

Physik ohne Realität: Tiefsinn oder Wahnsinn?

H. D. Zeh (www.zeh-hd.de) – Dezember 2009 (zuletzt geändert: Mai 2011)

1. Vorbemerkung

Ich habe in letzter Zeit des öfteren bemerken müssen, daß mir in wissenschaftlichen Publikationen und in Internet-Foren unterstellt wird, ich setze bei gewissen Argumenten zur Interpretation der Quantentheorie voraus, daß die Wellenfunktion die Realität beschreibt, was aber „bekanntlich“ nicht zuträfe. Jedoch ist weder das eine noch das andere richtig, auch wenn die zweite Aussage noch immer ein verbreitetes Vorurteil unter Physikern ist. Denn die Wahrscheinlichkeitsinterpretation (insbesondere für das spontane Auftreten von Partikeleigenschaften) wird allen Physikstudenten als unumstößliches Dogma ins Gehirn gebrannt. Sie ist für viele Zwecke natürlich gerechtfertigt, beschreibt jedoch nur die halbe Wahrheit über die Wellenfunktion und überläßt die Anwendung der dabei zu benutzenden statistischen Regeln weitgehend der situationsbedingten Intuition (was neuerdings auch „Kontextualität“ genannt wird). Die erste Aussage habe ich dagegen nur als *möglich und konsistent* bezeichnet, wenn man bereit ist, den Realitätsbegriff unabhängig von traditionellen Vorurteilen zu verstehen. Keinesfalls ist sie *notwendig* für irgendwelche meiner Schlußfolgerungen. Deren Bedeutung für eine *mögliche* „Realität“ muß von den Subtilitäten der Definition dieses Begriffes abhängen. Die pragmatische Ablehnung einer Realität in der Quantenphysik ist dagegen nur ein Verzicht auf Konsistenz der Beschreibung (umschrieben durch Vokabeln wie Dualismus, Unschärfe usw.).

2. Historisches zum Realitätsbegriff in der Physik

„Es gibt keine Quantenwelt“ lautet ein bekanntes Zitat von Niels Bohr. Ein anderes besagt, daß „die Physik keine Aussagen darüber machen kann, wie die Welt *ist*, sondern nur darüber, was wir über sie wissen.“ Letzteres kann man mehr oder auch weniger trivial verstehen. Denn schon vorher hatte Heisenberg die keineswegs triviale Behauptung aufgestellt, daß „die Bahn des Elektrons erst durch ihre Beobachtung *entsteht*“ – nämlich aus einer Folge von Messungen des Teilchenortes, der vorher jeweils „objektiv unbe-

stimmt“ oder „unscharf“ war. Nach seiner später geäußerten Auffassung stellt die Wellenfunktion, die nach Schrödingers ursprünglichen Absichten das Elektron objektiv beschreiben sollte, lediglich „menschliches Wissen“ dar. Somit wäre auch der umstrittene Kollaps der Wellenfunktion bei einer Messung nur Ausdruck einer Informationsveränderung im Beobachter. All diese Unterscheidungsversuche setzen aber bereits eine in der Quantentheorie fragliche begriffliche Trennung der Zustände von beobachtetem System, Meßapparat und Beobachter voraus.

Ist es denn nun die Messung als Vorgang im Meßgerät oder die menschliche Wahrnehmung des Ergebnisses, die angeblich den Ort des Teilchens erzeugt? Nach Bohr ist das Meßergebnis mit klassischen Begriffen zu beschreiben, sollte also nach Beendigung der Messung unabhängig von der Anwesenheit eines menschlichen Beobachters existieren. Das Wissen des Beobachters wird nach traditioneller Auffassung dagegen erst durch das Ablesen des Ergebnisses beeinflusst (und nicht etwa umgekehrt).

Ursprünglich hatte Heisenberg mittels seines „Gedanken-Mikroskops“ versucht, seine Unbestimmtheitsrelation als Folge einer unvermeidlichen Störung des Objekts durch die Messung zu verstehen. Das wäre noch nicht mit der *Existenz* realer Partikel in Konflikt gewesen. Dieser Versuch ist aber gescheitert, so daß Pauli später ganz im Sinne Heisenbergs formulierte, der bei der Messung in Erscheinung tretende Ort des Elektrons sei als eine „außerhalb der Naturgesetze stehende Schöpfung“ aufzufassen. Eine ähnliche Auffassung wird auch heute noch (scheinbar notgedrungen) in irgendeiner Form von den meisten Physikern vertreten, wie erst kürzlich wieder einer Diskussion in Form von Leserbriefen in der Zeitschrift der American Physical Society, *Physics Today*, zu entnehmen war.¹ Denn nach der Kopenhagener Deutung gilt der (irreversible) Meßprozeß als nicht dynamisch analysierbar, während die in den letzten Jahrzehnten entwickelte Dekohärenztheorie sehr wohl eine Möglichkeiten dazu bietet.

Nun erweist sich zwar der Realitätsbegriff bei einer tiefergehenden philosophischen Analyse als sehr schwer zu fassen, doch das erklärt keineswegs, warum seine Subtilität gerade in der Quantentheorie eine besondere Rolle spielen soll. Hier sind es also die ausdrücklichen Ablehner einer mikroskopischen Realität, die eine Bringschuld bei der Antwort auf die Frage „Was ist denn mit Realität gemeint?“ haben.

Die Realität neuer physikalischer Konzepte war häufig anfangs umstritten. Galilei wurde angeklagt, weil er das kopernikanische Weltbild als real und nicht nur als eine

Rechenmethode ansah. Ähnliche Versuche einer Abwertung oder Verharmlosung naturwissenschaftlicher Erkenntnisse sind heute keineswegs nur bei Kreationisten, sondern auch bei vielen Philosophen (etwa bezüglich Einsteins Raumzeitkonzept) und sogar bei den meisten Physikern (bezüglich Schrödingers Wellenfunktion) verbreitet, obwohl *alle* Quantenphänomene mit deren Hilfe vorhergesagt werden konnten. Heute bedarf es zur Aufrechterhaltung einmal akzeptierter Begriffe und Denkmuster nicht einmal mehr der radikalen Maßnahmen durch die Obrigkeit wie zu Galileis Zeiten, denn ganz demokratische akademische Entscheidungsprozesse (wie durch peer review, Forschungsgemeinschaften und Berufungsgremien) haben sich als sehr effizient erwiesen.

Im neunzehnten Jahrhundert wurde auch das elektrische Feld zunächst als ein rein formales Hilfskonstrukt zur Berechnung von Kräften auf Ladungen angesehen. Da wir das Feld nicht „direkt erblicken“ können, fragt sich, was wir unter seiner Realität verstehen. Bei der Begründung eines realen elektrischen Feldes spielt die konsistente „Denkbarkeit“ kleiner Probeladungen, mit deren Hilfe man es überall operationell nachweisen *könnte*, ohne es merklich zu stören, eine wesentliche Rolle. Die mögliche Realität der Probeladungen stellt man dabei nicht in Frage. Man kann also konsistent so tun, *als ob* das elektrische Feld überall auch ohne die Präsenz von Probeladungen existierte, und, in seiner elektromagnetischen Verallgemeinerung, *als ob* es eine Energie- und Impulsdichte besäße. Als Folge der erkenntniskritischen Betrachtungen von Descartes und Hume ist dieses „als ob“ aber für den Realitätsbegriff ganz allgemein von entscheidender Bedeutung. Das unwiderlegbare Extrem dieser Kritik ist *Descartes Dämon*, der uns die Welt, die wir zu sehen glauben, nur vortäuschen könnte. Diese Hypothesen- (oder Theorien-) Abhängigkeit unseres gesamten Weltbildes betrifft die „gefühlte Realität“ von Objekten unserer Alltagserfahrung, die wir ständig zu bestätigen scheinen, offenbar geringer als die von solchen, die nur indirekt oder durch apparativen und theoretischen Aufwand zu erschließen sind, obwohl diese von sehr viel allgemeinerer Gültigkeit sein können. Die uneingeschränkte Extrapolation aktueller Theorien und Begriffe zu einer geschlossenen Kosmologie kann aber grundsätzlich nur als Konsistenzprüfung für das jeweilige Hypothesensystem verstanden werden.

Entscheidend ist, daß eine solche „heuristische Fiktion“ einer realen Welt mit allen Erfahrungen im Einklang steht und keine überflüssigen Elemente enthält, die nicht aus Konsistenzgründen erforderlich sind (Occam's razor). Diese Konstruktion verlangt keinesfalls, realen Objekten auch „materielle“ Eigenschaften, wie Energie und Impuls,

zuzuschreiben (wie es beim elektromagnetischen Feld noch möglich ist). Diese laut Vaihinger² somit *grundsätzlich fiktive Realität* gilt gewöhnlich als neokantisches Konzept, kann aber als ausdrückliche Fiktion sehr wohl auch als metaphysikfrei im Sinne eines Humeschen Positivismus verstanden werden – wenn das denn überhaupt ein Gegensatz ist.

Ein weiteres Objekt von strittiger Realität in der Physikgeschichte ist der Lichtäther als ursprünglich vermutetes materielles Medium für elektromagnetische Schwingungen. Er gilt gemeinhin als gescheitertes Konstrukt (insofern eben nicht als heuristisch), da er nicht zu mit den Experimenten konsistenten Vorhersagen geführt hat. Das ist allerdings nur richtig, solange man für den Äther irgendein Ruhesystem voraussetzt, während das Vakuum als Schwingungsmedium nach heutigen Vorstellungen durchaus eine physikalische, als real anzusehende Struktur, aber auch eine ungewöhnliche, relativistisch invariante Zustandsgleichung besitzt, die *kein* Ruhesystem auszeichnet.

Es ist sicher kein Zufall, daß sich Einstein als junger Mann intensiv mit erkenntnistheoretischen Überlegungen befaßt hat.³ Als Folge seiner positivistischen Grundauffassung entwickelte er seine Relativitätstheorie zunächst ausschließlich in Form von Beziehungen zwischen Zeit- und Längenmessungen, was ihm half, Newtons absolute Begriffe von Raum und Zeit zu umgehen. Die „Realität“ der Raumzeit als neuem, einheitlichen Gebilde wurde erst von Minkowski klar erkannt (ganz offensichtlich im Sinne einer heuristischen Fiktion). Einstein hat oft betont, daß die Krümmung der Raumzeit nicht wirklich beweisbar, sondern eben nur eine sehr nützliche Hypothese ist. Minkowskis Standpunkt wird konsequent mit Hilfe von koordinatenunabhängigen (vierdimensionalen) geometrischen Objekten zur Darstellung physikalischer (realer) Objekte in dem bekannten Lehrbuch von Misner, Thorne und Wheeler vertreten.⁴ (John Wheeler schlug dafür auch die Einführung neuer Namen, wie „momenergy“ an Stelle der operationell begründeten, aber nicht invarianten separaten Begriffe Impuls und Energie vor.) Als Heisenberg sich trotz Minkowskis Einsichten mit seinem operationalistischen Konzept auf Einstein berief, führte das zu Mißverständnissen mit diesem.⁵

Warum erscheint der Verzicht auf ein vordem so erfolgreiches Konzept wie das der Realität (also einer konsistenten, beobachterunabhängigen Beschreibung der Welt) nun vielen Physikern in der Quantentheorie geboten? Die Bereitschaft zu einer solchen Einstellung wurde zweifellos aus dem Zeitgeist der zwanziger Jahre geboren, als man

sich aus den vermeintlichen Fesseln von Materialismus und Determinismus zu befreien suchte.⁶ Dazu mußten aber ganz konkrete Argumente kommen. Sie ergaben sich zunächst aus Heisenbergs erfolgreicher formaler Umschreibung der Partikelmechanik auf seine Matrizenmechanik, die, wie er damals glaubte, nur für atomare Teilchen gelten könne, die für den jugendlichen Dränger und Humanisten zur Welt der Ideale gehören mußten. Die klassischen Teilchenvariablen wie Ort und Impuls werden dabei durch rein formale Größen ersetzt, denen *keine bestimmten Zahlenwerte* entsprechen, sondern denen solche nach seiner Auffassung erst bei menschlichen Eingriffen (Messungen) zukommen.

Diese Vorstellungen erschienen aber den meisten Physikern zunächst inakzeptabel. So wurde Schrödingers Wellenmechanik mit großen Erwartungen aufgenommen – vorübergehend selbst von Heisenbergs frühen Unterstützern, wie etwa Max Born. Ihre Anschaulichkeit, gestützt durch die neuen Interferenzexperimente mit Elektronen durch Davisson und Germer, beruhte jedoch auf einer starken Vereinfachung von Schrödingers Theorie (ihrer Beschränkung auf von einander unabhängige Elektronen), die wegen der Plausibilität *räumlicher* Wellenfunktionen zunächst auch natürlich erschien.

Der Anstoß zur endgültigen Absage an eine mikroskopische Realität ergab sich in der Quantentheorie erst aus Konsistenzfragen der Art: „Ist das Elektron denn nun *in Wirklichkeit* ein Teilchen oder eine (räumliche) Welle?“ Keine dieser beiden Möglichkeiten kann bekanntlich alle Beobachtungen beschreiben, weshalb Niels Bohr sein dem philosophischen Irrationalismus entlehntes *Komplementaritätsprinzip* einführte, das die Verwendung sich logisch ausschließender Begriffe je nach Art des durchgeführten Experiments explizit gestattet und sogar erfordert. Unter der (dann also bestrittenen) Realität eines quantenmechanischen Objekts wird hier offensichtlich die Existenz einer eindeutigen und konsistent anwendbaren formalen Beschreibung verstanden. Der grundsätzliche Verzicht auf eine „Quantenwelt“ entspricht daher der Erwartung, daß sich eine begrifflich konsistente und vollständige Beschreibung niemals finden lasse.

In dieser allgemeinen Form ist eine solche Erwartung durch Gegenbeispiele, wie etwa Bohms Theorie, längst widerlegt (s. Abschnitt 5).⁷ Wenn Bohrs „Kopenhagener Deutung“ trotzdem von der Mehrheit der Physiker immer noch akzeptiert wird, so nicht zuletzt wegen dessen anhaltender Autorität, aber auch deswegen, weil fast alle der diversen Gegenvorschläge neue Elemente oder Annahmen enthalten, die nicht bestätigt

werden konnten oder können. Es spielt sicher auch eine Rolle, daß die pragmatischen Regeln der Kopenhagener Deutung es erlauben, den darin postulierten begrifflichen Inkonsistenzen systematisch aus dem Wege zu gehen. Falls der Verzicht auf Realität denn Wahnsinn ist, so erfordert er jedenfalls Methode – und diese ist lehrreich. Wenn etwa ein Physiker behauptet, er wende konsistent die Kopenhagener Deutung an, so bedeutet das eigentlich nur, daß er sich konsistent immer auf dieselbe Art begrifflicher Inkonsistenz beruft – aber das ergibt noch keine konsistente Theorie. Man hat die Komplementarität daher zu Recht als einen „Unbegriff“ bezeichnet, und man könnte sie, einer Mode folgend, vielleicht sogar zum „Unwort der Wissenschaft des zwanzigsten Jahrhunderts“ ernennen.

3. Heisenberg, Schrödinger und Dirac

Heisenberg wurde noch von einer reinen Partikel-Vorstellung für Elektronen geleitet – auch wenn er dabei erhebliche begriffliche Einschränkungen machen mußte. Die wichtigste war seine erst eine Weile nach dem Formalismus eingeführte Unschärferelation. Als sich deren Begründung durch unvermeidbare Störungen bei einer Messung als unzureichend erwies, konnte die Unschärfe nur so verstanden werden, daß Ort und Impuls eines Elektrons nicht gleichzeitig *existieren*. Nach traditionellen Maßstäben würde das einen Partikelbegriff für das Elektron einfach ausschließen. Hier wird es gewöhnlich so interpretiert, daß lediglich die einem Partikel zukommenden Eigenschaften (Ort und Impuls) vor einer Messung „objektiv unbestimmt“ sind – was immer das heißen mag. Es gibt unzählige philosophische oder formale Versuche, dies zu begründen.

Als Schrödinger kurz darauf das Elektron durch eine räumliche Wellenfunktion beschrieb, schien sich die Unschärferelation sehr anschaulich durch das Fouriertheorem erklären zu lassen (also durch die Unmöglichkeit, Ausdehnung *und* Wellenlängenbereich eines Wellenpaketes gleichzeitig beliebig zu beschränken) . Das Elektron wäre danach in Wirklichkeit kein Teilchen sondern ein Feld – und die von Heisenberg postulierte Unschärfe (ähnlich wie die in der Quantenmechanik gelegentlich eingeführte „neue Logik“) nur eine irreführende Krücke, die das Partikelkonzept auf seinen amputierten Beinen

halten soll.* Dieser Auffassung scheinen jedoch diverse Partikelphänomene zu widersprechen, so daß Bohr die Heisenbergsche Unschärfe von Ort und Impuls in Form seines Komplementaritätsprinzips noch verallgemeinerte: So wie das Elektron entweder einen Ort *oder* einen Impuls besitzen kann, kann es je nach Experiment auch entweder Partikel *oder* Welle sein. Ist das nun Tiefsinn oder die letzte Stufe des Wahnsinns? Jedenfalls haben sich die meisten Physiker damit abgefunden und betrachten jeden bei ihren Studenten oder Kollegen aufkommenden Zweifel gewöhnlich als mangelndes Verständnis für die moderne Physik – ein perfektes „Totschlagsargument“, das auf die Zeit von Bohr und Pauli zurückgeht, und der Grund, warum gerade professionelle Physiker davor zurückschreckten, Zweifel an Kopenhagen öffentlich zu äußern.

Schrödinger war bei seinem Versuch, eine Wellengleichung nach dem Vorbild der hamiltonschen partiellen Differentialgleichungen zu konstruieren, zunächst direkt auf Wellenfunktionen im klassischen Konfigurationsraum geführt worden. Diese Form der Wellenfunktion, die ihre statistische Interpretation zu unterstützen scheint, ist vielfach bestätigt worden. Für Schrödinger (ebenso wie für Einstein) war aber nur eine Realität in Raum und Zeit denkbar. Daher beschränkte er sich zunächst auf Einelektronenprobleme, für die der Konfigurationsraum mit dem normalen Raum identisch ist. Das reichte aber nicht, um diskrete Phänomene wie Zählerklicks, Spuren in der Wilsonkammer oder Quantensprünge zu verstehen. Somit wurde das Komplementaritätsprinzip zusammen mit der Wahrscheinlichkeitsinterpretation der Wellenfunktion von den meisten Physikern akzeptiert, auch wenn es niemand *verstehen* konnte. Genau das galt eben als ein Zeichen von „Tiefe“.⁶ In der Praxis benutzen die Physiker einfach die jeweils passenden Begriffe, die auf den zugehörigen „Kontext“ beschränkt bleiben müssen.

Hier führt Diracs allgemeines *Superpositionsprinzip* auf ähnliche Weise weiter wie Schrödingers Wellenfunktion mittels des Fouriertheorems zur Erklärung von Heisenbergs Unschärferelation – auch wenn das für Bohr nur eine rein technische Formalisierung seiner Vorstellungen war. Dieses Prinzip führte Dirac auf das Konstrukt des abstrakten Hilbertraums mit einer verallgemeinerten Schrödingergleichung für dessen

* Schrödinger hat darauf hingewiesen, daß schon die klassischen Interferenzphänomene des Lichts auch mit Newtons Lichtteilchen vereinbar gewesen wären, wenn man diesen eine „Unschärfe“ zugebilligt hätte. In diesem Sinne läßt sich auch jede klassische Wellengleichung formal durch ein geeignetes dreidimensionales Feynmansches Pfadintegral für „Teilchen“ ersetzen.

Elemente (Hilbertraumvektoren), die beliebige Quantenzustände darstellen sollen. Um auch klassische Eigenschaften beschreiben zu können, wurde es oftmals durch Zusatzpostulate („Superauswahlregeln“) wieder eingeschränkt, was sich aber durch die Entdeckung der Dekohärenz erübrigt hat. Im Nachhinein muß man das Superpositionsprinzip als die eigentliche Grundlage der gesamten Quantentheorie ansehen. Dabei interessierte sich Dirac, der gern formal argumentierte, allerdings kaum für die Realitätsdebatte, die ja eigentlich eine Konsistenzdebatte über die physikalische Anwendbarkeit der formalen Begriffe ist. Im Gegenteil – er benutzte sogar die Wahrscheinlichkeitsinterpretation, um eine „Äquivalenz“ von Heisenberg- und Schrödingerbild zu begründen, die aber nur auf die Berechnung von Erwartungswerten für Observable in abgeschlossenen Systemen anwendbar ist. Heisenberg, Born und Jordans formale Observablenalgebra von 1925 mag zwar mathematisch elegant und konsistent sein – ohne ihre Funktion im Hilbertraum (insbesondere als auf Wellenfunktionen wirkende Differentialoperatoren) fehlt ihr jedoch jede konkrete Interpretation.

Am einfachsten läßt sich das Superpositionsprinzip für Spinoren (oder auch Photonpolarisationen) erläutern. Die komplexwertige Superposition zweier beliebiger Spinoren ergibt einen ganz bestimmten anderen Spinor, wobei jeder davon eine bestimmte Raumrichtung charakterisiert. Jede mögliche Superposition ist daher genau so „real“ wie die beiden Ausgangsspinoren bzw. –polarisationen, denn diese können selber als Superpositionen in jeder anderen Basis aufgefaßt werden. Betrachtet man nun statt der beiden Basisspinoren alle möglichen Orte eines Elektrons als Basis eines Hilbertraums, so definieren deren Superpositionen Wellenfunktionen im Raum. Analogerweise sind daher auch Wellenfunktionen nicht mehr oder weniger reale Zustände als die Orte des Elektrons selber; sie können keinesfalls nur „Wahrscheinlichkeitsamplituden“ sein. Beim Vergleich mit den Spinoren fehlt lediglich das Analogon zu deren dynamischer Rotationsinvarianz, da die Ortseigenzustände durch die Lokalität aller Wechselwirkungen gegenüber allen anderen Zuständen ausgezeichnet sind. Dadurch wird auch die Möglichkeit von Messungen praktisch eingeschränkt. Diese Konsequenz des Superpositionsprinzips gilt dann auch für n Elektronen, so daß man automatisch Wellenfunktionen in deren Konfigurationsraum erhält. Diese sind aber „nichtlokal“, das heißt, sie sind im allgemeinen nicht durch Teilwellenfunktionen ihrer räumlich getrennten Subsysteme definiert. Trotzdem beschreiben sie auch individuell beobachtbare (also *nicht nur* statistische) Eigenschaften, wie etwa die Gesamtenergie. Zum Beispiel lassen sich die Drehimpuls-

eigenzustände von Molekülen oder deformierten Atomkernen nur als kollektive Superpositionen, also verschränkte Zustände, darstellen.⁸ Ein besonders drastischer Erfolg des Superpositionsprinzips ergab sich historisch im Zusammenhang mit der Paritätsverletzung bei schwachen Wechselwirkungen. Dort zeigte sich, daß man auch ein K -Meson und sein Antiteilchen superponieren kann, um je nach Phasenbeziehung ein langlebiges oder kurzlebige K -Meson als *neue Teilchen* zu beschreiben. Ähnliches gilt für die Superposition unterschiedlicher Neutrinos, was begrifflich erst unproblematisch wird, wenn man diese „Teilchen“ durch mehrkomponentige Felder ersetzt.

Ein freies klassisches Feld läßt sich als ein Kontinuum gekoppelter harmonischer Oszillatoren auffassen. Deren Kopplung kann man durch eine Variablentransformation auf die Eigenschwingungen („Moden“) des Feldes eliminieren. Das ergibt ein System unabhängiger harmonischer Oszillatoren, die man durch ihre räumlichen Wellenzahlen unterscheiden kann. Deren Amplituden definieren, äquivalent zu den ortsabhängigen Feldern, eine Basis für den zugehörigen Konfigurationsraum. Die quantenmechanische Superposition verschiedener Amplituden jeder vorgegebenen Eigenschwingung führt dann auf Oszillatorwellenfunktionen mit einem durch deren Knotenzahlen charakterisierten äquidistanten Energiespektrum mit Abständen $h\nu$, wobei ν die klassische Oszillatorfrequenz ist. Dieses Resultat beschreibt genau die Planckschen Energiequanten als Eigenschaften des so konstruierten Quantenfeldes, jedoch zunächst noch keine lokal auftretenden „Photonen“.

Eine beliebige Superposition von Produkten all dieser Oszillatorwellenfunktionen definiert einen allgemeinen Quantenzustand des Feldes. Er ist äquivalent zu einem „Funktional“ des elektromagnetischen Feldes (genauer dessen Vektorpotentials, das die Feldkonfigurationen im hamiltonschen Sinne darstellt).^{*} Auch Feynman-Integrale beschreiben nichts weiter als unitäre Propagatoren für solche verallgemeinerten Wellenfunktionen.⁹ Lokalisierte einzelne „Photonen“ kann man als Superpositionen von sehr

^{*} Diese Sicht der Quantenfeldtheorie als eine normale Anwendung der kanonischen Quantenmechanik auf klassische Felder wird nicht von allen Quantenfeldtheoretikern geteilt. Diese Ansicht rührt aber wohl daher, daß die Theorie wechselwirkender Felder wegen der unendlich vielen Freiheitsgrade im allgemeinen zu kompliziert für eine exakte Behandlung ist, so daß man auf Näherungen, wie etwa eine Störungsentwicklung mit Hilfe von Feynman-Graphen, zurückgreifen muß. Hier hat man es also mit einer praktisch begründeten Beschränkung der Theorie auf Rechenmethoden für bestimmte Zwecke zu tun. Oftmals benutzte semiklassische Ansätze (wie ein symmetriebrechendes Vakuum) beruhen jedoch implizit auf Dekohärenzargumenten (s. Abschnitt 4).

vielen unterschiedlichen Eigenschwingungen im ersten angeregten („einfach besetzten“) Quantenzustand konstruieren. Sie sind also aus diesen klassischen (räumlichen) Eigenschwingungen des Feldes gebastelte Wellenpakete, während Superpositionen von unterschiedlich angeregten Quantenzuständen, also von unterschiedlicher „Photonenzahlen“, (kohärente Zustände) klassisch schwingende Felder beschreiben können. Das eröffnet die Möglichkeit, die „komplementären“ Aspekte (Partikel und Welle) in *einem* konsistenten Formalismus zu verstehen.¹⁰ In der Tat gibt es auch eine Unschärferelation im Sinne des Fouriertheorems zwischen Teilchenzahl und Feldstärke, die bedeutet, daß diese beiden klassischen Begriffe wieder nur unterschiedlichen Hilbertraumbasen (oder „Darstellungen“) entsprechen.

Diese Konstruktion läßt sich auf alle „Teilchen“ anwenden, wenn man diese entsprechend Schrödingers Erwartungen zunächst durch *räumliche* Felder beschreibt, was aus rein historischen Gründen als „erste Quantisierung“ bezeichnet wird.¹¹ Relativistisch muß dann also der fundamentale Konfigurationsraum der Quantenfeldtheorie durch die Amplituden oder Potentiale aller fundamentalen Felder definiert werden. Bei Fermionen muß man allerdings noch die Beschränkung der Quantenzahlen für alle Eigenschwingungen auf null und eins („Fermistatistik“) postulieren oder durch weitere Annahmen begründen.¹² Aber warum scheinen alle Quantenphänomene bei Messungen gewöhnlich in Form scheinbarer Teilchen oder diskreter Quantensprünge aufzutreten, wenn alles Geschehen doch durch sich kontinuierlich entwickelnde Wellenfunktionale beschrieben wird? Und warum findet man das Elektronenfeld (Diracfeld) nicht wie das elektromagnetische Feld auch als ein klassisches Feld? Um das zu verstehen, bedarf es des Konzepts der Dekohärenz. Während also die diskreten Energiewerte, insbesondere bei Photonen, Eigenschaften der Quantenfelder sind, werden deren lokale und spontane Erscheinungsformen erst durch realistische Meßvorgänge verständlich.

4. Nichtlokalität und Dekohärenz

Als John von Neumann 1932 sein berühmtes Buch über die mathematischen Grundlagen der Quantenmechanik veröffentlichte,¹³ war die Theorie wechselwirkender Quantensysteme längst entwickelt. Die dabei entstehende Verschränkung der Systeme, die schon seit Schrödingers Wellenfunktionen im Konfigurationsraum bekannt war, wurde nun auf Grund der bornschen Interpretation als rein statistische Korrelation angesehen. Das

ist aber ungenügend, denn – wie schon gesagt – können auch verschränkte Zustände individuell meßbare Eigenschaften, wie die Gesamtenergie oder den Gesamtdrehimpuls, beschreiben. In diversen modernen Experimenten werden etwa Spinorpaare real oder „in Gedanken“ durch eine Messung nach Wahrscheinlichkeiten für verschränkte „Bell-Zustände“ analysiert – selbst wenn die beiden Spinoren zwischenzeitlich räumlich getrennt waren. Verschränkte Superpositionen können also *nicht nur* als Wahrscheinlichkeitsamplituden, sondern ebenso als mögliche Meßergebnisse auftreten – was sich auch aus der phänomenologischen Interpretation allgemeiner innerer Produkte im Hilbertraum ergibt.

Von Neumann ging davon aus, daß der Meßprozeß eine physikalische Wechselwirkung zwischen System S und Apparat A sein muß, und er entwarf sein bekanntes Modell, das zu einem verschränkten Endzustand von diesen führt:

$$(1) \quad \sum_n c_n \psi_n^S \psi_0^A \rightarrow \sum_n c_n \psi_n^S \psi_n^A .$$

Schrödinger ersetzte später in einer Grundsatzdiskussion die Zeigerstellungen ψ_n^A durch die Zustände seiner unglücklichen Katze, um die Absurdität dieses Ergebnisses herauszustellen. Von Neumann versuchte aber, dieses zu vermeiden, indem er eine zweite Art von Dynamik vorschlug – den stochastischen Kollaps der Wellenfunktion in *eine* der Komponenten von (1). Er bezeichnete sie als „ersten Eingriff“, weil man anfangs solche Quantensprünge (hier verursacht durch die Messung) als die eigentliche Dynamik mikroskopischer Zustände ansah. Angewandt auf den Meßprozeß würde das erlauben, die reale Zeigerstellung durch ein Wellenpaket darzustellen, während die mikroskopischen Bestandteile des Systems und des Apparats weiterhin verschränkt, also im allgemeinen in nichtlokalen Zuständen sein können. Ein solcher, geeignet zu postulierender Kollapsmechanismus müßte also die „Zeigerbasis“ ψ_n^A , in die der Kollaps erfolgt, in Form schmaler Wellenpakete für die Zeigerstellungen (quasi-klassische Zustände) festlegen. Diese Darstellung des Meßprozesses wird heute gelegentlich als Princeton-Schule bezeichnet und oft mit der Kopenhagener Interpretation verwechselt.

Es ist wesentlich für die Argumentation mittels (1), daß die beiden Subsysteme S und A beliebig komplex sein dürfen. Man hat nämlich vielfach versucht, die Komplexität des Apparats und dessen damit verbundene thermodynamischen Eigenschaften auszunutzen, um die globale Superposition auf der rechten Seite von (1) zu vermeiden und einen Kollaps aus der Schrödingerdynamik zu begründen. Sie beruhen *alle* auf der Ein-

führung irgendwelcher Approximationen, die für andere Zwecke geeignet sein mögen, sich aber an der entscheidenden (durch die Komplexität nur verschleierte) Stelle von dem einfachen und exakten Argument (1) unterscheiden. Sie sind also *keine* für diesen Zweck geeigneten Näherungen.

Eine Wechselwirkung vom Typ (1) läßt sich formal auch zwischen Apparat und Beobachter konstruieren, um den Prozeß der Ablesung des Ergebnisses zu beschreiben, wenn die unitäre Dynamik noch über den Meßapparat hinaus gelten soll. Dann entsteht eine weitere Verschränkung mit dem Wahrnehmungs- und Gedächtniszustand des Beobachters B ,

$$(2) \quad \sum_n c_n \psi_n^S \psi_0^A \psi_0^B \rightarrow \sum_n c_n \psi_n^S \psi_n^A \psi_0^B \rightarrow \sum_n c_n \psi_n^S \psi_n^A \psi_n^B .$$

Von Neumann begründete seinen Kollaps daher auch mit dem Ziel, einen „psycho-physischen Parallelismus“ zu ermöglichen, durch den man den Bewußtseinszustand des Beobachters eindeutig einem bestimmten Quantenzustand ψ_n^B in seinem Gehirn zuordnet. Das würde allerdings die Position des „Heisenbergschen Schnittes“, an dem der Kollaps passieren soll, auf dem ganzen langen – in (2) nur symbolisch verkürzten – Weg zwischen mikroskopischem System und Beobachter weitgehend beliebig lassen. Eugene Wigner schlug daher vor,¹⁴ diesen Schnitt in den bewußten Beobachter selbst zu verlegen, da das Bewußtsein ohnehin eine besondere Rolle zu spielen scheint. Schließlich bemerkte erstmals Hugh Everett, daß man gar keinen Kollaps annehmen muß, wenn man stattdessen die Konsequenz einer universellen Schrödingergleichung in der Form (2) einfach akzeptiert, so daß alle Komponenten des globalen Quantenzustands weiterexistieren würden. Diese Annahme ist zwar nicht verifizierbar (nur konsequent), wohl aber falsifizierbar – nämlich durch die Entdeckung einer Gültigkeitsgrenze der globalen Schrödingergleichung, die einem Kollaps entsprechen könnte. Die „relativen Zustände“ der Welt in Bezug auf jeden der verschiedenen Beobachterzustände ψ_n^B würden nach Everett *alle*, aber eben unabhängig voneinander, wahrgenommen. Auch hier bleibt die Wahl der Beobachterbasis (analog zur Zeigerbasis) aber willkürlich, was diese Interpretation noch unvollständig läßt.

Wann und wieso dürfen wir die Komponenten in (2) überhaupt als eigenständige „Welten“ ansehen? Dazu müssen sie jedenfalls dynamisch voneinander unabhängig („autonom“) sein, so daß sie sich gegenseitig nicht mehr „bemerken“ oder beeinflussen können. Eine solche Unabhängigkeit trifft zum Beispiel näherungsweise schon in der geome-

trischen Optik, also dem Grenzfall kurzer Wellenlängen, auf lokalisierte Partialwellen (schmale Teilwellenpakete) einer ausgedehnten elektromagnetischen Welle zu. Nur deshalb konnte Newton sich Licht als aus unabhängigen Teilchen bestehend vorstellen. In der Quantentheorie entspricht diese Situation der sogenannten WKB-Näherung. Jedoch sind auch in der geometrischen Optik die Teile einer klassischen Welle nicht völlig unabhängig voneinander, da sie etwa durch Fokussierung zur Interferenz miteinander gebracht werden können. Wir können auch immer noch die Welle als Ganzes, also in Newtons Bild die Wirkung sehr viele Lichtteilchen gleichzeitig, beobachten. Ist der Beobachter dagegen selber Teil der wellenmechanischen Beschreibung, wird sein Zustand durch die sich ergebende Verschränkung (2) ebenfalls Mitglied der *unterschiedlichen* Partialwellen, so daß er, anders als bei den Partialwellen der geometrischen Optik, jeweils nur *eine* dieser „Welten“ wahrnimmt. Dies ist die entscheidende begriffliche Neuerung der Wellenmechanik im Konfigurationsraum im Vergleich zu räumlichen Wellen.

Die in der Quantentheorie vieldiskutierte „untrennbare Kette zwischen Objekt und Subjekt“ für sich ist jedoch unrealistisch. Fast alle Glieder dieser Kette wechselwirken einzeln ganz entscheidend mit ihrer weiteren Umgebung, so daß sie auch mit dieser stark verschränkt sein müssen. Nur für mikroskopische oder sehr schwach wechselwirkende Systeme läßt sich das vorübergehend näherungsweise vermeiden. Wenn daher eine mikroskopische Superposition laut (1) durch Messung auf einen Apparat übertragen worden ist, muß sie nicht nur laut (2) den Beobachter einschließen, sobald dieser das Ergebnis abgelesen hat, sondern zunächst einmal das auch ohne Beobachter stets vorhandene Beobachtungsmedium (Licht) sowie andere, unkontrollierbare Freiheitsgrade, wie etwa gestreute Gasmoleküle.¹⁵ Die Superposition wird dadurch ähnlich wie die bei Boltzmanns Stößen entstehenden statistischen Korrelationen irreversibel „delokalisiert“. Sie ist somit einem lokalen Beobachter nicht mehr zugänglich. Daher nennt man diesen Vorgang auch „Dekohärenz“. Es ist also die unvermeidbare Wechselwirkung des Apparats mit seiner Umgebung, die dessen Zeigerbasis festlegt und, in Verbindung mit der entsprechenden Wechselwirkung zwischen System und Apparat, eine „Kontextualität“ rein physikalisch und innerhalb der Theorie definiert.

Dekohärenz bedeutet also viel mehr als das Verschwinden von Interferenzmustern in der statistischen Verteilung stochastischer Meßergebnisse,¹⁶ das auch das Resultat einer Mittelung über unterschiedliche Interferenzbilder auf Grund variierender Störungen sein könnte. Als Konsequenz einer Verschränkung mit der Umgebung betrifft

sie jeden *individuellen* Prozeß und erlaubt es gerade, fundamentale klassische Konzepte (und damit einen Teilchen-Welle-Dualismus) zu vermeiden. Was nützen die schönsten Dekohärenzexperimente, wenn sie unzureichend interpretiert werden und man letztendlich wieder auf die alten Zöpfe zurückgreift? Wenn Dekohärenz den scheinbar partikelhaften Schlitzdurchgang wellenmechanisch beschreiben kann, so muß das natürlich im gleichen Sinne auch für das nachfolgende Auftreten von lokalen Ereignissen (scheinbaren Teilchen) auf dem Bildschirm und für jeden anderen das Experiment abschließenden Meßprozeß gelten: Die *jeweils* zunächst existierende Superposition wird durch unitäre Wechselwirkung mit der Umgebung dislokalisiert, so daß sie für den lokalen Beobachter ein Ensemble von *potentiellen* quasi-klassischen Meßergebnissen (ohne Inanspruchnahme eines Teilchenkonzepts) darstellt.

Wellen im Konfigurationsraum lassen sich kaum jemals fokussieren. Sobald eine bestimmte Superposition in einer Beobachtungskette erstmals *irreversibel* dislokalisiert worden ist, kann sie im Effekt als ein Ensemble von unabhängigen, allein durch die unitäre Dynamik definierten Partialwellen angesehen werden. Für den potentiellen Beobachter scheint das Meßergebnis nach diesem Dekohärenzprozeß fixiert (Teil der Realität geworden) und ihm nur noch nicht bekannt zu sein. Genau genommen ist aber nur die subjektive Zukunft des Beobachters (nach seiner Zurkenntnisnahme des Ergebnisses) vielfältig. Das erste Auftreten von Dekohärenz bei einer Messung definiert zwar eine natürliche und objektive Position des Heisenbergschen Schnittes, aber ohne eine Modifikation der Schrödingergleichung bleiben alle Partialwellen Teil der für dieses Argument benutzten hypothetischen Realität. Denn sie entwickeln sich gemäß ihrer Dynamik (der Grundannahme der Theorie im Sinne einer heuristischen Fiktion) deterministisch aus einem dokumentierten Anfangszustand. Deshalb können sie auch nicht mittels Occam's razor eliminiert werden, denn dies würde eine empirisch unbegründete Änderung der Dynamik eigens für diesen Zweck verlangen. Ein durch Dekohärenz gerechtfertigter „effektiver Kollaps“ benötigt gerade *keine* Modifikation der unitären Dynamik.

Aus den Details der Dekohärenztheorie¹⁷ ergibt sich weiterhin, daß dieser irreversible Vorgang extrem schnell abläuft, sobald die Superposition makroskopische Variablen einschließt. Dieses Resultat erklärt das scheinbare Auftreten sowohl von spontanen Ereignissen (Quantensprüngen) wie von Partikelaspekten (z.B. Spuren in der Nebelkammer).¹⁸ Die beobachteten Phänomene, deren Realität auch in der Kopenhagener Deutung unstrittig ist, sind also selber durch Wellenfunktionen beschreibbar. Obwohl

man auf dem Weg zur Quantentheorie klassische Begriffe benutzen mußte, kann man sie nachträglich wie eine Wittgensteinsche Leiter verwerfen.

Die hierdurch erschlossene hypothetische Quantenrealität ist jedoch sehr viel reichhaltiger als die der uns zugänglichen „Phänomene“, wie schon die ungeheure und nicht einmal klar definierte Zahl der Everett-Welten belegt. Deren Existenz wird gewöhnlich deswegen bestritten, weil sie nicht dem traditionell erfolgreichen *operationalistischen Realitätskonzept* entspricht. Ein Beobachter in einer der Everett-Welten kann keine Operationen an den anderen Welten mehr durchführen, weshalb diese im Sinne einer operationalistischen Definition nicht „existieren“ würden. Zweifellos ist dies eine Realitätsauffassung, wie wir sie im Alltag oder im Labor benutzen. Ein ähnliches Realitätsproblem ist auch aus der Relativitätstheorie bekannt, wo das Innere eines Schwarzen Loches ein für „Außenstehende“ unbeobachtbarer Teil der hypothetischen Realität dieser Theorie ist. Tatsächlich hat man seine Existenz oder physikalische Bedeutung nach der Entdeckung der Schwarzschild-Metrik zunächst ebenfalls in Frage gestellt. Situationen dieser Art muß man durchaus auch als *mögliche* Hinweise auf Gültigkeitsgrenzen der jeweiligen Theorie ansehen, die dann aber in Form neuer Hypothesen zu spezifizieren und zu verifizieren wären.¹⁹

Die auf Max Born zurückgehende Wahrscheinlichkeitsinterpretation hat im Laufe der Zeit erhebliche Veränderungen erfahren. Born hatte sie ursprünglich als eine stochastische dynamische Verknüpfung von stationären Elektronenwellenfunktionen (Quantensprünge zwischen gebundenen Zuständen oder ebenen Wellen) verstanden. Erst Pauli interpretierte sie als Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Partikeleigenschaften. Bei Bohr wurden es später Wahrscheinlichkeiten für klassisch zu beschreibende Meßergebnisse (die aber – um Einsteins Einwänden auf den Solvay-Konferenzen²⁰ von 1927 und 1930 zu entgehen – trotzdem der Unschärferelation unterworfen sein müssen). Der von Neumannsche Kollaps als ein dynamischer Prozeß, der oben bereits diskutiert wurde, nähert sich wieder Borns ursprünglichen Auffassungen. Er postuliert stochastische Übergänge zwischen allgemeinen Quantenzuständen (beliebigen Superpositionen klassischer Zustände). Heisenberg hatte zwischenzeitlich versucht, die Quantentheorie auf eine reine S-Matrix-Theorie zurückzuführen, wonach Streu- und Zerfallsprozesse stochastischer Natur sein sollen. Das funktioniert für asymptotisch isolierbare Fragmente, solange diese Prozesse unmittelbar durch Registrierung im Zähler abgeschlossen werden, scheitert aber schon bei kohärenten Mehrfachstreuungen, bei denen

die Wahrscheinlichkeitsinterpretation erst nach Abschluß vieler Streuprozesse angewandt werden darf – nämlich wieder genau dann, wenn Dekohärenz aufgetreten ist, was aber nur mittels einer globalen Wellenfunktion konsistent beschrieben werden kann. Ersetzt man den (stetigen) Dekohärenzprozeß durch einen stochastischen Kollaps, so leugnet man einfach die dabei entstandene Verschränkung. Unter den genannten unterschiedlichen Spezifizierungen des Heisenbergschen Schnittes kommt die Bohrsche Auffassung dem Ergebnis der Dekohärenz sicher am nächsten,²¹ während für Heisenberg die Beliebigkeit des Schnittes wesentlich war.²²

Alle Interpretationen *postulieren* die bornschen statistischen Wahrscheinlichkeiten gemäß dem Quadrat der Norm in irgendeiner Form. Versuche, sie aus der everettschen Interpretation abzuleiten, muß man als fehlgeschlagen ansehen. Ihr Ursprung liegt in einem zirkulären Argument in Everetts Dissertation, das andere Autoren zu der Hoffnung verleitete, diesen Fehler reparieren zu können. Zur Rechtfertigung der statistischen Gewichte muß man sich also, wie bei allen fundamentalen Gesetzen, auf die empirischen Befunde (hier die beobachteten Häufigkeiten) berufen. Sie verhalten sich so, *als ob* die beobachteten Zustände bei der Messung jeweils entsprechend der Bornschen Regel ausgewählt würden. Im Everettschen Weltbild ist das offenbar nur eine Aussage über „unsere Welt“, die aber für alle Everett-Zweige mit nicht allzu kleiner Norm zutrifft. Eine statistische Gewichtung der Zweige entsprechend dem Normquadrat ist aber plausibel, weil dieses (im Gegensatz zur ohnehin unzureichend definierten *Anzahl* von Everett-Welten) unter der unitären Dynamik eine Erhaltungsgröße ist.

5. John Stewart Bell und die Realität

Man kann John Bell wohl im erkenntnistheoretischen Sinne als einen „naiven Realisten“ bezeichnen. Damit ist gemeint, daß er jeden Zweifel an der Realität einer physi(kali)schen Welt als völlig indiskutabel und absurd ansah – sicher eine recht „gesunde“ Einstellung. Als ich Ende der siebziger Jahre in einer Diskussion mit ihm den Begriff der heuristischen Fiktion erwähnte, protestierte er energisch mit dem Argument, daß die Begriffe Fiktion und Realität sich ausschließen. Als er deswegen nach einem Lexikon verlangte, hatte ich lediglich Glück, daß die dortige Definition auch das *mögliche* Zutreffen einer Fiktion explizit zuließ. Dies demonstriert noch einmal, daß Realität auch eine Sache der Definition ist. Aber Konsistenz verlangt dieser Begriff auf jeden Fall, was

„komplementäre“ Begriffe der Beschreibung eben ausschließt. Bell lehnte auch ein rein abstraktes Informationskonzept, das in heutigen Darstellungen der Quantenmechanik verbreitet ist, ab, indem er regelmäßig insistierte: „Information über *was?*“ Er verstand Information ausschließlich als eine Aussage oder Wahrscheinlichkeitsangabe *über* eine vorauszusetzende Realität. Ich betone das hier auch deswegen, weil die ja von Bell selbst erwartete Verletzung seiner Ungleichung gelegentlich gegen seine entschiedenen Absichten als Argument für die Kopenhagener Deutung mißbraucht wird.²³

Ausgangspunkt unserer damaligen Diskussion waren die Theorien von Everett und deBroglie-Bohm. John Bell hatte letztere als ein erstes Beispiel dafür entdeckt, daß eine realistische Beschreibung der Quantenwelt im Gegensatz zur Kopenhagener Deutung keineswegs ausgeschlossen ist. Dabei betonte er, daß niemand diese Theorie wirklich verstehen könne, ohne die Realität der Wellenfunktion (die hier als Führungswelle betrachtet wird) etwa in Analogie zu einem elektrischen Feld zu akzeptieren. Diese Ansicht beruht auf dem plausiblen Konzept, daß etwas, das die Realität beeinflussen kann, selber real sein muß. Wie könnte die Wellenfunktion die Struktur physikalischer Objekte erklären, wenn sie nur menschliches Wissen oder Information darstellte? Wenn Bohm von *wholeness and implicate order* in der Quantenphysik spricht, so bedeutet das nichts anderes als die globale Verschränkung der Wellenfunktion. Die nach Bohms Theorie durch die Wellenfunktion „geführten“ Partikel und klassischen Felder betrachtete Bell nicht als verborgen, sondern als „offene“ Variablen, weil er damals davon überzeugt war, daß wir direkt nur diese wahrnehmen – und sei es durch ihr Verhalten in unserem Gehirn (etwa gemäß einem psycho-physischen Parallelismus).²⁴ Denn im Gegensatz zur Wellenfunktion sind sie lokal. Dies war es, was ich als *seine* damalige Fiktion – und als nicht einmal heuristisch (also ökonomisch) – kritisierte.

Ich sah und sehe keinen Grund, zwischen objektiv erfolgreicher Wellenfunktion und subjektiver Wahrnehmung noch irgendwelche anderen Variablen einzuschalten, wenn diese prinzipiell nicht zu bestätigen, also *rein* hypothetisch sind. Das gilt auch dann, wenn sie dabei formal einen Determinismus wiederherzustellen vermögen, was mit zusätzlichen, unbeobachtbaren Variablen natürlich immer möglich ist.²⁵ Insbesondere die Verwendung klassischer Variablen für diesen Zweck im Bohmschen Modell ist rein „traditionalistisch“ begründet (um einen von Bells bevorzugten Begriffe gegen ihn selber zu verwenden). Selbst unter Annahme der Bohmschen Theorie gäbe es ohne den

rein wellenmechanischen Dekohärenzprozeß nicht die Welt der klassischen Phänomene, durch welche Bohms klassische Trajektorien erst motiviert sind.

Everetts Theorie lehnte Bell dagegen wegen der Myriaden der sich daraus ergebenden Welten als „extravagant“ ab, obwohl er sie durchaus als konsistent anerkannte. Ich widersprach ihm, indem ich darauf hinwies, daß Bohms Theorie genau dieselbe, weit über alles für uns Beobachtbare hinausgehende Wellenfunktion wie Everetts Theorie benutzt. Denn beide Theorien betrachten die Schrödingergleichung als universell und exakt. In Bohms Theorie betrachtet man die sich durch Verzweigung ergebenden „anderen“ Komponenten einfach als „leer“. Sie haben dann etwa den Realitätsstatus wie ein elektrisches Feld in einem Gebiet, in dem sich keine Ladungen befinden.

Einige Jahre später begann Bell, sich für die Kollapsmodelle von Pearle und GRW²⁶ einzusetzen, die diese Konsequenz zu vermeiden suchen, aber die Realität im Gegensatz zu Bohm *allein* durch eine (mikroskopisch weiterhin nichtlokale) Wellenfunktion beschreiben. Obwohl solche Theorien vielleicht möglich sind, steht ihre konsistent relativistische Formulierung und vor allem ihre experimentelle Bestätigung trotz intensiver Suche bisher aus. (Im Gegensatz zu Bohms Theorie sind sie falsifizierbar sobald sie konkretisiert werden.) In der Tat zeigte Erich Joos unmittelbar nach Erscheinen der ersten Arbeit von Ghirardi, Rimini und Weber, daß die von diesen postulierten Modifikationen der Schrödingergleichung in lokalen Systemen – soweit nachprüfbar – perfekt durch Dekohärenz simuliert werden.²⁷ Statt der angestrebten echten Ensemble von möglichen Meßergebnissen (proper mixtures) beschreibt Dekohärenz jedoch nur scheinbare Ensemble (dislokalisierte Superpositionen), was genau auf Everetts Interpretation führt, aber eben mit allen Beobachtungen im Einklang steht. Selbstverständlich kann und will keine fundamental oder effektiv stochastische Theorie das individuelle Ergebnis determinieren, wie es merkwürdigerweise von einigen Gegnern der Everett-Theorie von dieser verlangt wird.

Während Einstein, Podolsky und Rosen noch versucht hatten, mittels verschränkter Zustände auf die Unvollständigkeit der quantenmechanischen Beschreibung zu schließen,²⁸ zeigte Bell mit Hilfe seiner berühmten Ungleichung, daß *jede* beliebige Theorie mit lokalen Variablen und ohne Annahme einer nichtlokalen Fernwirkung zwischen diesen mit den Voraussagen der Quantentheorie in Widerspruch steht.²⁹ Es gibt eine Fülle von Literatur zu der Frage, ob man die experimentelle Bestätigung der Quan-

tentheorie im Kontext dieser Ungleichung nun als Widerlegung der Lokalität oder der Realität anzusehen hat. Dabei ist Bells Präferenz eindeutig: Er hätte eine konsistent anzunehmende Realität nie in Frage gestellt. Nur wenn man von der Prämisse ausgeht, daß die Realität in dem genannten Sinne lokal sein *muß*, führt das auf Widersprüche zum Experiment. Aber auch ohne diese Prämisse bleibt noch immer die Entscheidung zwischen nichtlokalen Zuständen (etwa realen Wellenfunktionen in einem fundamentalen „Konfigurationsraum“) oder einer spukhaften Fernwirkung (zwischen noch unbekannt lokalen Variablen) offen.

Alle bisher vorgeschlagenen und mit den Experimenten kompatiblen realistischen Theorien benutzen bezeichnenderweise die universelle, also nichtlokale Wellenfunktion als Teil der von ihnen angenommenen Realität. Außer der Bohmschen Theorie setzen sie keine zusätzlichen klassischen Begriffe voraus. Nur in dieser werden die die Bellsche Ungleichung verletzenden Effekte durch eine Fernwirkung zwischen den „surrealen“ klassischen Bahnen,³⁰ jedoch vermittelt durch die nichtlokale Führungswelle, erzeugt. Theorien, die auf rein lokalen Realitätskonzepten beharren, müssen dagegen die bekannten Paradoxien in Kauf nehmen. Deswegen auf eine mikroskopische Realität ganz zu verzichten, erscheint dann nur als ein Trick, der dazu dient, Konsistenzfragen oder unerwünschten Konsequenzen aus dem Wege zu gehen. Verwirft man aber in Bohms Theorie die klassischen Trajektorien als unbegründet und überflüssig (Occam's razor), so verbleibt genau Everett. Das gleiche gilt, wenn man in Kollapstheorien erkennt, daß es keinen zwingenden Grund gibt, die „anderen“ Komponenten durch Modifikation der Dynamik aus der Existenz zu verbannen. Neuartig ist als Folge der Nichtlokalität lediglich die Lokalisierung von Beobachterzuständen in autonomen „Zweigen“ der Wellenfunktion.

Die Everett-Interpretation ist trotzdem für die meisten Physiker immer noch „ganz undenkbar“ oder ein rotes Tuch – in erster Linie wohl deshalb, weil sie weit über unsere traditionelle Vorstellungswelt hinausgeht. Den meisten Menschen, und selbst Astronomen, wäre es wohl vor ein paar Jahrhunderten ebenso undenkbar erschienen, daß unsere irdischen Naturgesetze auch auf die Himmelsobjekte zutreffen, denn es führt dazu, daß sich die bis dahin nur aus dem Sonnensystem bestehende „Welt“ vertrittillardenfacht. Wäre ihnen das nicht auch als „ontologische Verschwendung“ vorgekommen, wie man es über die vielen Everett-Zweige gesagt hat? Es sei daher noch einmal betont, daß diese „vielen Welten“ (ob man sie nun real nennt oder nicht) *keine Spekulation* dar-

stellen, sondern eine Konsequenz der bisher stets bestätigten Schrödingergleichung sind. Dies nicht wahrhaben zu wollen bedeutet, einfach den Kopf in den Sand zu stecken und auf irgendeine neue Entdeckung zu hoffen, nur um diese Konsequenz nicht ins Auge fassen zu müssen. Aber warum ist es so abwegig, die Existenz aller unbeobachteten Komponenten der Wellenfunktion aus Konsistenzgründen (und mit dem selbstverständlichen Zusatz „nach dem derzeitigen Stand der Theorie“) zu akzeptieren und dabei zu erkennen, daß „wir“ dank der praktisch autonomen Dynamik all dieser Komponenten nur jeweils *eine* davon wahrnehmen können, die wir dann als „unsere Welt“ ansehen? Unsere Vergangenheit kann aber nur als Superposition der deterministischen Vorgänger *vieler* „anderer Welten“ verstanden werden, was deren Realitätsanspruch unterstreicht.

Dieses (aber nur dieses) Bild würde die gesamte Kollapsdiskussion auf reine Dekohärenzargumente reduzieren. Somit ist es rein traditionalistisch, anzunehmen, daß die anderen Zweige nicht mehr existieren, sobald „wir“ von ihnen dynamisch entkoppelt sind. Im Rahmen einer universellen Quantentheorie ist „unsere Welt“ zwar ein praktisch sehr wichtiges, aber andererseits auch ein nur subjektiv begründetes und ungenau definiertes Konzept.¹⁰ Ganz ähnlich verhält es sich mit dem trotz allgemeiner Gültigkeit des relativistischen Raumzeit-Konzepts praktisch oft nützlichen globalen „Jetzt“-Begriff. In beiden Fällen erscheint uns das nur deshalb plausibel, weil wie die Welt im Alltag eben so wahrnehmen.

Literatur

¹ Physics Today, September 2009, S. 10ff.

² H. Vaihinger: *Die Philosophie des Als Ob* (Scientia Verlag, 1911). Das Konzept eines hypothetischen Realismus war jedoch in der Naturwissenschaft ziemlich verbreitet – s. etwa H. Poincaré: *Wissenschaft und Hypothese* (Teubner, 1906).

³ Th. Damour: *Einstein 1905–2005: His approach to physics*. In: *Einstein, 1905–2005*, Th. Damour, O. Darrigol, B. Duplantier, and V., Rivasseau, eds. (Birkhäuser, 2006).

⁴ C.W. Misner, K.S. Thorne and J.A. Wheeler: *Gravitation* (Freeman, 1970).

⁵ W. Heisenberg: *Der Teil und das Ganze* (Piper, 1969), S. 92 ff.

⁶ Karl von Mayenne, Hrsg.: *Quantenmechanik und Weimarer Republik* (Vieweg, 1994); M. Beller: *Quantum Dialogue* (University of Chicago Press, 1999).

-
- ⁷ Eine nützliche Klassikation möglicher ontischer Interpretationen findet sich bei N. Harrigan und R. W. Spekkens: *Einstein, Incompleteness, and the Epistemic View of Quantum States*, Found. Phys. **40**, 125 (2010).
- ⁸ H.D. Zeh: *Symmetrieverletzende Modellzustände und kollektive Bewegungen*. Z. Phys. **202**, 38 (1967).
- ⁹ F.J. Dyson: *The Radiation Theories of Tomonaga, Schwinger and Feynman*. Phys. Rev. **75**, 486 (1949); H.D. Zeh: Feynman's quantum theory – <http://arxiv.org/abs/0804.3348> .
- ¹⁰ H.D. Zeh: *Quantum Discreteness is an Illusion*. Found. Phys. (im Erscheinen – DOI 10.1007/s10701-009-9383-9) – <http://arxiv.org/abs/0809.2904> .
- ¹¹ H.D. Zeh: *There is no „first“ quantization*. Phys. Lett. **A309**, 329 (2003).
- ¹² J.M. Leinaas and J. Myrheim: *On the theory of identical particles*. Nuovo Cim. **B37**, 1 (1977).
- ¹³ J. von Neumann: *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* (Springer, Berlin 1932).
- ¹⁴ E.P. Wigner: *Remarks on the mind-body question*. In: *The Scientist Speculates*, L.G. Good, ed. (Heinemann, 1962); see also F. London and E. Bauer: *La théorie de l'observation en mécanique quantique* (Hermann, Paris 1939).
- ¹⁵ E. Joos and H.D. Zeh: *The emergence of classical properties through interaction with the environment*. Z. Phys. **B59**, 223 (1985).
- ¹⁶ M. Arndt, O. Nairz, J. Vol-Andreae, C. Keler, G. van der Zouw, and A. Zeilinger: *Wave particle duality of C₆₀ molecules*. Nature, **401**, 680 (1999).
- ¹⁷ E. Joos, H.D. Zeh, C. Kiefer, D. Giulini, J. Kupsch, and I.-O. Stamatescu: *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*, 2nd edtn. (Springer, 2003), Kap. 1-4; W.H. Zurek: *Decoherence, einselection, and the quantum origin of the classical*. Rev. Mod. Phys. **75**, 715 (2003); M. Schlosshauer: *Decoherence and the quantum-to-classical transition* (Springer, Berlin 2007).
- ¹⁸ H.D. Zeh: *There are no quantum jumps, nor are there particles*. Phys. Lett. **A172**, 189 (1993).
- ¹⁹ H.D. Zeh: *Where has all the information gone?* Phys. Rev. **A347**, 1 (2005).
- ²⁰ Eine sehr ausführliche Diskussion der Hintergründe und Begleitumstände findet sich bei G. Bacciagaluppi and A. Valentini: *Quantum Theory at the Crossroads: Reconsidering the 1927 Solvay Conference* (UCP, 2009).

-
- ²¹ M. Schlosshauer and C. Camilleri: *The quantum-to-classical transition: Bohr's doctrine of classical concepts, emergent classicality, and decoherence*.
<http://arxiv.org/abs/0804.1609> ; O. Ulfbeck and A. Bohr: *Genuine fortuitousness: Where did that click come from?* Found. Phys. **31**, 757 (2001).
- ²² Siehe G. Bacciagaluppi and E. Crull: *Heisenberg (and Schrödinger, and Pauli) on hidden variables*. Stud. Hist. Phil. Mod. Phys. **40**, 374 (2009).
- ²³ R.A. Bertlmann und A. Zeilinger, *Quantum (Un)speakables: From Bell to Quantum Information*. (Springer, Berlin 2002).
- ²⁴ J.S. Bell: *Quantum mechanics for cosmologists*. In: *Quantum Gravity II*, C.J. Isham, R. Penrose, and D.W. Sciama, eds.. (Clarendon Press, 1981).
- ²⁵ H.D. Zeh: *Why Bohm's quantum theory?* Found. Phys. Lett. **12**, 197 (1999).
- ²⁶ Ph. Pearle: *Reduction of the state vector by a non-linear Schrödinger equation*. Phys. Rev. **D13**, 857 (1976); G.C. Ghirardi, A. Rimini, and T. Weber: *Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems*. Phys. Rev. **D34**, 470 (1986).
- ²⁷ E. Joos: *Comment on „Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems.“* Phys. Rev. **D36**, 3285 (1987).
- ²⁸ A. Einstein, B. Podolski, and N. Rosen: *Can quantum-mechanical description of physical reality be considered complete?* Phys. Rev. **47**, 777 (1935).
- ²⁹ J.S. Bell: *On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox*. Physics **1**, 195 (1964).
- ³⁰ B.G. Englert, M.O. Scully, G. Süssmann, and H. Walther: *Surrealistic Bohm trajectories*. Z. Naturf. **47a**, 1175 (1992).