar, da sie das Zusprechen einer Eigenschaft situationsabhängig macht. Ein solches Vorgehen hat sicherlich eine starke phänomenalistische Tendenz. Dieser Phänomenalismus wird vermieden in zwei Weiterentwicklungen und Präzisierungen der Bohrschen Strategie aus neuerer Zeit. Gemeint sind die eher erkenntnistheoretischen Überlegungen von Hilary Putnam[11] und die Formulierungen im Rahmen eines quantenlogischen Formalismus z. B. durch Hans Primas.[12] Wir wollen uns hier auf das erkenntnistheoretisch geprägte Konzept von Hilary Putnam beschränken.

Putnam stützt sich dabei auf eine Analogie, die mehrfach von Niels Bohr herangezogen worden ist: Ähnlich wie in der Relativitätstheorie die Angabe einer Länge von dem gewählten Bezugssystem abhängt, soll nun auch in der Quantenmechanik die Angabe über den Sinn und den Wahrheitswert einer Aussage von dem gewählten Bezugssystem (z. B. einer Experimentieranordnung) abhängen. Die Auswahl einer quantenmechanischen Meßgröße entspricht der Einrichtung eines Bezugssystems, relativ zu dem das Quantensystem bestimmte Eigenschaften hat. (In der quantenlogischen Formulierung entspricht dem die Auswahl eines Booleschen Unterverbandes.) So kann z. B. ein Beobachter in einem Bezugssystem den Ort eines Teilchens messen, ein anderer Beobachter in einem anderen Bezugssystem kann den Impuls des Teilchens messen. Beide Aussagen sind in ihrem jeweiligen Rahmen wahr. Dennoch ist es nicht möglich, beide Aussagen zusammenzusetzen und etwa die Konjunktion beider Aussagen zu behaupten. Innerhalb einer Anordnung (eines Rahmens), d. h. bei allen Eigenschaften, die gleichzeitig meßbar sind, behandelt die Quantenmechanik (gemäß dieser Interpretation) gemessene Werte und nicht gemessene Werte in gleicher Weise. Deswegen ist diese Interpretation vor dem Vorwurf des Instrumentalismus geschützt. Es wird jedoch der Eigenschaftsbegriff selbst relativiert auf eine Meßanordnung. Die

[10] Vgl. auch Stein (1970) S. 102, der hervorhebt, daß die Vorgänge beim Meßprozeß ein ungelöstes *physikalisches* Problem darstellen.

[11] Putnam (1981).

[12] Primas (1984), insbes. Abschnitte 8 bis 10; Primas (1983), insbes. Kap. 4 und 5. Hinweise auf frühere Überlegungen in ähnlicher Richtung geben Primas (1983) S. 201 und Holdsworth/Hooker (1983) S. 152, S. 157, S. 180.

Angabe von Eigenschaften wird abhängig von der physischen Umgebung, so daß verschiedene Beobachter mit verschiedenen Anordnungen das System mit Hilfe verschiedener Eigenschaften beschreiben, wobei es keine absolute, übergeordnete Beschreibung gibt.

Der erkenntnistheoretische Hintergrund bei Hilary Putnam ist seine Auffassung, daß man unter der Wahrheit eines Satzes dessen (idealisiert aufgefaßte) rationale Akzeptierbarkeit verstehen sollte und nicht seine „Korrespondenz" im Sinne einer nicht epistemischen Relation. Vorausgesetzt wird dabei, daß Eigenschaften, die zu verschiedenen Bezugssystemen gehören, nicht gleichzeitig überprüfbar sind. So kann die Aussage „dieses Teilchen hat den Impuls p" und die Aussage „dieses Teilchen hat den Ort x" nicht gleichzeitig experimentell überprüft werden. So wie die Eigenschaften von Dingen in der Welt allgemein theorienrelativ sind, so sollen auch quantenmechanische Eigenschaften eines physikalischen Systems von der physikalischen Situation bei der Messung abhängig sein.

Was ist damit für die Interpretation der Quantenmechanik gewonnen? Erstens verschwinden alle Probleme, die dadurch entstehen, daß man nach dem Zusammenhang der verschiedenen Aspekte fragt. Ein typisches Beispiel für diese Fragestellung ist, was denn nun eigentlich das Elektron ist, das sich einmal als Teilchen und einmal als Welle zeigt.[13] Wie ist der Zusammenhang zwischen den verschiedenen Erscheinungsformen? Ist das Elektron ein lokalisiertes Teilchen oder ein ausgebreiteter Wellenvorgang? Ist die raumzeitliche Beschreibung als grundlegender Rahmen der Physik auch in der Quantenmechanik noch zu gebrauchen? Der zweite Vorteil ist, daß alle Probleme des Meßprozesses verschwinden. Die Schwierigkeiten des Meßprozesses finden sich ja gerade da, wo ein System innerhalb eines Bezugsrahmens präpariert worden ist (z. B. in einen Impulseigenzustand gebracht worden ist), und wo dann eine Eigenschaft gemessen wird, die (wie in unserem Beispiel der Ort) zu einem anderen Bezugsrahmen gehört (in dem der Systemzustand also eine Superposition ist). Alle Fragen, die den Übergang zwischen verschiedenen Bezugsrahmen betreffen, werden aber durch die erkenntnistheoretische Relativierung der Beschreibung von vornherein abgeschnitten. Es scheint, daß man auf diese Weise alle Paradoxa und alle sonstigen Interpretationsschwierigkeiten der Quantenmechanik umgehen kann, indem man zeigt, daß sie im Rahmen eines relationalen Eigenschaftsbegriffs nicht mehr formulierbar sind.

Ich möchte im folgenden begründen, warum ich den Putnamschen Kompromißvorschlag nicht für einen glücklichen Ausweg halte.

1. Die Analogie zwischen Relativitätstheorie und Quantenmechanik sollte nicht überschätzt werden. In der Relativitätstheorie sind die Vorgänge beim Wechsel des Bezugssystems berechenbar, es gibt sogar explizite Umrechnungsformeln (die Lorentz-Transformationen). In der Quantenmechanik ist jedoch nicht so einfach verfolgbar, was beim Wechsel eines Bezugssystems geschieht. Dabei müßte eigentlich physikalisch zu verstehen sein, warum ein System bestimmte Eigenschaften hat, wenn es mit diesem Meßgerät gemessen wird, sie

[13] Vgl. dazu Stöckler (1984b).

aber nicht hat, wenn es mit jenem Meßgerät gemessen wird. Gerade darüber gibt aber die Kopenhagener Interpretation und die Putnamsche Weiterentwicklung keine Auskunft. Diese setzen schon voraus, daß die Wechselwirkung zwischen Objekt und Meßgerät prinzipiell nicht kontrolliert werden kann, d. h. keiner theoretischen Untersuchung zugänglich ist. Hier wird u. U. unnötig eine Erkenntnisgrenze postuliert. Die Vorgänge beim Wechsel des Bezugssystems (der Methode der Verifikation) werden nicht verständlich gemacht, da sich aufgrund der verifikationistischen Bedeutungstheorie keine Fragen mehr stellen, die über das Bezugssystem hinausgehen.

2. Es ist wohl richtig, daß die verschiedenen Theorien über die Welt, die im Laufe der Geschichte entwickelt worden sind, sich nicht in eine einheitliche Übertheorie integrieren lassen. Die Objekte , aus denen die Welt besteht, sind sicherlich in dem Sinne theorieabhängig, daß man im Wandel der Zeit nicht immer an die Existenz der gleichen Objekte geglaubt hat. Dafür kann man gute Argumente vorbringen. Andererseits folgt daraus noch nicht, daß man darauf verzichten sollte, innerhalb *einer* Theorie die verschiedenen Aspekte zu integrieren. Es wird einfach hingenommen, daß man über das Vorliegen oder Nichtvorliegen bestimmter Eigenschaften nur unter Angabe der Experimentalanordnung sprechen kann, ohne daß diese Einschränkung physikalisch begründet wird.

Das Problem ist doch wohl weniger, warum man bestimmte Eigenschaften unter bestimmten Bedingungen nicht messen kann, als vielmehr die Frage, warum z. B. eine Ortsmessung einen scharfen Wert ergibt, obwohl diese Eigenschaft nicht präpariert war. (Und das ist wieder die Frage, wie der Übergang zwischen den Bezugssystemen vor sich geht.) Durch die Relativierung des Eigenschaftsbegriffs auf Bezugssysteme kommt eine Aufspaltung der Quantenmechanik ins Spiel, die sich im Formalismus nicht widerspiegelt: Der Hilbertraum der Zustände bildet ja eine Einheit, aus der die aspektabhängigen Beschreibungen Untermengen ausgrenzen. Dieser mathematischen Integration der Zustände im Gesamthilbertraum scheint aber in der Kopenhagener Interpretation und in ihren Weiterentwicklungen keine Integration der Aspekte zu entsprechen. (In der quantenlogischen Formulierung stellt sich das gleiche Problem: Welche Rolle hat der gesamte Aussagenverband, wenn nur jeweils Boolesche Unterverbände innerhalb eines Bezugssystems betrachtet werden?) Hier fehlen also die invarianten Größen, die in der Relativitätstheorie die Einheit beim Wechsel der Bezugssysteme garantieren.

Zusammenfassend möchte ich bemerken, daß diese Interpretationen gangbare Wege sind. Dennoch meine ich, daß auch die Weiterentwicklungen der Kopenhagener Interpretation wegen der angedeuteten Schwierigkeiten keine *befriedigende* Interpretationen der Quantenmechanik sind.

3. DAS LABYRINTH DER QUANTENLOGIK[14]

Eine zweite wichtige Gruppe im Interpretationsstreit stellen die Quantenlogiker dar. Wie überhaupt in der Geschichte der Deutungen der Quantenme-

[14] Vgl. den gleichnamigen Titel bei van Fraassen (1974).

chanik zeigt sich auch hier eine Tendenz zu immer subtileren Problemstellungen. Eine solche Entwicklung bringt jedoch Probleme mit sich. Die einschlägigen Aufsätze sind nur noch für Spezialisten verständlich, so daß die Kommunikation zwischen den verschiedenen Arbeitsgruppen von vielen Mißverständnissen bedroht ist oder ganz zum Erliegen kommt. Dies mag nur ein didaktisches Problem sein, aber zuweilen gefährden die Präzisierungsbemühungen auch die Inhalte. Nämlich dann, wenn die hohe Genauigkeit nur dadurch erreicht wird, daß die entscheidenden Fragen umgangen werden. Ich möchte versuchen, dafür anschauliche Beispiele aus der Quantenlogik anzuführen. Es sei jedoch im voraus ganz ausdrücklich darauf hingewiesen, daß man dabei bestenfalls typische Beispiele, nicht aber eine erschöpfende Behandlung des Problems erwarten kann.

Bei Diskussionen um die Quantenlogik ist Vorsicht am Platze. Es gibt nämlich eine überraschende Fülle ganz unterschiedlicher Ansätze.[15] Für eine Reihe dieser Ansätze sagt die Bezeichnung Quanten*logik* schon zuviel aus. Treffender dürfte man z. B. oft nur von der mathematischen Struktur der Menge der empirischen Elementaraussagen sprechen. Für diesen logisch-algebraischen Zugang zur Quantenmechanik ist es wohl bezeichnend, daß die frühe klassische Arbeit von Garret Birkhoff und Johann von Neumann, von der viele Anregungen ausgingen, 1936 in einer mathematischen Zeitschrift erschien.[16] Die eigentliche Blüte dieses mathematisch orientierten Zugangs zur Quantenmechanik begann allerdings erst vor 20 Jahren.

Eine typische Argumentationsweise geht von der Idee aus, daß eine Messung aus dem Raum der möglichen Zustände des Systems eine Untermenge auswählt. Zu einer sogenannten Elementaraussage gehört also eine Untermenge des Zustandsraumes. In unserem Beispiel des Meßprozesses gehört zu der Aussage „das Lichtteilchen geht durch den Polarisationsfilter" die Untermenge des Hilbertraumes, die durch den Pfeil $\vec{a}$ dargestellt ist. Die Aussagen über das physikalische System (die empirischen Elementaraussagen) können also eindeutig den Unterräumen des Zustandsraumes zugeordnet werden. Nun kann man mit diesen empirischen Elementaraussagen auch Verknüpfungen bilden. Der Aussage „wen α gemessen wird, dann wird auch β gemessen" entspricht im Zustandsraum die Relation, nach der die Untermenge, die α zugeordnet ist, in der Untermenge enthalten ist, die β zugeordnet ist ($S_\alpha \subset S_\beta$). In der Quantenmechanik ist nun der Zustandsraum durch den Hilbertraum gegeben. Die Aussage „α und β" ($\alpha \cap \beta$) wird nun der größte abgeschlossene Unterraum zugeordnet, der sowohl in dem α zugeordneten Unterraum S_α als auch in dem β zugeordneten Unterraum S_β enthalten ist. Der Aussage „α oder β" ($\alpha \cup \beta$) ist der kleinste abgeschlossene Unterraum zugeordnet, der sowohl S_α als auch S_β enthält. Es zeigt sich nun, daß die Elementaraussagen unter diesen beiden Operationen die algebraische Struktur

[15] Für einen Überblick vgl. die Eingangsreferate von P. Mittelstaedt und B. van Fraassen in Beltrametti (1981), die Bände von Hooker (1975/1979) sowie vor allem Holdsworth/Hooker (1983).

[16] Birkhoff/Neumann (1936).

eines Verbandes bilden, der in der klassischen Physik Boolesch ist, in der Quantenmechanik jedoch nicht. Das bedeutet anschaulich, daß das Distributivgesetz für quantenmechanische Elementaraussagen nicht mehr gilt, d. h.

$$(\alpha \cup \beta) \cap \gamma = (\alpha \cap \gamma) \cup (\beta \cap \gamma)$$

gilt nicht für beliebige Aussagen.[17] Man kann z. B. bei Hilary Putnam nachlesen, wie die Rätsel des Doppelspaltes damit scheinbar zum Verschwinden gebracht werden können.[18] Ich möchte noch einmal zusammenfassen. Bei dieser Art von Quantenlogik betrachtet man die Struktur der Verknüpfungen der empirischen Elementaraussagen der Theorie. Die klassische Mechanik und die Quantentheorie unterscheiden sich nun in wichtigen Punkten in dieser Struktur. Darin spiegelt sich, daß in der Quantenmechanik der Phasenraum durch einen Hilbertraum ersetzt wird. Da in der Quantenmechanik nicht alle Größen gleichzeitig scharf meßbar sind, ist die Struktur des Verbands der empirischen Elementaraussagen nicht mehr Boolesch. Bei diesen quantenlogischen Ansätzen geht es also zunächst nur um die algebraische Struktur des Verbandes der Unterräume des Hilbertraumes, wobei allerdings mit diesen Unterräumen empirische Eigenschaften verknüpft sind. Wenn man die algebraische Struktur der Unterräume (und der damit verknüpften Aussagen) als Logik bezeichnen will, dann ist es auch problemlos, daß diese „Logik" aus der Struktur des Hilbertraumes abgelesen wird und damit eine empirische Wissenschaft wird. Denn es ist nicht zu erwarten, daß die Verknüpfung der empirischen Elementaraussagen die gleiche Struktur hat wie die übliche Logik. Soviel zu unserem vereinfachten Beispiel.

Man muß sich über folgendes ganz klar sein: Die zuweilen diskutierte Frage, ob es sinnvoll ist, bei der Quantenlogik von einer durch die (quantenmechanische) Erfahrung erzwungene Abänderung der Logik zu sprechen, kann nur beantwortet werden, wenn man sich verständigt hat, was man vernünftigerweise unter „Logik" zu verstehen hat.

Eine zweite Frage ist, ob diese Abänderung der „Logik" hilft, das Grundlagenproblem der Quantenmechanik aufzuklären. Die Vertreter des logisch-algebraischen Zugangs zur Quantenmechanik haben die Tendenz, von der Untersuchung der Struktur des Aussagenverbandes ein besonderes Verständnis der Theorie zu erwarten. Ich meine dagegen, daß solche Untersuchungen zwar nützlich sind, daß aber aus ihnen doch nicht alles folgt, was zum Verständnis einer Theorie notwendig ist. Es wird dabei z. B. nicht erklärt, warum bei identisch präparierten Systemen eine Impulsmessung einen scharfen *Impuls* ergibt, das Ergebnis einer Ortsmessung jedoch ein *scharfer Ortszustand* ist. Alle Probleme im Zusammenhang mit der Reduktion des Wellenpakets werden umgangen, wenn man nur die Situation *nach* der Messung untersucht und nur den Zustand nach der Messung als Element der

[17] Max Jammer hat ein Beispiel angegeben, in dem dieses Gesetz verletzt ist (Jammer (1974) S. 349): Man setze $\alpha \triangleq$ „$s_x = \hbar/2$", $\beta \triangleq$ „$s_x = -\hbar/2/2$" und $\gamma \triangleq$ „$s_z = \hbar/2/2$". Da $\alpha \cup \beta = 1$ und $\alpha \cap \gamma = \beta \cap \gamma = 0$, ist das Distributivgesetz verletzt.

[18] Putnam (1969).

Menge der empirischen Elementaraussagen zuläßt. Das Wichtige bei der Quantenmechanik ist aber nun gerade, daß die Meßergebnisse (die Zustände nach der Messung) nicht in einfacher Weise mit dem Systemzustand vor der Messung zusammenhängen. Das Verhältnis von *Zustand* des Systems (d. h. das Verhältnis der Wellenfunktion, die sich deterministisch nach der Schrödingergleichung zeitlich entwickelt) zu dem in der Elementaraussage protokollierten Vorliegen einer bestimmten *Eigenschaft* (die bei der Messung durch einen indeterministischen „Sprung" entsteht) ist gerade der Punkt der Quantenmechanik, der den Interpretationsstreit auslöst.[19] Dieser Punkt wird durch den logisch-algebraischen Zugang jedoch gerade ausgegrenzt. Hier kommt die operationalistische Grundtendenz der meisten quantenlogischen Ansätze zutage, die oft schon darin angelegt ist, daß eine physikalische Theorie aufgrund der Struktur der Elementaraussagen analysiert wird und die untersuchten Elemente Aussagen über Messungen (oder Ja-Nein-Experimente) sind.

Aus den vielfältigen Ansätzen im Bereich der Quantenlogik sei im folgenden noch ein Konzept herausgegriffen, dem ein besonderer Logikbegriff zugrunde liegt. An den Auseinandersetzungen um die Quantenlogik, wie sie von Peter Mittelstaedt entwickelt wurde[20], kann man deutlich machen, daß die Interpretationsproblematik der Quantenmechanik sogar für die Grundlagendiskussion der Logik wichtig ist.

Eine Pointe dieser Auffassung liegt darin, daß die für eine Logik unverzichtbaren Eigenschaften der Erfahrungsunabhängigkeit und Universalität nicht mehr der *klassischen Logik* zugesprochen werden können, sondern vielmehr gerade ein Kennzeichen der *Quantenlogik* sind. So kann die Quantenlogik nicht nur als Logik im ursprünglichen Sinn dieses Wortes angesehen werden, sie verdient diese Bezeichnung sogar im stärkerem Maße als die klassische Logik.

Der Grund hierfür wird darin gesehen, daß in der klassischen Logik stillschweigende Voraussetzungen über den von der Sprache erfaßten Realitätsbereich gemacht werden („ontologische Prämissen"). Mittelstaedt erläutert dies am Beispiel der Rechtfertigung der intuitionistischen Logik, in der $A \vee \neg A$ (das tertium non datur) kein formal wahrer Satz mehr ist. Die Gültigkeit von $A \vee \neg A$ läßt sich nur rechtfertigen, wenn man als ontologische Prämisse akzeptiert, daß alle Sachverhalte objektiv entschieden sind. Wenn diese Prämisse nicht erfüllt ist, dann kann man den Kalkül der klassischen Logik so abschwächen, daß z. B. $A \vee \neg A$ kein formal wahrer Satz ist.

[19] Vgl. hierzu auch die erhellenden Überlegungen bei van Fraassen (1981) S. 237 ff. Die unterschiedlichen Auffassungen in der Quantenlogik über den Status physikalischer Theorien und über die Sonderproblematik der Quantenmechanik haben Holdsworth/Hooker (1983) analysiert. Diese hervorragende Arbeit zeichnet sich dadurch aus, daß die philosophischen Aspekte nicht von der mathematischen Diskussion verdrängt werden.

[20] Einen informativen und untechnischen Überblick gibt Mittelstaedt (1984), auf dem die folgende Darstellung beruht. Eine ausführliche Erörterung findet sich in Mittelstaedt (1978).

Das Verhältnis von klassischer und intuitionistischer Logik dient nun als Vorbild beim Übergang zur Quantenmechanik. In der intuitionistischen Logik wird die objektive Entschiedenheit aller Sachverhalte nicht mehr vorausgesetzt, in der Quantenlogik wird die Voraussetzung aufgegeben, daß eine einmal bewiesene Elementaraussage auch nach dem Beweis einer anderen Aussage unbeschränkt zur Verfügung steht und in einem Dialogspiel zitiert werden kann. Dies wird darauf zurückgeführt, daß in der Mikrophysik – im Gegensatz zur klassischen Physik – Elementareigenschaften in der Regel nicht mehr unabhängig voneinander überprüfbar sind. So wird z. B. eine Impulsmessung das Resultat einer vorhergehenden Ortsmessung verändern. Auch die Aufgabe der ontologischen Prämisse der unbeschränkten Verfügbarkeit spiegelt sich in einer Abschwächung des Kalküls der klassischen Logik, so daß in der Quantenlogik etwa $A \rightarrow (B \rightarrow A)$ kein formal wahrer Satz mehr ist.

Die quantenlogische Abschwächung der klassischen Logik ist also auf ähnlich indirekte Weise erfahrungsabhängig wie der Übergang von der klassischen zur intuitionistischen Logik. Die Quantenlogik ist unabhängig vom Inhalt der Elementaraussagen; die Eigenarten des Erfahrungsbereichs, auf den sich die Elementaraussagen beziehen, bestimmen jedoch die Möglichkeiten des Beweisens (etwa im Dialogspiel) und damit die Struktur des Logikkalküls.

Die vorangegangenen Andeutungen der Mittelstaedtschen Konzeption einer Quantenlogik reichen natürlich nicht für eine eingehende Auseinandersetzung. Es soll damit nur plausibel gemacht werden, wie die Quantenmechanik tatsächlich die Diskussion um die Grundlagen der Logik anregen kann. Man vergleiche dazu etwa die geschilderte Logikauffassung mit bestimmten argumentationspragmatischen Begründungen der Logik[21]. Daß die quantenlogischen Überlegungen nicht ohne weiteres mit diesen pragmatischen Begründungsversuchen verträglich sind, zeigt sich schon daran, daß unterschiedliche Kalküle die Rolle der universellen Logik übernehmen. Argumentationspragmatisch wird der minimallogische Kalkül (Johansson) als allgemein ausgezeichnet (d. h. der intuitionistische ohne das ex falso quodlibet), in dem (im Gegensatz zur Quantenlogik) $A \rightarrow (B \rightarrow A)$ gültig ist. Innerhalb dieses Konzepts erscheint die Quantenlogik als kontextvariant (und wäre damit keine Logik im engeren Sinne mehr). So muß wohl eine der beiden Positionen ihre Ansprüche einschränken: Entweder ist die lebensweltliche Argumentationspraxis als Ausgangsbasis der formalen Pragmatik zu eng, so daß einige in ihr als kontextinvariant aufgefaßten Regeln tatsächlich nur unter speziellen Bedingungen (etwa der klassischen Physik) gültig sind. Oder aber der an Messungen orientierte Aussagebegriff der Quantenlogik und die Art der Einführung der quantenlogischen Operatoren stimmt nicht mit dem überein, was unter einer pragmatisch gerechtfertigten Logik verstanden wird. Die Quantenlogik könnte dann nicht die Nachfolge der klassischen Logik als erfahrungsunab-

[21] Eine solche Begründungsstrategie entwickelt Gethmann (1979), für einen ersten Überblick siehe Gethmann (1980).

hängige und universelle Logik antreten. Die Auseinandersetzung darüber (bei der es im Grunde um das jeweilige Logikverständnis geht) soll aber hiermit den einschlägigen Spezialisten überlassen werden.

4. DAS EPR-PARADOXON

Die Diskussionen um die Interpretation der Quantenmechanik haben sich schon immer um einige wenige anschauliche Fallbeispiele und Gedankenexperimente gruppiert. Als Beispiele seien Wigners Freund, Schrödingers Katze und Rosens Lokomotive erwähnt. Gegenwärtig sind sowohl physikalische als auch philosophische Fachzeitschriften voll von Arbeiten über ein Paradoxon, das im Jahre 1935 von Albert Einstein, P. Podolsky und N. Rosen erfunden wurde. Dieses EPR-Paradoxon ist wohl auch deshalb zum Mittelpunkt der Auseinandersetzungen geworden, weil D. Bohm (1951) und J. S. Bell (1964) es umformen und fortentwickeln konnten, so daß dazu sogar Experimente möglich wurden. Die Diskussionen um das EPR-Paradoxon haben immerhin so viel Aufsehen erregt, daß ihnen 1979 in „Scientific American" ein Aufsatz unter dem Titel „Die Quantentheorie und die Realität" gewidmet wurde.[22] Dort wird plakativ behauptet, daß die Lehre, nach der die Welt aus unabhängig vom menschlichen Bewußtsein bestehenden Gegenständen aufgebaut ist, nicht mit der Quantenmechanik und experimentell bestätigten Fakten vereinbart werden könne. In einer physikalischen Fachzeitschrift konnte man lesen, daß das aus dem EPR-Gedankenexperiment entwickelte Bellsche Theorem zusammen mit experimentellen Ergebnissen nur die Wahl lasse, entweder auf die erkenntnistheoretische Position des Realismus zu verzichten oder die Vorstellung von Raum und Zeit dramatisch zu verändern.[23] Weiter ist in diesem Zusammenhang behauptet worden, daß die aus dem EPR-Experiment folgenden nichtklassischen Korrelationen zwischen nichtwechselwirkenden und räumlich getrennten Objekten den Systembegriff der klassischen Naturwissenschaften problematisch machten und die Idee, daß die Welt durch Kompartimentalisierung beschrieben werden kann, revidiert werden müsse.[24] Das ist wohl Grund genug, das EPR-Paradoxon kurz zu erläutern und zu prüfen, ob die aufgestellten Behauptungen tatsächlich begründet sind. Für die darüber geführten Diskussionen war von Anfang an eine enge Verflechtung von physikalischen Argumenten (aus dem Formalismus der Quantenmechanik) und von philosophischen Überlegungen kennzeichnend. Auf die Details des Formalismus kann hier verzichtet werden, da sich die wesentlichen Folgerungen auch an einem einfachen Modell erläutern lassen. Ebenso werde ich auf alle historischen Zusammenhänge verzichten.[25]

[22] d'Espagnat (1979). Auch die „Physikalischen Blätter" haben sich dieses Thema angenommen (Mückenheim (1983)).

[23] Clauser/Shimony (1978) S. 1881, 1883, 1921.

[24] Primas/Gans (1979).

[25] Eine ausführliche Darstellung der formalen und historischen Aspekte findet sich in Stöckler (1984a) Kap. IV.

Ein einfaches Beispiel einer EPR-Situation hat David Bohm im Jahre 1951 angegeben. Als Modell dient dabei der Zerfall eines Spin-0-Teilchens M in zwei identische Spin-½-Teilchen. Der Gesamt-Spin soll auch dann 0 bleiben, wenn die Teilchen in entgegengesetzte Richtungen davonfliegen. Das Experiment besteht nun darin, daß man in verschiedenen Richtungen die Komponenten des Spins der Teilchen mißt (vgl. Abb. 4).

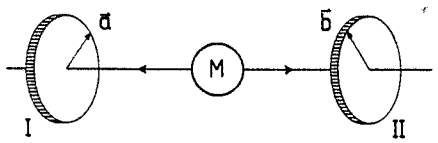

Abb. 4: Ein einfaches Modell zum EPR-Paradoxon

Man kann dazu etwa Stern-Gerlach-Magnete benutzen. Die Meßgeräte I und II seien so weit räumlich voneinander getrennt, daß keine Messung an einem der Teilsysteme einen physikalischen Einfluß auf das andere Meßgerät oder auf das andere System haben kann. An jedem Meßgerät kann das Teilchen nach oben abgelenkt werden („spin-up"), oder es kann nach unten abgelenkt werden („spin-down"). Wenn man die beiden Magnete nach der gleichen Richtung orientiert (also $\vec{a} = \vec{b}$ wählt), so stellt man fest, daß immer entweder bei Gerät I „spin-up" und bei Gerät II „spin-down" gemessen wird oder umgekehrt bei Gerät I „spin-down" und bei Gerät II „spin-up". D. h. die beiden Teilchen haben immer entgegengesetzten Spin. Da man die Richtungen der Magnete frei wählen kann (und dabei nacheinander auch solche Richtungen auswählen kann, die nicht gleichzeitig scharf meßbar sind), kann man nicht in jedem Fall annehmen, daß die Teilchen schon vor der Messung den im Meßprozeß entstehenden Zustand haben. Der Kern des EPR-Paradoxons liegt darin, daß dennoch die Meßausgänge an den beiden Meßgeräten Korrelationen zeigen, und das, obwohl keine physikalische Verbindung zwischen den beiden Meßgeräten möglich ist. Man könnte sich nun vorstellen, daß die Ergebnisse der Messungen für beliebige Richtungen schon im voraus festgelegt sind, und zwar durch sogenannte verborgene Parameter, die im gewöhnlichen Formalismus der Quantenmechanik nicht auftauchen (etwa weil dieser dafür zu grob ist) und die nicht kontrolliert werden können. Der genaue verborgene Zustand eines Teilchenpaares könnte dann durch eine Messung aufgedeckt werden, so daß das Ergebnis der anderen Messung vorhergesagt werden kann. Dieser Ausweg ist nun für eine große Klasse von Theorien mit verborgenen Parametern versperrt. Im Jahre 1964 hat nämlich J. S. Bell gezeigt, daß keine deterministische verborgene Parameter-Theorie (sofern sie lokal in einem noch zu erläuternden Sinne ist) alle statistischen Vorhersagen der Quantenmechanik wiedergeben kann. Lokal bedeutet dabei, daß der Meßausgang an einem Meßgerät nur von dem Zustand des zerfallenden Teilchenpaares und von der Orientierung dieses Meßgeräts abhängen darf, also insbesondere nicht durch

den Meßausgang am anderen Meßgerät beeinflußt werden darf. (Anzumerken ist, daß die Quantenmechanik diese Bedingung nicht erfüllt.) Die zentrale Bedeutung der Lokalität wurde betont, als in der Folge von Clauser, Horne, Holt und Shimony gezeigt wurde, daß auch stochastische Theorien mit verborgenen Parametern (die also nicht den Meßausgang deterministisch festlegen, sondern nur Wahrscheinlichkeiten des Meßausgangs angeben), nicht mit der Quantenmechanik vereinbar sind, wenn sie die Lokalitätsbedingung erfüllen. Lokale Theorien kommen also zu anderen Vorhersagen als die Quantenmechanik.[26] Dadurch wird ein experimentum crucis zwischen diesen beiden Theorien möglich. In jüngster Zeit wurde eine Reihe von Experimenten durchgeführt, und alles weist darauf hin, daß die Quantenmechanik die Erfahrung korrekt wiedergibt.[27]

Die Schwierigkeit beim EPR-Paradoxon liegt nun darin, daß man intuitiv zwei getrennte Systeme vor Augen hat, zwischen denen keine physikalische Wechselwirkung mehr möglich ist, daß aber dennoch die Ergebnisse der Messungen korreliert sind. Die aus dem physikalischen Hintergrundwissen zu erwartende Lokalitätsannahme führt zu einem Widerspruch mit Experimenten. Andererseits sagt der Formalismus der Quantenmechanik zwar die Korrelationen korrekt voraus, er gibt aber keinerlei Hilfe, physikalisch zu verstehen, wie diese Korrelationen zustande kommen. Deswegen ist die Bezeichnung Paradoxon hier berechtigt: In der Physik spricht man von einem Paradoxon, wenn eine Theorie eine Aussage zur Konsequenz hat, die einer vertrauten, plausiblen Annahme des physikalischen Hintergrundwissens widerspricht. Wenn man über die unmittelbare Messung hinausgeht, dann stellen sich eine Reihe schwieriger Fragen: Welchen Zustand haben die Systeme vor der Messung? Wie ist es möglich, daß durch die Messung am Meßgerät I auch das Teilchen 2 zu einem definierten Zustand kommt? Diese Probleme verschwinden, wenn man eine instrumentalistische Theorienauffassung hat. Dann nämlich hat die Quantenmechanik nur Meßausgänge zu beschreiben, und alle anderen Fragen sind sinnlos. Wenn man aber bereit ist, über das im Experiment direkt Kontrollierbare hinauszufragen, dann zeigen sich viele offene Probleme. Die nun schon 50 Jahre anhaltende Diskussion um das EPR-Paradoxon scheint darauf hinzuweisen, daß die instrumentalistische Selbstbeschränkung offenbar doch von vielen als unbefriedigend empfunden wird.

Die Korrelation von Systemen, die räumlich getrennt sind und keine Wechselwirkungen austauschen, ist in den quantenmechanischen Formalismus für Vielteilchensysteme von Anfang an eingebaut. Danach haben die einzelnen Teilchen keinen Zustandsvektor im Hilbertraum und verlieren so ihre individuellen Eigenschaften.[28] In dieser Situation gibt es zwei Möglichkeiten. Man kann die Theorie wegen ihrer empirischen Erfolge akzeptieren und ontologische Konsequenzen ziehen. „Theorie und Experiment ergeben übereinstimmend, daß sogar bei um makroskopische Distanzen räumlich separierten Quantensystemen nichtklassische holistische Effekte existieren. . .Die Idee, daß die Welt durch Kompartimentalisierung beschrieben werden kann, muß revidiert werden. Das einzige, im Sinne der Quantenmechanik absolut existierende Objekt ist das ganze Universum, eine einzige und unteilbare Einheit."[29] Andererseits kann man die Akzeptierbarkeit der quantenmechanischen Beschreibung von Vielteilchensystemen anzweifeln, da sie z. B. Teilchen, die in keiner Weise mehr miteinander verbunden sind, dennoch nicht wie freie Teilchen behandelt.[30] Hier ist man also nicht bereit, jede physikalische Theorie zu akzeptieren, wenn sie nur die Erfahrung korrekt wiedergibt. Man stellt vielmehr zusätzliche Anforderungen in bezug auf Erklärungskraft und physikalische Einsichtigkeit (etwa durch raumzeitliche Beschreibbarkeit). Da die zuletzt geschilderte Position im Falle des EPR-Paradoxons gute Gründe ins Feld führen kann, haben wir hier ein aktuelles und aussagekräftiges Beispiel für einen Konflikt zwischen rein empirischen Bewertungskriterien einer Theorie (d. h. Übereinstimmung mit der Erfahrung) und nichtempirischen Bewertungskriterien (d. h. erkenntnistheoretischen Zusatzforderungen, z. B. Vermeidung von black-box-Modellen).

Es bleibt noch anzumerken, daß auch beim EPR-Paradoxon die Rätsel des Meßprozesses wieder auftauchen. Die offenen Fragen des Meßprozesses werden dabei besonders deutlich, da hier gewissermaßen zwei Zustandsreduktionen korreliert sind, ohne daß dafür ein physikalisch einsichtiger Mechanismus existiert. So kann man hier H. Putnam zustimmen, wenn er schreibt: „To conclude, there is major ‚unfinished business' in the very foundation of quantum mechanics and in particular in the elaboration of a consistent and physically acceptable theory of measurement. Only when such a theory has been elaborated will a final resolution of the Einstein-Podolsky-Rosen Paradox be possible."[31]

5. REALISMUS UND QUANTENMECHANIK

In einem schon erwähnten Artikel der Zeitschrift „Scientific American" war im November 1979 unter der Überschrift „Quantentheorie und Realität" folgende Behauptung zu lesen: „Die Auffassung, daß die Welt aus Objekten besteht, deren Existenz unabhängig vom menschlichen Bewußtsein ist, erweist sich als unvereinbar mit der Quantenmechanik und mit Fakten, die experimentell bestätigt sind."[32] Auch C. F. von Weizsäcker sprach von der Quantenmechanik als „einer Physik, die gar nicht mehr realistisch gedeutet werden kann."[33] Viele Physiker haben sich ähnlich geäußert.[34] In diesen Äußerungen

[26] Details und Literaturhinweise in Stöckler (1984a) S. 159 ff.
[27] Quellen in Stöckler (1984a) S. 200.
[28] Hier ist die gemeinsame Wurzel von EPR-Paradoxon und der sog. Ununterscheidbarkeit etwa von Elektronen: Die Wellenfunktion zweier unabhängiger Fermi-Teilchen wird durch Antisymmetrisierung zu einer Wellenfunktion mit Korrelationen.

[29] Primas/Gans (1979) S. 23.
[30] Beispiele für diese Argumentationsrichtung sind angegeben in Stöckler (1984a) S. 167 f. und S. 201.
[31] Putnam (1961) S. 237.
[32] d'Espagnat (1979) S. 128.
[33] Weizsäcker (1963) S. 116.
[34] Weitere Zitate kann man finden in Trigg (1980) S. 154 ff.

wird der Begriff „Realismus" allerdings nicht einheitlich verwendet, die daraus folgenden Schwierigkeiten werden uns noch beschäftigen.

Während in den vorhergehenden Abschnitten immer wieder darauf hingewiesen wurde, daß viele der Schwierigkeiten mit der Quantenmechanik sich nur dann formulieren lassen, wenn man sich nicht mit einer instrumentalistischen Minimalinterpretation zufriedengibt, wird von den jetzt zu untersuchenden Positionen die Angriffsrichtung umgedreht. Sie behaupten nämlich, daß keine Interpretation der Quantenmechanik möglich ist, die mit einer realistischen Erkenntnistheorie vereinbar ist, und daß deswegen der Realismus aufgegeben werden sollte. Um es vorweg deutlich zu machen: Während ich natürlich zugestehe, daß naturwissenschaftliche Theorien philosophische Konsequenzen haben können und haben sollen[35], scheinen mir die „quantenmechanischen" Argumente gegen den Realismus nicht überzeugend.

Widerlegt die Quantenmechanik den Realismus? Ich möchte im folgenden auf drei Strategien eingehen, mit denen die Unvereinbarkeit von Quantenmechanik und Realismus behauptet wird. Alle drei Strategien (der metaphysische, der formalistische und der phänomenalistische Weg) sind gleichzeitig Versuche, die im ersten Abschnitt geschilderten Schwierigkeiten mit inkommensurablen Größen und mit der Zustandsreduktion zu lösen.

Als erstes möchte ich auf eine Strategie eingehen, die ich hier als *metaphysischen Weg* bezeichnen will. Bei dieser in gewissem Sinn gewaltsamen Lösung wird die Zustandsreduktion durch eine psycho-physische Wechselwirkung des mit Bewußtsein ausgestatteten Physikers mit dem untersuchten Quantensystem herbeigeführt. Gegen eine solche Behauptung (die natürlich eine bestimmte Position im Leib-Seele-Problem voraussetzt) kann man verschiedene Einwände erheben[36]; ich möchte nur eines zu bedenken geben, daß nämlich diese Lösung zu gut ist: Das Bewußtsein steuert den Meßprozeß wie ein deus ex machina. Über die Details der Wechselwirkung wird nichts ausgesagt, so daß z. B. nicht erklärt werden kann, warum im Zustand $|\psi>$ die Wahrscheinlichkeit, als Meßresultat $|\phi>$ zu erhalten, gerade $|<\phi|\psi>|^2$ ist. Für die hier postulierte Wechselwirkung von Bewußtsein und Quantensystem gibt es keinerlei Hinweise im Formalismus der Quantenmechanik. Behauptungen der Art, daß das Bewußtsein in der Quantenmechanik eine besondere Rolle spiele, beruhen meist darauf, daß von vornherein von einer nichtrealistischen Erkenntnistheorie ausgegangen wird. Darüber hinaus zeigen historische Untersuchungen, daß auch das Motiv dazu nicht aus der Quantenmechanik kam. So hat z. B. ein prominenter Vertreter dieser Auffassung, der für seine Arbeiten zur chemischen Bindung bekannt gewordene Fritz London, während seines Physikstudiums bei Sommerfeld in München im Jahre 1921 außerdem im Fach Philosophie promoviert. Während seines Philosophiestudiums war er in Richtung eines Leib-Seele Interaktionismus beeinflußt worden.[37] Es ist klar, daß die angesprochene Strategie nicht mehr von einer vom Subjekt unabhängi-

[35] Vgl. Jammer (1981).
[36] Vgl. Kanitscheider (1981) S. 180 ff.
[37] Vgl. Jammer (1974) S. 482 f.

gen Realität ausgeht und damit gegen die Intentionen eines Realismus verstößt, zumal die bei jedem Meßprozeß notwendig werdenden Wirkungen des Bewußtseins auf der materiellen Ebene starke anthropozentrische Züge tragen. Die erkenntnistheoretischen Voraussetzungen des metaphysischen Weges nehmen ihm die Möglichkeit, die Unvereinbarkeit von Realismus und Quantenmechanik zu beweisen.

Die zweite Strategie zur Widerlegung des Realismus möchte ich den *formalistischen Weg* nennen. Seine Vertreter halten es für ein Kennzeichen einer realistischen Position, daß die Observablen, d. h. die Eigenschaften eines Quantensystemes, immer festgelegte Wahrheitswerte haben. Unabhängig davon, ob eine Messung möglich ist oder nicht, muß demnach für alle klassischen Variable feststehen, ob die entsprechenden Eigenschaften vorliegen oder nicht.[38] Insbesondere wird dadurch der realistischen Position unterstellt, daß sie auch inkommensurablen Größen gleichzeitig festgelegte Werte zuschreibt. So etwas läßt der Formalismus der Quantenmechanik – wie wir schon gesehen haben – jedoch nicht zu (zumindest nicht nach Auffassung der meisten Interpreten).

Andererseits ist nicht einzusehen, warum die Forderung nach festgelegten Wahrheitswerten ein notwendiger Bestandteil einer realistischen Erkenntnistheorie sein soll. Im formalistischen Weg wird ein Strohmann von Realismus aufgebaut, für den sich kaum echte Vertreter finden lassen. Wenn man den Realisten auf die Annahme verpflichtet, daß ein System in jeder klassischen Größe genau festgelegte Wahrheitswerte hat (daß z. B. die Aussage „Das Teilchen ist im Punkt x lokalisiert" immer wahr oder falsch ist), dann unterschiebt man ihm, daß er auf alle Fälle an der klassischen Ontologie (also etwa an Teilchen und Wellen) festhalten will. Der erkenntnistheoretische Realismus ist aber nicht identisch mit dem Glauben an die Ontologie der klassischen Mechanik, wenn auch diese beiden Auffassungen zuweilen zusammen aufgetreten sind, z. B. bei Karl R. Popper.[39]

In diesen Kontext gehören diejenigen Diskussionen zum Thema Realismus und Quantenmechanik, die sich an das EPR-Paradoxon anschließen (das Eingangszitat aus „Scientific American" ist ein Beispiel dafür). Meist ist hier mit Realismus nur die Annahme verborgener Parameter oder die These der festgelegten Wahrheitswerte gemeint. Eine solche Festsetzung ist aber keine adäquate Übersetzung der erkenntnistheoretischen Position des Realismus in den Formalismus der Quantenmechanik. Durch den Bellschen Beweis und durch seine Verallgemeinerungen wird nun eine große Anzahl von Theorien mit verborgenen Parametern ausgeschlossen. Dies spricht aber nicht gegen den Realismus, da weder verborgene Parameter noch festgelegte Wahrheitswerte für alle klassischen Größen notwendige Bestandteile des Realismus sind.

Der im Vorhergehenden geschilderte „formalistische" Angriff auf den Realismus knüpft an den Vielteilchenformalismus der Quantenmechanik an.

[38] Beispiele für eine solche Definition des Realismus finden sich in Gardner (1972), Belinfante (1975) S. 9 und in Healey (1979).
[39] Zur Quantenmechanikinterpretation von K. Popper vgl. Stöckler (1986).

Dieser Vielteilchenformalismus spielt auch bei der Analyse des Meßprozesses eine Rolle, der der Ausgangspunkt des metaphysischen Angriffs ist. Er ist ebenso die Grundlage der nun zu kennzeichnenden dritten Strategie zur Abkehr vom Realismus, den ich den *phänomenalistischen Weg* nennen will. Diese Strategie ist weitaus differenzierter als die ersten beiden Wege, sie wird z. B. von Franz von Kutschera in seinem Buch „Grundfragen der Erkenntnistheorie" verfolgt.[40] Kutschera sieht die Besonderheit des Mikrobereichs darin, daß es dort keine störungsfreien Messungen geben kann. Dies führt dazu, daß beobachtete Eigenschaften nicht den Objekten zugeschrieben werden können, sondern daß man nur sagen kann, daß das System die beobachtete Eigenschaft bei dieser Messung zeigt. Da man den Effekt der Wechselwirkung der Systeme mit dem Meßgerät nicht „herausrechnen" kann, kann sich nach dieser Auffassung die Quantenmechanik nur auf Beobachtungen beziehen, nicht auf beobachtungsunabhängige Quantensysteme. Die Physik redet danach nicht mehr über eine objektive, von der Beobachtung unabhängige Realität. Damit ist jedoch nicht gemeint, daß das Subjekt die Realität erschafft. Die Quantenmechanik gilt danach vielmehr als Wissenschaft von der Natur, wie sie sich uns zeigt, wenn sie mit bestimmten Beobachtungsverfahren untersucht wird. Diese Auffassung (die ähnlich z. B. auch von P. Mittelstaedt vertreten wird[41]) ist natürlich nahe verwandt mit der Kopenhagener Interpretation. So ergeben sich hier auch ähnlich kritische Punkte:

1) Die Unkontrollierbarkeit der Störung beim Meßprozeß und die Erklärung der Reduktion der Zustandsfunktion durch die physische Wirkung des Meßgeräts kann man mit guten Gründen bezweifeln.[42] Damit kann man also den Rückzug zum Phänomenalismus nicht begründen.

2) Die Einschränkung des Geltungsbereichs der Quantenmechanik auf beobachtete Objekte (d. h. auf die makroskopischen Effekte der mikroskopischen Objekte) zeigt sich nicht im Formalismus der Quantenmechanik, sie ist nicht durch diesen erzwungen.

3) Der Vorteil dieser Interpretation der Quantenmechanik ist der Vorteil aller Theorien, die sich in ihrer Aussagekraft beschränken (indem sie z. B. nicht mehr über die Natur, sondern nur über die beobachtete Natur sprechen): bestimmte Probleme sind in ihrem Rahmen nicht mehr formulierbar (z. B. die Details des Meßprozesses).

Natürlich kann man die Quantenmechanik (wie jede andere Theorie) so interpretieren, daß man nur ihren empirischen Gehalt ernst nimmt und den übrigen Elementen des Formalismus keinen Bezug zur Realität zuordnet. Damit ist man alle Schwierigkeiten der Deutung der Quantenmechanik los, denn diese Schwierigkeiten sind ja „philosophischer" Art, sie betreffen nicht den unbestrittenen Erfolg der Quantenmechanik bei der Vorhersage von Versuchsergebnissen. Dies ist aber ein Vorteil, den jede Oberflächenbeschreibung über alle Versuche eine Erfassung der Tiefenstruktur hat. Eine solche

[40] Kutschera (1982) S. 371 ff.
[41] Vgl. etwa Mittelstaedt (1983).
[42] Vgl. Brown/Redhead (1981) und Hooker (1973) S. 205.

statistische Minimalinterpretation der Quantenmechanik reicht für den Laboralltag aus, sie kann jedoch weder den Meßprozeß analysieren, noch die raumzeitliche Einbettung der Quantenobjekte aufklären. Solche Interpretationen der Quantenmechanik lösen nicht die Probleme, sondern werfen sie einfach nicht mehr auf. Die schwierigen Fragen werden dann häufig entweder gleich als sinnlos erklärt oder in den Bereich der Philosophie verwiesen, was i. A. der Klassifizierung als Geschmacksfrage entspricht.

Wenn wir jetzt noch einmal unsere Ausgangsfrage betrachten, ob die Quantenmechanik den Realismus widerlegt, dann mag der Eindruck entstehen, daß unser Problem in der Fülle der Differenzierungen und technischer Details untergegangen ist. Andererseits hat beim Thema Realismus und Quantenmechanik vermutlich nichts soviel Verwirrung angerichtet hat wie die Mehrdeutigkeit des Wortes „Realismus". Die seit zwei Jahrzehnten laufende Auseinandersetzung um den „wissenschaftlichen Realismus", in der es um eine Revision der empiristischen Wissenschaftsphilosophie der ersten Hälfte unseres Jahrhunderts geht, hat die Lage zusätzlich unübersichtlich gemacht.[43] Eine Voraussetzung unserer Erörterung ist ja, daß es möglich ist, eine erkenntnistheoretische Fragestellung so umzusetzen, daß sie mit Hilfe des Formalismus der Quantenmechanik entscheidbar wird. Dabei kann es leicht zu Übersetzungsfehlern kommen (schon Goethe beklagte sich: Die Mathematiker sind eine Art Franzosen; redet man zu ihnen, so übersetzen sie es in ihre Sprache, und dann ist es alsbald ganz etwas anderes[44]). Vor diesem Hintergrund will ich nun versuchen, eine Antwort auf die Frage zu geben, ob die Quantenmechanik den Realismus widerlegt.

Keinen Einfluß hat die Quantenmechanik auf die ganz allgemeine Problematik, daß das, was wir für die reale Welt halten, zunächst immer nur unser *Bild* von der Welt ist. Die Welt wird zunächst in unserem Bewußtsein konstituiert, wobei dann Realisten glauben, daß diesem Bild eine subjektunabhängige Realität entspricht. Sowohl eine Realismuskritik wie die des Deutschen Idealismus als auch die Kritik am metaphysischen Realismus, wie sie gegenwärtig etwa von H. Putnam vertreten wird, sind so grundsätzlich, daß sie von der Struktur und den Inhalten einer bestimmten einzelwissenschaftlichen Theorie von der Art der Quantenmechanik gar nicht betroffen werden.[45]

Wenn der interne Realismus behauptet, daß es nicht nur *eine* wahre und vollständige Beschreibung unserer Welt geben kann, sondern mehrere „wahre" Theorien (mit gänzlich verschiedenen Begriffsrahmen), wenn der interne Realismus es deshalb nicht für sinnvoll hält, von einem festen Satz bewußtseinsunabhängiger Objekte auszugehen, sondern die Frage, in welche Dinge die Welt eingeteilt ist, nur im Rahmen der jeweiligen Theorie für sinnvoll hält, dann kann darüber nur mit erkenntnistheoretischen Argumenten debattiert werden, nicht aber mit dem Hinweis auf die nichtboolesche Struktur der Quantenmechanik.

[43] Vgl. für eine Übersicht Putnam (1982b), Boyd (1983) und Hellman (1983). Einen differenzierten Realismus verteidigt Krüger (1983).
[44] Goethe (1893) S. 102.
[45] Für Putnams Position des internen Realismus vgl. Putnam (1982a) Kap. III.

Ein wichtiger Punkt in der Auseinandersetzung um den Realismus ist die Frage, ob sich theoretische Sätze, die nicht an der Erfahrung überprüfbar sind, in gleicher Weise auf die Realität beziehen können wie Beobachtungssätze. Dieses Problem spielt in der Mikrophysik natürlich eine besondere Rolle, da Elektronen und π-Mesonen der menschlichen Erfahrung nicht in der gleichen Weise zugänglich sind wie Bäume und Regenwürmer. Die Diskussion hat gezeigt, daß die Quantenmechanik nicht zwingt, bei der Interpretation theoretischer Größen von der realistischen Position abzuweichen. Die ontologische Dignität muß man nicht an die Direktheit der Beobachtung binden: So kann man mit guten Gründen behaupten, daß Atome und Neutrinos in der gleichen Weise existieren wie Häuser und Vögel.

Man mag der Auffassung sein, daß Theorien nur Instrumente zur Vorhersage von Experimentalergebnissen sind. Wie wir gesehen haben, ist es aber keinesfalls so, daß die Quantenmechanik zu dieser Auffassung zwingt oder sie auch nur nahelegt. Bei der Entwicklung einer neu geschaffenen Theorie ist es oft forschungspraktisch sinnvoll, sich anfänglich mit einer instrumentalistischen Deutung zufrieden zu geben. Man sollte sich dieser Selbstbeschränkung aber bewußt sein, denn viele Beispiele legen nahe, daß eine empiristische Beschränkung auf die Oberflächenstruktur auf Dauer dem Fortschritt der Wissenschaft im Wege stehen kann.[46]

Unter den vielfältigen Bedeutungen von „Realismus" sind zwei Spielarten besonders wichtig, weil bei ihnen die physikalische Theorie Ansatzpunkte zur Entscheidung erkenntnistheoretischer Fragestellungen bieten könnte, da hier epistemologische Behauptungen in die Quantenmechanik übersetzt werden können. Die erste Spielart besteht in der Forderung, daß der Zustand eines physikalischen Systems unabhängig von Versuchsanordnungen und Meßmöglichkeiten charakterisierbar sein sollte (und er sich in diesem Sinn als unabhängig von der Beobachtung erweisen sollte). Wir haben gesehen, wie in der Tradition von Niels Bohr diese Möglichkeit bestritten wird und wie der Meßprozeß dabei Kernpunkt der Auseinandersetzung ist. Auf die Forderung nach einer beobachterunabhängigen Charakterisierung des Zustands physikalischer Systeme kann man leicht verzichten, wenn man auch die zweite im Zusammenhang mit der Quantenmechanik wichtige Spielart des Realismus bestreitet und die Aufgabe physikalischer Theoriebildung nur in der Wiedergabe der Experimente sieht, wenn man also der Ansicht ist, daß sich Physik nur auf die beobachtete Natur beziehen soll. Im „phänomenalistischen Weg" haben wir eine solche Position mitsamt ihren schwachen Punkten kennengelernt.

Wie wir gesehen haben, liegen einige der erkenntnistheoretischen Probleme auf einer Ebene, die von der Quantenmechanik gar nicht betroffen wird. Soweit aber tatsächlich quantenmechanische Argumente ins Spiel kommen, reichen sie nicht aus, um den Realismus zu widerlegen. Wenn man sich der angegebenen Differenzierungen bewußt ist, dann kann man zusammenfassend

[46] Vgl. Grant (1962), insbes. S. 215 und S. 220, und Gardner (1979).

sagen, daß die Quantenmechanik keinen systematischen Grund liefert, von einer realistischen Erkenntnistheorie abzuweichen.

Andererseits scheint es bisher noch nicht gelungen zu sein, eine befriedigende Interpretation der Quantenmechanik vorzulegen, die realistisch in dem Sinne ist, daß sie die beiden oben genannten Forderungen erfüllt. Sicher gehen die meisten Interpreten von einer bewußtseinsunabhängigen Existenz der Quantenobjekte aus. Frei von inneren Schwierigkeiten scheinen zur Zeit nur die Positionen zu sein, die sich in einer phänomenalistischen Tradition auf eine Beschreibung der Oberflächenstruktur beschränken. Alle tiefergehenden (und in diesem Sinn realistischen) Interpretationen können das Rätsel des Meßprozesses nicht umgehen. Wenn man die vorausgegangene Kritik an den empiristischen Lösungsvorschlägen und an den „kopenhagianischen" Kompromißvorschlägen akzeptiert und nicht mit einem rein instrumentalistischen Umgang mit der Quantenmechanik zufrieden ist, dann gibt es zur Zeit überhaupt keine befriedigende Interpretation der Quantenmechanik. Der Streit um den Realismus kann damit wieder in die Philosophie zurückverwiesen werden. Er ist ja auch schon ohne Hilbert-Räume und Tensorprodukte kompliziert genug. Damit ist unsere Ausgangsfrage beantwortet: Die Quantenmechanik widerlegt nicht den Realismus. Aber dies verhilft uns weder zu einer befriedigenden Interpretation der Quantenmechanik noch ist das Problem gelöst, welche Erkenntnistheorie wir akzeptieren sollten.

6. SCHLUSSBEMERKUNGEN

Vielleicht sollte an dieser Stelle etwas genauer bestimmt werden, was unter dem Interpretationsproblem der Quantenmechanik zu verstehen ist. Interpretation ist mehr als die Verknüpfung von Formalismus und Erfahrung. Es geht dabei auch um die Einordnung in einen erkenntnistheoretischen und ontologischen Rahmen. Interpretation betrifft z. B. die Präzisierung der Minimalsemantik, die für den Alltag ausreicht. Man denke dabei an folgende Fragen: Steht $|\psi>$ für ein Einzelsystem, für ein Ensemble oder für ein Präparierverfahren? Worüber spricht die Quantenmechanik, über die Natur, insofern sie gemessen wird, oder über autonome Quantensysteme? Sind die Vorgänge beim Meßprozeß mit der Dynamik der Theorie vereinbar?

Für den *physikalischen Alltag* am Schreibtisch, am Computer oder im Labor hängt davon wenig ab. Diese Fragen werden erst dann wichtig, wenn man als Philosoph darüber nachdenkt, welches Bild von der Welt die Quantenmechanik entwirft. Ob man die Grundlagenprobleme der Quantenmechanik ernst nimmt oder mehr oder weniger als Scheinprobleme ansieht, das hängt davon ab, ob man physikalische Theorien nur als Instrumente sieht oder ihnen auch eine kognitive Aufgabe zuspricht.

So zeichnet sich folgende Alternative ab:[47]

[47] Für eine differenzierende Einordnung der Positionen des Interpretationsstreits in diese Alternative vgl. Hooker (1973) S. 204 ff.

– Soll man eine Abschwächung des erkenntnistheoretischen Anspruchs (in Richtung Instrumentalismus) in Kauf nehmen und das Interpretationsproblem dadurch lösen, daß man nur über Meßausgänge spricht?
– Oder soll man darauf bestehen, daß (in der Tradition des Realismus) ein Zustand unabhängig von der Umgebung des Systems definiert werden kann und daß man auch über Nichtbeobachtbares sprechen kann? Kann man diese Forderungen beibehalten, auch wenn man damit das Interpretationsproblem zunächst ungelöst zurückbehält? Wird sich vielleicht das Interpretationsproblem bei einer zukünftigen Revision der Quantenmechanik ganz anders stellen?

Die meisten Physiker und vermutlich auch die Mehrzahl der Wissenschaftstheoretiker haben sich für die erste Variante entschieden. Hier soll, jedoch für die Minderheit eine Lanze gebrochen werden, und deshalb möchte ich noch folgendes zu bedenken geben. Sicherlich haben die Anhänger der ersten Variante recht, wenn sie betonen, daß alle Probleme verschwinden, wenn die Quantenmechanik nur Messungen beschreibt, und darüber hinausgehende Fragen empirisch nicht entscheidbar sind. Aber die Anhänger des zweiten Weges können gleichzeitig recht haben, wenn sie behaupten, daß die Probleme gerade da anfangen, wo der Empirist (im Sinne der ersten Variante) zu fragen aufhört. Die zweite Variante umfaßt das weitergehende Programm, deshalb sollte man diesen Weg zuerst einschlagen.

Die Frage, wann man methodologische und erkenntnistheoretische Anforderungen aufgeben sollte, wenn eine gegenwärtig äußerst erfolgreiche Theorie sie nicht erfüllt, ist nicht einfach zu beantworten. Es gibt erkenntnistheoretische Forderungen, von denen man nicht ablassen wird, z. B. müssen Theorien in jedem Fall widerspruchsfrei sein. Ein wichtiges Kriterium wird sein, wie es um konkurrierende Theorien bestellt ist, die die erkenntnistheoretischen Anforderungen *erfüllen* können.

Wie die Wissenschaftsgeschichte zeigt, sind bei der Kritik alter Theorien und bei der Konstruktion neuer Theorien oft grundlegende philosophische Überlegungen wichtig. Ein Beispiel dafür ist Einsteins Weg zur speziellen und zur allgemeinen Relativitätstheorie. Man sollte die Grundlagenprobleme vielleicht auch deshalb ernstnehmen, weil sie u. U. Hinweise darauf liefern können, in welcher Richtung die Quantentheorie weiterzuentwickeln ist.[48]

Zum Abschluß sei eine Stimme zitiert, bei der niemand den Verdacht hegen wird, daß eine solche Forderung von einem mangelhaften Verständnis der Physik herrührt. P. A. M. Dirac schrieb im Jahre 1963: „Wir können uns glücklich schätzen, wenn es uns gelingt, die Unschärferelationen und den Indeterminismus der gegenwärtigen Quantenmechanik in einer Weise zu beschreiben, die für unsere philosophischen Überlegungen befriedigend ist. Wenn uns dies aber nicht gelingt, dann sollten wir deswegen nicht allzu

[48] In Frage kommen z. B. nichtlineare Theorien, wie sie in Ansätzen von L. de Broglie, W. Heisenberg oder M. Sachs versucht wurden. Vgl. hierzu Hooker (1973) S. 207–210, S. 270–277.

beunruhigt sein. Wir dürfen einfach nicht vergessen, daß wir uns in einem Übergangsstadium (der Physik) befinden, und daß es vielleicht ganz unmöglich ist, in diesem Stadium ein befriedigendes Bild zu erhalten."[49] So mag auch hier die Ratlosigkeit am Ende fruchtbarer sein als die Anwendung billiger Rezepte.

LITERATUR

Audi (1973): Michael Audi, The Interpretation of Quantum Mechanics, Chicago 1973

Beehner (1980): Janet Beehner, Bibliography on Quantum Logic, S. 223–261 in Patrick Suppes (Hrsg.), Studies in the Foundations of Quantum Mechanics, East Lansing (Mich.) 1980

Belinfante (1975): Frederik J. Belinfante, Measurements and Time Reversal in Objective Quantum Theory, Oxford 1975

Bell (1964): John Stewart Bell, On the Einstein-Podolsky-Rosen Paradoxon, Physics *1* (1964) 195–200

Beltrametti (1981): Enrico G. Beltrametti/Bas C. van Fraassen (Hrsg.), Current Issues in Quantum Logic, New York 1981

Birkhoff/Neumann (1936): Garrett Birkhoff/Johann von Neumann, The Logic of Quantum Mechanics, Annals of Mathematics *37* (1936) 823–843

Bohm (1951): David Bohm, Quantum Theory, Englewood Cliffs (N. J.) 1951

Boyd (1983): Richard Boyd, On the Current Status of the Issue of Scientific Realism, Erkenntnis *19* (1983) 45–90

Brown/Redhead (1981): Harvey R. Brown/Michael L. G. Redhead, A Critique of the Disturbance Theory of Indeterminacy in Quantum Mechanics, Foundations of Physics *11* (1981) 1–20

Bunge (1973): Mario Bunge, Philosophy of Physics, Dordrecht 1973

Clauser/Shimony (1978): John F. Clauser, Abner Shimony, Bell's Theorem: Experimental Tests and Implications, Reports on Progress in Physics *41* (1978) 1881–1927

Dirac (1963): P. A. M. Dirac, The Evolution of the Physicist's Picture of Nature, Scientific American *208,5* (Mai 1963) 45–53

d'Espagnat (1979): Bernard d'Espagnat, The Quantum Theory and Reality, Scientific American *241,5* (Nov. 1979) 128–141

van Fraassen (1974): Bas C. van Fraassen, The Labyrinth of Quantum Logics, S. 224–254 in R. Cohen and W. Wartofsky (Hrsg.), Boston Studies in the Philosophy of Science, Vol. 13, Dordrecht 1974 (wiederabgedruckt in Hooker (1975/1979))

van Fraassen (1981): Bas C. van Fraassen, A Modal Interpretation of Quantum Mechanics, S. 229–258 in Beltrametti (1981)

Gardner (1972): Michael R. Gardner, Quantum Theoretical Realism: Popper and Einstein v. Kochen and Specker, British Journal for the Philosophy of Science *23* (1972) 13–23

Gardner (1979): Michael R. Gardner, Realism and Instrumentalism in 19th-Century Atomism. Philosophy of Science *46* (1979) 1–34

Gethmann (1979): Carl Friedrich Gethmann, Protologik, Frankfurt 1979

Gethmann (1980): Carl Friedrich Gethmann, Empfehlungen zum Elementaren Logikunterricht, Zeitschrift für Didaktik der Philosophie *2* (1980) 150–159

Goethe (1893): Johann Wolfgang von Goethe, Ferneres über Mathematik und Mathematiker, S. 96–102: Goethes Werke (Weimarer Ausgabe) II. Abt., 11. Band, Weimar 1893

Grant (1962): Edward Grant, Late Medieval Thought, Copernicus, and the Scientific Revolution, Journal of the History of Ideas *23* (1962) 197–220

Healey (1979): Richard Healey, Quantum Realism: Naiveté is no excuse, Synthese *42* (1979) 121–144

Hellman (1983): Geoffrey Hellman, Realist Principles, Philosophy of Science *50* (1983) 227–249

[49] Dirac (1963) S. 49 (übersetzt).

Holdsworth/Hooker (1983): David G. Holdsworth/ Clifford A. Hooker, A Critical Survey of Quantum Logic, S. 127–246 in: Maria Luisa Dalla Chiara et al., Logic in the 20th Century, Scientia, Mailand 1983

Honner (1982): John Honner, The Transcendental Philosophy of Niels Bohr, Studies in History and Philosophy of Science *13* (1982) 1–29

Hooker (1972): Clifford A. Hooker, The Nature of Quantum Mechanical Reality: Einstein Versus Bohr, S. 67–302 in: R. G. Colodny (Hrsg.), Paradigms & Paradoxes, Pittsburgh 1972

Hooker (1973): Clifford A. Hooker, Metaphysics and Modern Physics, S. 174–304 in: C. A. Hooker (Hrsg.), Contemporary Research in the Foundations and Philosophy of Quantum Mechanics, Dordrecht 1973

Hooker (1975/1979): Clifford A. Hooker, (Hrsg.), The Logico-Algebraic Approach to Quantum Mechanics (Vol. I: Historical Evolution; Vol. II: Contemporary Consolidation), Dordrecht 1975/1979

Jammer (1974): Max Jammer, The Philosophy of Quantum Mechanics, New York 1974

Jammer (1981): Max Jammer, Zu den philosophischen Konsequenzen der neuen Physik, S. 129–154 in: G. Radnitzky und G. Andersson (Hrsg.), Voraussetzungen und Grenzen der Wissenschaft, Tübingen 1981

Kanitscheider (1979): Bernulf Kanitscheider, Philosophie und moderne Physik, Darmstadt 1979

Kanitscheider (1981): Bernulf Kanitscheider, Wissenschaftstheorie der Naturwissenschaft, Berlin 1981

Krüger (1983): Lorenz Krüger, Empirismus oder Realismus – eine Alternative in der Wissenschaftstheorie?, S. 569–587 in: G. Frey und J. Zelger (Hrsg.), Der Mensch und die Wissenschaften vom Menschen (Beiträge des XII. Deutschen Kongr. f. Philosophie), Bd. II, Innsbruck 1983

Kutschera (1982): Franz von Kutschera, Grundfragen der Erkenntnistheorie, Berlin 1982

Meyer-Abich (1965): Klaus Michael Meyer-Abich, Korrespondenz, Individualität und Komplementarität, Wiesbaden 1965

Mittelstaedt (1978): Peter Mittelstaedt, Quantum Logic, Dordrecht 1978

Mittelstaedt (1983): Peter Mittelstaedt, Wahrheit, Wirklichkeit, und Logik in der Sprache der Physik, Zeitschrift für allgemeine Wissenschaftstheorie *14* (1983) 24–45

Mittelstaedt (1984): Peter Mittelstaedt, Über die Bedeutung und Rechtfertigung der Quantenlogik, in: Bernulf Kanitscheider (Hrsg.), Moderne Naturphilosophie, Würzburg 1984, S. 261–281

Mückenheim (1983): Wolfgang Mückenheim, Das EPR-Paradoxon und die Unbestimmtheit der Realität, Physikalische Blätter *39* (1983) 331–336

Nilson (1976): Donald Richard Nilson, Bibliography on the History and Philosophy of Quantum Physics, S. 457–520 in P. Suppes (Hrsg.), Logic and Probability in Quantum Mechanics, Dordrecht 1976

Primas (1983): Hans Primas, Chemistry, Quantum Mechanics and Reductionism, Berlin/ Heidelberg/New York ^{2}1983

Primas (1984): Hans Primas, Verschränkte Systeme und Komplementarität, S. 243–260 in: Bernulf Kanitscheider (Hrsg.), Moderne Naturphilosophie, Würzburg 1984

Primas/Gans (1979): Hans Primas/Werner Gans, Quantenmechanik, Biologie und Theoriereduktion, S. 15–42 in: Bernulf Kanitscheider (Hrsg.), Materie-Leben-Geist, Berlin 1979

Putnam (1961): Hilary Putnam, Comments on the Paper of David Sharp, Philosophy of Science *28* (1961) 234–237

Putnam (1969): Hilary Putnam, Is Logic Empirical?, S. 216–241 in: Robert S. Cohen/Marx W. Wartofsky (Hrsg.), Boston Studies in the Philosophy of Science V, Dordrecht 1969 (auch in Hooker (1979) S. 181–208)

Putnam (1981): Hilary Putnam, Quantum Mechanics and the Observer, Erkenntnis *16* (1981) 193–219

Putnam (1982a): Hilary Putnam, Vernunft, Wahrheit und Geschichte, Frankfurt 1982

Putnam (1982b): Hilary Putnam, Three Kinds of Scientific Realism, The Philosophical Quarterly *32* (1982) 195–200

Scheibe (1973): Erhard Scheibe, The Logical Analysis of Quantum Mechanics, Oxford 1973

Stein (1970): Howard Stein, Is There a Problem of Interpreting Quantum Mechanics?, Nous *4* (1970) 93–103

Stein (1972): Howard Stein, On the Conceptual Structure of Quantum Mechanics, S. 367–439 in: R. G. Colodny (Hrsg.), Paradigms & Paradoxes, Pittsburgh 1972

Stöckler (1984a): Manfred Stöckler, Philosophische Probleme der relativistischen Quantenmechanik, Berlin 1984

Stöckler (1984b): Manfred Stöckler, 9 Thesen zum Dualismus von Welle und Teilchen, S. 223–242 in: Bernulf Kanitscheider (Hrsg.), Moderne Naturphilosophie, Würzburg 1984

Stöckler (1986) Manfred Stöckler, Abschied von Kopenhagen? Karl Popper und die realistischen Interpretationen der Quantenmechanik, soll in einem von F. Wallner hrsg. Band in Wien 1986 erscheinen.

Trigg (1980): Roger Trigg, Reality at Risk: A Defence of Realism in Philosophy and the Sciences, Brighton 1980

Vogel (1928): Thilo Vogel, Zur Erkenntnistheorie der quantentheoretischen Grundbegriffe, Gießen 1928 (Diss. phil. Fak. Gießen)

Weizsäcker (1963): Carl Friedrich von Weizsäcker, Zum Weltbild der Physik, Stuttgart ^{10}1963

Adresse des Autors:
Dr. Manfred Stöckler, Auf dem Dill 4, D–6290 Weilburg