

Wozu braucht man “Viele Welten” in der Quantentheorie?

– Versuch einer Darstellung auch für interessierte Nicht-Physiker –

(Sept. 2007 – zuletzt revidiert Sept. 2012)

H. D. Zeh (www.zeh-hd.de)

1. Worum geht es?

Die meisten Menschen werden davon gehört haben, daß im Bereich der Atome, der durch die Quantentheorie beschrieben wird, äußerst merkwürdige Dinge passieren. So soll ein einzelnes quantenmechanisches Teilchen (also ein Elektron, Photon, Atom oder auch ein komplexes Molekül) gleichzeitig an verschiedenen Orten sein können – was widersinnig erscheint. Nun bestehen aber auch die uns vertrauten Objekte des Alltags aus solchen Bausteinen, weshalb sie dann ebenfalls an mehreren Orten sein können müßten. Dabei wären die Alternativ-Orte der einzelnen atomaren Bausteine ganz unabhängig voneinander, so daß nicht nur der Schwerpunkt eines makroskopischen Objekts, sondern auch seine innere Struktur oder “Konfiguration”, also die oftmals stabile relative räumliche Anordnung seiner Bausteine, gleichzeitig auch eine andere sein könnte. Das ist bei Molekülen tatsächlich bestätigt worden. Warum zeigt sich dieses merkwürdige, noch genauer zu erläuternde Verhalten also nur an einzelnen Atomen oder Molekülen – und was würde es sonst überhaupt bedeuten?

Wenn etwa der Zustand einer Katze durch die Anordnung und Funktion seiner atomaren Bausteine bestimmt ist, sollte eine Katze theoretisch gleichzeitig lebendig und tot sein können, wie es Erwin Schrödinger an einem berühmt gewordenen Beispiel formuliert hat. Er hat sogar ein Gedankenexperiment beschrieben, mit dem man einen solchen Zustand der Katze erzeugen *könnte*, wenn die Quantentheorie allgemein gültig und ohne weitere Komplikationen auf die Katze anwendbar wäre. (Natürlich dient die Katze nur der Dramatisierung der Situation – sie ist keine Aufforderung zu einem wirklichen Experiment, dessen Ausgang ohnehin klar ist!) Wenn wir diese scheinbar absurde Extrapolation der Quantentheorie konsequent fortsetzen, müßte sogar die ganze Welt gleichzeitig in sehr vielen unterschiedlichen Zuständen existieren können. Es sind solche (zunächst rein theoretisch) gleichzeitig existierenden unterschiedlichen Zustände der Welt, auf die sich der Begriff “Viele-Welten-Theorie”

(Many Worlds Interpretation) bezieht, obwohl sie eigentlich alle zusammen nur den einzigen Zustand *einer* Quantenwelt bilden würden (die daher auch *Multiversum* genannt wird). Damit ist der Grundgedanke bereits in sehr vager Form ausgedrückt. Das Interessante an dieser “extravaganter” aber konsequenter Extrapolation des Anwendungsbereichs der Quantentheorie besteht nun darin, daß sie eine völlig konsistente Lösung des erwähnten Problems von Schrödingers Katze anbietet, ohne daß man dazu die experimentell bestens begründete Theorie modifizieren müßte. Aber wie ist das zu verstehen?

Dazu muß man zunächst einmal erklären, was denn mit einem “Teilchen an verschiedenen Orten” gemeint ist. Das ist nicht einfach, denn die unseren Sinnen nicht direkt zugängliche Wirklichkeit tut uns leider nicht den Gefallen, sich den Begriffen unterzuordnen, die wir im Laufe der Evolution unseren Alltagssituationen angepaßt haben. Wir müssen also erwarten, daß sich beim tieferen Eindringen in die Natur nur ganz neue Begriffe bewähren können.

Wenn man etwa ein einzelnes “Elementarteilchen”, also z.B. ein Photon oder Neutron, einen absorbierenden Schirm mit zwei (oder mehr) Schlitzen passieren läßt, so kann man unter sehr allgemeinen Voraussetzungen zeigen, daß es bei einem Durchgang alle Schlitze gleichzeitig passiert haben muß. Also kann es kein Teilchen im üblichen Sinne sein! Andererseits wundern wir uns *nicht*, wenn eine Schall- oder Lichtwelle gleichzeitig mehrere Schlitze passiert, denn eine Welle (ein “Feld”, wie der Physiker sagt) ist im Gegensatz zu einem Teilchen ein ausgedehntes Objekt. Seine lokalen Bestandteile (das Feld an verschiedenen Orten) existieren zwar unabhängig voneinander, *wirken* aber zusammen, so daß sie durchaus gemeinsame Effekte, wie ein Interferenzmuster, verursachen können. Für unabhängige Teilchen wäre das nicht möglich.

Das klingt auf den ersten Blick schon wie eine Erklärung dieser merkwürdigen Eigenschaft mikroskopischer Objekte, da sich etwa auch die diskreten Energien der Elektronen im Wasserstoffatom ebenfalls als stehende Wellen verstehen lassen, wie Schrödinger 1926 gezeigt hat. *Ist* also das vermeintliche Teilchen einfach in Wirklichkeit eine Welle? Leider beschreibt dieses Konzept *nicht alle* beobachteten Tatsachen, weshalb man der Natur einen “Dualismus” von Teilchen *und* Wellen unterstellt hat. Das ist aber zunächst nichts anderes als eine Verlegenheitsvokabel für eine inkonsistente Beschreibung mit wechselnden Begriffen, die man je nach Bedarf verwendet. Die Physiker wenden diese Art von “doublethink” ständig und mit Erfolg an, indem sie sich jeweils für die passende Alternative entscheiden. Wenn man etwa hinter dem Schirm mit den Schlitzen eine flächendeckende Anordnung von kleinen Detektoren zum Nachweis aufstellt (etwa einen Scintillationsschirm), wird jeweils nur einer davon ansprechen – so *als ob* ein lokales Objekt, wie ein Teilchen, ihn und deswegen keinen

anderen getroffen hätte. Erst bei einer großen Zahl von Wiederholungen (also statistisch) zeigt sich ein Interferenzmuster in der räumlichen Verteilung der Ereignisse, welches durch die Existenz aller Schlitze bedingt (also nur durch eine Welle zu beschreiben) ist. Diese empirische Situation führte Max Born zu seiner *statistischen Interpretation*, nach der Schrödingers Wellenfunktion sich zwar deterministisch im Raum ausbreitet, aber lediglich die *Wahrscheinlichkeit für das spontane Auftreten eines Teilchens* im Detektor bestimmt. Demnach wäre der Begriff einer *Bahn* des Teilchens aufzugeben.

Eine solche Vorstellung ist sicher unvereinbar mit der Annahme *wirklichen Teilchen*. Andererseits widerlegt der Befund aber noch nicht ein ausschließliches Wellenbild, wenn wir es dynamisch ergänzen. Denn es könnte sein, daß die ausgedehnte Welle sich durch Wechselwirkung mit den Detektoren indeterministisch an einem nicht vorhersagbaren Ort auf ein lokales "Wellenpaket" zusammenzieht, wodurch sie das Auftreten eines Teilchens nur vortäuscht. Ohne (oder bei ineffektiven) Detektoren bleibt sie nachweisbar eine ausgedehnte Welle, während bei zu 100% effektiven aber nicht absorbierenden Detektoren tatsächlich nur genau der *Teil* der Welle übrigbleibt, der den aktivierten Detektor passiert haben muß. Das hierfür zu postulierende dynamische Verhalten der Welle wird als *Kollaps der Wellenfunktion* bezeichnet. Ein solcher würde aber eine Modifikation der von Schrödinger eingeführten und vielfach bestätigten Wellendynamik verlangen, die noch an keinem zu diesem Zweck isolierten System jemals nachgewiesen werden konnte. Jedenfalls *würde* eine solche Beschreibung, wenn sie sich denn bestätigen ließe, kein zusätzliches Teilchenkonzept mehr benötigen.

Die Ersetzung von Teilchen durch Wellen *im Raum* führt aber nur auf einen unvollständigen und daher irreführender Spezialfall der Wellenfunktion. Gerade bei der statistischen Interpretation sollte man erwarten, daß *viele* Teilchen durch eine Welle beschrieben werden. Tatsächlich "besitzt" (oder "ist"?) aber jedes eine eigene Wellenfunktion, die im betrachteten Beispiel nur auf Grund einer fest vorgegebenen Präparation (z.B. nacheinander) bis auf die zeitliche Verschiebung alle gleich sind. Denn nur die Wellenfunktion des jeweils im Detektor nachgewiesenen Teilchens "kollabiert" auf ein kleines Wellenpaket (oder verschwindet im Falle einer Absorption, dann aber *überall* im Raum). Die formale Addition verschiedener Wellenfunktionen würde daher nur eine andere Welle des *einen* "Teilchens" ergeben. Mehr noch – bei (zum Beispiel) zwei Elektronen wäre deren jeweiliger Zustand (ihre "Konfiguration") klassisch durch zwei Punkte im Raum, also durch zweimal drei Koordinaten zu beschreiben. Da beide Elektronen (ganz unabhängig voneinander) "an verschiedenen Orten sein" können, wird ihr quantenmechanischer Zustand durch eine Wellenfunktion in ihrem sechsdimensionalen *Konfigurationsraum* beschrieben, dessen Punkte den Positionen *beider*

Teilchen entsprechen. Nur im Ausnahmefall zerfällt sie in ein Produkt oder ähnliches Gebilde aus zwei räumlichen Funktionen, so daß jedes “Teilchen” durch eine eigene Wellenfunktion im Raum repräsentiert wird. Im allgemeinen sind somit auch die Wahrscheinlichkeiten für das Ansprechen zweier Detektoren miteinander korreliert – also nicht unabhängig voneinander.

Das sieht tatsächlich so aus, als ob die Wellenfunktion doch *nur* Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von Teilchen oder für andere lokale Ereignisse beschreibt. Entscheidend ist aber, daß es sich hier nicht ausschließlich um eine statistische Korrelation, sondern um eine individuelle Eigenschaft des Zweielektronensystems handelt – die spezifisch quantenmechanische “Verschränkung” der beiden Elektronen, für die es kein klassisches Analogon gibt. Die gemeinsame Wellenfunktion bestimmt etwa die individuell definierte und meßbare Energie im Helium-Atom, das zwei Elektronen enthält. Die beiden Elektronen *existieren* also gewissermaßen als *ein* Feld über einem sechs-dimensionalen Kontinuum: ihrem klassischen Konfigurationsraum. Damit das Sinn macht, muß es einen fundamentalen Konfigurationsraum des ganzen Universums geben, der die Rolle des uns gewohnten dreidimensionalen Raums als “Bühne der Realität” übernimmt. Das mag sehr abstrakt erscheinen, aber die Eigenschaften von separaten Atomen oder Molekülen lassen sich korrekt nur durch Wellenfunktionen in ihren jeweiligen hochdimensionalen Teilräumen beschreiben. Daß mikroskopische Objekte im allgemeinen keine separaten Eigenschaften besitzen, wurde endgültig durch in den sechziger Jahren von John Bell initiierte Experimente bestätigt (s. Anhang). Wellenfunktionen im Raum, die aus lokalen Teilen bestehen, spielen zwar in vielen Anwendungen – vor allem historisch – eine wichtige Rolle, bilden aber eine wegen ihrer Popularität sehr irreführende Vereinfachung, die in allgemeineren Situationen auf Widersprüche zum Experiment führt.

Dieses *Superpositionsprinzip*, nach dem alle möglichen Zustände eines beliebigen Systems in Form *einer* Wellenfunktion, also in “gemeinsamer Realität”, wieder einen möglichen Zustand bilden (superponiert werden können), ist aber noch viel allgemeiner als bei dem genannten n-Teilchensystem. Um der Vielfalt der physikalischen Systeme gerecht zu werden, muß man auch andere klassische oder nichtklassische Konfigurationen einbeziehen. So ist ein klassisches Feld durch die Feldstärke an jedem Ort definiert, also durch ein ganzes Kontinuum von Zahlenangaben, die somit einen unendlich-dimensionalen Konfigurationsraum bilden. Quantenmechanisch ist diesem System eine Wellenfunktion über seinem bereits recht komplizierten Konfigurationsraum zuzuordnen. In einem formal wohldefinierten Sinne existieren dann *gleichzeitig verschiedene klassische Feldkonfigurationen* (nicht nur die eingangs genannten verschiedenen Orte eines oder mehrerer Teilchens), die aber im allgemeinen dynamisch miteinander gekoppelt sind – also zunächst noch keine getrennten “Welten” beschrei-

ben. Weiterhin können gleichzeitig sogar “unterschiedlich viele Teilchen” in einem abgeschlossenen System sein, was insbesondere bei Photonen meistens der Fall ist. Ihre Anzahl erweist sich dabei einfach als die Zahl der Nulldurchgänge (“Knoten”) einer allgemeinen Wellenfunktion! Das Wort “gleichzeitig” soll hier auch klarstellen, daß es sich nicht etwa um zeitabhängige *Fluktuationen* handelt. Aus mehr oder weniger bewußter Verlegenheit machen Physiker sich in solchen Fällen oft das Bild einer ständigen Erzeugung und Vernichtung “virtueller” Teilchen. Eine solche Vorstellung ist nicht nur überflüssig, sondern auch falsch. Der verschränkte Quantenzustand kann absolut statisch sein.

Man darf sich die “vielen Welten” der Quantentheorie also keineswegs als *räumlich* getrennte Teilwelten vorstellen. Sie existieren vielmehr als getrennte Wellenpakete in dem hochdimensionalen Raum, den wir nur in unserer klassischen Erfahrung als den Raum aller Möglichkeiten (Konfigurationen) interpretieren. Der Raum der *quantenmechanischen* Möglichkeiten ist dann der Raum aller möglichen Wellenfunktionen über diesem hochdimensionalen scheinbaren Konfigurationsraum, denn diese (und nicht mehr die einzelnen Punkte dieses Raumes) charakterisieren die “realen” physikalischen Zustände. Der formale Raum der Wellenfunktionen wird dagegen als “Hilbertraum” bezeichnet. (In manchen kosmologischen Modellen werden irreführenderweise auch *räumlich* getrennte Teiluniversen unter dem Namen Multiversum zusammengefaßt. Dieses würde aber nur *eine* der vielen “Welten” im Sinne der Quantentheorie, die jeweils sogar ihre eigene Raumzeit besitzen können, bilden.)

Die Vorstellung gleichzeitig existierender Welten (oder parallel existierender Historien) ist des öfteren in der Science-Fiction-Literatur benutzt worden. Sie hat dort aber eine triviale und fragwürdige Bedeutung. Wenn nämlich jede der angenommenen Historien völlig unabhängig von den anderen eine “eigene Welt” beschreibt, sind alle bis auf die von uns erlebte ohne jede Konsequenz und daher ohne jeden Sinn. Das gilt auch noch dann, wenn die verschiedenen Historien indeterministisch aus derselben Vorgeschichte entstanden sein *könnten*. Die fundamentalen dynamischen Gesetze der klassischen Physik sind aber ohnehin deterministisch, so daß selbst dieser unzureichende Anlaß für “viele Welten” entfällt. Ein nicht langweilen wollender Science-Fiction-Autor wird daher stets irgendeine hypothetische Wechselwirkung zwischen seinen fiktiven Welten annehmen, bei der etwa ein Akteur aus einer Welt in eine andere wechselt. Damit wird eine solche Vorstellung aber endgültig zur Science Fiction.

Wegen dieser äußerlichen Ähnlichkeit wird die Viele-Welten-Interpretation der Quantentheorie ebenfalls oft als Science Fiction bezeichnet. Genau diese Ansicht beweist aber ein elementares Unverständnis der Situation auf Seiten des Kritikers. Denn während Science Fic-

tion sich über die Naturgesetze hinwegsetzt, sind die Vielen Welten gerade eine *Konsequenz* der allgemeinsten und bestgeprüften Gleichung der Physik (der Schrödingergleichung). Um sie zu vermeiden, muß man diese Gleichung willkürlich abändern oder ergänzen, so daß man eigentlich die Kopenhagener Interpretation als Science Fiction bezeichnen müßte.

Die verschiedenen “Welten” der Quantentheorie, die sich aus der Schrödinger-Gleichung ergeben, bilden also eine dynamische Einheit. Sie werden *als Konsequenz dieser Dynamik* erst näherungsweise unabhängig, wobei sie in scheinbar instantanen Ereignissen (“Quantensprüngen”) zu selbständigen Welten *werden* – wie die Bruchstücke einer kontinuierlich ablaufenden Explosion. Somit ist es auch falsch, der Viele-Welten-Interpretation die Behauptung zu unterstellen, daß *alle denkbaren* Welten existieren. Nach dieser Vorstellung existieren vielmehr nur solche Welten, die sich deterministisch aus einer bestimmten Anfangsbedingung der universellen Wellenfunktion (z.B. beim Urknall) gemäß der Schrödinger-Gleichung entwickelt haben. Wohlgedenkt kann es an diesen Konsequenzen überhaupt keinen Zweifel geben, *wenn* man die Schrödingergleichung uneingeschränkt akzeptiert, was wie jede Kosmologie eine Hypothese ist. Die von den meisten Physikern vertretenen gegenteiligen Ansichten beruhen dagegen nur auf ihren traditionellen, der klassischen Alltagserfahrung entstammenden Vorstellungen und nicht der empirisch begründeten fundamentalen Theorie (s. a. Abschnitt 4).

Daß ein Kollaps der Wellenfunktion auf diese Weise überflüssig wird, wurde erstmals 1957 von Hugh Everett erkannt. Es spricht einiges dafür, daß er dazu durch einen Vortrag Albert Einsteins (den letzten seines Lebens) angeregt wurde – sicher aber durch John von Neumanns Analyse des Meßprozesses. Allerdings war Everetts Definition der dabei entstehenden “Zweige” der Wellenfunktion noch etwas willkürlich. Er sprach auch nicht von vielen Welten, sondern von “relativen Zuständen”. Der Begriff vieler Welten wurde erst später von Bryce DeWitt eingeführt und danach von David Deutsch in einem etwas verfremdeten Sinn popularisiert, wobei er in einem Artikel im Scientific American rein spekulativ und *entgegen der Theorie* sogar “Zeitreisen” zwischen den Welten diskutiert hat. (David liebt Science Fiction!) Wenn er in seinem Buch behauptet, daß Quantencomputer, zu deren Konzept er wesentlich beigetragen hat, gleichzeitig in parallelen Welten rechnen, oder daß ein Teilchen die Interferometerschlitze in verschiedenen Welten passiert, hat er Everett mißverstanden. Dessen “Welten” entsprechen keineswegs allen möglichen klassischen Bahnen (oder “Feynman-Pfaden”), sondern vielmehr *dynamisch autonomen Komponenten einer sich deterministisch entwickelnden Wellenfunktionen*, die erst eigene “Welten” bilden, wenn sie sich irreversibel voneinander getrennt (also in diesem Sinne “verzweigt”) haben, während wir die Inter-

ferenzen (oder die Kohärenz von Quantencomputern) voll und ganz in “unserer Welt” beobachten.

2. Der Quanten-Meßprozeß

Die Messung einer physikalischen Größe spielt in der Quantentheorie eine besondere Rolle, weil dabei eine mikroskopische Eigenschaft, die zweifelsfrei der Quantentheorie unterliegt, durch Wechselwirkung mit dem Meßgerät ein makroskopisches Meßergebnis verursacht, so daß der Übergang zwischen diesen beiden Bereichen deutlich werden muß. Hierbei wird insbesondere die Wahrscheinlichkeits-Interpretation (als Gegensatz zur deterministischen Schrödinger-Gleichung) relevant. Viele andere Vorgänge in der Natur sind in dieser Hinsicht einem Meßprozeß ähnlich. Es sind solche meßprozeßartigen Vorgänge, die nach der Schrödinger-Gleichung auf Schrödingers Katze oder auf “Viele Welten” führen.

Betrachten wir das Beispiel eines Photons oder Neutrons, das in Form einer räumlichen Welle auf die erwähnte Anordnung von zu 100% effektiven Detektoren trifft, von denen immer genau einer anspricht, wenn wir *eines* dieser Quantenobjekte einlaufen lassen. Wie schon gesagt soll hier angenommen werden, daß dieses dabei nur registriert, also nicht absorbiert und selber nur vernachlässigbar beeinflußt wird (was in vielen Fällen realisiert werden kann). Nach dem Klicken des Zählers mit der Nummer i ist somit anzunehmen, daß die zugehörige Welle genau diesen und keinen anderen Detektor durchlaufen hat. Tatsächlich kann man nachprüfen, daß *nach* der Messung immer nur der *Teil* der Welle existiert, der genau diesen Detektor passiert haben muß. Dies entspricht wieder ganz dem Bilde einer Wahrscheinlichkeitsverteilung, denn die durch eine solche beschriebene unvollständige Information sollte sich durch die Messung vergrößern, was eine diese Verteilung beschreibende Welle in ihrer Ausdehnung reduzieren müßte. Die Addition aller dieser Teilwellen einer flächendeckenden Anordnung von kleinen Detektoren ergibt formal genau wieder die ursprüngliche Welle, weshalb man bei den einzelnen Summanden dann auch von Partialwellen oder *Komponenten* spricht.

Diese Addition von Teilwellen ist ein einfaches und konkretes Beispiel für die Anwendung des *Superpositionsprinzips*, das schon für klassische Wellen (im Raum) gilt. Man beachte, daß jede beliebige Welle sich auf vielerlei Art als Superposition von irgendwelchen anderen Wellen darstellen läßt. Diese darf insbesondere auch “destruktiv” sein (so daß ihre Komponenten sich ganz oder stellenweise aufheben). Da Superpositionen in der Quantentheorie sich auf Wellen im Konfigurationsraum beziehen, der nur in den wichtigen Spezialfällen von Streuexperimenten oder Einteilchenproblemen mit dem Ortsraum identisch ist, ergibt sich

allerdings ein wesentlicher Unterschied: Bei klassischen Wellen bedeutet die Superposition stets ein “sowohl als auch” (alle Anteile des Feldes existieren nur als Ganzes), bei einer Superposition im Konfigurationsraum (dem Raum aller klassischen *Möglichkeiten*) würde man dagegen ein “entweder oder” erwarten, wie es die Messung ja auch zu belegen scheint. Wie im vorigen Abschnitt bereits angedeutet, beschreibt die quantenmechanische Superposition *vor einer Messung* (also solange sie zweifelsfrei existiert) aber trotzdem ein “sowohl als auch” – worin genau das Problem liegt! Wenn Sie das als Laie widersinnig finden, liegt das wahrscheinlich daran, daß Sie noch nicht der “Hirnwäsche” (Gell-Manns Bezeichnung) durch Lehrbücher und Prüfungsdruck zu Gunsten der Kopenhagener Deutung unterworfen wurden.

Berücksichtigen wir nun im nächsten Schritt aus Konsistenzgründen die Detektoren ebenfalls als Objekte der Quantentheorie. Auch wenn diese aus vielen Atomen bestehenden Gebilde durch sehr komplizierte Wellenfunktionen zu beschreiben sind, müssen wir hier nur zwischen solchen, bei denen noch kein Detektor angesprochen hat, und denjenigen, bei denen ein bestimmter Detektor (etwa der mit der Nummer i) geklickt hat, unterscheiden. *Vor* dem Eintreffen der Welle sind alle Detektoren in ihrem Ausgangszustand. Läuft nun nur die Partialwelle ein, die genau den Detektor i passiert, so ändert sich unter den gemachten Annahmen nur *dessen* Wellenfunktion (wodurch er das Ereignis registriert) – die räumliche Welle läuft dagegen ungestört weiter. Dies kann man tatsächlich exakt durch eine Schrödinger-Gleichung für das Gesamtsystem beschreiben. Läuft dagegen die volle Welle (also die Superposition aller Partialwellen) ein, so beobachtet man trotzdem nur das Klicken eines *einzelnen* Detektors und findet danach die zugehörige räumliche Partialwelle (als ob *nur diese* eingelaufen wäre). Dieses Ergebnis scheint aber der Schrödinger-Gleichung zu widersprechen. Denn diese Gleichung verlangt, daß das Gesamtsystem nach wie vor in einer Superposition ist, wobei die einzelnen Partialwellen jetzt aber mit unterschiedlichen Detektorzuständen korreliert, die Systeme also “verschränkt” wären. Ein solcher Zustand würde bedeuten, daß *gleichzeitig* (in verschiedenen Komponenten) verschiedene Detektoren (aber jeweils nur einer!) angesprochen haben. Da diese Situation bei makroskopischen Objekten niemals beobachtet wurde, besitzen wir weder Anschauung noch Begriffe für sie.

Das “sowohl als auch” scheint also *nach* der Messung nicht mehr zuzutreffen – sehr wohl aber im Falle von mikroskopischen “Detektoren” (etwa einzeln anzuregenden Atomen), mit denen man ein völlig analoges Experiment durchführen kann. Es ist dann auch einfach, einen Detektor *gedanklich* mit einer Apparatur zu kombinieren, die genau bei dessen Ansprechen eine Katze umbrächte, so daß auch diese gemäß der Schrödinger-Gleichung in eine Superposition von tot und lebendig geriete. Das tatsächlich beobachtete Ergebnis (natürlich ohne

Katze) entspricht dagegen einem Kollaps der Wellenfunktion auf eine einzelne Komponente – so, *als ob* wir nur unsere “Information” vergrößert hätten. Aber diese Interpretation würde eben verlangen, daß schon vorher in Wirklichkeit nur eine der Teilwellen existiert hat.

Beweist das Resultat nun aber nicht, daß entweder die Quantentheorie wirklich nur Wahrscheinlichkeiten, etwa für die schließlich beobachteten klassischen Größen, beschreibt oder aber, daß es den stochastischen Kollaps der Wellenfunktion als einen realen physikalischen Prozeß geben muß? Im ersten Fall wäre die begriffliche Konsistenz der Theorie (Teilchen oder Wellenfunktionen), im zweiten die dynamische (Schrödinger-Gleichung oder Kollaps) verletzt. Somit wäre die Theorie entweder unvollständig, da sie nicht erklärt, *was* wir nun eigentlich gemessen haben, oder das Ergebnis würde in einer Messung nicht *ermittelt*, sondern (als eine neue Wellenfunktion) erst zufallsbedingt *erzeugt*, was aber eine neue fundamentale Dynamik erfordert.

Nun fehlt bei dieser Beschreibung des Meßprozesses aber noch ein wesentliches Detail, das lange Zeit völlig übersehen wurde. Während man ein mikroskopisches System häufig als isoliert annehmen darf, steht ein makroskopisches ständig und unvermeidbar in wesentlicher Wechselwirkung mit seiner Umgebung. Zum Beispiel reflektiert ein realer Detektor ständig Licht, das anschließend von seinem Zustand abhängt und somit Information über den Zählerstand in alle Welt trägt. Das Licht “mißt” gewissermaßen ständig die Anzeige – sonst könnten wir sie nicht *sehen*. Wegen der dadurch verursachten, sich ausbreitenden Verschränkung der Quantenzustände ist diese Tatsache auch dann von Bedeutung für das beobachtete System (wie den Detektor), wenn dieses selber gar nicht dynamisch beeinflußt (also “gestört”) wird. Während man ein vollständig isoliertes Gesamtsystem aus Objekt und *mikroskopischem* Detektor aber im Prinzip immer noch als Ganzes messen und somit die nunmehr nichtlokale Superposition nachweisen könnte, ist das unmöglich für eine Superposition, an der eine unbeschränkte Umgebung teilhat – wie es notwendigerweise bei einem makroskopischen Detektor der Fall ist. Dazu ist es keineswegs nötig, daß diese Verschränkung *Information* darstellt (wie bei gestreutem Licht); es genügt eine Wechselwirkung mit thermischen (chaotischen) Gasmolekülen oder mit Wärmestrahlung.

Da die lokalen, beobachtbaren Subsysteme dann nicht mehr für sich allein in einer “kohärenten” Superposition sind, bezeichnet man diesen praktisch unvermeidbaren Vorgang als *Dekohärenz*. Ich habe ihn in einer um 1970 beginnenden Reihe von Publikationen als Argument für eine universell verschränkte Wellenfunktion (und damit für die jedenfalls formale Existenz von “Everett-Welten”) erstmals diskutiert. Dieses anfangs kaum beachtete Phänomen einer ständig zunehmenden globalen Verschränkung wurde ab 1981 von Wojciech Zurek

und Anthony Leggett aufgegriffen, ab 1984 von Erich Joos und anderen unter realistischen Bedingungen genauer analysiert und schließlich 1996 von Serge Haroche und Mitarbeitern experimentell bestätigt. Claus Kiefer hat in diversen Arbeiten seit 1987 die Bedeutung der Dekohärenz für Quantenfeldtheorie und Quantenkosmologie herausgestellt.

Seit zwei Jahrzehnten ist die Dekohärenz zwar in aller Physiker Munde, ihre Bedeutung wird aber immer noch sehr häufig mißverstanden. Verbreitet findet man sogar die Behauptung, daß Dekohärenz einen Kollaps der Wellenfunktion beschreibe und somit die Everett-Welten zu vermeiden gestatte. Das ist jedoch reines Wunschdenken, denn genau das Gegenteil ist richtig! Was bedeutet dann aber diese unkontrollierbare *Dislokalisierung* von Superpositionen, die als Dekohärenz bezeichnet wird, für einen lokalen Beobachter, der ja erfahrungsgemäß ein *bestimmtes* Meßergebnis wahrnimmt?

Nach der Quantentheorie “mißt” der Beobachter die Zeigerstellung des Detektors nach dem gleichen Prinzip wie der Detektor das mikroskopische “Teilchen”. Das heißt, daß er mit dem Meßergebnis und der unkontrollierbaren Umgebung genau so verschränkt wird wie Schrödingers Katze. Er muß zwar in diesem humaneren Experiment nicht teilweise sterben (wie die bedauernswerte Katze), existiert aber laut Schrödinger-Gleichung anschließend in diversen Zuständen, in denen er unterschiedliche Meßergebnisse beobachtet und daraufhin vielleicht ganz unterschiedlich reagiert. Weil alle bekannten Wechselwirkungen in der Natur lokal sind, bleiben die nunmehr praktisch *überall* verschiedenen Komponenten der globalen Superposition dynamisch völlig voneinander getrennt – eben unabhängige “Welten”, die auch unterschiedlich reagierende Beobachter enthalten. Diese entwickeln sich also *alle* gemeinsam aus jeweils *einem* Individuum als Folge der deterministischen “Verzweigung” der Wellenfunktion (sie haben daher alle zunächst dieselbe Vergangenheit). Da sie aber nach dieser Beschreibung auch mit dem Katzenzustand verschränkt wären (ebenso wie mit den Zuständen anderer Beobachter in ihrer “Welt”), finden sie individuell stets nur eine tote *oder* eine lebende Katze vor, und dieser Katzenzustand wird ihnen durch andere Beobachter auf Rückfrage bestätigt. Er ist also – ebenso wie jedes makroskopische Meßergebnis – separat in jedem Zweig “objektiviert”. Bevor diese Konsequenz des Superpositionsprinzips verstanden war, hat man das Auftreten von Dekohärenz regelmäßig als dessen Gültigkeitsgrenze interpretiert.

Die Identifikation von (offenbar auch bewußten) Beobachtern mit Zuständen lokaler Systeme in individuellen, sich ständig kausal verzweigenden *Komponenten* einer universellen, ein Multiversum beschreibenden Wellenfunktion ist im Vergleich zu konventionellen Weltbildern sicher ganz neuartig. Sie ist jedoch konsistent mit allen Beobachtungen und durch die Nichtlokalität der Quantentheorie erzwungen, *wenn* diese denn tatsächlich universell gültig

ist. Denn ein Beobachter kann in der *globalen* Wellenfunktion keinen bestimmten Zustand besitzen. Der für alle abgeschlossenen Systeme immer wieder bestätigte Formalismus der Quantentheorie verlangt, daß ein sich deterministisch entwickelndes Quantenuniversum nur solche Beobachter als Subsysteme enthalten kann, die sich ständig kausal verzweigen, was sie dann subjektiv als einen Indeterminismus der von ihnen wahrgenommenen Welt erleben. Trotz ihrer ungeheuren und nicht einmal klar definierten Zahl belegen die so entstandenen Everett-Welten wesentlich nur einen verschwindend kleinen Teil des hochdimensionalen Raums, der uns nur in der quasi-klassischen Alltagswelt als ein Konfigurationsraum *möglicher* Zustände erscheint.

Von „anderen Welten“ in einem trivialeren Sinn hat man schon des öfteren in der Geschichte der Kosmologie gesprochen, nämlich wenn sich die jeweils bekannte Welt durch neue Erkenntnisse *räumlich* erweitert und vervielfacht hat. Das war etwa beim Erkennen der Fixsterne als Zentren möglicher anderer Sonnensysteme oder später bei der Entdeckung ferner Galaxien („Welteninseln“) der Fall. Mit Einsteins Theorie eines gekrümmten und damit möglicherweise endlichen Raums schien dieser Fortsetzungsroman ein Ende gefunden zu haben. Seitdem jüngere Beobachtungen (erst nach Everetts Interpretationsvorschlag) aber nahelegen, daß *unsere* quasiklassische Welt nahezu flach und somit möglicherweise doch unendlich ist, haben viele Kosmologen die Bezeichnung „Viele Welten“ für bisher völlig spekulative, *räumlich* in irgendeinem Sinne voneinander getrennte „Welten“ jenseits unsres Beobachtungshorizonts übernommen, was zu einer Inflation derart bezeichneter Modelle („Multiversumstheorien“) geführt hat. Diese haben jedoch allesamt nichts mit dem nichttrivialen Multiversum im Sinne von Everett zu tun, das sich, wie beschrieben, notwendig aus der Nichtlokalität einer als universell angenommenen Quantentheorie ergibt.

3. Müssen alle „Welten“ tatsächlich existieren?

Das *müssen* sie sicher nicht. Nur ihre Konsequenzen sowie Argumente der Ökonomie der Beschreibung können über die Berechtigung der Annahme ihrer Existenz entscheiden. Wenn wir innerhalb der Viele-Welten-Vorstellung die Tatsache akzeptieren, daß wir als lokale Beobachter nach dem Eintreten eines Dekohärenzereignisses (etwa bei der Messung eines mikroskopischen Objektes) subjektiv in *einer* der dabei voneinander unabhängig gewordenen Komponenten des Quantenuniversums leben, könnten wir ebensogut auch annehmen, daß alle anderen *von nun an* nicht mehr „existieren“ – auch wenn wir im Experiment niemals eine objektive Modifikation der Schrödinger-Gleichung nachweisen können. Dies scheint sogar die ökonomischere Annahme zu sein, für die deswegen oftmals „Occams Rasiermesser“ ins

Feld geführt wird, mit dem man alles Überflüssige und nicht Nachprüfbares aus unserem Weltbild entfernen soll.

Man wendet Occams Argument allerdings gewöhnlich auf die Naturgesetze und nicht auf die sich daraus ergebenden Tatsachen an. So hat sich das Weltbild erheblich vergrößert, seitdem wir die irdischen Naturgesetze universell anwenden, ohne daß wir die sich dabei ergebenden Milliarden von Galaxien als "ontologische Verschwendungsucht" betrachten. Einige Philosophen haben in der Vergangenheit sogar die Existenz der Rückseite des Mondes oder des Inneren der Fixsterne angezweifelt, sind aber bald von der Entwicklung der technischen Möglichkeiten überholt worden (wenn auch nur in dem Sinne, daß heute die gegenteilige Annahme die eindeutig ökonomischere ist – streng beweisen läßt sich in den empirischen Wissenschaften nichts). Als eine bessere Analogie zu den "anderen Welten" bietet sich das Innere Schwarzer Löcher an, aus dem uns auch keine Information erreichen kann. Tatsächlich hat man den Sinn und die Existenz solcher Raumzeitbereiche in den Anfängen der Allgemeinen Relativitätstheorie angezweifelt (Einstein selber eingeschlossen). Heute wird in allen Fachvorlesungen ausführlich erklärt, was einem Beobachter passieren würde, der in ein Schwarzes Loch fällt, obwohl er nie mehr zurückkehren und darüber berichten kann. Man nimmt dazu an, daß die Einsteinschen Gesetze, die man nur außerhalb des Schwarzen Loches bestätigen kann, auch in seinem Inneren gelten. Ist das unökonomisch? Vielleicht für die Menge der Fakten – man könnte ja die Realität am Rande des Schwarzen Loches einfach abschneiden –, nicht aber für die Naturgesetze, die man dazu auf unplausible und komplizierte Weise ändern müßte. Ähnlich läßt sich auch Poppers Falsifizierbarkeitseinwand beantworten. Die Vielen Welten sind ja kein unabhängiges Postulat, sondern eine Konsequenz der Schrödinger-Gleichung, und letztere ließe sich sehr wohl falsifizieren – was bis heute aber nicht geschehen ist.

Bei den Schwarzen Löchern gibt es allerdings nicht ganz unbegründete Argumente aus der Quantengravitation, wonach die klassische Fortsetzung der Lösung fraglich sein könnte, so daß es gar nicht zur Ausbildung eines inneren Bereiches käme. Mit solch "ganz neuer Physik" muß man stets rechnen – insbesondere bei einem so weitgehenden Schluß wie auf Viele Welten. Wissenschaftliche Kosmologie ist eine hypothetische Extrapolation der *jeweils bekannten* Naturgesetze. Es wäre aber billig, deren Konsequenzen zu verwerfen, nur weil sie unerwartet sind. Selbst wenn wir irgendein Ereignis direkt zu sehen meinen, können wir dabei optischen Täuschungen unterliegen, die gegebenenfalls zu korrigieren sind.

Die ungewohnte Nichtlokalität der quantenmechanischen Zustände hat viele Physiker zu dem erwähnten Irrtum verführt, daß Dekohärenz einen Kollaps der Wellenfunktion be-

schreibe. Es ist aber nicht völlig auszuschließen, daß dieser Prozeß mit Hilfe einer noch unbekannte Modifikation der Schrödingergleichung einen Kollaps *auslöst*. Ohne empirische Hinweise wäre eine solche Annahme allerdings nur durch klassische Vorurteile motiviert.

Viele in der Physik benutzte Begriffskonstruktionen sind “operationalistisch”. So hat man das Konzept eines (klassischen) elektromagnetischen Feldes durch dessen Wirkung auf elektrische Ladungen, die man “direkt” beobachten kann, begründet. Das Feld galt daher ursprünglich nur als ein Hilfsbegriff zur Berechnung von Kräften auf elektrisch geladene Teilchen. Aus ähnlichen Gründen gilt die Wellenfunktion heute vielfach immer noch nur als ein theoretisches Instrument zur Berechnung von Wahrscheinlichkeiten für das Auftreten von “Ereignissen”. Operationalistisch kann man aber weder das Innere Schwarzer Löcher noch die anderen “Welten” begründen. In einem operationalistischen Weltbild *existieren* sie daher nicht. Das ist eine zwar konsistente aber sehr einschränkende Auslegung des Realitätsbegriffs, die zudem die Universalität der Naturgesetze verletzen würde – also im Sinne dieser Gesetze unökonomisch ist. Das Konzept einer Realität als “what you can kick and what kicks back”, das insbesondere experimentierenden Physikern naheliegt, greift hier offenbar zu kurz.

Zudem setzt die Beschreibung von Operationen stets Begriffe zu ihrer Formulierung voraus. Das ist solange unproblematisch, wie diese nicht selber in Frage stehen, sondern nur durch neue Konzepte ergänzt werden sollen. So bleibt der Begriff von (scheinbar direkt beobachtbaren) geladenen Teilchen bei der operationalistischen Begründung des elektromagnetischen Feldes unangetastet. Das ist aber anders, wenn man universell anzunehmende Quantenkonzepte operationalistisch begründen will, weil dann die Operationen selber quantenmechanisch beschrieben werden müssen. Klassisch beschriebene Operationen müssen dagegen zwangsläufig auf Zirkelschlüsse führen. In einer Situation, die die Revision *aller* grundlegenden Begriffe erfordert, kann man diese nur in Form von Hypothesen postulieren, um sie dann auf ihren Erfolg bei konsistenter Anwendung (auch bei der Beschreibung der Operationen) zu prüfen. Gerade die Konsistenzfrage wird deshalb bei der operationalistischen Einführung der Quantentheorie zu Gunsten von “komplementären” Beschreibungswesen beiseite geschoben.

4. Alles nur eine Frage der Interpretation?

Richard Feynman hat einmal konstatiert, daß wohl niemand die Quantentheorie wirklich versteht. Damit hat er auf die diversen begrifflichen Probleme angespielt, die ich versucht habe, in den ersten beiden Abschnitten dieses Artikels anzudeuten. Obwohl seine Bemerkung sehr häufig zitiert wird, scheint die überwiegende Mehrheit der Physikdozenten, auch solche an führenden Universitäten weltweit, ihre Bedeutung noch immer nicht ausreichend zu wür-

digen. Das ergibt sich schon daraus, welche unterschiedlichen, weitgehend willkürlichen “Bilder” und Interpretationen der formalen Theorie sie benutzen. Praktiker beschränken sich gewöhnlich auf spezifische Vorstellungen, die nur in ihren Arbeitsbereichen gelten, den Rest der Quantenphänomene aber vernachlässigen (“Du gleichst dem Geist, den Du begreifst ...”). Dabei wird die Theorie nicht selten auf eine Karikatur ihrer selbst reduziert. Es ist erstaunlich, wie zählebig etwa die Vorstellungen von Teilchen, die in den Atomen herumfliegen, oder von rein räumlichen Wellenfunktionen sind. Auch der radioaktive Zerfall wird immer wieder als Paradebeispiel spontaner Ereignisse dargestellt, obwohl unterschiedliche Zerfallszeiten in geeigneten Experimenten (bei denen sich Dekohärenz vermeiden läßt) interferieren – also in einer Superposition gemeinsam existieren müssen. So werden häufig ganz offensichtliche Konsequenzen der nun schon lange bekannten Theorie als sensationelle Neuentdeckungen herausgestellt – insbesondere wenn sie erstmals in den Bereich der experimentellen Möglichkeiten rücken (was natürlich für die technische Anwendung extrem interessant sein kann). Dazu gehört in erster Linie die längst bekannte, aber immer wieder auf ihren rein statistischen Inhalt reduzierte Eigenschaft der Zustandsverschränkung (Nichtlokalität).

Diese pragmatische Haltung beruft sich überwiegend auf die *Kopenhagener Deutung* von Niels Bohr, doch meistens ohne deren volle Konsequenzen zu erfassen. Bohr hatte auf Grund seiner langen und tiefen Erfahrung schon vor 1925 erkannt, daß es “keine einfache Lösung” der Probleme der Quantenphysik geben könne. Damit erteilte er allen “naiven” (traditionellen) Versuchen einer Interpretation eine auch nachträglich berechtigte Absage. Er ging aber weiter, indem er auf einem rein operationalistischen Umgang mit der Theorie bestand, der ausdrücklich begriffliche Inkonsistenzen (“komplementäre” klassische Beschreibungsweisen) zuläßt. Daß dies die Aufgabe eines Realitätsbegriffes in der Mikrophysik verlangt, kam Bohr sogar entgegen, da er philosophisch nachweisbar vom Irrationalismus beeinflusst war, der damals auch für einige führende Naturwissenschaftler im Zeitgeist lag. Tatsächlich ergab sich diese explizite Absage an eine “reale Quantenwelt” aber aus ganz konkreten Konsistenzfragen, etwa ob das Elektron nun *wirklich* ein Teilchen oder eine Welle sei. In der operationalistisch begründeten Realität im Rahmen der klassischen Begriffe hat sich diese pragmatische Haltung außerordentlich bewährt, da sie sich hierfür nicht nur als ausreichend erwiesen hat, sondern die Physiker auch nicht von der Fortsetzung ihrer praktischen Arbeit abhielt. (Ich kenne eine ganze Reihe ausgezeichneter junger Physiker, die durch die unlösbar erscheinenden Konsistenzprobleme der Quantentheorie völlig blockiert wurden und dadurch in ihrer beruflichen Karriere scheiterten.) Andererseits führt sie aber zu einer “negativen natürlichen Auslese” bezüglich möglicher Fortschritte im *Verständnis* der Theorie und damit unserer

Welt. Die Kopenhagener Deutung wird heute in den meisten Lehrbüchern als Standardinterpretation (wenn es denn überhaupt eine ist) bezeichnet, aber ohne daß ihre volle Bedeutung und *Ungeheuerlichkeit* hinreichend klargestellt wird. Das führt dann leicht zu neuen Fehlinterpretationen.

Bohrs "Deutung" der Theorie ist ihrerseits weitgehend durch Werner Heisenbergs fundamentale erste Arbeit zur Quantentheorie von 1925 beeinflusst. Diese bestand im Wesentlichen aus der Einführung neuartiger "Rechenvorschriften" (seiner Matrixmechanik), und selbst berühmte und formal ausgerichtete Physiker bestätigen heute, daß diese Arbeit eigentlich unverständlich ist. Soll heißen, daß sie keinerlei Interpretation dieser neuen Methoden durch ein konsistentes Modell enthält. Erst später schob Heisenberg eine "negative Interpretation" in Form seiner Unschärferelationen nach. Dabei hielt er zwar am klassischen Begriff von Partikeln fest, nahm aber an, daß deren Orte und Impulse "unscharf" sein müssen. Sein ursprünglicher Versuch, dies als Störung bei der Messung der jeweils komplementären Größe zu verstehen, schlug aber fehl. Die somit zu postulierende Unschärfe sollte man daher als ein grundsätzliches Versagen eben dieser Begriffe auffassen.

Heisenberg, ein höchst genialer aber damals noch verhältnismäßig unerfahrener Wissenschaftler, war nicht zuletzt durch anfängliche und noch nicht ganz ausgereifte Interpretationen der Relativitätstheorie (auch durch Albert Einstein selber, dem er es in seinem großen Ehrgeiz gleichzutun wollte) beeinflusst. Einstein hatte darin den Begriff einer *momentanen* (gleichzeitigen) Realität, weil operationell unbegründet, abgeschafft. Erst Hermann Minkowski stellte klar, daß dieser dabei konsistent durch den einer hypothetischen vierdimensionalen, raumzeitlichen Realität ersetzt wird. In dieser ist die scheinbare momentane Realität (ein globales Jetzt) nur aus der raumzeitlichen "Perspektive" eines Betrachters, definiert durch seinen Bewegungszustand, zu verstehen. Heisenberg bestand aber unter Berufung auf Einsteins ursprünglicher Formulierung darauf, daß man nicht über das was *ist*, sondern nur über das was beobachtet wird, reden und eine Theorie formulieren kann. Dieser positivistische Standpunkt kam Bohr sehr entgegen. Heisenberg zitiert in seinen Erinnerungen Einsteins folgende Aussage aus einer Diskussion, die er mit ihm führte: "Erst die Theorie entscheidet darüber, was man beobachten kann." Dieses Zitat wird häufig fälschlicherweise so verstanden, daß die Theorie durch Postulate *frei festlegen* (oder einschränken) darf, was beobachtbar ist. Heisenberg führte zu diesem Zweck in seinem "Bild" den formalen Begriff von "Observablen" an Stelle von realen und objektiven Variablen ein. Aber Einstein fährt fort: "Auf dem ganzen langen Weg vom Vorgang" (im Meßapparat) "bis zur Beobachtung in unserem Bewußtsein müssen wir wissen wie die Natur funktioniert, ... wenn wir behaupten wollen, daß

wir etwas beobachtet haben.” Das ist ein klares Bekenntnis zu einer beobachterunabhängigen Realität, die jedoch in der Kopenhagener Deutung der Quantentheorie bestritten wird. Daher wird diese auch so gern zur Rechtfertigung antireduktionistischer oder gar esoterischer Vorstellungen angeführt.

Kurz nach Heisenberg präsentierte Schrödinger seine Wellenmechanik, in der die Unschärferelationen verständlich werden. Sie sind danach vergleichbar mit dem bekannten Kompromiß, den man bei Radiowellen zwischen Trennschärfe und Informationskapazität machen muß. Der vermeintliche Teilchenimpuls erweist sich dabei als inverse Wellenlänge. Nur weil man den Impuls bis dahin in mechanischen Einheiten gemessen hatte, benötigt man einen Umrechnungsfaktor, der sich als Plancksche Konstante erweist. Schrödingers Herleitung seiner Wellenmechanik führte ihn direkt auf Wellenfunktionen im hochdimensionalen Konfigurationsraum, was er aber zunächst umging, indem er sich mit großem Erfolg auf den Spezialfall einzelner Elektronen, also Wellenfunktionen im Raum, konzentrierte. Er wäre sonst direkt auf den erwähnten und entscheidend neuen Begriff der Zustandsverschränkung (und damit der Nichtlokalität) gestoßen. Viele Lehrbücher bezeichnen den dreidimensionalen Spezialfall auch heute noch fälschlicherweise als die eigentliche Schrödinger-Gleichung.

Tatsächlich bilden Everetts “Welten” eine gewisse Analogie zu inhaltlich voneinander unabhängigen und getrennt betrachtbaren Radio- oder Fernsehsendungen, die alle gleichzeitig als *eine* elektromagnetische Welle den (hier dreidimensionalen) Raum füllen – nur daß in der globalen Quantenwelt der Zuschauer selber Teil einer der “Sendungen” oder “Welten” ist (die entscheidende neue Erkenntnis). Später versuchte Schrödinger die Wellenfunktion im Konfigurationsraum neu zu interpretieren, da für ihn (wie für die meisten seiner Zeitgenossen) nur eine Realität in Raum und Zeit denkbar war. Es waren insbesondere die scheinbaren Quantensprünge als allzu offensichtliche Abweichungen von der von ihm gefundenen Wellendynamik, die ihn von Borns Wahrscheinlichkeitsinterpretation überzeugten, obwohl er diese als Indiz für die Vorläufigkeit der Theorie ansah. Born hatte sich umgekehrt vorübergehend durch Schrödinger von Heisenbergs Matrixmechanik abbringen lassen und seine Wahrscheinlichkeiten zunächst als einen Kollaps der Wellenfunktion formuliert, den erst Wolfgang Pauli wieder als eine Informationsvermehrung über Teilchen umdeutete. Erst nach der Arbeit von Einstein, Podolsky und Rosen im Jahr 1935 bezeichnete Schrödinger den Begriff der Verschränkung als den wichtigsten der Quantentheorie, sprach aber im Titel seiner Arbeit immer noch von Wahrscheinlichkeitskorrelationen – nicht von einer Eigenschaft individueller Zustände. Immer wieder stieß man so auf die unlösbare Frage: Teilchen oder Welle?

So konnte sich die Kopenhagener Deutung trotz oder gerade wegen ihrer vagen Formulierung nahezu uneingeschränkt durchsetzen. Versuche, ihre begrifflichen Inkonsistenzen (gewöhnlich umschrieben als “Komplementarität” – m.E. der größte Sophismus der Wissenschaftsgeschichte) zu überwinden, wurden vornehmlich von Außenseitern unternommen. Ihre erfolglosen Bemühungen stießen auf wenig Interesse und oft auf Spott, wovon selbst der “zu alte” Einstein nicht ausgenommen wurde. Die meisten ihrer Ansätze scheitern tatsächlich schon daran, daß sie nur bestimmte Aspekte erklären können, während sie zu anderen sogar in Widerspruch stehen. Es ist bezeichnend, daß alle existierenden *konsistenten* Theorien die nichtlokale Wellenfunktion als fundamentalen Teil der Realität ansehen (sie also “ontisch” und nicht nur “epistemisch” im Sinne einer unvollständigen Information verstehen). Neben den bisher erwähnten “Viele-Welten” (besser sollte man sagen “Multiple Beobachter” oder “Many Minds”) und den Kollapstheorien gibt es noch eine konsistente Theorie von David Bohm, der zusätzlich zu einer universellen Wellenfunktion noch klassische Teilchen und Felder annahm, die von ersterer dynamisch “geleitet” werden. Dadurch läßt sich eine solche Theorie in ihren beobachtbaren Konsequenzen exakt äquivalent zur üblichen Quantentheorie machen, jedoch nur auf Kosten der Tatsache, daß sich die so zusätzlich postulierten klassischen Objekte zwischen zwei Messungen völlig “abwegig” verhalten (z.B. schneller als Licht sein können) und keinesfalls einigermaßen plausiblen Erwartungen entsprechen. Da sie nach dieser Theorie auch niemals direkt nachweisbar sind, haben sie nur den Zweck, auf notgedrungen skurrile Weise einen Determinismus für Meßergebnisse wiederherzustellen. Verzichtet man auf solche konsequenzlosen Hypothesen, bleibt außer einem vorerst ebenfalls hypothetischen Kollaps nur Everetts Interpretation der Vielen Welten, die durch dynamisch autonome Komponenten der Wellenfunktion beschrieben sind

In den letzten Jahrzehnten konnten die Experimentalphysiker mit unglaublich genialen Anordnungen den ursprünglich nur für Atome angenommenen Anwendungsbereich der Quantentheorie immer weiter als gültig nachweisen. Dabei wurde der von der Kopenhagener Deutung vorausgesetzte klassische Bereich ständig zurückgedrängt – beschreibt aber nach wie vor ausreichend unsere Alltagswelt. In allen untersuchten Fällen wird die phänomenologische Grenze ganz innerhalb der Quantentheorie durch den erwähnten Dekohärenzmechanismus erklärt, der die Everett-Welten praktisch *irreversibel* voneinander trennt. Es gibt also derzeit gar keinen vernünftigen Grund, die Allgemeingültigkeit dieser Theorie, die dann zwangsläufig zu den “Vielen Welten” führt, in Zweifel zu ziehen. Andererseits ist es natürlich nachvollziehbar, daß praktizierende Physiker eher den Begriffen trauen, die die ihnen zugängliche Laborsituation beschreiben. Diese können jedoch nur eine situationsbedingte “Oberfläche”

der Natur darstellen, die uns als Welt der Alltagsphänomene geläufig ist. Warum aber sollte sich die Realität auf ihren unseren erweiterten Sinnen zugänglichen Teil beschränken? Leider werden Interpretationsfragen der Quantentheorie oftmals nicht mit Argumenten sondern mit Hilfe des angeblich so gesunden “Menschenverstandes” beantwortet.

Die pragmatisch gerechtfertigte Interpretation der Wellenfunktion als Wahrscheinlichkeitsamplitude für klassische Eigenschaften ist so suggestiv, daß man neuerdings zu ihrer Rechtfertigung den ganz neuen Begriff einer fundamentalen “Quanteninformation” eingeführt hat – ein Zwitterbegriff zwischen ontisch und epistemisch, der jeder Realität überzuordnen wäre. Dieser steht ganz in der Tradition der Kopenhagener Deutung mit ihrer irrationalistischen “Lösung” von Problemen durch Einführung neuer Vokabeln (Many Words statt Many Worlds, wie es Max Tegmark auf den Punkt gebracht hat). Der Pragmatismus in der Physik erweist sich dabei als stärker als alle Konsistenzfragen. So akzeptiert man bereitwillig begriffliche Inkonsistenzen (wie einen “Dualismus” von Teilchen und Wellen), solange diese nicht zu praktischen Problemen führen. Tegmarks Forderung, daß die Lehrbücher der Quantentheorie umgeschrieben werden müssen, dürfte also vorerst wenig Gehör finden, denn nur wenige Wissenschaftler sind jemals bereit, etwas zu widerrufen, was sie ein Leben lang unterrichtet haben. Mir wurde früher bei Versuchen, die Konsequenzen einer universellen Quantentheorie zu diskutieren, von Kollegen gewöhnlich die Antwort zuteil, daß diese “dafür nicht gemacht” sei! Wegen der oben erwähnten negativen natürlichen Auslese dürfen wir nicht einmal im Sinne Max Plancks erwarten, daß wenigstens das Aussterben der alten Physiker (wie er sich ausdrückte) den Fortschritt bringen wird. Und so schleppen sich klassische Vorurteile und Vorstellungen mit ihren begrifflichen Inkonsistenzen “wie eine ewige Krankheit” fort.

5. Haben die “anderen Welten” irgendwelche Konsequenzen?

Wenn die “anderen” Welten tatsächlich existieren, ist das offenbar von elementarer Konsequenz für die darin dann ebenfalls existierenden Beobachter. Wesentlich sind sie natürlich auch für ein konsistentes und vollständiges *Bild*, das wir uns von der Welt zu machen versuchen. Denn die Schrödinger-Gleichung, durch deren Anwendung sich die Vielen Welten ergeben, ist ja immer wieder bestätigt worden – nicht zuletzt durch das Phänomen der Dekohärenz selber. Erstaunlicherweise betreiben aber viele Kosmologen ihr Metier auch heute noch so, als ob die Quantentheorie dafür nur von untergeordneter Bedeutung sei, während sie bereitwillig neue, spekulative Feldtheorien aufgreifen.

Es bleibt aber noch die Frage, welche *praktischen* Konsequenzen die Vielen Welten für “uns” haben könnten, also für das spezifische Kollektiv von individuellen Beobachtern, die miteinander in Informationsaustausch stehen, das heißt, zu einer “Welt” gehören. In der Kollapsinterpretation müßten sich beobachtbare Konsequenzen aus den dazu nötigen Modifikationen der Schrödinger-Gleichung ergeben. Gibt es außer deren Nichtauftreten weitere Konsequenzen der Viele-Welten-Interpretation? Ich möchte hier zwei erwähnen, obwohl sie derzeit kaum nachzuprüfen sind: (1) mögliche Abweichungen von einer universellen Richtung der Zeit und (2) das anthropische Prinzip.

Die Verzweigung der Everettschen “Welten” ist offenbar ein zeit-asymmetrischer Vorgang, obwohl die Grundgleichungen der Theorie (insbesondere die Schrödinger-Gleichung) im wesentlichen zeitsymmetrisch sind. Die Asymmetrie der Verzweigung ist in diesem Rahmen nur durch eine sehr spezifische *Anfangsbedingung* an die Wellenfunktion des Universums zu begründen, die dann für die Zeitrichtung *aller* Alltagsphänomene (physikalisch charakterisiert durch die Zunahme der Entropie) verantwortlich sein muß. Sie ist auch für die zeitgerichtete Kausalität (also den strukturellen Unterschied zwischen Ursachen und Wirkungen) verantwortlich. Im kopenhagener Pragmatismus ist diese Asymmetrie nicht einmal innerhalb der Theorie formulierbar – sie erscheint erst *ad hoc* in der aufgesetzten Interpretation oder in Form von vorausgesetzten zeit-asymmetrischen “Operationen”.

Es ist nun denkbar, daß unser sich ausdehnendes Universum einmal zum Stillstand kommt und in Umkehrung des Urknalls wieder einen Zustand unendlicher Dichte anstreben wird, was nach den Vorstellungen einiger Kosmologen in symmetrischer Weise geschehen sollte. In diesem Fall müßte sich auch die Zeitrichtung des Zusammenhangs zwischen Dokumenten oder Erinnerungen und ihren Quellen (oder allgemein die Richtung kausaler Zusammenhänge) umkehren, so daß auch Beobachter die Zeit nur in umgekehrter Richtung bewußt erleben könnten. Bei einem fundamental zeit-asymmetrischen Kollaps der Wellenfunktion wäre das allerdings nicht möglich: Eine Wiedervereinigung von Everett-Welten wäre ausgeschlossen, wenn diese bis auf jeweils eine durch den Kollaps aus der Realität verschwänden. Eine empirische Entscheidbarkeit liegt aber wohl in der sehr fernen Zukunft, selbst wenn sich das Universum nicht bis in alle Ewigkeit ausdehnen sollte.

Mit dem *anthropischen Prinzip* versucht man zu begründen, warum wir als subjektive und bewußte Beobachter eine objektiv gesehen unwahrscheinliche Situation vorfinden. Das kann sehr persönlich gemeint sein (warum Sie und ich gerade als hochentwickelte Wesen existieren, obwohl es viel mehr Individuen auf niederer Entwicklungsstufe gibt, bei denen wir auch ein Bewußtsein vermuten) oder sich auf die ganze Menschheit beziehen (warum finden

wir uns gerade auf einem bewohnbaren Planeten, obwohl es viel mehr unbewohnbare gibt?). Die saloppe Antwort “andernfalls könnten wir nicht diese Fragen stellen” mag befriedigend erscheinen, wenn es denn genügend Möglichkeiten im Universum gibt. (Sie hat trotzdem nichttriviale Konsequenzen für den von uns beobachteten Teil der Welt!) Man bezeichnet eine solche Art der Antwort als das *schwache anthropische Prinzip*. Das *starke anthropische Prinzip* versucht die gleiche Art von Antwort auf die Frage, warum es denn überhaupt bewohnbare Situationen im Universum gibt, oder warum die Welt gerade so ist, daß Evolution *irgendwo* zu intelligenten Wesen führen konnte. Eine quantitative Abschätzung der entsprechenden Wahrscheinlichkeiten ist aber sehr schwierig und stark abhängig von weiteren fundamentalen Annahmen.

Das schwache Prinzip akzeptieren wir gewöhnlich ohne uns dessen überhaupt bewußt zu sein, während das starke eher an kreationistische Vorstellungen erinnert. Ein Vorteil der Viele-Welten-Interpretation ist nun, daß sie von viel mehr *existierenden* Situationen ausgeht, so daß manche scheinbar nötige Anwendung des starken anthropischen Prinzips nur noch das schwache erfordert. Es ist sogar denkbar, daß eine von einem Beobachter registrierte Häufung unwahrscheinlicher Quantenereignisse in seiner Vergangenheit, die für seine aktuelle Existenz nötig waren, als Hinweis auf die Vielen Welten dienen könnten – nämlich dann, wenn die Gesamtheit solcher Ereignisse so unwahrscheinlich ist, daß sie *nirgendwo* in einem als endlich angenommenen einzelnen Universum zu erwarten wäre. Ein solcher Hinweis wäre jedoch nur insoweit objektivierbar, wie diese Ereignisse zur Selektion *vieler* Beobachter beigetragen haben – etwa zur Evolution des homo sapiens in “unserer Welt”.

Anhang: Bells Argument zur Nichtlokalität der Realität

Die *ontische* Bedeutung einer nichtlokalen Verschränkung zwischen Quantenobjekten wurde besonders überzeugend mit Hilfe einer von John Bell abgeleiteten Ungleichung aufgezeigt. Obwohl diese sich auf Ensemble von Ergebnissen vieler gleichartiger Messungen bezieht, erlaubt sie unter sehr allgemeinen Annahmen, eine rein *statistische* Interpretation der nichtlokalen Verschränkung zweier lokaler Systeme auszuschließen. Die dazu vorgeschlagene Meßanordnung ist schematisch in Abbildung 1 dargestellt.

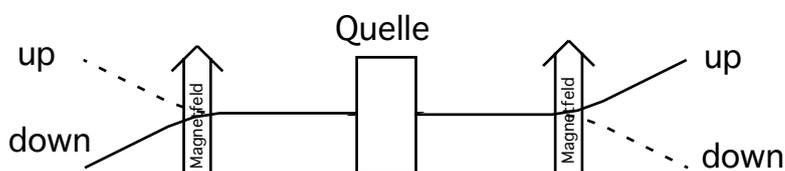


Abbildung 1: Versuchsanordnung zum Bellschen Experiment.

Man erzeugt in einer geeigneten Quelle Photonen, Neutronen oder Atome *paarweise* derart, daß sie in entgegengesetzten Richtungen (nennen wir sie L für links und R für rechts) davonfliegen. Danach kann man das Vorzeichen ihres jeweiligen Drehimpulses (“Spin”) bezüglich eines beliebig ausgerichteten Magnetfeldes durch die Richtung der Ablenkung (“up” oder “down”) messen. Werden die Paare dabei in einer verschränkten Spin-Superposition der Form $L_{\text{up}}R_{\text{down}} - L_{\text{down}}R_{\text{up}}$ erzeugt (was recht einfach möglich ist), so ist das Meßergebnis für jedes einzelne “Teilchen” und jede Richtung des Magnetfeldes vor der Messung völlig unbestimmt (denn diese Superposition enthält etwa L_{up} und L_{down} in symmetrischer Weise). Andererseits erhält man aber bei gleichgerichteten Magnetfeldern links und rechts – egal in *welcher* Richtung – exakt antikorrelierte Ergebnisse: Ist ein Neutronenspin “up”, so ist der andere *bei derselben Ausrichtung* des Magnetfeldes “down” und umgekehrt: Es bleibt nach der Messung immer nur *eine* der beiden lokalen Komponenten übrig (genau wie eine von vielen Komponenten der Wellenfunktion hinter den in Abschnitt 1 erwähnten flächendeckenden Detektoren).

Das allein ist noch unproblematisch, weil man es als eine statistische Korrelation verstehen kann. Nach einem Argument von Einstein, Podolsky und Rosen (EPR) aus dem Jahre 1935 müßte demzufolge aber jedes Neutron bereits vor der Messung einen Wert up oder down *für alle Meßrichtungen* objektiv “besitzen” (auch ohne daß man ihn kennt), weil man ihn wegen der exakten Antikorrelation mit Hilfe des *anderen* Neutrons, also unter der Annahme lokaler Wechselwirkungen *ohne das erste zu beeinflussen*, jederzeit eindeutig feststellen *könnte*. EPR interpretierten diese Tatsache so, daß der quantenmechanische Formalismus, der keinen solchen Wert enthält, nicht vollständig sein könne, und Quantenzustände demnach nur eine Wahrscheinlichkeitsverteilung (hier der “noch unbekanntes” ups und downs *jeder Magnetfeldrichtung*) auf Grund dieser unvollständigen Beschreibung darstellen.

Diese Vorstellung wurde aber 1964 von Bell widerlegt. Um sein Argument nachzuvollziehen, betrachte man zunächst eine Meßreihe für eine beliebige aber gleiche Ausrichtung der beiden die Messung definierenden Magnetfelder mit ihren exakt antikorrelierten Ergebnissen (z.B. die Meßreihe (a) von Tabelle 1). Nun kann man annehmen, das Magnetfeld L *wäre* bei dieser Meßreihe um einen kleinen Winkel α verdreht gewesen. Dann *wären* einige Ergebnisse nur an diesem Meßgerät anders ausgefallen (Meßreihe (b) der Tabelle). Bei diesen Abweichungen von der Meßreihe (a) *hätte* es keine Antikorrelation gegeben. (Diese Meßreihe kann aber nicht zusammen mit der Reihe (a) gefunden werden, weil das Magnetfeld bei jeder Messung *eine* ganz bestimmte Richtung hat.)

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

Tabelle 1: Beispiel von vier Meßreihen des Bellschen Experiments für zwei exakt parallele Magnetfelder (a) sowie die nach der Vorstellung von EPR *anzunehmende* Abweichungen (betroffene \pm unterstrichen), falls die Magnetfeldrichtung links oder rechts (b bzw. c) oder aber beide (d) eine etwas andere gewesen *wären*. \pm steht für “up” oder “down”. F ist die Zahl der “Fehler”, also der Abweichungen von der Antikorrelation. Nach den Vorstellungen von EPR hätten im Fall (d) die Veränderungen der Reihen (b) und (c) gemeinsam auftreten müssen – die “Fehlerzahlen” sich also höchstens addieren (einige aber auch kompensieren) können.

Denkt man sich nun *stattdessen* das Magnetfeld des anderen Apparates um den entgegengesetzten Winkel verdreht, so wären einige Ergebnisse (nur) an diesem anders ausgefallen: Reihe (c). Im Mittel ist die Quote der “Fehler” $F(\alpha)$ in den Fällen (b) und (c) aus Symmetriegründen dieselbe. Betrachtet man schließlich noch den Fall, daß *beide* Magnetfelder während der ursprünglichen Meßreihe verdreht gewesen *wären*, so daß der Winkelunterschied jetzt 2α betrüge, so hätten sich die Abweichungen von der Antikorrelation bis auf jene Fälle, in denen veränderte Meßwerte zufällig an *beiden* Apparaten aufgetreten sind und die Antikorrelation damit wiederhergestellt haben, einfach addiert: Reihe (d). Die Fehlerquote sollte also in diesem Fall nicht mehr als die Summe von (b) und (c) betragen.

Das bedeutet für die Fehlerquote $F(2\alpha)$ bei der gleichzeitigen, entgegengesetzten Drehung beider Magnetfelder, also bei verdoppeltem Differenzwinkel,

$$F(2\alpha) \leq 2F(\alpha) .$$

Dies ist bereits die *Bellsche Ungleichung*. Im (konstruierten) Beispiel von Tabelle 1 ist sie wegen $4 < 6$ (letzteres die Summe aus b und c) offensichtlich erfüllt. Für einen verschränkten Quantenzustand der obigen Art folgt dagegen aus der Quantentheorie, daß die Fehlerquote für kleine Winkel quadratisch mit α wächst. Das widerspricht der Ungleichung, denn $(2\alpha)^2 = 4\alpha^2 > 2\alpha^2$; statt $F \leq 6$ hat man in dieser Näherung für das obige Beispiel im Mittel $F = 9$ zu erwarten. Eine solche Verletzung der Bellschen Ungleichung im Einklang mit der Quantentheorie wurde vielfach experimentell bestätigt. Zwar muß man $F(\alpha)$ und $F(2\alpha)$ wegen der vorzuge-

benden Magnetfeldrichtungen in *separaten* Meßreihen ermitteln (sonst gäbe es ja einen *logischen* Widerspruch), jedoch sind die theoretisch vorhergesagten Werte für F in hinreichend langen Meßreihen beliebig genau als Mittelwerte reproduzierbar. Da die einzelnen Meßergebnisse nur statistisch bestimmt sind, ist die Erfüllung der Bellschen Ungleichung zwar für individuelle Meßreihen noch immer möglich, dies wird aber mit zunehmender Länge der Meßreihe immer unwahrscheinlicher.

Die nichtlokale Wellenfunktion kann also nicht einfach statistische Korrelationen auf Grund unvollständiger Information (hier über noch nicht gemessene Spinwerte) beschreiben. Da die Detektoren mit den zugehörigen Magnetfeldern zudem beliebig weit von einander entfernt sein dürfen, wären im Prinzip nur noch mysteriöse, überlichtschnelle Wechselwirkungen zwischen ihnen zur Erklärung möglich (von Einstein, dem nichtlokale Zustände fremd waren, als “spukhafte Fernwirkung” bezeichnet). Es sei daher betont, daß auch die Quantentheorie keine beobachtbaren nichtlokalen oder superluminalen kausalen Einflüsse erlaubt, also insbesondere die kausale Raumzeitstruktur, die durch die Grenzgeschwindigkeit des Lichts definiert wird, respektiert. Sie benötigt aber gar keine Fernwirkungen, da sie bereits *nichtlokale Zustände* voraussetzt, die ihrerseits die Grundlage der “Vielen Welten” bilden.

Weitere Publikationen und Essays zum Thema finden sich auf der Webseite des Autors (<http://www.zeh-hd.de>) – s. insbes. “Dekohärenz und andere Quantenmißverständnisse” oder “Physik ohne Realität: Tiefsinn oder Wahnsinn?”.