

INTERPRETATIONSPROBLEME UND PARADIGMENSUCHE IN DER QUANTENMECHANIK

Anton Zeilinger

In diesem Beitrag, den ich als Diskussionsanregung verstanden wissen möchte, will ich mich ein wenig mit den Problemen des Verstehens und der Interpretation der Quantenmechanik befassen. Ich möchte mich gleich zu Beginn auf einen so Berufenen wie Feynmann stützen, der vor nicht allzu langer Zeit (1) sagte: "I think I can safely say that nobody today understands quantum mechanics" wobei er offenbar auch sich selbst einschließt oder auf R. Penrose, der im kürzlich erschienenen Buch "Quantum Concepts in Space and Time" seine Haltung gegenüber der heutigen nichtrelativistischen Quantenmechanik folgendermaßen beschrieb: "Die Theorie hat zwei sehr wirksame Argumente für sich und nur ein kleines gegen sich. Erstens, die Theorie stimmt in unglaublicher Weise mit allen experimentellen Resultaten bis heute überein. Zweitens, und fast gleich wichtig, sie ist eine Theorie erstaunlicher und profunder mathematischer Schönheit. Das Einzige, das gegen sie gesagt werden kann, ist, daß sie absolut keinen Sinn macht!" (2).

Woher kommt es, daß gerade Physiker, die doch immerhin sehr signifikante Beiträge zur Quantentheorie geliefert haben, einer davon, Feynman, hat für eine ihrer mathematischen Formulierungen sogar den Nobelpreis erhalten, woher kommt es also, daß diese Physiker solche eindeutigen und kräftigen Formulierungen wählen und woher kommt es auch, daß man als Durchschnittsphysiker während seiner Ausbildung nie von solchen Problemen hört, daß sogar das einzige als solches normalerweise akzeptierte Nichtverstehen das des Formalismus ist, tieferliegenden Fragen jedoch üblicherweise ausgewichen wird?

Um diese Situation etwas unter die Lupe zu nehmen, wollen wir uns dem Interpretationsproblem der Quantenmechanik zuwenden. Wir merken zuerst gleich an, daß es zumindest zwei Ebenen der Interpretation eines Formalismus, einer physikalischen Theorie, gibt. Die erste, untere Ebene liefert die Regeln dafür, welches Element des Formalismus welchem Beobachtbarem in einer konkreten

experimentellen Situation entspricht. Für den Fall der Experimentalwissenschaften ist dies im Regelfall ein umfangreicher, zum Großteil nicht explizierter sondern oft nur impliziter Satz von Anweisungen an den Physiker dahingehend, wie die Aussagen der Theorie zu operationalisieren sind und wie aus der Theorie Vorhersagen für künftige Experimente oder Ereignisse gewonnen werden können.

Für den Fall der Quantenmechanik treffen wir auf dieser unteren Ebene auf die von Born stammende statistische Interpretation, die ich als statistische Interpretation im engeren Sinn bezeichnen möchte. Sie besagt, daß das Absolutquadrat $|\psi|^2$ der Wellenfunktion die Wahrscheinlichkeit für die Beobachtung eines bestimmten Ergebnisses darstellt, zum Beispiel etwa die Wahrscheinlichkeit dafür, das Elektron innerhalb eines bestimmten Raumvolumens zu finden. Auf dieser Ebene der Interpretation herrscht praktisch vollständiger Konsens unter den Physikern, da, wie das obige Zitat von Penrose ja zeigte, die mit Hilfe dieser Regel aus der Theorie gewonnenen Vorhersagen in ausgezeichneter Weise mit dem Experiment übereinstimmen. Hier ist besonders auch die Breite der erfolgreichen Anwendung der Theorie beeindruckend, liefert die Quantentheorie doch Vorhersagen vom subatomaren Bereich über die Festkörperphysik bis hinauf zu kosmologischen Problemen. Solange man sich also darauf beschränkt, die Quantenmechanik ausschließlich für die Lösung physikalischer Fragestellungen zu verwenden, wird man nie auf ein Interpretationsproblem stoßen, ja mit allergrößter Wahrscheinlichkeit wird man immer schönere Bestätigungen der Theorie finden.

Wo liegt also das Problem, wo liegen die Schwierigkeiten? Nun, sie treten gerade dort auf, wo es um Begriffe wie Verstehen, Bedeutung, Sinn etc. geht. Wo wir also Fragen stellen wie etwa die, was diese Theorie für unser Weltbild bedeutet oder gar Fragen nach dem Warum, dem So-Sein, der Theorie in sehr allgemeiner Weise. Ich bezeichne dies als Interpretationsproblem der zweiten Ebene, es handelt sich hier also um ein Metainterpretationsproblem.

Als ein interessantes Beispiel aus der Geschichte der Physik

möchte ich Einstein's Beitrag zur Speziellen Relativitätstheorie zitieren. Es war ja so, daß fast alle relativistischen Gleichungen, die in Einstein's Publikation von 1905 aufscheinen, schon vorher im wesentlichen durch Lorentz, Fitzgerald und Poincaré bekannt waren und zwar einfach als Versuch, experimentelle Daten quantitativ zu interpretieren (im engeren Sinne) (3). Erst Einstein hat durch Einführung seines Relativitätsprinzips, also des Prinzips, daß die physikalischen Gesetze in allen Inertialsystemen gleich sein müssen, die konzeptive Grundlage geschaffen aus der mit der Konstanz der Lichtgeschwindigkeit die Gleichungen der Relativitätstheorie folgen. Da es also für die Relativitätstheorie ein solches übergeordnetes Prinzip gibt, gibt es hier auch keine Interpretationsprobleme und zumindest keine Interpretationsdiskussion (4). Man weiß etwa, aus welchem Grund die Gleichungen der Theorie notwendigerweise zeigen, daß Uhren in relativ zueinander bewegten Bezugssystemen verschieden schnell gehen, und daß dies tatsächlich eine Aussage über den relativen Ablauf der Zeit in diesen Bezugssystemen ist.

Ganz anders ist die Lage im Falle der Quantentheorie. Hier haben wir es mit einer Mehrzahl von Interpretationen im weiteren Sinne zu tun, die behaupten, mit den experimentellen Vorhersagen des Formalismus im Einklang zu stehen. Nur um zu zeigen, zu welchen verschiedenen Implikationen für ein Weltbild diese Interpretationen führen, möchte ich hier die drei markantesten Interpretationen anführen.

Zuerst sei die Bohr'sche Komplementaritätsinterpretation (5) erwähnt, auch häufig als Kopenhagener Interpretation bezeichnet, obwohl der letztere Begriff keineswegs wohlumrissen ist. Wie in meinem Vortrag zum EPR-Paradoxon bereits ausgeführt, haben wir es in dieser Interpretation bei einem Quantenphänomen mit einer Gesamtheit zu tun, die das beobachtete atomare System und die makroskopischen Meßapparate einschließt. Ohne Spezifikation des Meßapparates ist es sinnlos, von Eigenschaften des Quantensystems an sich zu sprechen. Es ist daher insbesondere sinnlos, einem Quantensystem gleichzeitig komplementäre Eigenschaften wie Ort oder Impuls zuzuordnen, weil sich die für deren Messung notwendigen Meßapparate gegenseitig ausschließen. Die Wellen-

funktion ist lediglich unsere Weise der Repräsentation desjenigen Teils unseres Wissen über die Vergangenheit eines Systems, der für die Berechnung künftiger Wahrscheinlichkeiten spezifischer Meßresultate notwendig ist. Etwa im Falle des Doppelspaltexperiments ermöglicht es uns die Wellenfunktion, sowohl die Wahrscheinlichkeit dafür zu berechnen, daß das Elektron durch einen bestimmten Spalt tritt, als auch dafür, wo es im Interferenzbild aufscheint, wobei die Beobachtung dieser Wahrscheinlichkeit jedoch einander ausschließende Versuchsanordnungen bedingt. Eine über diese Wahrscheinlichkeiten hinausgehende Vorhersage ist allerdings prinzipiell nicht möglich, es ist also insbesondere grundsätzlich unmöglich, für ein bestimmtes Elektron vorherzusagen, durch welchen Spalt es treten oder wo es im Interferenzbild aufscheinen werde.

Dazu im Gegensatz steht die kausale oder Ensembleinterpretation, wieder vermeide ich hier die oft übliche Bezeichnung Statistische Interpretation (im weiteren Sinne), weil auch dieser Terminus von durchaus verschiedenen Positionen aus beansprucht wird (6). Die kausale Interpretation wird ursprünglich vor allem von Bohm (7) und deBroglie (8) vertreten. Nach Bohm liefert die Wellenfunktion ein zusätzliches Potential, das von ihm so benannte Quantenpotential, das, in die Hamilton-Jacobi Gleichungen der klassischen Physik eingesetzt, zu wohldeterminierten Trajektorien der einzelnen Teilchen führt. Im Falle des Doppelspaltexperiments etwa tritt daher nach dieser Interpretation jedes Teilchen durch einen der beiden Spalte. Das Interferenzbild entsteht dann durch die spezifische Form des Quantenpotentials, das so gestaltet ist, daß in den Intensitätsminima des Interferenzbildes weniger Teilchenbahnen enden als in den Maxima. Diese Interpretation gestattet also - im Gegensatz zur Komplementaritätsinterpretation - sogar in denjenigen Fällen, in denen die experimentelle Anordnung so gewählt ist, daß das Interferenzbild registriert wird, vom Weg des Teilchens zu sprechen. Jedoch ist dies mit einer prinzipiellen Unkontrollierbarkeit der Anfangsbedingungen verbunden, also der Tatsache, daß es nicht einmal im Prinzip möglich ist festzulegen, auf welcher Bahn ein bestimmtes Teilchen startet.

Als dritte von den beiden bisher erwähnten wieder ganz verschiedene Interpretation erwähne ich die Everett'sche Relative-State Interpretation (9), auch häufig Many-Worlds Interpretation genannt. Nach dieser Interpretation existieren alle Zweige der Wellenfunktion ständig, es gibt also keinen Kollaps der Wellenfunktion. Man spricht hier vielmehr von einer Aufspaltung des Universums in individuelle Zweige, wobei in jedem einer der Zweige die Wellenfunktion verwirklicht ist. Da diese Interpretation konsequenterweise behauptet, daß auch der Beobachter mit dem Universum in mehreren Zuständen existiert, also mit aufgespalten wird, ist die in dieser Interpretation nicht erklärte Tatsache die, daß sich mein konkretes Ich, mein Bewußtsein, hic et nunc in einem wohldefinierten Zustand befindet, also sich in einem bestimmten Zweig des Universums findet, in dem eben nur eines, nämlich ein bestimmtes, der möglichen Ergebnisse des einzelnen Meßprozesses realisiert ist.

Dieser kurze abrißhafte Vergleich dreier verschiedener Interpretationen (10) die, das sei nochmals bemerkt, zu den gleichen experimentellen Vorhersagen führen, erzählt Ihnen verschiedene Dinge. Erstens wohl, daß Physiker durchaus mit erfindungsreicher Phantasie begabt sind. Zweitens, daß es möglich ist, in einer Interpretation einer Größe ontische Eigenschaft, Existenz, zuzuweisen, für die eine andere Interpretation dies glattweg ablehnt. Weist doch etwa die Bohm'sche Interpretation jedem einzelnen Teilchen zu jeder Zeit sowohl wohldefinierten Impuls als auch wohldefinierten Ort zu, oder spricht etwa Everett's Interpretation von der gleichwertigen Existenz aller möglichen Resultate eines Meßprozesses. In beiden Fällen handelt es sich um Positionen, die von den anderen erwähnten Interpretationen als nicht zugelassen abgelehnt werden. Zum dritten läßt jede der Interpretationen ein unerklärtes Element übrig. Jede der Interpretationen versagt nämlich, wenn es zur vollständigen Beschreibung des Einzelprozesses kommt. Dies muß ja auch so sein, weil der Formalismus zur Beschreibung des Einzelprozesses keinerlei Ansätze liefert und alle drei Interpretationen sich auf denselben Formalismus beziehen. Nur über die Gesamtheit vieler Einzelmessungen gibt es Vorhersagen sowohl über den Mittelwert als auch über die Form der Verteilung selbst.

Diese Nichtvorhersagbarkeit des Einzelereignisses taucht natürlich bereits sehr früh im Zuge der Entwicklung der Quantenmechanik auf und wurde auch schon sehr früh zu einer prinzipiellen Position erhoben in der Weise, daß es nicht einmal im Prinzip möglich und sinnvoll sei, zu einer genauen und detaillierten Vorhersage und Beschreibung des Einzelprozesses zu gelangen. Dies halte ich wissenschaftshistorisch für außerordentlich bemerkenswert, da es erst mit Bell's Theorem möglich wurde, eine detailliertere Beschreibung, die "vernünftigerweise" natürlich lokal sein muß, prinzipiell auszuschließen. Eine solche Beschreibung wäre ja vorher vielleicht noch denkbar gewesen. Die allgemeine Attitüde der Mehrheit der Physiker damals war jedoch etwa die, daß es sich hier um eine Frage handle, die, obschon sie interessant sein möge, unüberprüfbar und daher ähnlich irrelevant sei wie, nach Pauli, die alte Frage, wieviel Engel auf der Spitze einer Nadel Platz hätten.

Zurückkehrend zur prinzipiellen Unmöglichkeit, im Rahmen der Quantenphysik den Einzelprozeß rational vollständig zu beschreiben, ist zu bemerken, daß wir es hier sicher mit einer Grenze des neuzeitlichen Programms einer rationalen, vollständigen Erfassung der Welt durch die Naturwissenschaften zu tun haben, also mit der Evidenz eines Elements von Irrationalität in der Naturbeschreibung. Nach Jean Wahl (11) gelten für eine Betrachtung der Geschichte des Irrationalismus in der Philosophie zwei methodologische Beobachtungen. Zum ersten sei Irrationalismus ein retrospektives Konzept. Seine Bedeutung, sein Sinn, kann nur durch den Gegensatz zu einem etablierten Rationalismus festgestellt werden und zweitens gibt es nach Wahl keine Tradition des Irrationalismus wie es etwa eine Tradition des Rationalismus gibt. Was wir, nach Wahl, beobachten, seien Irruptionen oder vielleicht sogar Eruptionen von Irrationalismus, da Irrationalismus eine Revolte darstelle. Obwohl dies sicherlich für die Beurteilung des Irrationalismus in der Geschichte der Philosophie formuliert worden war, können wir auch in unserem Fall gewisse Parallelen wiedererkennen. Zum ersten steht die prinzipielle Unmöglichkeit der Beschreibung des Einzelprozesses sicherlich im Gegensatz zur Position der klassischen Physik, wie sie etwa in der kinetischen Gastheorie klar zum Ausdruck kommt.

Dort können, wenigstens im Prinzip, komplizierte, viele Einheiten umfassende Phänomene auf eine genaue, kausale, detaillierte Beschreibung der individuellen Konstituenten zurückgeführt werden. Zum zweiten gibt es in der Physik meines Wissens ebenfalls keine Tradition eines Irrationalismus.

Ganz in diesem Sinne hat die Irrationalität des Einzelprozesses noch kaum Eingang in ein Gesamtweltbild der Physiker gefunden. Im allgemeinen wird die Unbeschreibbarkeit des Einzelprozesses lediglich einfach als Konsequenz der Quantengesetze und als Beschränkung der klassischen Beschreibbarkeit der Welt hingenommen. Dazu sind mir jedoch interessante Ausnahmen bekannt. Zum ersten Pauli, aus dessen Brief an Markus Fierz vom 13.10.1951 ich zitiere (12): "Das physikalisch Einmalige ist vom Beobachter nicht mehr abtrennbar - und geht der Physik deshalb durch die Maschen ihres Netzes. Der Einzelfall ist *occasio* und nicht *causa*. Ich bin geneigt, in dieser "*occasio*" - die den Beobachter und die von ihm getroffene Wahl der Versuchsanordnung mit einschließt - eine "*revenue*" der in dem 17. Jahrhundert abgedrängten *anima mundi* (natürlich in "verwandelter Gestalt") zu erblicken. *La donna é mobile* - auch die *anima mundi* und die *occasio*." Nach Pauli kommt also die Irrationalität als Eigenschaft der Welt im nicht rational beschreibbaren Einzelprozeß zum Vorschein. Es ist jedoch bemerkenswert, daß Pauli dies als Ausdruck eines Weltgeistes sieht, also offenbar doch wieder, wenn auch sehr indirekt, nach einer Ursache in einem umfassenderen Weltbild sucht. Gerade dadurch kommt meines Erachtens der Naturwissenschaftler in Pauli zum Ausdruck.

Eine etwas andere Position kann man aus der Bohr'schen Komplementarität ablesen. Danach ist es ja nicht möglich und sinnvoll, nach der Eigenschaft eines Quantensystems an sich zu fragen. Vielmehr sind solche Fragen nur im Zusammenhang mit einer gleichzeitigen Spezifikation des makroskopischen Apparates sinnvoll. Also auch hier gibt es eine grundsätzliche Grenze der Erfahbarkeit der Wirklichkeit, eine Grenze für eine vollständige, rationale Erfassung der Welt. Dies wird von Wheeler (13) dahingehend gedeutet, daß er die einzelne Messung in der Quantenmechanik, das Quantenphänomen, als einen "elementaren Schöpfungs-

akt" bezeichnet. In einer Anwendung der Bohr'schen Überlegung, daß ein Quantenphänomen eine aus Quantensystem und Meßapparat bestehende Gesamtheit ausmacht, stellt er fest, daß es uns als den Beobachtern ja freisteht zu entscheiden, in welcher Weise wir ein Quantenphänomen zum Abschluß bringen werden. Wir entscheiden durch die Wahl des Meßapparates, welches Phänomen Wirklichkeit werden kann und welches nicht. Wheeler zeigt dies etwa am berühmten Fall des Quasars, von dem wir zwei Bilder durch die Gravitationslinsenwirkung einer Galaxie, die zwischen uns und dem Quasar liegt, sehen. Wir können uns hier entscheiden, ob das Quantenphänomen, an dem die Photonen teilhaben, ein Interferenzphänomen ist oder die Passage des Photons auf dem einen oder anderen Weg an der Galaxie vorbei. In beiden Fällen enthält der Einzelprozeß jedoch wieder ein unkontrollierbares Element. Im Fall der Wegmessung etwa in der Weise, daß wir uns zwar entscheiden können, den Weg des Photons zu messen, also den Weg Realität werden zu lassen, jedoch keinen Einfluß darauf haben, welcher der beiden möglichen Wege des Photons tatsächlich Realität wird. Wheeler bezeichnet daher das einzelne Quantenphänomen als elementaren Schöpfungsakt, bei dem wir als Beobachter eine signifikante Rolle spielen in der Weise, als wir durch die Wahl des Meßapparates festlegen können, welche physikalische Größe im Quantenphänomen zur Realisierung kommt, deren Wert wir jedoch nicht beeinflussen können. Da wir Teil des Universums sind, schafft sich das Universum nach Wheeler also selbst, indem es sich selbst durch uns beobachtet.

Eine sehr interessante Position wird von Just (14) vertreten, der die spontane, diskontinuierliche und undeterminierte Reduktion der Wellenfunktion im quantenmechanischen Meßprozeß vergleicht mit dem Vorgang der Bewußtwerdung, für den genau dieselben Charakteristika zutreffen. In der Komplementarität des Meßprozesses, das ist die Eigenschaft, daß durch genaue Bestimmung einer Größe eine andere, dazu eben komplementäre, unbestimmbar und damit unbestimmt wird, sieht Just eine Analogie zu Schöpfungsmythen, die auch ein Auseinanderfallen des vorher Ganzen, Geeinten, Ununterscheidbaren in Getrenntes, Differenziertes beinhalten. Nach ihm liegt also "die Vermutung nahe, daß im Meßprozess der Quantenmechanik ein psychischer Vorgang in der Aus-

senwelt erlebt wird. Und zwar eben jenes Ereignis, das andere Kulturen und Epochen im Schöpfungsmythos dargestellt haben."

Damit haben wir allmählich die Rolle des Beobachters in das Zentrum unserer Überlegungen gerückt, eine Rolle, die durch Clauser und Shimony nach ihrer Analyse der gegenwärtigen EPR-Bell Situation folgendermaßen beschrieben wird (15): "Physikalische Systeme haben keine wohldefinierten Eigenschaften unabhängig von unserer Beobachtung, vielleicht macht ein umstürzender Baum im Wald doch keinen Lärm". In diesem Zusammenhang hat es zwischen Bohr, Heisenberg, Pauli und natürlich Einstein Auffassungsunterschiede gegeben: Es gab hier offenbar in den Fünfzigerjahren einen interessanten Meinungs austausch zwischen Bohr und Pauli zur Frage des sogenannten "losgelösten Beobachters" in der Quantenmechanik (16). Dazu erneut ein Zitat Pauli's aus einem Brief an Bohr vom 15.2.1955 (17): "...Es erscheint mir durchaus angebracht, die konzeptive Beschreibung der Natur in der klassischen Physik, die Einstein so emphatisch beibehalten möchte, das Ideal des losgelösten Beobachters zu nennen. In drastischen Worten hat der Beobachter nach diesem Ideal gänzlich in diskreter Weise als versteckter Zuschauer (spectator) aufzuscheinen, niemals als Handelnder (actor), die Natur wird dabei in ihrem vorbestimmten Lauf der Ereignisse allein gelassen, unabhängig davon, auf welche Weise die Phänomene beobachtet werden". Pauli kommt dann im selben Brief noch auf die Situation in der Quantenmechanik zu sprechen: "Da es erlaubt ist, die Beobachtungsinstrumente als eine Art Verlängerung der Sinnesorgane des Beobachters zu betrachten, betrachte ich die unvorhersagbare Änderung des Zustands durch eine einzelne Beobachtung - trotz des objektiven Charakters jeder Beobachtung unter gleichen Bedingungen - als eine Aufgabe der Idee der Isolation (Loslösung) des Beobachters vom Lauf der physikalischen Ereignisse außerhalb seiner selbst."

Dazu Bohr in seinem Artikel "Die Einheit der Wissenschaft" (18). "Komplementarität bedeutet in keiner Weise ein Verlassen unserer Stellung als außenstehende Beobachter, er muß vielmehr als logischer Ausdruck für unsere Situation bezüglich objektiver Beschreibung in diesem Erfahrungsbereich angesehen werden. Die Erkenntnis, daß die Wechselwirkung zwischen den Meßgeräten und

den untersuchten physikalischen Systemen einen integrierenden Bestandteil der Quantenphänomene bildet, hat nicht nur eine unvermutete Begrenzung der mechanistischen Naturauffassung welche den physikalischen Objekten selbst bestimmte Eigenschaften zuschreibt, enthüllt, sondern hat uns gezwungen, bei der Ordnung der Erfahrungen dem Beobachtungsproblem besondere Aufmerksamkeit zu widmen." In Übereinstimmung mit Laurikainen kann ich den Eindruck nicht vermeiden, daß Bohr hier den von Pauli aufgeworfenen Fragen ausgewichen ist. Wie anders als einen Einfluß des Beobachters soll man denn die Tatsache verstehen, daß vor einer Messung physikalischen Objekten selbst bestimmte Eigenschaften nicht zugeschrieben werden können, nach der Messung also nach der Wechselwirkung mit dem vom Beobachter gewählten Meßapparat jedoch durchaus?

Heisenberg (19) etwa sieht dieses Problem jedoch in einer Relation zu den großen Schwierigkeiten, die, nach ihm, selbst bedeutende Wissenschaftler wie Einstein beim Verstehen und beim Akzeptieren der Kopenhagener Interpretation der Quantenmechanik hätten. Man bemerke sodann, daß die Wurzeln dieser Schwierigkeiten in der cartesischen Unterscheidung lägen. Diese Unterscheidung sei während der drei Jahrhunderte nach Descartes tief in die menschliche Seele eingedrungen, und es würde eine lange Zeit erfordern, bevor sie durch eine wirklich andere Position bezüglich des Problems der Wirklichkeit ersetzt sein werde. Abgesehen davon, daß meiner Ansicht nach Einstein's Position hier insofern nicht richtig wiedergegeben wird, als er zumindest Bohr's Position durchaus verstand, wenn er sie auch vielleicht gerade deshalb nicht akzeptierte, so ist die von Heisenberg ausgesprochene Position wohl so zu verstehen, daß für ihn das Paradigma auf dem wir eine erkenntnistheoretische Fundierung aufbauen könnten noch nicht gefunden ist, daß also die Quantenmechanik, die unbestrittenermaßen in der Weise korrekt ist als sie korrekte Vorhersagen liefert, gewissermaßen, was ihre Grundlagen betrifft, in der Luft hängt.

Es gibt natürlich Versuche einer Suche nach einem solchen Paradigma bzw. nach einer neuen oder erweiterten Fundierung unseres physikalischen Weltbildes und unsere jetzige Tagung gibt davon

direkt Zeugnis. Daß diese Suche noch nicht beendet ist, kann man jedoch eben daran erkennen, daß es eine Vielfalt von Interpretationen der Quantenmechanik gibt, die miteinander in Konkurrenz liegen. Evelyn Fox-Keller (20) hat als weiteren Hinweis für das Fehlen eines solchen Paradigmas die cognitive Repression des Interpretationsproblems durch die Mehrheit der Physiker angeführt. Sie sieht hier eine sehr interessante Parallele zwischen der historischen Entwicklung wissenschaftlichen Denkens und der cognitiven Entwicklung des Kindes wie sie von Piaget beschrieben wurde. Beide Entwicklungen durchlaufen verschiedene diskrete Stadien struktureller Organisation. Bevor eine neue konzeptuelle Struktur etabliert ist, findet Wissen, das in nichtverbalen Formen bereits vorhanden ist, keine Möglichkeit des Ausdrucks und verlangt, sofern es mit früher festgelegten Strukturen im Widerspruch steht, cognitive Unterdrückung. Ein Kind, das sich im Übergang zwischen zwei Stadien befindet, zeigt Verwirrung, Ablehnung und Ausweichen, wenn man von ihm verlangt, Eindrücke und Empfindungen auszudrücken, für die die cognitiven Strukturen noch nicht vorhanden sind. Für Fox-Keller ist die im allgemeinen vorhandene Unwilligkeit, die Implikationen der Quantenmechanik zu diskutieren, genau so ein Phänomen. Für die Mehrheit der Physiker sind die Fragen nach der Bedeutung der Quantenmechanik ein für allemal beantwortet durch die Kopenhagener Interpretation und jedes weitere Fragen wird dann abgetan als Zeichen dafür, daß der Frager nicht versteht worum es geht, und es werden solche Fragen als "nur philosophisch", also für einen Physiker illegitim bezeichnet. Fragt man jedoch genau nach, was die Kopenhagener Interpretation besagt, erhält man eine Fülle verschiedener Antworten. Nach Fox-Keller ist auch dies ein Zeichen für ein Ausweichen, wobei das, dem ausgewichen wird, die Notwendigkeit für eine neue cognitive Struktur ist, die von der vorher existierenden Struktur radikal verschieden ist. Die alte Struktur nennt Fox-Keller den klassischen Objektivismus. Die Verwirrung um die Interpretation der Quantenmechanik besteht dann also im Versuch, eine oder mehrere Komponenten der klassischen Position beizubehalten.

Haben wir einmal erkannt, daß es ein Problem einer Fundierung der Quantenphysik gibt, so erhebt sich die Frage, wie das ge-

suchte neue Paradigma aussehen soll, was seine Eigenschaften sein sollen. Hierzu ist es sicherlich hilfreich, wenn wir uns einmal vor Augen führen, welche Eigenschaften die neue Theorie auszeichnen gegenüber der alten. Hier springt natürlich zuerst das Wirkungsquantum ins Auge, insbesondere die Tatsache, daß es eine universelle kleinste Wirkung gibt, die in einem physikalischen Prozeß übertragen werden kann. Dieser aus dem Experiment kommende und in die Theorie eingebaute Befund sollte sicherlich aus einem Paradigma folgen. Ob der Zahlenwert ebenfalls aus grundlegenden Überlegungen folgen kann oder muß ist offen. Wenn dies so ist, dann am ehesten über den Weg einer Begründung des Zahlenwertes der aus verschiedenen Naturkonstanten gebildeten dimensionslosen Zahlen, wie etwa der Feinstrukturkonstanten. Ich persönlich bezweifle, daß in einer Erklärung des Zahlenwertes des Wirkungsquantums selbst der Schlüssel für ein tieferliegendes Verständnis liegen könnte. Dies deshalb, weil die erkenntnistheoretischen Probleme der Quantenmechanik gegen eine Variation der Größe des Wirkungsquantums in einem weiten Bereich immun sind. Die Tatsache allerdings, daß es ein Wirkungsquantum gibt, ist sicherlich signifikant auf der Suche nach einem neuen Paradigma.

Die zweite Eigenschaft der Quantenmechanik, die hilfreich sein sollte auf dieser Suche, ist die Art und Weise, wie wir in der Quantenmechanik die Wahrscheinlichkeit für einen Vorgang berechnen, wenn es mehrere Wege gibt, um vom Ausgangspunkt zum Endpunkt zu gelangen. Anstatt einfach die entsprechenden Wahrscheinlichkeiten zu addieren, addiert der Physiker die komplexen Wurzeln aus diesen Wahrscheinlichkeiten, ein prozedere, für das es natürlich exakt festgelegte Regeln gibt. Ein wesentlicher Punkt hier ist, daß diese Vorgangsweise nur gilt, wenn die experimentelle Anordnung so beschaffen ist, daß die verschiedenen Wege, auf denen der betrachtete Vorgang ablaufen kann, prinzipiell ununterscheidbar sind. Sollte die Anordnung dagegen so beschaffen sein, daß die Wege unterscheidbar sind, so sind die Wahrscheinlichkeiten selbst zu addieren. Es treten hier also zwei Eigenschaften auf, die signifikant sind. Erstens sehen wir wieder den direkten Einfluß des Beobachters in einer sehr prinzipiellen Weise. Es steht ihm ja frei, durch die Wahl der ex-

perimentellen Anordnung festzulegen, ob bestimmte Wege, auf denen ein Vorgang ablaufen kann, unterscheidbar sind oder nicht. Und andererseits ist der Formalismus so ausgelegt, daß, wann immer solche ununterscheidbaren Wege experimentell vorliegen, auch im Formalismus die Ununterscheidbarkeit vorliegt. Diese Eigenschaft ist sicherlich zufriedenstellender als die Situation in der klassischen Physik, wo wir uns ein Ensemble immer in einzelne Komponenten zerlegt denken können und das stochastische Verhalten des Gesamtensembles aus dem im Prinzip als wohldefiniert denkbaren Verhalten seiner Konstituenten folgt. Die quantenmechanische Regel besagt in plakativer Form "Don't even think of distinguishing the undistinguishable". Das Faszinierende ist nun, daß aus der Weise, wie die Quantenphysik dies handhabt, Neues folgt, nämlich das Interferenzphänomen.

Nun möchte ich noch einmal auf die Unmöglichkeit einer detaillierten Beschreibung im Sinne einer Unvorhersagbarkeit des Einzelprozesses als einer Begrenzung einer rationalen Beschreibbarkeit zu sprechen kommen. Es ist ja, um zu rekapitulieren, so, daß wir zwar festlegen können, welche von zwei komplementären Größen sich manifestiert, etwa Ort oder Impuls, wir aber auf den Wert der Größe keinen Einfluß haben. Wir als Beobachter haben also qualifizierenden, aber nicht quantifizierenden Einfluß auf das Quantenphänomen. Das letztere, die Unmöglichkeit eines quantifizierenden Einflusses, hängt natürlich eng zusammen mit der Endlichkeit des Wirkungsquantums und ich sehe darin eine notwendige Folge des ersteren des qualifizierenden Einflusses, um dem Beobachter nicht totale Kontrolle über die Phänomene der Natur zuzugestehen. Der Beobachter kann also durch seine experimentelle Fragestellung die Natur zwingen, je nach gewählter Anordnung qualitativ verschiedene einander ausschließende Antworten zu geben, allerdings um den Preis einer quantitativen Nichtbeeinflussbarkeit.

Die Nichtlokalität, wie sie am stärksten in der EPR Situation zum Ausdruck kommt, ist dann meines Erachtens eine Folge des eben Gesagten, wenn man zugesteht, daß das Quantenphänomen über beliebige Distanzen ausgedehnt sein kann. Wenn also etwa im Fall einer Spinmessung vor der Messung grundsätzlich nicht gesagt

werden kann, was die Richtungen der beteiligten Spins sind, muß der Quantenzustand eine Superposition sein, nach einer Messung liegt dann nur mehr ein einzelner Zustand mit festgelegten Spins vor. Genau Analoges läßt sich natürlich über Orts- und Impulsmessung im Falle der ursprünglichen EPR Situation sagen.

Daß das neue Paradigma ganzheitliche Aspekte enthalten wird, ist sehr wahrscheinlich. So legen dies etwa schon die Überlegungen zum Superpositionsprinzip, wie sie von Pietschmann (21) heute präsentiert wurden, insofern nahe, als in den quantenmechanisch interessanten Fällen eine Auftrennung der Beobachtung in unterscheidbare Teilchen oder Prozesse nicht einmal prinzipiell möglich ist. Ganzheitliche Aspekte folgen ebenso aus den Überlegungen zum Einstein-Podolsky-Rosen Paradoxon (22). Dies deshalb, weil bei Festhalten an der gegenwärtigen Quantenmechanik entweder der kontrafaktische Schluß oder das EPR-Realitätskriterium oder das EPR-Lokalitätsprinzip aufzugeben ist.

Ich bin hier absichtlich nicht auf Fragen eingegangen wie etwa die, ob es eine Grenze zwischen Mikro- oder Makrophysik gäbe, ob für Quantenprozesse eine neue Form der Logik notwendig wäre, oder ob das Bewußtsein einen aktiven, dynamischen Einfluß auf die Wellenfunktion habe. Solche oder ähnliche Positionen wurden von einigen Physikern vertreten, sie würden jedoch meines Erachtens Occam's Rasierklinge zum Opfer fallen: Entia non sunt multiplicanda praeter necessitatem. Überdies wäre wohl jede Position, die eine Änderung des Quantenformalismus bedingen würde, als zumindest äußerst unwahrscheinlich anzusehen.

Aus Zeitmangel konnte ich in meinem Vortrag nicht im Detail auf zwei andere Begrenzungen der Rationalität innerhalb der Physik eingehen. Eine davon liegt in der Begriffsbildung, die sicher stark mit dem Konzept der Archetypen, die ihre Wurzeln im Unbewußten haben, zusammenhängt (23). Jung meint etwa, daß der Energiebegriff mit dem Archetyp des Feuers zusammenhängt (24). Eine andere Begrenzung der Rationalität liegt in der prinzipiellen Unvorhersagbarkeit der Zukunft der Physik und der Naturwissenschaften im allgemeinen. Gewiß sind einige Trends durch Extrapolation vermutbar, eine rational begründete Vorhersage würde je-

doch eine rationale Antizipation unerwarteter Durchbrüche bedeuten, also eine Vor-Entdeckung auf einer Metaebene, ein offenkundiger Widerspruch.

Zum Abschluß sei ein Zitat aus einem Brief Einsteins an Schrödinger vom 22.12.1950 wiedergegeben (25), das mir auch heute noch den gegenwärtigen Stand des Interpretationsproblems der Quantenmechanik wiederzugeben scheint, wenn ich auch, wie aus diesen Ausführungen hoffentlich hervorgeht, weder Einsteins noch Schrödingers Auffassungen voll teilen kann: "Es ist einigermaßen hart, zu sehen, daß wir uns immer noch im Stadium der Wickelkinder befinden und es ist nicht verwunderlich, daß sich die Kerle dagegen sträuben, es zuzugeben (auch sich selbst)".

Ich danke Herrn Prof. K.V. Laurikainen dafür, mir seine Arbeiten vor Publikation zur Verfügung gestellt zu haben, sie waren eine wesentliche Anregung für vorliegende Überlegungen.

Literaturverzeichnis:

- (1) R.P. Feynman: "The Character of Physical Law", MIT Press, Cambridge, Mass. (1965).
- (2) Roger Penrose: Gravity and State Vector Reduction. In "Quantum Concepts in Space and Time", R. Penrose and C.J. Isham eds., pp. 129-146, Clarendon Press, Oxford (1986): Übersetzung A.Z.
- (3) W. Rindler: Einstein's Priority in Recognizing Time Dilation Physically. Am.J.Phys. 38, 1111-1115 (1970).
- (4) Damit sei jedoch keineswegs behauptet, daß es nicht immer wieder Vorschläge gibt, die, ohne sie hier werten zu wollen, Änderungen oder sogar ein Aufgeben der Relativitätstheorie vorschlagen. Es ist jedoch so, daß es hier nicht eine Vielzahl einander konkurrierender, auf dem gleichen Formalismus aufbauender Interpretationen gibt.
- (5) N. Bohr: Discussions with Einstein on Epistemological Problems in Atomic Physics. In "Albert Einstein: Philosopher-Scientist", P.A. Schilpp, ed., pp.200-241, The Library of Living Philosophers, Evanston (1949).
- (6) vgl. L.E. Ballentine: The Statistical Interpretation of Quantum Mechanics. Rev.Mod.Phys. 42, 357-381 (1970), und C. Dewdney, A. Kyprianides and J.P. Vigiier: Causal Non Local Interpretation of the Double Slit Experiment and Quantum Statistics. Epistemological Letters, Heft 36, Oktober 1984, pp.71-82.
- (7) D. Bohm: A Suggested Interpretation of the Quantum Theory in Terms of 'Hidden' Variables, I and II. Phys.Rev. 85, 166-193 (1952).
- (8) L. de.Broglie: "Nonlinear Wave Mechanics" Elsevier Science, Amsterdam (1960).
Hier sei bemerkt, daß Bohm ausdrücklich die Vorhersagen der Quantenmechanik beibehält, während deBroglie eine Änderung des Formalismus zulassen würde. In der gegenwärtigen Arbeit beziehe ich mich vor allem auf Bohm's Position.
- (9) H. Everett III: 'Relative State' Formulation of Quantum Mechanics. Rev.Mod.Phys. 29, 454-462 (1957).
- (10) Die tatsächliche Zahl der existierenden Interpretationen ist beträchtlich größer. So unterscheidet N. Herbert ("Quantum Reality", Anchor Press, New York, 1985) allein acht verschiedene Realitätskonzepte.
- (11) Jean Wahl: Irrationalism in the History of Philosophy. In "Dictionary of the History of Ideas", Philip P. Wiener, ed., volume II, pp. 634-638. Charles Scribner's Sons, New York (1973).

- (12) Brief PLC (Pauli Letter Collection, CERN, Genf) 0092.063, veröffentlicht in K.V.Laurikainen: Wolfgang Pauli and Philosophy. Gesnerus 41, 225-227 (1984).
- (13) John Archibald Wheeler: Law without Law. In "Quantum Theory and Measurement", J.A.Wheeler and W.H.Zurek eds., pp. 182-213, Princeton University Press, Princeton (1983).
- (14) Wilhelm Just: Vom Mythos in den exakten Wissenschaften. Vortrag gehalten am 14.2.1985 an der Universität Zürich für die Physikalische Gesellschaft. Unveröffentlichtes Manuskript.
- (15) J.F.Clauser and A.Shimony: Bell's theorem: experimental tests and implications. Rep.Prog.Phys. 41, 1881-1927(1978).
- (16) Dieser Meinungs austausch und insbesondere Pauli's philosophische Position sind im Detail dargestellt in K.V.Laurikainen: Jenseits der Atome. Unveröffentlichtes Manuskript, Helsinki (1985).
- (17) Brief PLC 0014.51, veröffentlicht in K.V.Laurikainen: Wolfgang Pauli and the Copenhagen Philosophy. In "Symposium on the Foundations of Modern Physics", P.Lahti and P.Mittelstaedt, eds., pp. 273-287, World Scientific, Singapore (1985). Übersetzung A.Z.
- (18) N.Bohr: Die Einheit der Wissenschaft. Vortrag gehalten aus Anlaß der 200-Jahrfeier der Columbia University. Die hier zitierte Passage ist wiedergegeben in K.V.Laurikainen: Jenseits der Atome. Unveröffentlichtes Manuskript, Helsinki (1985).
- (19) Werner Heisenberg: "Physik und Philosophie", Hirzel, Leipzig (1944).
- (20) Evelyn Fox-Keller: Cognitive Repression in Contemporary Physics. Am.J.Phys.47, 718-721 (1978). Auch in "Reflections on Science and Gender", pp. 139-149, Yale University Press, New Haven (1985).
- (21) W. Pietschmann: Ganzheitsaspekte der Quantenmechanik, pp.88, dieser Band.
- (22) Anton Zeilinger: Das Einstein-Podolsky-Rosen Paradoxon, pp.29, dieser Band.
- (23) K.V.Laurikainen: The Possibility of Science and its Limits. Helsinki University preprint HU-TFT-85-51 (1985).
- (24) C.G.Jung: "Erinnerungen, Träume, Gedanken", Walter-Verlag, Olten und Freiburg (1985).
- (25) Brief Einstein an Schrödinger vom 22.12.1950, aus "Briefe zur Wellenmechanik", K.Przibram Hrsg., pp.36-37, Springer-Verlag, Wien (1963).