

## Die Realität der Quantenwelt

*Noch immer gibt es zahlreiche Interpretationen der Quantenmechanik und für viele Naturwissenschaftler und Philosophen erscheinen die Formeln der Quantenmechanik letztlich unverstanden.*

*In diesem Aufsatz soll ein neuer Blickwinkel eingenommen werden: Nicht unsere Alltagswelt ist die Realität sondern die Welt des Mikrokosmos, die Quantenwelt. Dann müssen wir die Eigenschaften der Quantenwelt akzeptieren und aus ihnen unsere alltägliche Welt konstruieren.*

*Für diesen Weg bieten Quantenmechanik und Philosophie interessante Konzepte.*

### Wellen kontra Teilchen?

Der mathematische Formalismus der Quantenmechanik ist vor fast 80 Jahren in kurzer Zeit auf zwei verschiedenen mathematischen Wegen entwickelt worden: Heisenberg hat die Matrizenmechanik und Schrödinger die Wellenmechanik entwickelt. Später kam noch Feynmans Pfadintegralmethode hinzu. Da hatte Schrödinger aber schon gezeigt, dass die Matrizen- und die Wellenmechanik zueinander äquivalent sind.

Die Wellenmechanik ist natürlich besonders anschaulich, arbeitet sie doch mit einer bildlichen Vorstellung der Welle, wie sie in der klassischen Alltagsphysik entwickelt wurde.

Für Mikroobjekte ist aber das Bild des Teilchens entwickelt worden und das steht nun mal im Widerspruch zu dem Wellenbild.

So entstand der Dualismus Welle-Teilchen, dessen Kenntnisnahme heute noch die Krönung der Schulphysik darstellt. Ist der Höhepunkt des Deutschunterrichtes etwa auch die Diskussion ob sich ein Gedicht besser auf Papier oder Schiefer schreiben lässt?

Der mathematische Formalismus ist ein Modell, das in weitestgehender Übereinstimmung mit den Messwerten der realitätsbezogenen Experimente Aspekte der Realität beschreiben soll.

Wir haben nicht zu entscheiden, ob Quantenobjekte Wellen sind, genau so wenig wie wir uns fragen, ob sie Matrizen sind. Wir halten nur fest, dass das Verhalten der Quantenobjekte mathematisch durch Wellenmodelle beschrieben werden kann.

Welcher Widerspruch zu unserer alltäglichen Teilchenvorstellung entsteht, zeigt am besten eine ausführliche Diskussion von Doppelspaltexperimenten mit Quantenobjekten.

### Interferenz am Doppelspalt

Schickt man Licht durch zwei nebeneinander liegende enge Öffnungen, einen Doppelspalt, so entsteht das bekannte Interferenzbild, das man auch erhält, wenn man zwei Steine nebeneinander gleichzeitig ins Wasser wirft.

In der Tat kann man dieses Interferenzbild durch eine Wellenvorstellung leicht erklären:

Der ankommende Lichtstrahl erzeugt (sehr vereinfachend gesagt) in jeder Öffnung eine kugelförmige Lichtwelle (Beugung). Beide Wellen breiten sich aus und treffen an verschiedenen Orten unterschiedlich aufeinander: Jeder Punkt auf der Mittelsenkrechten zum Doppelspalt ist gleich weit von den beiden Öffnungen entfernt, hier treffen also immer Wellenberge der einen Öffnung auf entsprechende Wellenberge der anderen Öffnung. Entsprechendes gilt natürlich auch für die Wellentäler. So verstärken sich auf der Mittelsenkrechten die beiden Wellen und es gibt das sog. 0. Maximum. Zu entsprechenden Punkten links und rechts von der Mittelsenkrechten sind die Laufzeiten von den beiden Öffnungen unterschiedlich. Deswegen kann es sein, dass ein Wellenberg von der einen Öffnung auf das nachfolgende Wellental der anderen Öffnung trifft und sich somit die beiden Wellen auslöschen (Interferenz). Wir erhalten dann ein

Abb1: Der Doppelspalt

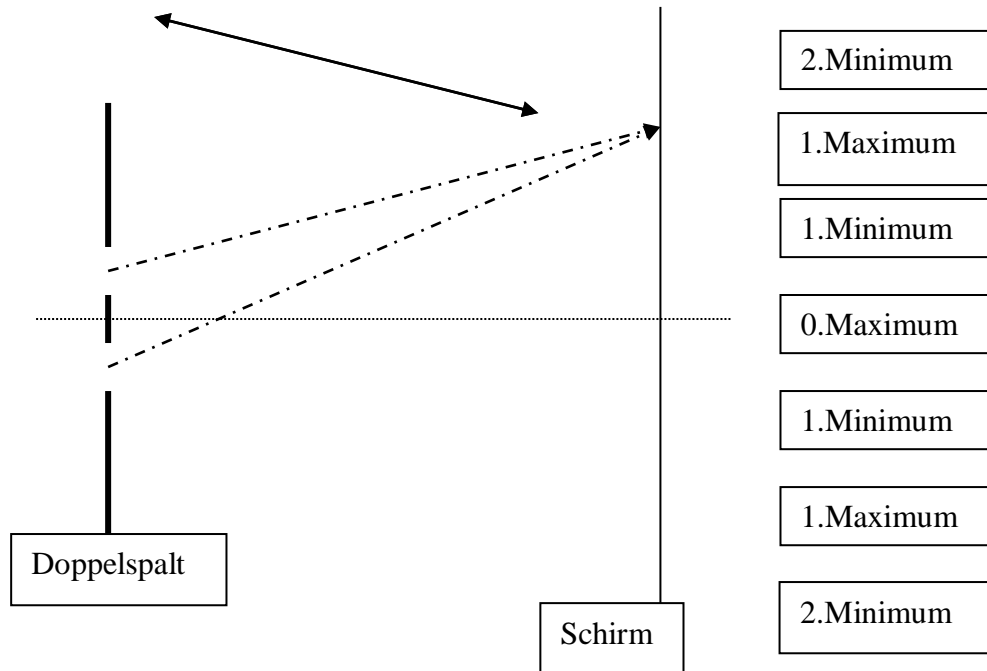


Abb.2:

Interferenzminimum. Da die Form der Wellenzüge sich in einer Welle periodisch wiederholt, gilt dies auch für die Interferenzbedingungen, wenn man sich immer weiter von der Mittelsenkrechten entfernt. Auf einem hinter dem Doppelspalt aufgestellten Schirm sieht man somit eine Folge von Minima und Maxima.

Ein solches Interferenzbild aber erhält man auch, wenn man nicht Lichtwellen, sondern Elementarteilchen, also z.B. Elektronen oder Protonen oder gar ganze Atome oder auch Riesenmoleküle wie aus 70 Kohlenstoffatomen bestehende Fullereine auf den Doppelspalt schickt.

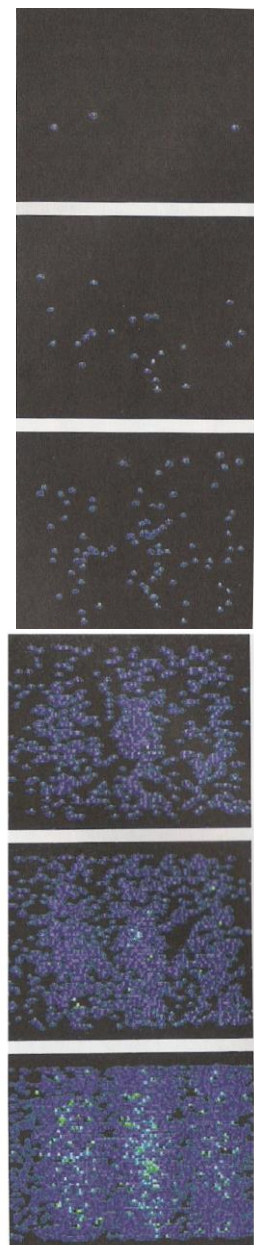
Diese klassischen Teilchenobjekte verhalten sich beim Durchgang durch den Doppelspalt also wie Wellen. Nach de Broglie kann man einem Teilchen der Masse  $m$ , das sich mit der Geschwindigkeit  $v$  bewegt die Wellenlänge  $\lambda = h / (m \cdot v)$  zuordnen ( $h$  ist die Plancksche Konstante). Ein sich mit 1000 km/sec bewegendes Elektron hat eine der Gammastrahlung vergleichbare Wellenlänge von 0,73 nm und ein im Schrittempo gehender Mensch die Wellenlänge  $9 \cdot 10^{-35}$  m, weshalb sich die Welleneigenschaften des Menschen nicht bemerkbar machen.

### Individuum gegen Kollektiv

In den Anfängen der Quantenmechanik dachte man noch, dass das Interferenzbild letztlich ein kollektives Phänomen ist, also durch eine Wechselwirkung vieler gleichzeitig durch den Doppelspalt gehender Teilchen entsteht.

Elementare, aber nicht leicht zu realisierende Versuche zeigen, dass Interferenzphänomene „Ein-Objekt-Prozesse“ sind.

Wenn man Atome, Elementarteilchen oder Moleküle einzeln, nacheinander auf den Doppelspalt zufliegen lässt und ihnen die Möglichkeit gibt durch die eine oder die andere Öffnung zu fliegen, so taucht in der Nachweisapparatur jedes dieser Objekte wieder an einem



Punkt auf. An welcher Stelle lässt sich aber nicht vorhersagen. Die Stärke des bekannten Interferenzbildes gibt lediglich die Wahrscheinlichkeit dafür an, dass das Objekt an einer bestimmten Stelle erscheint.

Macht man den Versuch nun mit Millionen einzelner Objekte, die nacheinander durch den Doppelspalt gehen, so entsteht aus der statistischen Verteilung hinter dem Doppelspalt langsam das bekannte Interferenzbild.

Entsprechende Versuche gelingen natürlich auch für Licht, wenn die Intensität der Lichtquelle so herabgeregelt wird, dass nur einzelne Photonen nacheinander durch den Doppelspalt gehen.

Für das Eintreten von Interferenzen ist es also nicht notwendig, dass sich gleichzeitig mehrere Mikroobjekte im Bereich des Doppelspalt aufhalten. Interferenz ist ein individuelles und kein kollektives Phänomen.

In der Abb.2 sieht man die Interferenzbilder, die man nach nacheinander durch immer längere Aufsummierung der Photonen erhält. Hier wird das scheinbare Problem „Welle oder Teilchen“ deutlich:

Jedes Objekt wird als vollständiges Einzelobjekt hinter den Doppelspalt nachgewiesen, verhält sich aber auf seinem „Weg“ durch den Doppelspalt so, als wenn es durch eine Welle geführt würde.

Welchen Weg hat das Mikroobjekt durch den Doppelspalt genommen? Insbesondere würde es uns interessieren, durch welche der beiden Öffnungen es gegangen ist? Denn eigentlich kann ein Objekt nur durch eine der beiden Öffnungen gehen. Lässt man aber jede Hälfte der Objekte gezielt (z.B. durch Schließen der jeweils anderen Öffnung) nur durch jeweils eine Öffnung gehen, so erhält man kein Interferenzbild eines Doppelspalt, sondern das zweier nebeneinander liegender Einzelspalte. Etwas Entsprechendes würden wir auch erwarten, wenn die Objekte nicht sortiert sondern unsortiert durch die beiden gleichzeitig offenen Spalte hindurchgehen. Nach unserem Verständnis der Welt kann ein Objekt ja nur durch eine von zwei Öffnungen gehen, es kann ja nicht gleichzeitig in zwei verschiedenen Öffnungen sein. Wenn es aber nur durch eine Öffnung geht, erhält es dann eine Information darüber, ob die andere Öffnung offen ist (dann muss es statistisch verteilt auf einem Doppelspaltinterferenzbild erscheinen) oder ob sie geschlossen ist (dann muss es statistisch verteilt auf einem Einzelspaltinterferenzbild erscheinen)?

Die Frage nach dem Weg der Mikroobjekte bringt uns an die Grenzen unserer Vorstellungen.

### **Frage nie nach dem Weg!**

Unser Naturverständnis ist vom Vorhandensein genauer Bewegungsvorgänge und Bahnen bestimmt. Die aus Einzelbildern zusammengesetzte Wahrnehmung einer Bewegung interpretieren wir als einen kontinuierlichen, auf einer Bahn ablaufenden Bewegungsablauf. So beobachten wir die Flugbahn eines Vogels, so hat schon das Gehirn unserer Vorfahren die Flugbahn eines Steines oder eines Speeres berechnet (anderenfalls hätten die Speere unserer Vorfahren nie getroffen und sie hätten nicht überlebt und uns gäbe es nicht). Und schließlich berechnen moderne Computer die Flugbahnen unserer Raumsonden zu den Planeten Jupiter und Saturn. Aber alle diese „Bahnen“, d.h. der Eindruck der Kontinuität einer Bewegung sind das Ergebnis eines Konstruktionsprozesses

### **Unbestimmtheiten**

Wir wollen wenigstens einen Bahnpunkt einer Bewegung beobachten und stellen deshalb eine Öffnung in die erwartete Bahn. Alle Objekte, die durch die Öffnung kommen, haben zumindest dann einmal diese bestimmte Position der Öffnung als ihre eigene gehabt.

Aber was passiert, wenn wir die Öffnung so eng machen, dass sie der Wellenlänge des bewegten Objektes entspricht? In diesem Fall wird die Welle des Objektes gebeugt und das

Objekt kann an beliebigen Stellen hinter der Öffnung aufkommen, die Wahrscheinlichkeit des Auftreffens wird durch die Intensität des zugehörigen Interferenzbildes bestimmt. Je stärker wir die Position durch eine immer engere Öffnung bestimmen, desto weiter fließt das Interferenzbild auseinander und desto mehr kann das Objekt außerhalb der direkten „Bahn“ auf einem Schirm auftreffen.

Diese einfache Beobachtung (das Interferenzbild der Beugung des Lichtes an einem Spalt wird umso breiter, je schmaler die Spaltöffnung ist), hat Werner Heisenberg allein durch den Formalismus der Quantenmechanik vorhergesagt und auf eine breite theoretische Basis gestellt:

Je genauer der Ort eines Objektes bestimmt ist (z.B. durch eine Öffnung), desto ungenauer ist die zugehörige Geschwindigkeit bestimmt (hinter der Öffnung hat das Teilchen dann eine zufällige zusätzliche seitliche Bewegung). Das Produkt der beiden Genauigkeiten liegt z.B. bei einem Elektron bei  $10^{-67} \text{ m} \cdot \text{kgm/sec}$ . Ein genau bestimmter Ort (ein lokalisiertes Elektron) würde eine vollkommen unbestimmte Geschwindigkeit bedeuten:  $\Delta x \cdot \Delta v \approx h/m$  und ein Objekt mit einer bestimmten Geschwindigkeit kann irgendwo sein.

Damit greift Heisenberg das Prinzip der klassischen Mechanik an: Aus den Angaben für Ort und Geschwindigkeit und den entsprechenden Orts-Zeit- und Geschwindigkeits-Zeit-Gesetzen kann die klassische Mechanik alle Bewegungen berechnen.

Heisenberg zeigt aber, dass genaue Orts- und Geschwindigkeitsangaben nicht nur am Anfang sondern nirgends längs der „Bahn“ eines Objektes sinnvoll sind. Zumindest im Mikrokosmos wirkt sich das so aus, dass man nicht mehr von einer Bahn eines Mikroobjektes sprechen kann: Ein Mikroobjekt ändert seine Position nicht längs einer Bahn, auf der ihm wie in der klassischen Mechanik ständig Ort und Geschwindigkeit zugeordnet werden können. Im Mikrokosmos macht der Bahnbegriff keinen Sinn.

#### Auf welchem Weg fliegt das Objekt durch den Doppelspalt?

Die folgenden Beispiele zeigen, dass die theoretische Beschreibung der Natur durch Heisenbergs Quantenmechanik nicht im Widerspruch zur Beobachtungsmöglichkeit der Natur steht:

Schicken wir erst einmal ein Elektron auf einen Doppelspalt und überlassen wir es dem Zufall, durch welche der beiden Öffnungen es fliegt. Dann trägt es mit einem Punkt zur Statistik des Interferenzbildes bei.

Nun wollen wir das Elektron auf dem Weg vom Doppelspalt zum Schirm beobachten und beleuchten den Bereich mit Licht, das natürlich aus Photonen besteht, die einen eigenen Schwung (Impuls) besitzen (der umgekehrt proportional zur Wellenlänge ist).

Benutzen wir zu dieser Beobachtung langwelliges Licht, so werden die langen Wellenlängen die kleinen Elektronen nur ungenau beobachten. Bei kurzwelligem Licht ist die Beobachtung der Elektronenpositionen viel präziser möglich (eigentlich müsste man Röntgenstrahlung verwenden). Wir kennen das aus der Optik: Je kurzwelliger die Strahlung ist, desto größer ist das Auflösungsvermögen des Fernrohres oder Mikroskops. Damit ein Radioteleskop bei den langen Radiowellen so scharf wie unser Auge bei den kurzen Lichtwellen sieht, müsste es einen Durchmesser von 1 km haben. Erst die auf verschiedenen Kontinenten stehenden und zu einem Teleskop zusammen geschalteten Radioteleskope erreichen die extrem hohe Auflösung moderner Radiobilder (Very Large Baseline Interferometrie).

Also: Je kürzer wir die Wellenlänge des Lichtes wählen, desto genauer können wir die Position des Elektrons messen. Je kurzwelliger das Licht ist, desto höher ist aber der Schwung, den die Photonen haben. Damit wir das Elektron nachweisen können, müssen die Photonen auf das Elektron treffen. Und wenn die Photonen viel Schwung haben (wir also eigentlich die Elektronenposition gut bestimmen können), dann boxen die schwungvollen Photonen das Elektron so zur Seite, dass es irgendwo anders auf dem Schirm ankommt, nur nicht mehr da, wo es laut Interferenzbild sein sollte.

Was heißt das? Wenn wir die Elektronen nach dem Durchgang durch den Doppelspalt vor ihrem Eintreffen auf dem Schirm beobachten wollen, dann boxen wir sie so in andere Richtungen, dass das Interferenzbild nicht mehr zu Stande kommt. Je genauer wir die Elektronenpositionen bestimmen, desto stärker verschwimmen die Konturen des Interferenzbildes.

Was passiert also, wenn wir nach dem Weg fragen? Je präziser die Antwort ist, desto mehr verschwindet die Interferenzfähigkeit der Elektronen.

Das passiert auch, wenn wir vor die beiden Öffnungen des Doppelspaltes unterschiedlich orientierte Polarisationsfolien kleben und damit anhand der Polarisation erkennen können, durch welche der beiden Öffnungen z.B. Licht gegangen ist. Auch hier würden wir eine präzise Antwort nach dem Weg des Lichtes (zumindest an der Stelle des Doppelspaltes) bekommen, aber wir erhalten kein Interferenzbild mehr, denn Licht unterschiedlicher Polarisationsrichtungen kann nicht interferieren.

Interferenzmuster entstehen also nur, wenn die unterschiedlichen Ausbreitungsmöglichkeiten durch nichts unterschieden werden können.

Selbst einem Genie wie Albert Einstein ist es nicht gelungen, diese Eigenschaft der realen Welt auszutricksen.

In einem 1927 veröffentlichtem Gedankenexperiment wollte er einen Doppelspalt an zwei Federn so aufhängen, dass der Rückstoß den das Objekt auf den Doppelspalt ausübt, wenn es wie und wodurch auch immer statistisch abgelenkt wird, messbar wird. Da Objekte, die an einem Punkt auftreffen, unterschiedlich stark abgelenkt sein müssen, je nach dem durch welche Öffnung sie gehen, kann man anhand des Rückstoßes den Weg durch den Doppelspalt rekonstruieren. Der Rückstoß bestimmt aber präzise den Impuls, den der Doppelspalt bekommt. Dadurch wird die Unbestimmtheit der Position des Doppelspaltes so groß, dass das Interferenzbild vollständig verschmiert, also nicht mehr sichtbar ist.

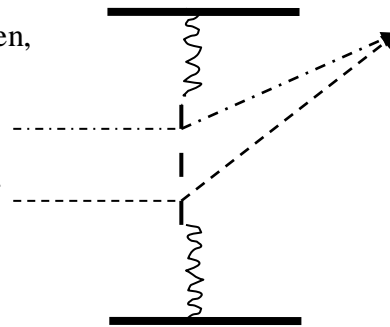


Abb.3

Die Botschaft ist klar: Frag nie nach dem Weg, denn den gibt es nicht.

Übrigens hat Herbert Walther 1991 gezeigt, dass man Interferenzbilder durch Beobachtungen des Weges auch zum Verschwinden bringen kann, wenn es keine Möglichkeit gibt, die Unbestimmtheit als Erklärung heranzuziehen. Hier spielt die Verschränkung von Mikroobjekten eine Rolle, die wir aber besser am doppelten Doppelspalt erklären können:

### Der doppelte Doppelspalt

Noch grundlegender zeigt sich die Antwort der Natur auf eine „Nach dem Weg – Frage“, wenn wir ein Atom zwischen zwei Doppelspalte setzen und das Atom dazu bringen, immer zwei Photonen gleichzeitig auszusenden, die in genau entgegengesetzte Richtungen fliegen.

Im ersten Fall ist nur der rechte Doppelspalt vorhanden. Auf der linken Seite steht ein Detektor, der feststellen kann, aus welcher Richtung das linke Photon kommt.

Ist der Detektor nicht eingeschaltet, so erfahren wir nichts über den Weg des linken und damit auch des rechten Photons und alle rechten Photonen erzeugen mit Hilfe des rechten Doppelspaltes ein Interferenzbild.

Schalten wir den Detektor ein, so erfahren wir über die linken Photonen den Weg der rechten Photonen (also durch welche Spaltöffnung sie geflogen sind) und schon baut sich kein Interferenzbild auf.

Das Interferenzbild bleibt auch weg, wenn wir den Detektor erst einschalten, wenn die beiden Photonen schon unterwegs sind. Ohne jede Störung des rechten Photons und ohne dass eine

Information über die zukünftige Wegmessung beim Aussenden vorliegen konnte, bleibt das Interferenzbild verschwunden. Und selbst wenn wir vollkommen zufällig den Detektor mal einschalten und bei anderen Photonenpaaren ausschalten, tragen nur die rechten Photonen zur Interferenz bei, für die der Detektor ausgeschaltet war, für die also keine Weginformation vorliegt.

Für unsere klassische Vorstellung ist das unmöglich! Woher soll denn das rechte Photon nach der Ausführung erfahren, dass am linken Photon eine Wegmessung gemacht wurde?

Die Antwort der Quantenmechanik widerspricht erneut unserer Alltagsvorstellung: Die beiden Photonen sind nie getrennt, auch wenn sie räumlich voneinander entfernt sind, bleiben sie immer eine gemeinsame Einheit, ein Objekt. Sie sind miteinander verschränkt.

Die Verschränkung von Mikroobjekten widerspricht also unserer räumlichen Separierung, unserer lokalisierten Wahrnehmung der Objekte unserer Welt. Sie ist aber ein gewaltiges Werkzeug der Quantenmechanik. Mit ihr erklärt man u.a. die Supraleitung (die verschränkten Paare von Elektronen heißen Cooper-Paare) und mit ihr ist das erste „Beamen“ eines Mikroobjektes gelungen.

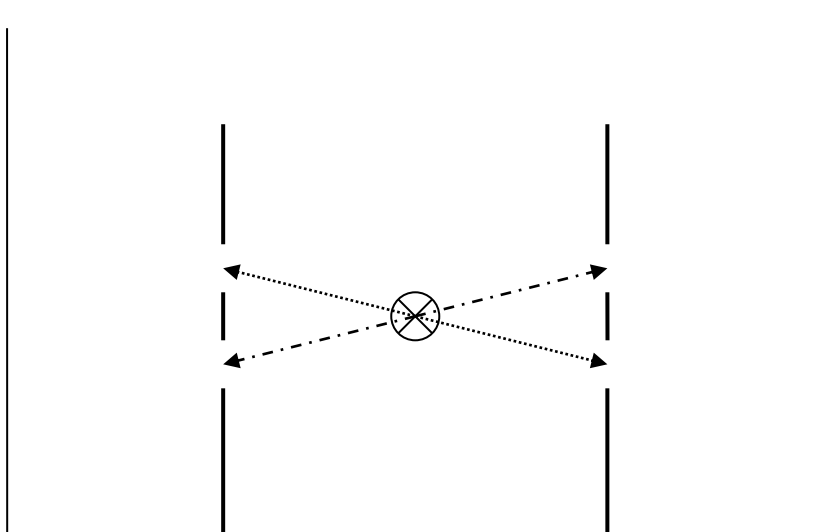


Abb.4: Der doppelte Doppelspalt

Wird nun an Stelle des Detektors der linke Doppelspalt eingebaut, so zerstört dessen Weginformation für das linke und damit auch das rechte Photon. Und schon entsteht auf der rechten Seite ebenfalls ein Interferenzmuster. Wenn das linke Photon durch Wechselwirkungen mit der Umgebung erfährt, ob ein ein- oder ausgeschalteter Detektor oder ein Doppelspalt im Weg ist, dann hat diese Information auch gleichzeitig das rechte Photon und verhält sich beim Aufbau oder Nichtaufbau des Interferenzbildes entsprechend.

In der Praxis muss man die miteinander verschränkten Photonenpaare über die gemeinsame Ankunftszeit auf den jeweiligen Schirmen identifizieren.

### Das Quantenradiergummi

Wird die Information wieder ausgelöscht (wegradiert), so kann man das Interferenzmuster rekonstruieren.

Diese erstaunliche Eigenschaft der Quantenwelt soll an einem einfachen Beispiel erläutert werden.

Wir betrachten einen Doppelspalt, bei dem wir Informationen über den Weg des Lichtes durch zwei senkrecht zueinander stehende Polarisationsfolien an den Spaltöffnungen erhalten haben. Untersucht man die Polarisation des auf dem Schirm ankommenden Lichtes, so kann

erkannt werden, durch welche Öffnung das Licht gegangen ist. Bei diesem Experiment erhält man kein Interferenzmuster.

Nun kann man aber die Weginformation, die ja in der Polarisationsrichtung enthalten ist, durch einen weiteren Polarisationsfilter löschen, dessen Einstellung genau zwischen derjenigen der ersten beiden Filter ist (also  $45^\circ$  gegenüber  $0^\circ$  und  $90^\circ$ ). Dieser dritte Filter behandelt nun die beiden ankommenden senkrecht zueinander polarisierten Lichtwellen identisch, er lässt jeweils nur 50% der Intensität durch, die andere Hälfte wird reflektiert. Durchgehendes und reflektiertes Licht besitzen dann die Polarisationsrichtung  $45^\circ$ , unabhängig davon durch welche Öffnung das Licht gekommen ist.

Es versteht sich von selbst, dass nun keine Information mehr vorhanden ist, durch welche der beiden Öffnungen das Licht gekommen ist. Der dritte Polarisationsfilter ist unser Quantenradiergummi.

Reflektiertes und durchgelassenes Licht zeigen nun wieder, allerdings entgegengesetzte, Interferenzmuster. Legt man die beiden Muster übereinander, so entsteht ein gleichmäßiges Grau. Die beiden Interferenzmuster heben sich zusammen genommen auf.

### Verschränkung wegen der Beschränkung?

Damit haben wir an dem konkreten Beispiel der in unserem Alltag so wichtigen Flugbahn gezeigt, dass sich die Mikrowelt nicht nur unerwartet verhält, sondern sich auch nicht mit den Begriffen beschreiben lässt, die wir in unserer Alltagssprache verwenden. Neue Begriffe, wie der der Verschränkung müssen erfunden werden und alte Begriffe wie der der Bahn haben keine Bedeutung mehr.

Unsere Alltagssprache ist natürlich im Rahmen der biologischen und geistigen Evolution aus den Fortpflanzungs- und Überlebensbedürfnissen heraus entstanden. Sie hat sich aus der Notwendigkeit entwickelt, in Sozialgemeinschaften eine komplexere Kommunikation zu ermöglichen. Die Sprache hat sich natürlich nicht entwickelt, um eine (von uns sowieso nicht vollständig erkennbare) Realität zu beschreiben. Nur die für unser Überleben wichtigen Aspekte der Realität, so fern sie in unserem Wahrnehmungssystem auftauchen, können durch unsere Alltagssprache beschrieben werden.

(Die Vollmerse Evolutionäre Erkenntnistheorie ist als unwissenschaftliche, weil nicht überprüfbare Meinung, unhaltbar!).

Diese, evolutionär eingeschränkte Fähigkeit unserer Sprache, Aspekte der Realität zu beschreiben, erschwert natürlich unser Verständnis von der Realität. Sprache hat sich ursprünglich an den Bedürfnissen der Sozial- und Kulturgemeinschaft orientiert und nicht an erkenntnistheoretischen Bestrebungen.

Wittgensteins „Worüber man nicht sprechen kann, darüber sollte man schweigen“ wollen wir uns aber nicht zu eigen machen und versuchen, Eigenschaften der Realität mit der uns zur Verfügung stehenden Sprache zu charakterisieren. Es gelingt uns teilweise durch Erfindung neuer Begriffe und teilweise nur, in dem wir festhalten, welche Alltagsbegriffe nicht zur Beschreibung der Realität verwendet werden dürfen.

### Die Realität der Quantenwelt

Im Folgenden wollen wir versuchen, Aspekte der Quantenrealität in Worte zu fassen.

#### Zufall

Quantenmechanische Prozesse finden zufällig statt. Wir kennen das von der Radioaktivität: In einer Ansammlung radioaktiver Kerne können wir nicht sagen, wann welcher Kern zerfällt, sondern nur angeben, nach welcher Zeit (der Halbwertszeit) die Hälfte der vorhandenen Kerne zerfallen ist.

In unserem Alltag kennen wir auch den Begriff Zufall, aber häufig versteckt sich dahinter eigentlich nur die Unkenntnis vielfältiger und hochkomplexer Ursachen für einen Vorgang. Der Zufall quantenmechanischer Prozesse dagegen scheint echt zu sein. Wie Bell mit Hilfe seiner berühmten Ungleichung zeigen konnte, ist keine innere Eigenschaft für das Verhalten von Quantenobjekten verantwortlich. Ebenso wenig kann man bisher die Korrelationen der Teile eines verschränkten Systems durch tiefer liegende, verborgene Parameter erklären.

Damit müssen wir ein in unserer Wirklichkeit zum Überleben wichtiges Prinzip der Wahrnehmung aufgeben, nämlich das Kausalitätsprinzip. Das schmerzt natürlich auch die Naturwissenschaften, denn eine Prämisse naturwissenschaftlichen Arbeitens ist natürlich die Annahme, dass es feste, überprüfbare und wiederholbare Kausalbeziehungen gibt. Feste, determinierte Beziehungen gibt es auch innerhalb einer quantenmechanischen Beschreibung, z.B. bei der Entwicklung einer Wellenfunktion oder eines quantenmechanischen Zustandes aber eben nur innerhalb des statistischen Begriffsystems der Quantenmechanik und nicht beim Übergang zur klassischen Welt.

In dieser klassischen Welt verknüpft unsere Wirklichkeitskonstruktionsmaschine Gehirn zeitlich aufeinander folgende Wahrnehmungen durch kausale Beziehungen, unabhängig davon, ob sie durch natürliche Prozesse verbunden sind oder nicht. Das kann schließlich zum Totalausfall logischer Überlegungen führen. So bilden sich viele Menschen ein, dass zwischen dem Ereignis A (Geburtstermin) und dem Ereignis B (Stellung eines Planeten) eine Beziehung existieren muss. Diese Einbildung ist so tief in die kognitiven Strukturen eingebrannt, dass man mit Astrologiegläubigen eigentlich nicht darüber reden kann. Entsprechendes gilt natürlich auch im religiösen Bereich, z.B. bei der Beobachtung sog. Wunder und Erscheinungen. Sie sind ein Phantasieprodukt unserer Wirklichkeitskonstruktion, angelegt zur Rettung des Kausalprinzips, mit dem wir ja so gut in der Evolution unsere Welt „verstehen“ und in ihr überleben konnten.

Der quantenmechanische Zufall zeigt uns, dass die Kausalität unserer Alltagswelt keiner realen Eigenschaft der Mikrowelt entspricht.

Kants berühmtes Kausalgesetz ist nicht auf die Realität anwendbar, denn es setzt die genaue Kenntnis einer Ursache voraus. Aber dies verhindert die Unbestimmtheitsrelation. Wäre es anwendbar, so würde das Zufallsverhalten von quantenmechanischen Prozessen das Kausalprinzip als ungültig erweisen. Kants Kausalgesetz ist also in der Realität weder anwendbar noch gültig!

### Verschränkung

Ein System, von dem wir annehmen, dass es aus Teilsystemen besteht, kann trotz der Möglichkeit, die Teilsysteme separiert wahrzunehmen, durch eine einzige Wellenfunktion beschrieben werden. Unsere Wahrnehmung täuscht uns also, das System besteht eigentlich nicht aus den Teilsystemen. Die getrennte (auch begriffliche!) Wahrnehmung ist das Ergebnis der Konstruktion unseres Gehirnes. Sie dient der Vereinfachung und der leichteren Prognostizierung überlebenswichtiger Verhaltensweisen. Deswegen müssen wir diesen sprachlichen Zirkelschluss durchführen: Das Objekt besteht nicht aus den beiden Teilobjekten, aus denen wir es zusammensetzen. Durch die Erfindung des neuen Wortes „Verschränkung“ umgehen wir das sprachliche Problem. Wir nennen die Teilobjekte zu einem Gesamtobjekt verschränkt.

Der räumliche Abstand, und nach dem orientiert sich unsere Wirklichkeitskonstruktion ja, hat nichts mit der Separierung von Objekten zu tun. Noch über eine Strecke von 10 km ist die Verschränkung von Mikroobjekten experimentell nachgewiesen. Schließlich müssen wir auch eine Verschränkung der Elektronen im Atom zum Objekt Elektronenhülle annehmen, nur so lassen sich die Energiezustände der Atome genau berechnen. Elektronen, die wie die Planeten um die Sonne um ihren Atomkern kreisen, die gibt es nicht.



## Superposition

Quantenmechanische Zustände können sich zu neuen Zuständen überlagern. Dies widerspricht unserer zweiwertigen, „entweder-oder“ Logik. Die Katzen unserer Alltagswelt kommen entweder nur tot oder nur lebendig vor. Eine Katze, die in einem Überlagerungszustand von tot oder lebendig ist, hat es in der Evolution nie gegeben und deswegen gibt es in unserer konstruierten Alltagssprache auch keinen Begriff dafür.

In der mathematischen Sprache der Quantenwelt kann man aber ein Symbol für diesen Zustand angeben:

Wir wollen dies am Beispiel von Schrödingers Katzenexperiment verdeutlichen, an dem der Unterschied zwischen Wirklichkeit und Realität deutlich wird (aber von Schrödinger benutzt wurde um die Quantenmechanik abzulehnen, da er der konstruierten Wirklichkeitsvorstellung des Menschen einen höheren Wahrheitsgehalt als der Realität zuordnen wollte, so wie es in der Evolutionären Erkenntnistheorie heute immer noch der Fall ist).

In einem Kasten befindet sich eine Katze, vollständig im Zustand „lebendig“, den wir durch die Zustandsfunktion  $\psi_L$  beschreiben wollen. Dazu gibt es ein radioaktives Präparat, das mit einer Wahrscheinlichkeit von 50% innerhalb eines Tages einen Zerfall hat, einen Hammer und eine Blausäurekapsel. Zerfällt das radioaktive Präparat, so wird über einen Geiger-Zähler der Hammer auf die Kapsel geschlagen, so dass die Blausäure ausströmt und die Katze garantiert tötet. Der tote Zustand der Katze wird durch die Funktion (das sprachliche Symbol)  $\psi_T$  beschrieben.

Der Kasten ist verschlossen, und deshalb wissen wir am Ende des Tages nicht, ob das radioaktive Präparat einen Zerfall hatte oder nicht. Um zu wissen, ob die Katze noch lebt, müssen wir den Kasten öffnen. Springt uns die Katze in die Arme, so wissen wir (laut unserer Alltagsvorstellung), dass sie auch schon vor dem Öffnen des Kastens gelebt haben muss.

In der Mikrowelt ist das anders. Das Quantenobjekt Katze befindet sich am Ende des Tages in einem Superpositionszustand aus lebendig und tot, der durch das Symbol  $\psi = c_L\psi_L + c_T\psi_T$  beschrieben wird. Die Vorfaktoren  $c_L$  und  $c_T$  beschreiben die Wahrscheinlichkeiten, mit der die beiden Teilzustände im Superpositionszustand enthalten sind, hier sind beide Zahlen 50%. Für diesen Superpositionszustand haben wir in unserer Alltagssprache kein Symbol, er existiert aber, jedenfalls so lange, bis ein Beobachter im Kasten nachsieht und das System dadurch z.B. in den Zustand „lebendig“ ( $c_L = 1$ ,  $c_T = 0$ ) übergeht.

Wir werden noch sehen, dass dazu kein Beobachter im klassischen Sinn notwendig ist, sondern dass das quantenmechanische System durch Wechselwirkungen mit anderen Systemen diesen Übergang in einen der klassisch möglichen Zustände von allein erzwingt (Dekohärenz).

Zustände, die sich überlagern können, nennt man kohärent. Nicht mehr überlagerungsfähige, klassische Zustände dagegen dekohärent. Je einfacher das System ist und je besser es gegen andere Systeme isoliert ist, desto länger dauert der Übergang von kohärenten zu dekohärenten Zuständen.

Unsere makroskopische Katze in seiner nicht isolierten Umgebung ist natürlich nur eine unvorstellbar kurze (für uns nicht messbare) Zeit in der Superposition aus tot und lebendig. Anders sieht es bei einzelnen isolierten Atomen aus, hier vergehen messbare und im Experiment auch nachgewiesene Zeiten, bevor sie aus der Superposition möglicher Zustände in einen bestimmten Zustand übergehen.

Wie schwierig unsere Sprache das Denken gestaltet (weil sie eben an der Wirklichkeit und nicht an der Realität orientiert ist), sieht man am Beispiel der Neutrinos. Wir kennen drei Neutrinosorten, die wir mit Elektronenneutrino, Müonenneutrino und Tauneutrino bezeichnen. Im Zentrum der Sonne entstehen durch die Kernfusion Elektronenneutrinos. Als es vor 20 Jahren gelang diese Neutrinos nachzuweisen, stellte man fest, dass wir nur ca. 67% der erwarteten Menge registrieren konnten. Seit etwa einem Jahr wissen wir, dass die Ursache in einer Umwandlung der Elektronenneutrinos (die ausgesandt werden und die nur

nachgewiesen und untersucht wurden) in Müonenneutrinos liegt. Inzwischen wurden auch die bisher nicht beachteten Müonenneutrinos registriert und die Anzahl aller von der Sonne registrierten Neutrinos stimmt mit der erwarteten Menge überein. (Unser Modell der Sonne war also richtig, das Standardmodell der Elementarteilchenphysik aber nicht). Diese Umwandlung ist aber keine Wechselwirkung im klassischen Sinn, sondern liegt daran, dass die Neutrinoarten eigentlich nur in einer Superposition aus den drei Arten existieren:  $\psi = c_1\psi_1 + c_2\psi_2 + c_3\psi_3$ . Bei der Entstehung ist  $c_1 = 1$  und  $c_2 = c_3 = 0$ . Durch Wechselwirkung während des Fluges, vor allem beim Durchqueren der Erde, verändern sich die Wahrscheinlichkeiten für die anderen Zustände, so dass bei einer Wechselwirkung mit der Nachweisapparatur die Superposition nicht immer in den dekohärenten Zustand des Elektronenneutrinos übergeht, sondern manchmal eben als Müonen- oder Tauneutrino auftaucht und somit von der Registrierung früher nicht erfasst wurde.

Die Superposition wird auch bei möglichen Quantencomputern eine wichtige Rolle spielen. Zu ihr gehört nämlich eine mehr als zweiwertige Logik, so dass in der Superposition alle möglichen Zustände gleichzeitig vorhanden und damit berechnet sind. Leider kann man nur einen der möglichen Zustände als dekohärenten Zustand auslesen.

Die Superposition ist auch die Ursache dafür, dass man einen quantenmechanischen Zustand nicht kopieren kann. Die Superposition besteht aus unendlich vielen Möglichkeiten der Überlagerung (die durch alle Kombinationen der  $c_1$  und  $c_2$ , deren Summe 1 ergibt, beschrieben werden), und eine unbegrenzte Anzahl von Dingen kann in endlicher Zeit nicht kopiert werden.

### Unbestimmtheiten

Das Modell der Quantenmechanik ergibt, dass bestimmte Größen nicht gleichzeitig genau existieren.

Heisenberg hat dies zuerst in der Unbestimmtheitsrelation UBR zwischen Ort  $x$  und Impuls  $p = m \cdot v$  formuliert, die sich unmittelbar aus der Beschreibung der Mikroobjekte durch Wellenpakete ergibt. Die Unbestimmtheiten  $\Delta x$  und  $\Delta p$  hängen voneinander ab, für ihr Produkt gilt:  $\Delta x \cdot \Delta p > h/2\pi$ . Je bestimmter der Ort ist, desto unbestimmter ist der Impuls des Objektes und umgekehrt.

Durch kein Experiment lässt sich die UBR umgehen, trotzdem ist sie nicht die Folge eines experimentellen Einflusses oder einer Störung sondern eine ontologische Eigenschaft eines Mikroobjektes. Wir haben schon die Folgerung diskutiert, dass es deswegen keinen Sinn macht von einer Bahn oder Bewegung eines Mikroobjektes zu sprechen. Das scheint auch den Versuch, die Quantenmechanik auf ein chaotisches Subsystem zurückzuführen, unmöglich zu machen.

Solche Unbestimmtheiten gibt es auch zwischen anderen Größen: Es existieren zum Beispiel nicht bestimmte Drehimpulsbestandteile eines Objektes zur gleichen Zeit. Sehr weitreichende Konsequenzen hat auch die Unbestimmtheit von Energie  $E$  und Zeit  $t$ :

$\Delta E \cdot \Delta t > h/2\pi$ . Für den Zeitraum  $\Delta t$  ist die Energie eines Mikroobjektes unbestimmt, d.h. für beliebig kurze Zeiträume kann ein beliebig hoher Energiebetrag  $\Delta E$  «aus dem Nichts» auftauchen.

Der in der makroskopischen Physik so bedeutende Energieerhaltungssatz ist im Mikrokosmos nur gültig, wenn makroskopische, also klassische Eigenschaften beschrieben werden.

Mit der UBR von Energie und Zeit kann man die Struktur des Vakuums erklären: Das Vakuum enthält, selbst nach dem Entfernen sämtlicher Materie und Strahlung, ein Meer aus Teilchen- und Antiteilchenpaaren, die unter „Verletzung“ des Energieerhaltungssatzes und mit „Erlaubnis“ der UBR auftauchen und verschwinden. Diese sog. virtuellen Teilchen werden natürlich auch durch Wellen beschrieben. Schränkt man z.B. durch dicht beieinander

stehende Platten die Möglichkeit für solche Wellen ein, so erzeugt das außerhalb der Platten befindliche Vakuum, in dem eine größere Vielfalt virtueller Teilchen möglich ist, einen Druck, der die Platten zusammenführt. Zwischen den Platten können nur die virtuellen Teilchen auftauchen, deren Wellenlängen ganz zwischen die Platten passen. Es sind also weniger virtuelle Teilchen zwischen den Platten als außerhalb, und das erklärt den Druckunterschied. Dieser sog. Casimir-Effekt ist experimentell überprüft worden. Die Kraftwirkung liegt im Bereich von mN!

An dem Wort „virtuell“ erkennt man auch das sprachliche Problem. Die virtuellen Teilchen sind ganz normale Objekte. Es gibt keinen Unterschied zwischen der Substanz eines Elektrons, das virtuell und das nicht virtuell ist. Mit dem sprachlichen Konstrukt „virtuell“ beschreiben wir keine Objekteigenschaft sondern die nicht mögliche Objekteinordnung in klassische Vorstellungen.

### Reduktionismus

Mit Erfolg beschreiben wir die Funktion der makroskopischen Welt dadurch, dass wir sie in kleine Einheiten zerlegen, deren Prinzip wir verstehen können.

Dies gelingt bei quantenmechanischen Objekten nicht. Sie sind immer mehr als die Summe ihrer Teile. Ein Cooper-Paar aus zwei Elektronen zum Beispiel ist ein Objekt, das sich reibungsfrei durch ein Metallgitter bewegen kann (Supraleitung). Und miteinander verschränkte Photonen bilden eine neue Einheit, ein räumlich ausgedehntes, aus nicht lokalisierbaren Teilen bestehendes Objekt.

Letztlich gilt Entsprechendes natürlich auch in unserer Makrowelt: Ein Tisch z.B. besteht nicht aus Atomen, er kann nur in Atome zerlegt werden. Seine Eigenschaften als Tisch aber können auf der Basis der Atome nicht formuliert werden.

Auch ein lebender Organismus besteht aus Atomen, das Leben aber ist eine emergente Eigenschaft des Organisationsprinzips der Atome, genau wie unser Bewusstsein eine emergente Eigenschaft des neuronalen Netzes ist.

Die reduktionistische Vorgehensweise der Physik erkennt man am Bestreben, die vorhandene Substanz des Kosmos auf wenige elementare Objekte und die vorhandenen Wechselwirkungen auf eine grundlegende Kraft zurückzuführen. Aber lässt sich wirklich mit der Urkraft und den Elementarteilchen der Kosmos verstehen?

### Individualität und Klonen

Die klassische Welt wird von Individuen bewohnt, die Quantenwelt von Klonen. Zwei klassische Objekte können nie in jeder Hinsicht genau gleich sein. In der Quantenwelt lassen sich aber Mikroobjekte so präparieren, dass sie prinzipiell ununterscheidbar sind. Dies liegt u.a. daran, dass sich Quantenobjekte diskret, eben gequantelt, verhalten und nicht kontinuierlich, wie klassische Objekte, alle möglichen Eigenschaften annehmen können.

### Wechselwirkungen

Die Wechselwirkungen zwischen Objekten können nicht beliebig klein gemacht werden, es gibt eine durch das Plancksche Wirkungsquantum  $h$  beschriebene kleinstmögliche Wechselwirkung, so etwa wie es das Bit als kleinstmögliche Informationseinheit gibt.

### Wellen als Werkzeuge

Die Beschreibung der Mikroobjekte durch Wellen erfordert Wellenpakete, d.h. Überlagerungen unendlich vieler Wellen verschiedener Wellenlängen. Diese Wellenpakete sind aber nicht stabil, für ein Elektron fließen sie schon nach  $10^{-15}$  Sekunden auseinander (der Mensch als klassisches Objekt wird durch Wellenpakete beschrieben, die  $10^{10}$  Jahre stabil sind). Deswegen sollte man den Wellen keine reale Bedeutung zuordnen, sie scheinen nur Werkzeuge zur Beschreibung der Realität zu sein. Die Frage, ob Licht Teilchen oder Welle „ist“, ergibt somit keinen Sinn.

### Diskrete Energieniveaus

Durch Kräfte eingesperrte Quantenobjekte können wegen der Welleneigenschaften nicht mehr jede beliebige Energie annehmen, sondern nur die Energien, deren zugehörige Wellenlängen in den Bereich der Einsperrung „passen“ (Stehende Wellen). Die diskreten Energiezustände der Mikroobjekte erkennt man z.B. an den diskreten Emissions- und Absorptionslinien der Atome. Diskrete Energieniveaus gestatten auch nur die Aussendung bestimmter (gequantelter) Energiebeträge. Diese Idee hatte Max Planck 1900. Sie ermöglichte ihm die Erklärung der spektralen Energieverteilung (Plancksche Kurven).

### Dekohärenz

Wenn quantenmechanische Objekte miteinander, d.h. mit ihrer Umgebung in Wechselwirkung treten, dann verlieren sie ihre Eigenschaften und entwickeln klassisches Verhalten. Mit dieser Dekohärenz werden wir uns gleich noch näher beschäftigen. Um klassische Eigenschaften zu erhalten, reicht für ein Quantenobjekt mit der Ausdehnung  $1 \mu\text{m}$  die Wechselwirkung mit Photonen der allgegenwärtigen kosmischen 3K-Strahlung!

### **Warum wir die Quantenmechanik nicht verstehen können**

Viele Physiker und Philosophen haben unterschiedliche Konzepte und Ideen zur Interpretation der Quantenmechanik veröffentlicht, die teilweise widersprüchlich und manchmal noch unverständlicher als der Formalismus der Quantenmechanik sind.

Diese Schwierigkeit ist darin begründet, dass nicht mit ausreichender Präzision zwischen Wirklichkeit und Realität unterschieden wird.

### Wirklichkeit und Realität

Ich möchte hier noch einmal die wichtigsten Thesen der konstruktivistischen Erkenntnistheorie zusammenfassen.

Unser Wissen ist kein Abbild einer externen Realität, sondern eine Konstruktion, die durch den Erkenntnisprozess und der sinnlichen Wahrnehmung ermöglicht wird. Da wir aus logisch trivialen Gründen ja nicht entscheiden können, ob und wie weit die so konstruierte Wirklichkeit mit der Realität übereinstimmt, bleibt uns nur die innere Wirklichkeit, während uns die externe Realität letztlich nicht zugänglich ist.

Konstruktivisten gehen natürlich von einer real existierenden Welt aus, sie sind ontologische Realisten. In der realen Welt gibt es Objekte, die verschiedene Eigenschaften haben. Aspekte dieser Eigenschaften, die im Rahmen unserer Evolution für die Fortpflanzung und das Überleben Bedeutung hatten bzw. haben, können wir sicher bestimmten Aspekten unserer Wirklichkeitskonstruktion zuordnen.

Übrigens, meine Wirklichkeit ist nicht die Konstruktion meines Ichs, denn mein Ich ist selbst eine Konstruktion meines Gehirnes.

Auch Wissenschaften sind unter sozialen und kulturellen Gegebenheiten konstruierte Vorstellungen und somit sind ihre Aussagen ja bestmöglich an die von uns konstruierte Wirklichkeit angepasst. Ich sage „bestmöglich“, weil wir im Bereich der quantenmechanischen Eigenschaften schon deutliche Abweichungen gesehen haben.

Dadurch, dass wissenschaftliche Aussagen widerlegbar sein müssen und nur so lange Bestand haben, wie sie nicht durch Beobachtungen widerlegt sind, unterscheiden sie sich von allen esoterischen, astrologischen und religiösen Aussagen. Und deswegen ist für mich das wissenschaftlich konstruierte Weltbild immer noch „realitätsnäher“ als andere Weltbilder.

Beschäftigt man sich mit der Evolution unseres Gehirnes, so entsteht die These, dass unser Gehirn nicht als Organ zum Erkennen der Welt entstanden ist, sondern sich als „Sozialorgan“ aus den Notwendigkeiten eines sozialen, gemeinschaftlichen Lebens in den ersten

vormenschlichen Gemeinschaften entwickelt hat. Vielleicht bildet es letztlich nur die Aspekte der Realität ab, die wir zum sozialen Leben und Überleben benötigen. Unsere stammesgeschichtlich erworbene Wirklichkeit reicht nicht aus, die reale Natur von Licht, Elektronen, Vakuum, Feldern kurz eines großen Teiles unserer Welt zu erfassen.

### Verstehen und Erklären

Inzwischen sind wir schon von der genetischen zur kulturellen Evolution gewechselt. Dies ermöglichen die Prägungsmöglichkeiten, die unser Gehirn vor allem in den ersten Lebensjahren besitzt und natürlich unsere Fähigkeit, Objekte der Wirklichkeit durch Symbole zu bezeichnen und mit diesen Symbolen in einer eigenen „geistigen“ Weise weitere Konstruktionen vorzunehmen. Ich spreche von der Entwicklung der Sprache als allen Menschen gemeinsame Form, Objekte und Eigenschaften durch Symbole zu repräsentieren. Hierzu gehört aber auch die, nur wenigen Menschen zugängliche, Mathematik, die eine eigene, nicht immer sprachlich zu erfassende Symbolik besitzt und eigene Spielregeln, mit denen aus diesen mathematischen Symbolen neue Symbole konstruiert werden.

Unsere Sprache allein kann die Realität nicht erfassen, und deshalb darf sie nach Wittgenstein, auch nicht zur Beschreibung der Realität missbraucht werden. Schon an den Begriffsbildungen zu Gefühlen und Moral wird deutlich, dass unsere Sprache nur in unserer Wirklichkeit konstruiert und von Bedeutung ist. Wir vergessen dies, und ordnen unseren Gefühlen und unseren moralischen Sätzen eine eigene, von uns unabhängige, Existenz zu. Dies lehnte Wittgenstein schon vor über 80 Jahren ab und die moderne Forschung scheint ihm Recht zugeben: Gefühle sind, teilweise auch in der frühen Kindheit erlernte, konstruierte Selbstwahrnehmungen einer Abweichung zwischen verschiedenen IST- und SOLL-Zuständen unseres Organismus (einschl. unserer Selbstwahrnehmung). Unsere moralischen Regeln sind konstruierte, intersubjektive Selbstwahrnehmungen sozialer Funktionsabläufe und Beziehungen, die wir schon in früher Kindheit internalisiert bekommen, so dass es uns nahezu unmöglich ist, sie als Scheintatsachen zu entlarven.

Viele philosophische Probleme kommen letztlich nur dadurch, dass wir die Funktion der Sprache bei der Beschreibung und Wahrnehmung der Welt nicht richtig hinterfragen. Und letztlich bestimmt die Sprache unsere Fähigkeit, die Welt zu verstehen und zu erforschen.

Menschen sind eigentlich nicht gleich. Ihre Sprache bestimmt jeweils ihre Welt und die Grenzen ihrer Sprache sind die Grenzen ihrer Welt!

Nach diesem Ausflug in die Welt des Konstruktivismus wird jetzt auch der Unterschied zwischen Verstehen und Erklären deutlich:

- Etwas verstehen heißt, es in den Sinnzusammenhang unserer Sprache einzuordnen.
- Etwas erklären bedeutet, es auf allgemeine, grundlegendere Gesetzmäßigkeiten zurückzuführen.

Jetzt wird deutlich warum wir die Quantenmechanik nicht verstehen können: Wir müssten Aspekte der Realität mit Begriffen unserer Wirklichkeit in den Sinnzusammenhang unserer Sprache einordnen. Nach all dem Gesagten, wäre es schon ein extrem überraschender Zufall, wenn das gehen würde....

Aber: Wir können die Quantenmechanik erklären! Wir können die Erscheinungen der Mikrowelt auf allgemeine Gesetzmäßigkeiten wie die Schrödinger Gleichung und die Unbestimmtheitsrelation zurückführen und das ohne innere und äußere Widersprüche.

Dies soll erneut an einigen Beispielen verdeutlicht werden:

- Auf Grund der Unbestimmtheit besitzt ein Photon eines monochromatischen Lasers mit der Frequenzunbestimmtheit von 1 Hz eine Ortsunbestimmtheit von 50000 km! Wir stellen uns aber Photonen als kleine Teilchen vor, die in einem wenige Dezimeter großem Laser entstehen und aus ihm herausfliegen....

- Werden Mikroobjekte durch kohärente Zustände beschrieben, so können wir ihnen keinen Weg zuordnen. Erst eine Wechselwirkung mit der Umgebung zerstört diese kohärenten Zustände (Dekohärenz), z.B. durch die innere Wechselwirkung von 3 Mikroobjekten schon in  $10^{-4}$  Sekunden. Wege sind also keine intrinsischen Raum-Zeit-Eigenschaften der Mikroobjekte, sondern es sind emergente Eigenschaften, die sich erst aus der Wechselwirkung der Mikroobjekte ergeben. Und erst auf dieser Ebene können wir dies mit unserer Sprache erfassen.

### **Die Umkehrung des Erklärungsanspruchs**

Wir können das Verhalten der Quantenobjekte erklären aber nicht verstehen. Durch unsere Evolutionsgeschichte verstehen wir die klassische Alltagswelt. Die Aufgabe der Physik ist es nun, diese klassische Alltagswelt zu erklären. Diese Welt lässt sich durch das Attribut „lokal-realistisch“ beschreiben.

Was bedeutet das?

Lokal ist eine Beschreibung, wenn ich das zu beschreibende Objekt separieren kann, also von seiner Umgebung losgelöst wirklichvollständig erfassen kann. Realistisch ist eine Beschreibung, wenn ich davon ausgehe, dass zu jeder messbaren Größe auch eine real vorhandene Eigenschaft des Objektes gehört, also z.B. Objekte Ort und Impuls besitzen oder eine Bahn haben.

Da sich klassische Eigenschaften durch die Wechselwirkung der Quantenobjekte bilden, ist die klassische, lokal-realistische Welt eine Folge der Quantenwelt. Nicht die Quantenwelt müssen wir verstehen (das geht gar nicht, Quanteneigenschaften können nicht durch lokal-realistische Annahmen hergeleitet werden), sondern erklären, wie sich aus der Quantenrealität die beobachteten klassischen Strukturen und Eigenschaften bilden.

Ein historischer Versuch hierzu ist das Bohrsche Korrespondenzprinzip: Für große Quantenzahlen (d.h. für hohe Energien) gehen die Aussagen der Quantenmechanik in korrespondierende Aussagen der klassischen Physik über.

So lässt sich z.B. der Quantensprung vom Zustand  $n = 250$  des Wasserstoffatoms auf den Zustand  $n = 248$  allein mit den Mitteln der klassischen Elektrodynamik berechnen. Solche hochangeregten Wasserstoffatome, die im interstellaren Raum durch die bei diesen Übergängen abgegebene Radiostrahlung beobachtet werden, verhalten sich klassisch.

### **Die Dekohärenz erzeugt die klassische Welt**

In unserer makroskopischen Welt beobachten wir keine Superpositionen: Bei einer Messung oder Wahrnehmung ist ein Objekt nur an einem Ort, oder unsere Katze entweder tot oder lebendig! Damit haben wir nur die Information über einen möglichen Zustand, nämlich den, der faktisch geworden ist.

In der Superposition aber sind alle Informationen über alle möglichen Zustände enthalten. Nur bei absolut perfekter Isolation bleiben diese Informationen im System erhalten. Normalerweise aber gehen diese Informationen in die Umgebung, die zu den möglichen Zuständen gehörenden kohärenten Wellen werden gestört, dadurch hören die festen Phasenbeziehungen der Wellen auf, die Kohärenz wird beendet und es entsteht der beobachtbare dekohärente Zustand.

Durch Wechselwirkungen entsteht also aus den Möglichkeiten das Faktum, wird Kohärenz zur Dekohärenz.

Je größer und je heißer ein System ist, desto mehr Möglichkeiten hat es mit seiner Umgebung in Wechselwirkung zu treten und desto schneller bildet sich der beobachtbare klassische Zustand heraus: Die Interferenzen von  $C_{70}$  – Molekülen am Doppelspalt verschwinden, wenn das Molekülgas auf über  $700\text{ }^{\circ}\text{C}$  erhitzt wird.

Die Entstehung der Dekohärenz ist kein neuer Prozess, sondern wird vollständig durch die bekannten quantenmechanischen Regeln und Wechselwirkungen beschrieben. Damit kann die Quantenmechanik erklären, wie es zur klassischen Welt kommt. Sprachliche Konstrukte, wie Dualismus oder Komplementarität (Ort und Impuls sind zueinander komplementäre Größen), müssen nicht länger unser Unvermögen, die Quantenwelt zu verstehen, kaschieren.

Alle Messergebnisse, Quantensprünge und Lokalisierungen sind das Ergebnis von sehr schnellen aber stetig ablaufenden Dekohärenzvorgängen. Die Reduktion der Wellenfunktion bei einem Messvorgang von einer Welle zu einer an einem Ort befindlichen Linie als eigenständiges, aber nicht erklärtes, Prinzip der Quantenmechanik ist nicht mehr nötig. Der Messprozess scheint durch die Dekohärenz erklärbar und beschreibbar zu sein. Natürlich ist, da die Dekohärenz ja eine quantenmechanische Eigenschaft ist, das Ergebnis des Messprozesses nicht vorhersagbar. Das fordert die Quantenwelt auch nicht, nur unsere klassisch geprägte Vorstellung würde das wünschen.

Nur Mikroobjekte lassen sich so gut von ihrer Umgebung isolieren, dass sie in einem kohärenten Zustand bleiben können und dabei alle bekannten Quanteneigenschaften zeigen.

Die Quantenmechanik gilt natürlich auch für makroskopische Objekte. Aber je größer ein Objekt ist, desto mehr Möglichkeiten hat es, mit seiner Umgebung (und sei es mit der kosmischen Hintergrundstrahlung) in Wechselwirkung zu treten. Deswegen verlieren die möglichen Superpositionen kohärenter Wellen ihre Bedeutung und es bildet sich der beobachtete klassische Zustand.

Klassische Zustände aber sind also schon dekohärent, weitere Wechselwirkungen können ihnen nichts anhaben. Sie bilden die klassische Welt, eine Welt in der es nur tote oder lebendige Katzen gibt und keine Mischformen.

Eine Welt, die für das Erlernen unserer Sprache und Begriffe verantwortlich ist und die uns deshalb das Verstehen der Quantenwelt nicht nur unmöglich sondern auch unnötig macht!

Die Quantenwelt erklärt dagegen die klassische Welt.

Nachwort:

Es gibt eine Theorie, wonach das Universum, falls jemals jemand dahinter kommen sollte, wozu und weswegen es existiert, sofort verschwinden und durch noch etwas Bizarrereres und Unerklärliches ersetzt werden wird. Es gibt eine andere Theorie, wonach dies bereits geschehen ist.

Douglas Adams, Das Restaurant am Ende des Universums