

Das Bekannte und das Unbekannte

Ein Versuch über das Unerreichbare des Realen

von Kim Joris Boström
Freiburg, 9.12.1995

I	Introduktion	1
II	Zur Struktur der Erkenntnis.....	3
III	Gewißheit und Wahrscheinlichkeit	5
IV	Kurze Darstellung der Formalismen der Quantentheorie.....	7
IVa	System, Zustand, Observable	7
IVb	Reiner Zustand, Eigenzustände, Eigenwerte	8
IVc	Vollständiger Satz von Eigenschaften.....	10
IVd	Unverträglichkeit, Unschärfe	11
IVe	Superposition von Zuständen, Projektion	13
IVf	Zustandsreduktion.....	14
V	Schrödinger's Katze	16
VI	Interpretationen und Lösungsversuche	18
VIa	Verschiedene Ansätze	18
VII	Reduktionsansatz.....	19
	Literatur	26

I **Introduktion**

Würden Sie zustimmen, wenn ich sagte: "Das Ideale ist unerreichbar"?

Diejenigen unter Ihnen, die widersprechen, könnte man als "Idealisten" bezeichnen. Sie glauben, daß auch das Ideale realisierbar ist.

Diejenigen unter Ihnen, die zustimmen, könnte man als "Realisten" bezeichnen. Sie glauben, daß nichts Ideales wirklich realisierbar ist und das alles Realisierte nicht ideal sein kann. Sie würden sicherlich der platonischen Ideenlehre folgen und die Ideen aller möglichen Objekte irgendwo jenseits des Erfahrbaren ansiedeln, den erfahrbaren Objekten jedoch nur zugestehen, allenfalls Abbilder dieser Ideale zu sein. Das Ideale könnte man vielleicht dazu benutzen, es anzustreben, aber erreichen wird man es nie. Es übernehme die Rolle eines Fluchtpunkts in der perspektivischen Zeichnung. Alle Linien, die in die unendliche Ferne weisen, laufen auf den Fluchtpunkt zu und orientieren sich an ihm. Auf diese Weise entsteht ein Bild mit dem Eindruck von Tiefe, auch wenn es eigentlich nur ein flaches Blatt Papier ist. Ohne Fluchtpunkt keine klare Struktur der Tiefe, keine Ausrichtung in die Ferne. So erscheint das "Ideale" unerreichbar und alles, was wir hier um uns herum vorfinden, nennen wir "real". Das Reale orientiert sich am Idealen und der Realist orientiert sich am Realen.

Jetzt frage ich aber:

Wie erreichbar ist das Reale?

*

Ich stehe hier vorne eigentlich, um Sie über das Paradoxon der sogenannten "Schrödinger'schen Katze" zu informieren, Sie wundern sich bereits wahrscheinlich, warum ich mit einem anderen Thema beginne und über das "Bekanntes und das Unbekannte" referiere. Nun, bevor ich Ihnen die Schrödinger'sche Katze vor die geistige Nase setze, ist es nötig, daß Sie einige grundlegende

Gedanken der Philosophie und der Quantenphysik nachvollziehen, damit Sie verstehen, wo genau das Paradoxon eigentlich liegt. Unter sehr vielen möglichen Formen der Darstellung dieses Gedankenexperiments gibt es zwei besonders wichtige: die **historische** und die **fundamentalphilosophische Darstellung**.

In der historischen Darstellung werden der geschichtliche Zusammenhang, der zeitbezogene physikalische Wissensstand, die Meinungsverschiedenheiten zwischen Physikern und die verschiedenen Interpretationen und Lösungsversuche des Paradoxons vorgestellt.

In der fundamentalphilosophischen Darstellung wird der Zusammenhang zwischen physikalischem und philosophischem Denken hergestellt. Symbole und mathematische Operationen werden mit Bedeutung erfüllt, es gibt leicht nachvollziehbare und sehr schwer nachvollziehbare Schlüsse, wobei die Mathematik im Grunde nur zur Vereinfachung des Denkens dienen soll, da viele mathematische Schlüsse zwar anhand von Analogien anschaulich gemacht werden können, aber die Konsequenzen dieser Übertragungen sind vom begrifflichen Verstand meistens nur sehr schwer oder gar nicht nachvollziehbar. Ich stelle mich jedoch nicht auf die Seite derjenigen, die sagen: "Dies **kann** der menschliche Geist nicht begreifen." Das hat man im letzten Jahrhundert z.B. zu Fraktalen gesagt und heute kann sich jeder auf dem PC seine eigenen Fraktale basteln und anschauen. Als die Relativitätstheorie gerade im Durchbruch begriffen war, gab es nach Ansicht der meisten Physiker nur etwa drei Menschen auf der ganzen Welt, die die Relativitätstheorie verstehen würden. Heute wird sie in Schulen gelehrt und immer wieder in populärwissenschaftlichen Büchern und Magazinen in aller Anschaulichkeit erklärt. Es könnte sein, daß uns in 20 Jahren die Schrödinger'sche Katze keine Schwierigkeiten mehr bereitet. Es gibt Physiker, die das schon heute behaupten. Wenn ich ihre Lösungen und Interpretationen aber dann versucht habe, nachzuvollziehen, so erschien es mir oft, als ob sie sich an einer günstigen Stelle eine Hintertür gesägt haben, durch die sie dem eigentlichen Dilemma mehr oder weniger heimlich entwischen.

Ich habe viel Zeit auf die fundamentalphilosophische Darstellung verwendet. Einerseits, weil ich mir selbst über das Phänomen Klarheit verschaffen wollte, andererseits, weil es mir wichtig ist, daß Sie anfangen, über dieses Paradoxon auf Ihre eigene Weise nachzudenken, und nicht ausschließlich die sehr verschiedenen Gedanken anderer nachvollziehen. Denn über die "Schrödinger'sche Katze" haben sich schon einige recht schlaue Leute den Kopf zerbrochen und sind zu immer neuen Resultaten gekommen. Bis heute hat man sich aber nicht darüber geeinigt, welche dieser Interpretationen für "real gültig" erklärt werden könnte. Damit kann man tatsächlich sagen, daß das Gedankenexperiment der "Schrödinger'schen Katze" eins der bis heute ungelösten Paradoxa ist. Allerdings ist es auch nicht besonders alt. Schrödinger hat es 1935 zum ersten Mal zur Illustration des sog. "**Meßproblems**" der Quantenmechanik formuliert. Bis heute wurde es immer wieder unter neuen Aspekten betrachtet. Einige der Erklärungsversuche leiten uns zu einer neuen Weltsicht, die, wie wir sehen werden, radikal von unserer intuitiven Weltsicht abweichen kann. Daher hat das Gedankenexperiment "Schrödinger's Katze" ganz sicher den Titel eines echten "Paradoxons" verdient (griech. "para doxan" : "gegen die Meinung") . Es ist keine eigentliche "Antinomie", also kein innerer Widerspruch, denn die Quantentheorie ist in sich schlüssig und die Schrödinger'sche Katze macht ihr nicht zu schaffen. Das Problem, was wir mit ihr haben ist eher von der Art, daß die Konsequenzen der Quantentheorie, wenn man sie auf alltägliche Dinge wie Katzen überträgt, offenbar unvereinbar sind mit unserer Erfahrung. Ich sagte gerade "offenbar", ich könnte auch sagen "scheinbar", denn es **gibt** es einige Erklärungen, die dieses Dilemma auflösen, allerdings zum Teil mit dem Preis der Aufgabe unserer herkömmlichen Ansicht von dem, was wir "Realität" nennen. Damit greift die Quantentheorie im Grunde noch tiefer als die Relativitätstheorie, welche "nur" unsere Vorstellungen von Raum & Zeit auf den Kopf gestellt hat. Hier wird unsere Vorstellung von der Realität auf den Kopf gestellt.

Wir finden nicht zum ersten Mal, daß die Physik in ungewollter Weise allein durch das konsequente Weiterdenken ihrer theoretischen Erkenntnisse die Weltsicht des Menschen verändert und damit zu

einer höchst philosophischen Angelegenheit wird. Meiner Ansicht nach ist jeder Physiker auch Philosoph. Und umgekehrt ist auch jeder Philosoph in gewissem Sinne Physiker. Denn wenn er die Beziehung des menschlichen Bewußtseins zur sog. "Realität" studiert, kommt er nicht darum herum, auch die Ergebnisse der Physik zu studieren, welche sich schließlich ja nicht wie die Mathematik an idealen Gedankenkonstruktionen, sondern an der "Realität" orientiert, was auch immer das sein mag.

*

Im Rahmen dieses Seminars sind uns schon einige Paradoxa über den Weg gelaufen, die die Frage nach der Erfahrbarkeit der Realität ebenfalls immer wieder neu stellen. Zenons Bewegungsparadoxe lassen uns vermuten, daß je mehr wir über die "Realität" nachdenken, um so weiter wir uns von ihr entfernen. Wollen wir uns in diesem Sinne noch ein Stückchen weiter von ihr entfernen, indem wir noch ein bißchen weiter über sie nachdenken.

Die Schrödinger'sche Katze ist eigentlich das erkenntnistheoretische Grundproblem selbst. Das Problem der **Erfahrbarkeit der Realität**, das Problem der **Gewißheit von Erkenntnissen**, ja tatsächlich im Grunde das Thema dieses ganzen Seminars, die Frage: was ist "evident"?

*

II Zur Struktur der Erkenntnis

Ich stelle also das Paradoxon zunächst einmal vor:

{Redner holt eine große Schachtel hervor, die verschlossen ist.}

Was ist das hier?

Einige von Ihnen werden denken: "eine Schachtel", einige von Ihnen vielleicht: "eine wiederholte Ablenkung vom Thema" und manche, die sowieso schon wissen, worum es geht, denken "da ist Schrödinger's Katze drin!" Dies wirft Licht auf unsere Art zu denken:

Unsere Vorstellung von der Welt beruht auf **Vermutungen**

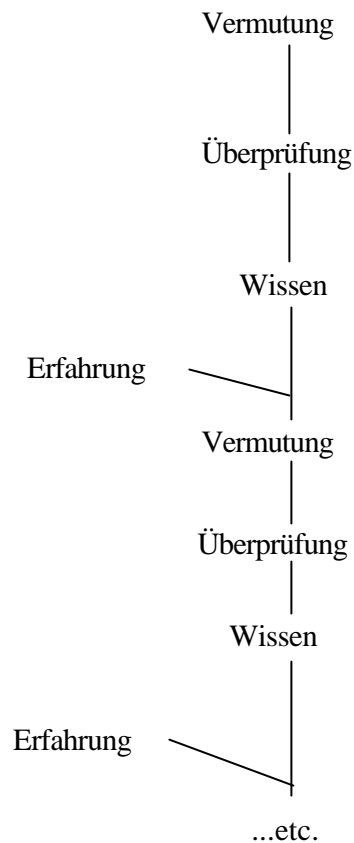
{Redner schreibt "Vermutungen" an die Tafel}

Ich zeige Ihnen ein gefaltetes Stück Karton, Sie **vermuten**, daß es sich um eine Schachtel handelt, sie **vermuten**, daß sie leer ist oder, indem sie sich an den Grund meines Hierseins erinnern, daß darin vielleicht sogar eine Katze ist, oder daß ich wenigstens auf eine solche hinweisen will. und daß in diesem Zusammenhang irgendwie der Name "Schrödinger" auftauchen wird.

Was tun Sie nun weiter? Sie versuchen, Ihre Vermutung zu **überprüfen!** Dazu bleiben sie zunächst ruhig sitzen, weil das komisch aussähe, wenn Sie jetzt hier nach vorn stürzten, um in die Schachtel zu gucken, und weil sie wissen: "es dauert nicht lang und er wird uns schon zeigen, was es damit auf sich hat." Wie kommen sie auf sowas? Nun, weil sie bisher einige **Erfahrung** gemacht haben und **wissen** daß sie sich hier in einem Seminar befinden, in dem jemand über "Schrödinger's Katze" referiert und unter Umständen **wissen** Sie auch bereits ungefähr, worum es dabei geht. Damit habe ich auch die anderen beiden wichtigen Begriffe eingeführt:

Erfahrung & Wissen

In welcher Beziehung stehen diese Begriffe zueinander?



Wie Sie sehen können, kann man an jeder Stelle der Grafik beginnen. Die Frage, was zuerst da war, Vermutung, Erfahrung, oder Wissen ähnelt der Frage, was zuerst da war, das Ei oder die Henne?

Ich werde die Begriffe etwas klarer umreißen.

Erfahrung ist eine unserer Wahrnehmung zugänglich gewordene Information, wo auch immer sie herkommt und auf welchem Wege auch immer sie den Weg in unser Bewußtsein gefunden hat.

Wissen ist strukturierte Erfahrung. Damit meine ich, daß die Erfahrung mit anderen Erfahrungen in einen Zusammenhang gebracht wird. Das setzt natürlich 1. ein Erinnerungsvermögen und 2. eine Fähigkeit der gedanklichen Strukturierung voraus, die eine Eigenschaft unseres menschlichen Bewußtseins ist.

Vermutung ist ein gedanklicher Zusammenhang zwischen Erfahrungen, die nicht alle tatsächlich gemacht worden sind.

Und schließlich:

Überprüfung ist gelenkte Erfahrung.

Insbesondere ist die Überprüfung von Vermutungen die Ergänzung der Liste von Erfahrungen, die ich in meinem gedanklichen Zusammenhang benötige.

Diese Definitionen, auf denen ich aufbauen will, sind Versuche meinerseits, Ihnen das Problem möglichst klar vor Augen zu führen. Dazu ist es nötig, sich darüber klar zu werden, welche Begriffe man gebraucht und vor allem, in welchem Sinne man sie gebraucht.

III Gewißheit und Wahrscheinlichkeit

Wann können wir aber wirklich behaupten, etwas zu **wissen**?

Angenommen, ich überprüfe eine Vermutung, ich schaue zum Beispiel in die Kiste. Dann wird sich zeigen, ob ich recht hatte mit meiner Vermutung oder nicht. Wer sagt mir aber, daß, wenn ich ein zweites Mal hineingucke, dasselbe drin ist und nicht etwas völlig anderes? Auch wenn ich eine Vermutung hundertmal für richtig befinde, niemand kann mir versichern, daß sie nicht beim hunderteinsten Male falsch ist. Oder noch schlimmer: ich komme jedesmal, wenn ich die Vermutung überprüfe, *zu einem anderen Ergebnis!* Ist dann meine Vermutung richtig oder falsch. Oder ist sie beides? Oder keins von beiden? Oder ist sie einfach nicht überprüfbar?

An dieser Stelle möchte ich den Begriff der **Wahrscheinlichkeit** einführen. Die Wahrscheinlichkeit ist einer der ehrlichsten Aussagen über unser Wissen oder Nichtwissen überhaupt. Sie könnte mir z.B. sagen, daß ich "wahrscheinlich" recht habe, oder sogar "höchstwahrscheinlich" oder nur mit "geringer Wahrscheinlichkeit", also "vielleicht", "eventuell", "möglicherweise", "vermutlich". Alles Begriffe, mit denen wir um uns werfen und damit andeuten, daß wir uns nicht so recht sicher sind.

Präzisieren wir diesen Begriff:

Wahrscheinlichkeit wird durch eine positive reelle Zahl ausgedrückt, die zwischen Null und Eins liegt.

Im Laplace-Modell berechnet sie sich z.B. durch folgendes Verhältnis:

$$\text{Wahrscheinlichkeit } P = \frac{\text{\#günstige Ereignisse}}{\text{\#mögliche Ereignisse}}$$

Beim Würfeln einer Sechse erhält man also $1/6$, beim Würfeln einer geraden Zahl $3/6 = 1/2$ und beim Würfeln eines Pasches mit zwei Würfeln erhält man $6/36 = 1/6$ (!).

Es gibt aber noch andere Modelle, bei denen die Wahrscheinlichkeit anders berechnet wird und auch Zahlenwerte erreichen kann, die irrational sind, d.h die nicht durch einen Bruch (wie oben) darstellbar sind, wie z.B. $\sqrt{2}$ oder p .

Approximiert wird die Wahrscheinlichkeit durch die **relative Häufigkeit**.

So nennt man das Verhältnis von tatsächlich erfolgten günstigen Ereignissen zur Gesamtzahl der Versuche.

$$\text{relative Häufigkeit } H = \frac{\text{\#günstige Ereignisse}}{\text{\#Versuche insgesamt}}$$

Tatsächlich **meßbar** ist stets nur die relative Häufigkeit. Tatsächlich **berechenbar** jedoch nur die Wahrscheinlichkeit. Beachten Sie den Unterschied zwischen dem Idealen und dem Realen! Abstrakt kann ich bereits etwas "wissen", indem ich es berechne. Um es aber konkret zu wissen, muß ich Überprüfungen machen. Dies zwingt uns, eine Unterscheidung zu machen:

Abstraktes Wissen ist ein gedanklicher Zusammenhang zwischen gedachten Objekten, deren Eigenschaften nicht durch Erfahrung, sondern durch Festlegung bekannt sind.

Abstrakte Gewißheit liegt genau dann vor, wenn der gedankliche Zusammenhang widerspruchsfrei ist

Konkretes Wissen ist ein gedanklicher Zusammenhang zwischen Objekten, deren Eigenschaften durch Erfahrung bekannt sind.

Konkrete Gewißheit liegt genau dann vor, wenn jede Überprüfung des konkreten Wissens nicht zu Widersprüchen führt.

Es zeigt sich, daß die relative Häufigkeit bei steigender Anzahl der Versuche sich immer mehr dem berechneten Wert der Wahrscheinlichkeit nähert. Ist dieser Wert eine irrationale Zahl, so kann die Wahrscheinlichkeit offenbar durch die relative Häufigkeit nie erreicht werden, denn sie ist ja ein Bruch (s.o.). Selbst im Falle einer rationalen Zahl ist es der relativen Häufigkeit stets erlaubt, um einen gewissen Betrag, der sog. "**Varianz**" bzw. deren Quadratwurzel, von der Wahrscheinlichkeit abzuweichen. Die Varianz nimmt mit steigender Anzahl der Versuche ab, wird aber für endlich viele Versuche nicht Null. Immerhin nähert sie sich der eigentlichen Wahrscheinlichkeit beliebig gut und man kann in der Statistischen Physik zeigen, warum das so ist.

Halten wir fest:

Die relative Häufigkeit approximiert die Wahrscheinlichkeit, ohne sie jemals zu erreichen. Mit anderen Worten:

Erst bei einer unendlichen Anzahl von Überprüfungen ist die relative Häufigkeit identisch mit der Wahrscheinlichkeit.

*

In der Logik hat man es einfach:

Eine Aussage ist entweder wahr oder falsch. Eine Vermutung wäre in den Gesetzen der Logik entweder richtig oder falsch. Um ihre Wahrheit zu überprüfen würde dann natürlich eine einzige Beobachtung genügen. In Begriffen der Wahrscheinlichkeit bedeutet das also: die Wahrscheinlichkeit, daß die Vermutung richtig ist, ist entweder Eins oder Null. Lassen wir noch andere Werte zu, so verlassen wir sofort den Boden der klassischen Logik und begeben uns in eine statistische Logik und auch in das Reich der Quantenlogik.

Nehmen wir an, eine Vermutung hätte eine Wahrscheinlichkeit **zwischen** Null und Eins, richtig zu sein. Nehmen wir weiter an, ich könnte diesen Wert berechnen. Selbst wenn ich die Wahrscheinlichkeiten berechnet habe, so ist ja auch diese Berechnung zunächst nur eine Vermutung! Und erst über die relative Häufigkeit wäre ich dann imstande zu überprüfen, ob diese Vermutung stimmt, nämlich wenn die relative Häufigkeit mit der berechneten Wahrscheinlichkeit identisch ist. Und wie wir gesehen haben ist dies erst dann der Fall, wenn ich eine unendliche Anzahl von Überprüfungen gemacht habe. Erst dann weiß ich, daß meine Vermutung stimmt! In diesem Sinne gibt es keine konkrete Gewißheit, denn so sehr ich mich auch mit wachsender Zahl der Überprüfungen der konkreten Gewißheit nähere, ich erreiche sie in Wirklichkeit nie, denn ich kann ja immer nur eine endliche Anzahl von Überprüfungen machen! Dies ist das wesentliche Dilemma der Gewißheit der Erkenntnis, es ist das Problem der **Erfahrbarkeit der Realität, bzw. der Realität des Erfahrbaren**.

Sobald ich auch nur theoretisch Vermutungen zulasse, die eine Wahrscheinlichkeit zwischen Null und Eins haben, richtig zu sein, können sie nicht mit konkreter Gewißheit richtig sein.

Denn ich kann die Wahrscheinlichkeit ihrer Richtigkeit prinzipiell nicht beobachten, sie existiert allein im "Idealen", liegt meinen realen Beobachtungen aber als bestimmende Größe **zugrunde**. Hat etwas "Zugrundeliegendes" aber Nichtbeobachtbares überhaupt "Realität"?

Was hat Schrödinger's Katze mit all dem zu tun?

Nun, was **wissen** wir über das, was in diesem Karton ist?

Tja, **ich** weiß, was drin ist, **Sie** wissen es nicht. Für Sie könnte alles mögliche darin sein: ein Waschlappen, eine Spinne, ein toter Fisch, eine Dose Ravioli oder ein eisgekühltes Bier. Erst wenn ich diese Schachtel öffne und ihnen den Inhalt **zeige** wird für Sie klar sein, was ich längst schon wußte. Nämlich, daß sich darin...

{Redner will die Schachtel öffnen, zögert und läßt es schließlich sein }

Die Frage aber ist: **Was** ist denn in genau diesem Augenblick **für Sie** tatsächlich drin? Dasselbe wie für mich, oder das, was sie sich vorstellen? Oder gar nichts? Oder alles, was reinpaßt?

Es gibt ein Analogon dieses Dilemmas in der Quantenphysik: das sogenannte **Meßproblem**. Dazu muß ich Ihnen einige Begriffe der Quantentheorie erläutern:

IV Kurze Darstellung der Formalismen der Quantentheorie

Die Quantentheorie ist eine der genauesten Modelle, die der Physik heute zur Verfügung stehen. Ihre Aussagen stimmen umwerfend gut mit den Experimenten überein und ihr mathematischer Formalismus ist von einer Schönheit, die von dem Bemühen zeugt, schwierige Sachverhalte so klar und einfach wie möglich hinzuschreiben. Ich will jedoch versuchen, Sie nicht übermäßig mit der Schreibweise in der Quantenmechanik zu belasten.

IVa System, Zustand, Observable

Zuallererst muß ich Ihnen den in der Quantenmechanik zentralen Begriff des **Zustands** erklären.

*Der **Zustand** eines Systems ist ein bestimmter Satz an Informationen über dieses System.*

*Ein **System** ist eine Menge von unserer Erfahrung zugänglichen Objekten und damit selbst ein solches Objekt.*

Man kann diese Informationen als **Eigenschaften** des Systems bezeichnen. Sie äußern sich physikalisch als **Meßwerte** bestimmter Größen, die man als **Observablen** bezeichnet, also sinngemäß als **beobachtbare Größen**. Wenn ich nun eine beobachtbare Größe sprich Observable als "Eigenschaftsart" definiere und die tatsächlich gemessenen Werte als "Eigenschaft" komme ich zu folgenden Entsprechungen:

Eigenschaftsart	↔	Observable
Eigenschaft	↔	Meßwert der Observable
Satz an Informationen	↔	Zustand

Ein Beispiel dazu: Die Observable A entspreche der Eigenschaftsart "Alter" die Meßwerte dieser Observablen sind irgendwelche Altersangaben wie "23 Jahre", "89 Jahre", "Zehn Sekunden" oder "12 Monate". Der Zustand eines Menschen kann durch Angabe der Information über sein Alter beschrieben werden. Diese Information reicht natürlich nicht aus, um dem ganzen Menschen und seiner Person gerecht zu werden, aber immerhin sagt er irgendetwas über ihn aus, was ihm eigen ist, eben eine "Eigenschaft".

Wir sollten aber klarstellen, daß es keine Unterscheidung in der Alltagssprache zwischen einer **Eigenschaftsart** gibt, wie etwa Alter, Haarfarbe usw. und der **Eigenschaft** selbst, "23 Jahre alt" oder "dunkelhaarig". Beides nennen wir gewöhnlich "Eigenschaften", obwohl es zwei begrifflich verschiedene Dinge sind. Hier wird deutlich, daß die Art unseres Denkens sehr von den Begriffen abhängt, in denen wir denken. Wenn mir nie ein Unterschied aufgefallen ist zwischen bestimmten Dingen, dann identifiziere ich sie intuitiv als "identisch". Auf einer anderen Ebene des Denkens, etwa der physikalischen, erweisen sich diese Dinge aber als grundsätzlich verschieden.

Eine zeitlang kannte man noch nicht den sog. "Spin" eines Elektrons, so stellte man irgendwann fest, daß zwei Zustände, die eigentlich einander gleich sein müßten, es tatsächlich nicht waren, weil die zugehörigen Systeme sich unter bestimmten Bedingungen anders verhielten. Man hatte also ohne es zu wissen eine Eigenschaft gemessen, die man bisher noch nicht kannte. Also wurde der bisherige Raum der Zustände um eine weitere Komponente erhöht, nämlich die Spinkomponente.

Wir haben den Begriff der "Verschiedenheit" gebraucht.

Wann sind zwei Zustände verschieden?

Nun, das ist anschaulich einfach:

Zwei Zustände sind genau dann verschieden, wenn sie bezüglich irgendeiner Eigenschaftsart verschieden sind.

Das bedeutet aber auch:

Wenn es irgendeine Eigenschaftsart gibt, die bei einem Zustand, den wir als identisch zu sich selbst angenommen haben verschiedene Werte annimmt, so können wir nicht mehr sagen, daß es sich immer um denselben Zustand handelt.

Dies wird zum Dilemma beim **Meßproblem** und bei der Schrödinger'schen Katze.

Es gibt nämlich in der QM Zustände, die eindeutig beschreibbar sind durch Angabe eines bestimmten Satzes an Eigenschaften, aber nicht mehr eindeutig beschreibbar hinsichtlich eines anderen Satzes an Eigenschaften. Dieser Zustand besteht also in einer Betrachtungsweise aus mehreren, in einer anderen Betrachtungsweise nur aus einem einzigen Zustand. Wir werden sehen, daß sich leider sogar **alle** quantenmechanischen Zustände so verhalten, gleichgültig wie vollständig unser Informationsstand über sie ist!

IVb Reiner Zustand, Eigenzustände, Eigenwerte

Fangen wir an:

Den Zustand eines Systems schreibt man in der QM so:

$$|\psi\rangle$$

Dabei steht Psi für den Satz an Eigenschaften, die über das System bekannt sind. In der Quantenmechanik gibt es einen "vollständigen Satz von Eigenschaften", die einen einzelnen Zustand beschreiben. Wenn man diesen vollständigen Satz zur Verfügung hat, nennt man den Zustand einen "**reinen**" Zustand und schreibt die Eigenschaften anstatt des Psi zwischen die Klammern:

$$|a;b;c;\dots\rangle$$

Für verschiedene Eigenschaften a,b,c,...usw.

Diese Notation ist äquivalent zur folgenden:

$$|a;b;c;\dots\rangle \quad + \quad |a\rangle |b\rangle |c\rangle \dots$$

"identisch gleich"

D.h. die einzelnen Zustände werden miteinander multipliziert, und zwar über das sog. "direkte Produkt". Diese Verknüpfung entspricht der Verknüpfung "und". Ein Zustand der obigen Form hat die Eigenschaften **a und b und c und** usw.

Wir korrelieren also jeden der gemessenen Werte a, b, c, ... bezüglich der Observablen A, B, C, ... jeweils mit einem eigenen Zustand $|a\rangle, |b\rangle, |c\rangle, \dots$ den wir **Eigenzustand** zu der Observablen A, B, C, ... nennen. Die gemessenen Werte a, b, c, ... nennen wir **Eigenwerte** der Observablen A, B, C, ...:

Eigenwert zu A	a	\emptyset	$ a\rangle$	Eigenzustand zu	A
" B	b	\emptyset	$ b\rangle$	"	B
" C	c	\emptyset	$ c\rangle$	"	C
			...		

Diese Korrelation ist nur dann sinnvoll, wenn mir das einzelne Meßergebnis etwas über mein **Wissen** über den vorliegenden Zustand aussagt. Wie wir zu Anfang festgelegt haben, ist die Vermutung, daß Zustand $|a\rangle$ vorliegt nur dann formal richtig, wenn jede Überprüfung des Zustands $|a\rangle$ hinsichtlich der Eigenschaftsart A den Wert a liefert. Entsprechend muß jede Überprüfung des Zustands $|a; b; c; \dots\rangle$ bei jeder Überprüfung die Werte a, b, c, ... liefern. Andernfalls ist der Zustand mit dem Symbol $|a; b; c; \dots\rangle$ nicht sinnvoll beschrieben. Wir müssen also diese Korrelation im obigen Sinne festlegen, damit die Notation $|a; b; c; \dots\rangle$ überhaupt etwas **bedeutet**:

$$a \quad \emptyset \quad |a\rangle \quad \Leftrightarrow \quad \text{Genau dann, wenn jede Messung den Wert a liefert, liegt der Zustand } |a\rangle \text{ vor}$$

Somit können wir automatisch auch in die andere Richtung schließen:

$$|a\rangle \quad \emptyset \quad a \quad \Leftrightarrow \quad \text{Genau dann, wenn Zustand } |a\rangle \text{ vorliegt, wird bei jeder Messung a gemessen}$$

Es gibt also nur die eindeutige Korrelation von Zustand und demjenigen Meßwert, den ich mit der Wahrscheinlichkeit Eins am System messe:

$$|a\rangle \quad \times \quad a \quad \Leftrightarrow \quad \text{Messung von A an } |a\rangle \text{ liefert jedesmal a}$$

Diese Festlegung ist die Basis einer anschaulichen Interpretation der Notation. Wir haben bisher also bloß unsere Notation erklärt, uns ihre anschauliche Bedeutung klargemacht. **Dieser Punkt ist mithin nicht eine Konsequenz der Notation, sondern eine Voraussetzung.** Dessen müssen wir uns ganz bewußt sein, denn es gibt, wie wir später sehen werden, den Versuch, das Meßproblem, also auch das Paradoxon der Schrödinger'schen Katze, zu lösen, indem diese Korrelation aufgehoben wird (Bas van Fraassen's modale Interpretation).

*

IVc Vollständiger Satz von Eigenschaften

Es erscheint merkwürdig, daß es einen "vollständigen Satz an Eigenschaften" geben kann. In der QM ist ein Satz an Eigenschaften genau dann vollständig, wenn wir den Zustand damit **eindeutig** beschreiben können. Es darf also keine zwei Zustände geben, die bezüglich irgendeiner Eigenschaftsart verschieden sind und durch denselben Satz an Eigenschaften beschrieben werden.

Erinnern wir uns noch einmal:

Quantenmechanisch:

Zwei Zustände sind genau dann verschieden, wenn es irgendeine Observable gibt, die verschiedene Meßwerte an den beiden Zuständen mißt.

Philosophisch:

Zwei Zustände sind genau dann verschieden, wenn es irgendeine Eigenschaft gibt, bezüglich derer sie verschieden sind.

Nehmen wir nun also an, wir hätten einen "**reinen Zustand**", also einen *Zustand der bezüglich aller uns bekannter Observablen nicht in zwei Zustände unterschieden werden kann.*

Jetzt gibt es eigentümlicherweise in der QM bestimmte Eigenschaften, die nicht miteinander **verträglich** sind.

Dies bedeutet folgendes: Wenn ich einen Zustand im Hinblick auf die eine Eigenschaft messe und dann auf die andere, erhalte ich andere Ergebnisse, als wenn ich zuerst die andere Eigenschaft messe und danach die eine. Es ist so, daß das System nicht beide Informationen **zugleich** liefern kann. In einem vollständigen Satz von Informationen über das System können aber sicherlich nur die Informationen vorkommen, die das System **zugleich** hat. Andernfalls läßt sich nicht sinnvoll sagen: daß System befände sich in dem reinen Zustand $|a; b\rangle$, der mir ja jedesmal, wenn ich ihn messe, die Informationen a und b liefern soll. Das wäre etwa so, als wenn ich sage "mein Name ist Boström" und unterschreibe mal mit "Banstrum", mal mit "Bunstrop".

Halten wir dazu fest:

*Ein **reiner** Zustand liefert mir bei jeder Messung des vollständigen Satzes verträglicher Observablen dieselben Informationen.*

Was passiert nun aber, wenn ich den reinen Zustand bezüglich Observablen messe, die nicht zu dem vollständigen Satz gehören, also bezüglich miteinander nicht verträglicher Observablen?

Wir stellen experimentell fest: das Meßergebnis ist nicht eindeutig.

Mal messen wir jenen Wert, mal diesen.

Wir stellen außerdem experimentell fest:

Die Häufigkeitsverteilung der verschiedenen gemessenen Werte ist immer dieselbe!

Das wäre etwa so, als ob ich immer z.B. in der Hälfte aller Fälle mit "Boström" unterschreibe und zu je einem Viertel mit "Banstrum" oder "Bunstrop".

Es herrscht eine Regelmäßigkeit, also schließt der Physiker:

Hier liegt irgendeine Gesetzmäßigkeit zugrunde!

Gesetzmäßigkeiten dieser Art liefern mir zwei verschiedene physikalische Disziplinen: Zum einen die **Statistische Physik** zum anderen die **Quantenphysik**. Beide Disziplinen behandeln Größen, deren genaue Meßwerte nicht eindeutig sind, sondern mit Wahrscheinlichkeitsverteilungen beschrieben werden.

Informationen über ein System werden über die Angabe dieser Verteilungen gemacht. Der Unterschied dieser beiden Disziplinen liegt in der formalen Beschreibung des **Zustandes**. Aus diesem Grunde habe ich Sie zuallererst mit diesem Begriff konfrontiert. Denn die Formulierung des Zustandsbegriffes regelt die Kombination von Systemen durch die Kombination der Informationen über diese Systeme. Wir können ja gedanklich nicht die Zustände selbst miteinander kombinieren, sondern nur das, was wir über sie wissen! Erst wenn wir genau geregelt haben, wie diese Kombination von Informationen vor sich gehen soll, können wir Aussagen treffen, die einen **vorraussagenden** Charakter haben, d.h. :

Wir können Aussagen über Informationen machen, die wir eigentlich in Wirklichkeit noch gar nicht haben!

IVd Unverträglichkeit, Unschärfe

Ich will Ihnen das Ganze mit einem rechnerischen Beispiel vor Augen führen:

Nehmen wir an, wir untersuchen einen Zustand nur hinsichtlich der Eigenschaft A. Wir messen beliebig oft und stellen jedesmal fest:

a

Die Messung liefert mir a als Information über den Zustand hinsichtlich dieser Eigenschaft. Wir korrelieren diesen Meßwert mit einem Zustand und schreiben:

$|a\rangle$

und sagen: "Wir haben den Zustand $|a\rangle$ **durch Messung verifiziert**".

Zunächst meinen wir, unser System mit dieser Messung eindeutig charakterisiert zu haben.

Jetzt stellen wir fest, daß wir das System noch auf eine weitere Eigenschaft untersuchen können, sagen wir B. Wir messen und stellen fest: Messung liefert b. Jetzt haben wir zwei Möglichkeiten: Entweder waren beide Messungen miteinander verträglich oder nicht.

Im ersten Fall darf ich b als unabhängige zusätzliche Eigenschaft mit einem eigenen Zustand korrelieren und die beiden Zustände multiplizieren, also

$$|\psi\rangle = |a\rangle |b\rangle + |a; b\rangle$$

und behaupten, es handle sich um einen reinen Zustand bezüglich der Eigenschaften A & B. Das bedeutet: jede weitere Messung von A oder B liefert mir immer wieder die Werte a bzw. b, unabhängig von der Reihenfolge der einzelnen Messungen. Das ist das, was wir klassisch erwarten, ja es ist das, was wir überhaupt von der Realität erwarten: daß sie sich nämlich bezüglich unserer Beobachtungen eindeutig verhält.

Leider, leider hält sich die Realität nicht daran und sie läßt noch Fall 2 zu:

Beide Messungen sind unverträglich.

Dann passiert folgendes: Ich messe b wie gewöhnlich und will schon fröhlich summend meine Eigenschaft hinschreiben, als ich beschließe, doch noch ein zweites Mal A zu messen, um mir ganz sicher zu sein. Ich messe und stelle fest: a2 ! Ich erhalte ein anderes Ergebnis für A als vorher! Ich messe noch einmal nach und wieder: a2!

Dann messe ich noch einmal B und stelle fest: b. O.K. das bleibt also, nun wieder zu A und siehe da: wieder a! Vielleicht nur eine kurze Laune der Natur? Ich messe danach B und stelle fest: b2. Jetzt ändert sich also auch noch B! Verdammt, zurück zu A, ich messe und sehe: a3. Oh nein! Ein dritter Meßwert hat sich eingeschlichen, ich messe B und sehe: b1, dann a2, b1, a1, b1, a4...

Schließlich sinke ich von Krämpfen geschüttelt zu Boden und werde in geistiger Umnachtung in das nächstgelegene Irrenhaus gefahren, wo man mir freundlich erklärt, daß das nur daran gelegen hätte, daß die Eigenschaften A & B eben nicht miteinander verträglich seien. Ich könne nur jeweils eine der

beiden Eigenschaften mit Gewißheit kennen. Sobald ich die eine genau weiß, wäre die andere wieder völlig unbestimmt. Der Herr mit dem weißen Haar, der mir das erklärt, stellt sich mit "Werner Heisenberg" vor und zeigt mir eine Ungleichung, die er als "Unschärferelation" bezeichnet und mein Problem genau erkläre.

Die Heisenberg'sche Unschärferelation lautet

$$\Delta A \Delta B = \frac{1}{2} |\langle [A, B] \rangle|$$

Auf der rechten Seite steht ein Ausdruck, der mithilfe der beiden Observablen A und B sowie des jeweiligen Zustands berechnet werden kann. Das Ergebnis ist entweder Null, wenn nämlich beide Observablen verträglich sind, also beide Messungen sich nicht beeinflussen, oder eine ungemein winzige Zahl, die aber immerhin nicht Null ist. Dieser letztere ist der klassisch unbekannte Fall zwei unverträglicher Observablen.

Das Produkt der Unschärfen zweier unverträglicher Observablen A & B ist also immer größer gleich dieser ungemein winzigen Zahl. Anders gesprochen: Je genauer ich A kenne, umso ungenauer kann ich B kennen. A & B gehören einfach nicht zum selben vollständigen Satz von Observablen, damit definieren ihre Meßwerte gemeinsam eben keine reinen Zustände. Denn, wie wir bereits festgelegt hatten, ist derjenige ein vollständiger Satz von Eigenschaften, der einen reinen Zustand definiert. Wir haben nicht ausgeschlossen, daß es verschiedene solcher Sätze geben kann, die einen Zustand beschreiben. A & B gehören in diesem Fall zu verschiedenen Sätzen und beide sind nicht miteinander verträglich.

In meinem Fall bedeutet das: Sobald ich B gemessen hatte, war die Messung von A wieder völlig unbrauchbar geworden. Ich habe durch die Messung von B meinen Zustand so verändert, daß er nicht mehr durch den Zustandsvektor $|\alpha\rangle$ beschrieben werden konnte. Dieser Eingriff ist nicht meßtechnischer sondern prinzipieller Natur, das muß man sich ganz klar machen! Die Heisenberg'sche Ungleichung, die mathematisch bewiesen werden kann, bedeutet schlicht & ergreifend, **daß der Zustand beide Eigenschaften a und b zugleich einfach nicht haben kann.** Punkt. Dies ist bereits ein Paradoxon für sich und man kann sich durchaus ein Weilchen hinsetzen und darüber nachdenken, daß

dasselbe Objekt zwar bestimmte Eigenschaftsarten haben kann, aber nicht unbedingt alle gleichzeitig.

Ich glaube, in der gewöhnlichen Philosophie wird stillschweigend vorausgesetzt, daß ein Objekt, so es denn Eigenschaften bezüglich bestimmter Eigenschaftsarten hat, diese eben auch gleichzeitig haben kann. Jeder Mensch hat z.B. ein gewisses Alter und eine bestimmte Haarfarbe. Und zwar gleichzeitig. Welcher Mensch könnte auch nur entweder 45 Jahre alt sein *oder* braune Haare haben? Daß sich die Philosophie darüber noch nicht viele Gedanken gemacht hat, kann daran liegen, daß sie eben nicht zwischen "Eigenschaften" und "Eigenschaftsarten" unterscheidet. Denn ein Mensch kann zwar 45 Jahre alt sein und gleichzeitig braune Haare haben, aber selbstverständlich nicht gleichzeitig 45 und 67 Jahre alt sein. Objekte unserer "realen", sichtbaren Welt können ausnahmslos Eigenschaftsarten gleichzeitig haben, aber es sind eben leider nicht wirklich **alle** Objekte dieser Welt. Denn Elektronen, Photonen usw. sind auch Objekte dieser Welt, und man kann sie sogar **sehen** und sie können einem auch **wehtun**, wenn man sie zum Beispiel ins Auge bekommt oder sonstwohin und man vielleicht anschließend an Krebs stirbt.

IVe Superposition von Zuständen, Projektion

Nun müssen wir uns etwas neues ausdenken, um unseren Zustand auch hinsichtlich der Eigenschaft B eindeutig charakterisieren zu können.

Es zeigt sich, daß man den Zustand $|a\rangle$, der ja als reiner Zustand existieren muß, so umgeschrieben werden kann, daß auch sein spezielles Verhalten bezüglich einer Messung irgendeiner anderen Observablen B beschreibbar ist.

Wir finden über verschiedene mathematische Operationen:

$$|a\rangle = c_1 |b_1\rangle + c_2 |b_2\rangle + \dots$$

Der Zustand $|a\rangle$ läßt sich also auch als Summe von Zuständen $|b_1\rangle, |b_2\rangle, \dots$ usw. beschreiben. Was bedeutet denn eine Summe von Zuständen? Anschaulich entspricht sie der Verknüpfung "oder".

Wenn wir den Zustand so umschreiben wie oben, dann bedeutet das: Das System hat die Eigenschaft b_1 **oder** b_2 **oder** b_3 usw.

Die Koeffizienten vor den einzelnen Zuständen ergeben zum Quadrat (und erst zum Quadrat!) die Wahrscheinlichkeit an, mit der der jeweilige Zustand durch eine Messung verifiziert werden kann. Nehmen wir z.B. an, es gelte

$$|a\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |b_1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |b_2\rangle$$

Was bedeutet dies?

Man sagt, daß der Zustand $|a\rangle$ aus einer **Superposition** der Zustände $|b_1\rangle$ & $|b_2\rangle$ besteht. Der Koeffizient $1/\sqrt{2}$ vor den Zuständen ergibt zum Quadrat die Wahrscheinlichkeit, mit der b_1 bzw. b_2 gemessen werden kann, in diesem Fall also beide Male $1/2$. Ich messe also durchschnittlich in 50% der Versuche b_1 und sonst b_2 . Aber nie b_1 und b_2 gleichzeitig. Obwohl also sowohl $|b_1\rangle$ wie auch $|b_2\rangle$ im Zustand $|a\rangle$ als Superposition erscheinen, treten sie doch in realita nie gemeinsam auf.

Warum nicht? Es ist ja bisher nicht festgelegt worden, ob es sich um ein "ausschließendes oder"

(XOR = exclusive or) oder um ein "oder auch" ($\Delta = \text{or}$) handelt. Nun, das liegt an der Eigenschaft der Zustände $|b_1\rangle$ & $|b_2\rangle$ **orthogonal** zu sein. In der Schule bezeichnete man mit "orthogonal" zwei Vektoren, die rechtwinklig aufeinander stehen. Hier ist das ganz ähnlich, in einem gewissen Sinne stehen die beiden Zustände "rechtwinklig" zueinander und daher ist die Projektion des einen auf den anderen wie auch die Projektion des anderen auf den einen gleich Null.

Eine **Projektion** ist ein Skalarprodukt zweier Vektoren, also eine reelle bzw. komplexe Zahl. In der QM schreibt man das folgendermaßen:

Projektion von $|a\rangle$ auf $|b\rangle$: $\langle a|b\rangle$

Projektion von $|b\rangle$ auf $|a\rangle$: $\langle b|a\rangle$

Dabei gilt: $\langle a|b\rangle = \langle b|a\rangle^*$ (konjugiert komplex)

(Ich meine hier mit "Projektion" die Länge des Vektors, der sich aus der Projektion ergibt, also nicht den Vektor selbst!)

Das Betragsquadrat der Projektion der beiden Zustände aufeinander ist unabhängig davon, wer auf wen projiziert wird und ist außerdem stets größer oder gleich Null:

$$|\langle a|b\rangle|^2 = |\langle b|a\rangle|^2 = 0$$

Wie wir den Laden kennen, kann das wieder einmal als Wahrscheinlichkeit interpretiert werden, und zwar in diesem Fall als die **Wahrscheinlichkeit, daß beide Zustände gemeinsam durch Messung verifiziert werden**, daß in diesem Fall also die Eigenschaften a und b gemeinsam vorliegen. Wieder haben wir über eine bestimmte Art der Multiplikation eine "und"-Verknüpfung. Da $|b_1\rangle$ & $|b_2\rangle$ zueinander orthogonal sind, (was daran liegt, daß es Eigenzustände zu hermiteschen Operatoren sind, ich will das jetzt nicht erklären, es sind mathematische Details), ist diese Projektion immer Null. Das bedeutet, daß beide Zustände nie gleichzeitig verifiziert werden können, sondern immer nur höchstens einer von beiden. Das ist auch vernünftig und beruhigend, denn sonst würde eine Messung desselben Zustands von B zwei verschiedene Meßwerte liefern können, womit unser vorgeblich "reiner" Zustand nach unserer eigenen Definition durch eine einzige Messung in zwei verschiedene Zustände unterschieden werden könnte, also kein "reiner" Zustand wäre. Die obige Darstellung von $|a\rangle$ als Summe mehrerer orthogonaler Zustände steht also nicht im Widerspruch zu der Voraussetzung, daß $|a\rangle$ ein reiner Zustand ist. Dies muß man sich ganz klar machen!

Obwohl $|a\rangle$ sich bezüglich der Messung von B **nicht eindeutig** verhält, gibt es keine Möglichkeit, $|a\rangle$ in verschiedene Zustände zu unterscheiden, es ist also nicht möglich, zu widerlegen, daß $|a\rangle$ ein reiner Zustand ist!

Dies alleine ist schon wieder ein kleines Paradoxon. Aber es ist keine Antinomie, kein innerer Widerspruch, wie wir sofort zeigen können.

IVf Zustandsreduktion

Schauen wir uns dazu noch einmal genauer an, ob $|a\rangle$ nicht vielleicht doch kein reiner Zustand ist:

$|a\rangle$ verhält sich bezüglich der Messung von B nicht eindeutig, sondern liefert mir mit bestimmten Wahrscheinlichkeiten genau einen von mehreren Meßwerten. Ist damit die Voraussetzung des "reinen Zustands" von oben verletzt?

Wollen sehen:

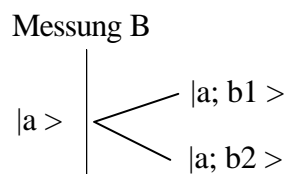
Reiner Zustand:

Zustand der bezüglich aller uns bekannter Observablen nicht in zwei Zustände unterschieden werden kann.

Und verschiedene Zustände:

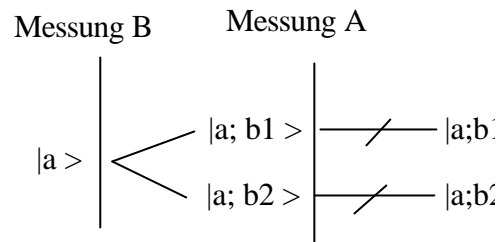
Zwei Zustände sind genau dann verschieden, wenn es irgendeine Observable gibt, die verschiedene Meßwerte an den beiden Zuständen mißt.

Hätten wir nicht mit $|a\rangle$ einen solchen Fall? Die Messung von $|a\rangle$ bezüglich B liefert mal b_1 und mal b_2 . Also handelt es sich doch offenbar um zwei verschiedene Zustände, somit würde folgen:



Der Zustand $|a\rangle$ kann durch die Messung von B in zwei Zustände unterschieden werden, damit ist $|a\rangle$ kein reiner Zustand. Klarer Fall, nicht wahr?

Nein! Dem ist nicht so! **Denn sobald wir einmal B gemessen haben, liefert jede weitere Messung von B stets denselben Meßwert.** Damit ist $|b_1\rangle$ bzw. $|b_2\rangle$ als eigener Zustand eindeutig charakterisiert. Eine erneute Messung von A an $|b_1\rangle$ bzw. $|b_2\rangle$ jedoch liefert mir **nicht** unbedingt wieder a.



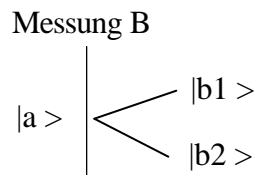
Wir können den Zustand $|a\rangle$ nicht mehr 100% ig verifizieren, nachdem wir B gemessen haben, somit existiert keine Korrelation der Meßwerte zu irgendeinem gemeinsamen Zustand:

a, b1	Fehler!	$ a; b_1\rangle$
a, b2	Fehler!	$ a; b_2\rangle$

$|a\rangle$ und $|b_1\rangle$ sowie $|b_2\rangle$ sind jeder für sich hingegen reine Zustände, da wir jeweils die Messungen von A bzw. B beliebig oft wiederholen können:

a	$\langle \text{---} \rangle$	$ a\rangle$
b1	$\langle \text{---} \rangle$	$ b_1\rangle$
b2	$\langle \text{---} \rangle$	$ b_2\rangle$

Wir haben also den reinen Zustand $|a\rangle$ durch unsere Messung in den reinen Zustand $|b_1\rangle$ oder $|b_2\rangle$ **umgewandelt**. Diesen Vorgang nennt man "**Zusammenbruch (Kollaps) der Superposition**" oder auch "**Zustandsreduktion**", weil wir durch unsere Messung den aus einer Summe von Zuständen zusammengesetzten Zustand auf einen einzigen Zustand reduzieren, welcher dann als solcher immer wieder verifizierbar ist:



$$\text{Also } |a\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |b_1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |b_2\rangle \quad \text{oder} \quad |b_1\rangle \quad \text{oder} \quad |b_2\rangle$$

Diese Zustände sind, wie wir gerade gesehen haben nach unserer eigenen Definition verschieden voneinander, d.h. es gibt keinen gemeinsamen reinen Zustand $|a; b_1\rangle$ oder $|a; b_2\rangle$, der mir a & b1 oder a & b2 bei beliebig oft wiederholten Messungen liefert, somit kann es in unserer Wirklichkeit nur einen der Zustände $|a\rangle$, $|b_1\rangle$ oder $|b_2\rangle$ geben, der mein System beschreibt. Was bedeutet dann aber der Ausdruck

$$|a\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |b_1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |b_2\rangle$$

den mir die Quantenmechanische Rechnung präsentiert und der mir sehr genaue Voraussagen über das statistische Verhalten des Zustands $|a\rangle$ bezüglich der Messung von B erlaubt? Es ist mir jedoch nicht möglich, statistische Aussagen über den einzelnen Zustand $|a\rangle$ bezüglich der Messung von B zu machen, da ich ihn ja durch die erste Messung bereits unwiderbringlich verändere. Ich muß also mehrere Zustände $|a\rangle$ erzeugen und jeden von ihnen hinsichtlich B messen! Dann erst erhalte ich eine statistische Häufigkeitsverteilung, mit der ich die Wahrscheinlichkeitsaussagen verifizieren kann.

Hat der Zustand als Superposition also aufgrund der exakten statistischen Voraussagen eine gewisse Realität? Oder ist der einzelne Zustand, da als solcher nicht als Superposition identifizierbar, gar nicht real? Abgesehen von einer pragmatischen Rechtfertigung: Wenn ich die linke

Seite der Gleichung für "real" erkläre, denn ich messe stets dieselbe Eigenschaft a, dann muß ich auch die rechte Seite für "real" erklären, denn es handelt sich um eine Identität. Entweder ist also die Identität falsch oder beide Seiten sind "real" und damit wird mein Begriff von der "Realität" entscheidend in Frage gestellt.

Akzeptieren wir unsere bisherigen Überlegungen, so müssen wir folgern:

Realität ist nicht nur das, was ist, sondern auch das, was sein kann.

Sie könnten fordern: "Zeigen Sie mir ein Objekt, das sich so wie oben angedeutet verhält!" Tja, und jetzt muß sich der Quantenphysiker am Kopf kratzen und zugeben, daß sich Objekte unserer gewohnten Welt tatsächlich so nicht verhalten. Wir haben es zwar auch im Alltag oft mit Wahrscheinlichkeiten zu tun, aber es gibt dort keine Objekte, die ihren Zustand durch reine Beobachtung in der Art verändern, wie wir es gerade abstrakt nachvollzogen haben. Die einzigen Systeme, die sich so verhalten, sind Quantensysteme, also Systeme von Teilchen wie Elektronen und Atome und Moleküle. Diese Systeme dürfen aber auch nicht zu komplex werden. Objekte unseres Alltags sind Systeme von etwa 10^{23} solcher Quantenobjekte, das ist eine Eins mit 23 Nullen, also eine Zahl, für die es keine Worte mehr gibt. Zwar verhalten sich die einzelnen Teilchen so wie oben beschrieben, und das ist experimentell bewiesen und jederzeit nachprüfbar, jedoch gelten jene Gesetzmäßigkeiten offenbar nicht für makroskopische Objekte wie Töpfe, Tische, Autos, Menschen und ... Katzen.

V Schrödinger's Katze

Nun kommen wir also endlich zum Gedankenexperiment von Erwin Schrödinger (1887 - 1961),

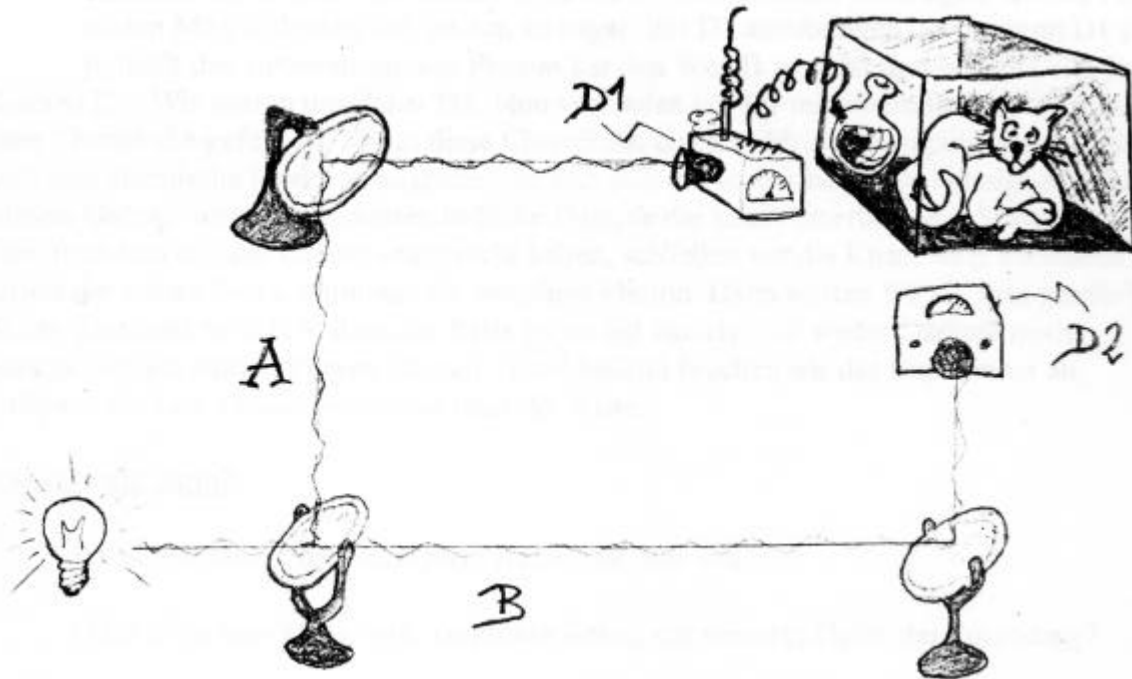
Die Schrödinger'sche Katze.

Sie sehen hier eine verschlossene Kiste.

Nehmen wir an, diese Kiste enthält folgenden Inhalt:

- a) eine sehr schwache Lichtquelle
- b) einen halbdurchlässigen Spiegel
- c) zwei Detektoren
- d) einen Behälter mit Gift
- e) eine Katze

Die obigen Zutaten dieser Kiste seien auf folgende Weise miteinander gekoppelt:



Die schwache Lichtquelle entsende zu einem Zeitpunkt ein einzelnes Photon, d.h. ein Lichtteilchen. Dies ist ohne weiteres möglich und läßt sich auf verschiedene Weise realisieren, z.B. mit schwach radioaktivem Material.

Der halbdurchlässige Spiegel teilt den einfallenden Lichtstrahl in zwei Strahlen der gleichen Intensität auf. Dies bedeutet für ein einzelnes Photon, daß die Wellenfunktion, die den Zustand dieses Photons beschreibt, sich aufspaltet in zwei Teilstrahlen, die bei einer stattfindenen Messung die Wahrscheinlichkeit, dieses Photon zu messen als Information enthält. Nehmen wir an, der Spiegel sei exakt halbdurchlässig, so daß die Zustandsfunktion in zwei Teilfunktionen aufgespalten wird, deren Intensität gerade $1/2$ ist. In der QM sind die Intensitäten von Wellenfunktionen gleichzusetzen mit den Wahrscheinlichkeiten, die jeweiligen Zustände bei Messung zu verifizieren.

Formal sieht das folgendermaßen aus:

Sei $|1\rangle$ der Zustand, der das Photon beschreibt, welches reflektiert wird und also Weg A zurücklegt. Sei $|2\rangle$ der Zustand, der das Photon beschreibt, welches durchgelassen wird und so Weg B zurücklegt.

Sei $|\psi\rangle$ der Zustand des Photons.

Dann läßt sich dieser Zustand wie folgt schreiben:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} |1\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}} |2\rangle$$

Dieser Zustand bewegt sich nun durch den Raum entlang der Wege A **und** B.

Wenn wir einen Detektor D1 an Weg A anbringen, so wird er mit der Wahrscheinlichkeit $(\frac{1}{\sqrt{2}})^2 = \frac{1}{2}$ "Klick" machen und damit anzeigen, daß das Photon den Weg A eingeschlagen hat. Wie wir bereits wissen liefert jede nachträgliche Messung dasselbe Ergebnis, das bedeutet, das Photon bleibt auf Weg A und Detektor D2 wird nie anschlagen. Das Photon hat nach **dieser** Messung den Zustand $|1\rangle$. Analog könnte mit derselben Wahrscheinlichkeit auch D2 sich melden und damit mitteilen, daß das Photon Weg B eingeschlagen hat. Nach **dieser** Messung wird das Photon dann auf den Zustand $|2\rangle$ reduziert und D1 wird für immer schweigen. Da das Photon nur die beiden

Möglichkeiten hat, genügt es sogar, nur D1 anzubringen. Denn wenn D1 **nicht** anschlägt, heißt das automatisch: das Photon hat den Weg B gewählt und befindet sich in Zustand $|2\rangle$. Wir sparen uns daher D2. Nun verbinden wir D1 mit einem Behälter, der mit einer Chemikalie gefüllt ist. Wenn diese Chemikalie einen elektrischen Impuls von D1 erhält, wird eine chemische Reaktion ausgelöst, so daß sich die vorher harmlose Flüssigkeit in ein giftiges Gebräu verwandelt, dessen tödliche Dämpfe die Katze innerhalb von Sekunden tötet. Nun, nachdem wir alle Drähte angebracht haben, schließen wir die Kiste. Jetzt entsenden wir mittels der schwachen Lichtquelle ein einzelnes Photon. Dann warten wir ab, was geschieht. Nichts geschieht natürlich, denn die Kiste ist so gut isoliert, daß weder Dämpfe noch Geräusche nach außen dringen können. Anschließend brechen wir das Experiment ab, entfernen die Drähte und meditieren über der Kiste.

Was ist wohl darin?

Ist es eine lebendige, verärgerte Katze, die raus will?

Oder ist es eine kalte, tote, vergiftete Katze, ein weiteres Opfer der Forschung?

Oder ist es eine Superposition aus lebender und toter Katze, die erst in dem Augenblick zusammenbricht, wenn wir in die Kiste schauen?

Oder gibt es zwei Welten, in denen die Katze jeweils entweder tot oder lebendig ist?

VI Interpretationen und Lösungsversuche

VIa Verschiedene Ansätze

Welche Versuche gibt es, das oben dargelegte Dilemma zu lösen?

Es gibt drei verschiedene Ansätze:

Der erste Ansatz beschäftigt sich mit der Frage:

- a) Wo findet die Zustandsreduktion statt und wodurch?

Der zweite Ansatz behauptet:

- b) Es findet überhaupt keine Zustandsreduktion statt.

Und es gibt noch einen dritten Ansatz:

- c) Das ist alles Blödsinn.

Ich werde mich mit dem dritten Ansatz nicht weiter beschäftigen, weil er ziemlich langweilig ist. Natürlich kann ich mich hinsetzen und sagen: "Das sind bloße Hirngespinnste, Produkte des menschlichen Geistes und haben a priori keinen Bezug zur Realität, die es sowieso nicht gibt." Es gibt einen Haufen Leute, die mit dieser Erklärung zufrieden sind und ruhig einschlafen, ohne ihre Vorstellung von der Realität auch nur anzutasten. Ich würde diesen Lösungsansatz als den "nihilistischen Ansatz" bezeichnen und es kostet eine übermäßige Anstrengung, mit den Leuten, die

ihn vertreten, zu diskutieren. Wer also diesen Ansatz verlockend finde, der sollte diese ganzen Überlegungen schnell vergessen, nach Hause gehen und sich eine Tasse irrealen Kaffee kochen.

VII Reduktionsansatz

Der erste Ansatz, den ich als den "Reduktionsansatz" bezeichnen möchte, versucht der Tatsache gerecht zu werden, daß, obwohl die Zustandsfunktion als Superposition vorliegt, dennoch bei einer Messung stets nur einer der Zustände, aus denen sich die Superposition zusammensetzt, verifiziert werden kann und man versucht nun diese offensichtlichen Reduktion der Information zu erklären. Erklärungsversuche der reduktiven Art bemühen sich darum, herauszufinden wo genau die Reduktion überhaupt stattfindet. Dabei gibt es natürlich ein großes Problem: Jeder Meßvorgang ist im Grunde nichts weiter als eine physikalische Wechselwirkung zwischen der Zustandsfunktion und einem Meßapparat, der sich zumindest im Prinzip ebenso quantenphysikalisch formulieren lassen müßte wie die Zustandsfunktion. Während aber Interferenzerscheinungen bei Teilchen zu beobachten sind, gibt es bei Meßapparaten und anderen makroskopischen Objekten keine Interferenz. Ein Teilchen ist, wenn wir es lokalisieren, entweder hier oder dort, aber niemals an mehreren Stellen zugleich, was die Superposition fordert. An irgendeiner Stelle bricht die Superposition zusammen und reduziert sich auf einen bestimmten Zustand. Wo das passiert steht im Mittelpunkt dieser Überlegungen.

Schauen wir uns die Skizze an:

Bis zur Messung durch den Detektor D1 befindet sich das Teilchen im Superpositionszustand. Dies kann man experimentell zeigen, indem man den Teilchenstrahl vor der Messung wieder zusammenführt und Interferenzerscheinungen beobachtet, die charakteristische Welleneigenschaften sind und nicht mit dem Teilchenbild erklärt werden können. Diese Erscheinungen zwingen uns zu dem Schluß, daß das Teilchen in Form einer Welle, welche aus Superpositionen besteht, tatsächlich beide Wege A und B nehmen **muß**. Andernfalls wäre es nämlich nicht imstande, mit sich selbst zu interferieren und die charakteristischen Muster auf Leuchtschirmen zu erzeugen.

Nachdem die Messung stattgefunden hat verliert das Teilchen seine Interferenzfähigkeit, was man auf dieselbe Weise zeigen kann. Das bedeutet also: Die Messung legt das Teilchen auf eindeutige Weise fest. Wenn es bei D1 gemessen wird, so hat es den ganzen Weg A bis zum Detektor zurückgelegt und hat nicht Weg B eingeschlagen. Wenn es bei D1 nicht gemessen wird, so ist es damit ebenfalls eindeutig festgelegt, da es nun nämlich Weg A nicht genommen haben kann und also ausschließlich Weg B zurückgelegt hat. In jedem Fall befindet es sich nach Durchgang bzw. Nicht-Durchgang von D1 nicht mehr als Superposition auf beiden Wegen und ist nicht mehr interferenzfähig.

Frage: Hat sich die Superposition auf den Zustand des Detektors übertragen?

Nach den Gesetzen der Quantenmechanik übertragen sich Superpositionen über ein Wechselwirkungspotential auf andere Systeme, hier also das System des Detektors. Wenn dies der Fall ist, so wird auch ein superpositioniertes Signal entlang der Drähte Richtung Kiste geschickt, wo es eine superpositionierte chemische Reaktion auslöst, die die Katze in den bedauernswerten superpositionierten Zustand von Lebendigkeit und Totheit versetzt. Wenn wir jedoch in die Kiste hineinschauen, so werden wir nur einen Zustand vorfinden, nämlich entweder eine lebendige oder eine tote Katze. Wo hat die Reduktion stattgefunden?

- a) im Detektor D1
- b) auf dem Weg von D1 zur Kiste
- c) bei der chemischen Reaktion

- d) in der Katze
- e) im Gehirn des Beobachters

Wir können mit Sicherheit sagen: im Gehirn des Beobachters ist die Zustandsfunktion bereits reduziert, denn wir erleben nur einen der möglichen Zustände, die die Superposition zuläßt.

VII a Kopenhagener Interpretation

Es gibt einen Versuch von *Niels Bohr* (1885-1962), dies Dilemma zu lösen, den er in der sog. "**Kopenhagener Interpretation**" formuliert hat.

Bohr sagt einfach: Es gibt zwei verschiedene Modelle, die die Wirklichkeit beschreiben. Einmal das klassische Modell, anwendbar auf alle makroskopischen Objekte, aber nicht auf Teilchen, einmal das quantenmechanische Modell, anwendbar auf Teilchen, aber nicht auf makroskopische Objekte. Beide Modelle beschreiben Bereiche, die zwar ineinander übergehen, aber die Art der Beschreibung ist so grundsätzlich verschieden (Bohr entwickelt in diesem Zusammenhang den Begriff der "Komplementarität"), daß irgendwo eine Trennung gemacht werden muß. Da man keine Grenze formulieren kann, die nicht durch irgendwelche Experimente in irgendeine Richtung hinausgeschoben werden könnte, fordert Bohr: Es muß eine Grenze gezogen werden, aber es hängt vom einzelnen Experiment ab, wo dies am sinnvollsten geschieht.

Können wir damit ruhig einschlafen? Sicher, wir können der Interpretation keine widersprechenden Erfahrungstatsachen entgegenbringen. Der Meßapparat wie auch die Katze sind zweifellos makroskopische Systeme und das Teilchen ist zweifellos mikroskopisch, also ließe sich der Trennstrich bereits irgendwo im Detektor ziehen, womit wir aus dem Dilemma wären. Jedoch erklärt diese Interpretation nicht, ob diese Trennung irgendeinen objektiven Charakter hat oder ob sie einfach nur je nach Bedarf und Brauchbarkeit gezogen werden kann. Die Willkürlichkeit dieser Trennungslinie hat nun auch Einstein gereizt, der sich gar nicht damit abfinden konnte, daß irgendetwas dem menschlichen Ermessen überlassen werden sollte und er schrieb 1935 an Schrödinger, daß er diese Interpretation für "einschläfernd" halte und er formulierte ein Gedankenexperiment mit einem explosivem Quantensystem, welches nach Verstreichen einer gewissen Zeit zu einer bestimmten Wahrscheinlichkeit detoniert. Auch dieses System läßt sich quantenphysikalisch beschreiben und würde in eine Supersposition aus explodiertem und nicht explodiertem System münden, welches Einstein für absurd hält. Er schreibt "Durch keine Kunst der Interpretation kann diese Psi-Funktion in eine angemessene Beschreibung des wirklichen Zustands von Dingen verwandelt werden."¹ Diese Konversation hat Schrödinger veranlaßt, sein berühmtes Gedankenexperiment mit der Katze zu formulieren, und zwar ebenfalls 1935 in einem Vortrag über "Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik". Sein Paradoxon sollte die Kopenhagener Interpretation ironisieren, indem es die willkürliche Verschiebbarkeit der Grenze zwischen Makro- und Mikrokosmos ins Absurde steigert. Eigentlich ist also das Paradoxon "Schrödinger's Katze" überhaupt nicht als Paradoxon gedacht, sondern als Witz. Dennoch stützt es sich natürlich auf quantenphysikalische Paradoxa und wurde daher von allen Physikern ziemlich ernst genommen.

Nach dem Reduktionsansatz, dem auch die Kopenhagener Interpretation folgt, findet die Reduktion also irgendwo zwischen Objekt und Beobachter statt. Was ist denn, wenn ich die Grenze, die Bohr postulierte, immer weiter verschiebe und schließlich ins menschliche Gehirn lege? Der erste, der diese gewagte Hypothese zum ersten Mal mit aller Ernsthaftigkeit vertrat, war *Eugene P. Wigner* ("Remarks on the mind-body-question", 1961). Er entwickelte sogar eine grobe mathematische Theorie, die diese Interpretation formalisieren sollte.

¹A. Fine 1986: "The Shaky Game: Einstein, Realism and the Quantum Theorie" University of Chicago Press

Nach dieser Interpretation veranlaßt der Bewußtseinsakt des Beobachters die Zustandsfunktion dazu, zu kollabieren und so in den einen oder anderen konkreten Zustand zu fallen, der dem Beobachter dann als "real" erscheint.

Mittels eines weiteren Beobachters, den er "Wigner's Freund" nannte und der sich zusammen mit der Katze im inneren der Kiste befindet, sich zum Glück gegen das giftige Gas durch eine Gasmasken zu schützen weiß, entwickelte er das Paradoxon von Schrödinger weiter und warf zunächst einen weiteren Widerspruch auf.

{Skizze}

Nehmen wir an, Wigner (W) stünde im Kontakt mit seinem Freund (F). F sieht die Katze entweder sterben oder weiterleben. Solange W nicht mit seinem Freund in Kontakt tritt, reduziert sein Bewußtseinsakt nicht die Zustandsfunktion des Systems im Inneren der Kiste, in welchem sich neben der Katze nun auch F befindet. Also müßte sich das Bewußtsein von F ebenfalls, von W aus gesehen, in einer Superposition befinden. Für F hingegen ist der Zustand schon vorher reduziert, denn er sieht ja die Katze. Welches Bewußtsein hat nun Priorität? Wigner selbst kam zu dem Schluß, daß es bereits genügt, daß W weiß, daß F den Vorgang beobachtet, um die Superposition zwischen der Beobachtung von F und der Kontaktaufnahme mit W durch eine gewöhnliche Mischung von Wahrscheinlichkeiten ersetzen zu müssen. Eine gewöhnliche Mischung von Wahrscheinlichkeiten ist kein Problem für die klassische Physik, denn sie produziert keine Interferenzerscheinungen und damit auch nicht den zwingenden Schluß, daß mehrere Zustände gleichzeitig existieren. Diese Interpretation ist im höchsten Maße subjektiv, also vom direkten Bewußtseinsprozeß eines Beobachters abhängig. Wie steht es aber mit einem eventuellen Bewußtsein der Katze? Und was genau ist ein Bewußtseinsprozeß eigentlich? Wann findet den der Prozeß der "Erkenntnis" im physikalischen Sinne statt? Und darüber hinaus: Wenn Wigner's Interpretation richtig ist, dann bedeutet das, daß im ganzen Universum Superpositionen existieren, bloß nicht in den verhältnismäßig winzigen Bereichen, in denen sich Menschen oder andere erkenntnisfähige Intelligenzen aufhalten. Führt denn nun jede Beobachtung des Himmels z.B. mit Teleskopen dazu, daß weit entfernte Galaxien und Sternhaufen plötzlich aus ihrer Superposition kollabieren? Und wie steht es mit den Aufnahmen von Satelliten, die zur Erde gefunkt werden und zum Teil erst Tage und Wochen später zur Kenntnis genommen werden. Bricht dann die Superposition des Photos und mit ihm der abgebildete Teil des Weltalls zusammen? Oder bricht eher Wigner's Hypothese zusammen?

Noch weiter treibt es **John A. Wheeler** 1983 in seinem Konzept des "**partizipatorischen Universums**", indem er auf Wigners Ansatz fußend schließt, daß sich zwangsläufig auch die gesamte Evolution auf unserem Planeten in Form von Superpositionen entwickelt hat. Jede Mutation ist ja in der Tat ein Quantenprozeß, in dem ein einfallendes Strahlungsquant in irgendeiner erbvermittelnden Zelle irgendwo im DNS-Strang irgendeine Veränderung bewirkt, aufgrund derer das neu entstehende Lebewesen mutiert und sich gemäß den Darwin'schen Selektionsgesetzen möglicherweise durchsetzt. Ganze Lebensformen existieren friedlich in Superposition nebeneinander, bis mit einem Mal die erste bewußte Lebensform entsteht und die ganze Umgebung sowie auch die gesamte Evolutionsgeschichte des Planeten zum Kollabieren bringt und sie festlegt auf die von uns heute vorgefundene Geschichte. Somit verleiht erst unsere eigene Gegenwart unserer Vergangenheit ihre Existenz.

Gehen wir mit unserer Grenze wieder etwas zurück und überlegen wir, ob die Zustandsfunktion nicht bereits etwas früher kollabieren könnte:

Eine voll ausformulierte Theorie von **Ghirardi, Rimini & Weber** (1986), die sog "**GRW Theorie**" legt den Kollaps der Wellenfunktion in das makroskopische Objekt. Ihre Grundhypothese ist, daß alle Wellenfunktionen eine gewisse Tendenz haben, zu kollabieren. Diese Tendenz drückt sich in einer enorm winzigen Wahrscheinlichkeit aus, womit sie erklären, warum man das Phänomen bisher

noch nicht beobachtet hat. Makroskopische Systeme wie Katzen haben aber eine gigantische Anzahl von Subsystemen, sie bestehen aus etwa 10^{23} Molekülen. Damit wird die Wahrscheinlichkeit, daß irgendeins dieser Moleküle aus seiner Superposition kollabiert enorm hoch. Und wenn dieses eine Molekül kollabiert dann "reißt" es alle anderen Moleküle mit, so daß es kein makroskopisches Objekt gibt, was sich über irgendeine beobachtbar lange Zeit in einer Superposition befindet. Die Theorie ist herrlich objektiv und sie bietet eigentlich eine wunderbare Lösung. Sie hat leider einige Probleme:

- a) Sie stützt sich auf eine unbewiesene Hypothese
- b) Sie erklärt nicht die Ausschließlichkeitsforderung (XOR), was bei einer genügend hohen Anzahl von Teilchen dazu führen kann, daß der Energiesatz verletzt wird. Dies ist ein giftiger Dorn im Auge des Physikers, der die Energieerhaltung als fundamentales Prinzip der Natur fordert und bisher auch im Einklang mit den Beobachtungen steht.

Es gibt noch eine wesentlich unkompliziertere Interpretation nach dem Reduktionsansatz. **Carl Friedrich von Weizsäcker** interpretiert die Zustandsfunktion nicht als objektiven Zustand des Systems, sondern als unseren *Informationszustand* über das System. Damit gibt die zeitliche Entwicklung der Zustandsfunktion nur an, wie sich die Konditionen unseres Wissens verändern, so daß wir mittels der Schrödingergleichung, die diesen zeitlichen Ablauf regelt, unsere Information, die wir uns zu einem bestimmten Zeitpunkt t_0 angeeignet haben in die Zukunft hineinverlegen können, so daß daraus "Voraussagen" werden. Naturgemäß haben Voraussagen einen probabilistischen Charakter, so daß uns der sog "Kollaps" der Zustandsfunktion überhaupt nicht weiter zu wundern braucht. Eine Kollektion von möglichen einander ausschließenden Aussagen sind eben nicht alle gleichzeitig wahr. Eine Messung aktualisiert einfach unseren Wissensstand. Diese Aktualisierung ist naturgemäß sprunghaft und irreversibel. Die weitere Behandlung der Wellenfunktion stützt sich dann auf diese neu hinzugewonnenen Informationen und damit sieht sie auch anders aus.

In Weizsäckers Sicht gibt es also überhaupt kein Paradoxon.

Man muß sich jedoch davor hüten, Weizsäcker in die Ecke der Subjektivisten zu drücken, die eine Welt jenseits unserer Wahrnehmung verleugnen. Er setzt das System als zwar objektiv vorhanden voraus, jedoch können wir nur über die Behandlung unseres eigenen Wissens über dieses System etwas erfahren. Denn wir können schließlich keine Aussagen über Dinge machen, von denen wir nichts wissen. Daß dieser Kenntnisstand prinzipiell eingeschränkt bleiben muß bedeutet keinesweg, daß der Zustand ebenfalls nur eingeschränkt existieren muß.

*

Kommen wir zur zweiten Art der Interpretation, dem "nichtreduktiven Ansatz":

Dieser Ansatz geht davon aus, daß die Reduktion des Zustands überhaupt nicht stattfindet. Eine Messung reduziert also den Zustand nicht, sondern läßt ihn normal weiterbestehen, in Wechselwirkung mit dem Laborsystem. Die Verfechter dieses Ansatzes müssen dann allerdings erklären,

1. Warum nur ein Zustand der Superposition durch Messung verifizierbar ist.

Denn die Erhaltung der Superposition der gemessenen Zuständen führt zur Superposition von Laborzuständen. Wieso ist diese Superposition nicht real erfahrbar, sondern immer nur ein einziger Zustand?

2. Warum bestimmte Messungen nicht miteinander verträglich sind.

Denn wenn die Messung den Zustand unberührt läßt, wie kann es dann sein, daß die Reihenfolge der unterschiedlichen Messungen bedeutsam ist und zu unterschiedlichen Resultaten führt?

3. Warum keine Interferenzerscheinungen mehr nach der Messung zu beobachten sind.

Denn wenn der Zustand vor der Messung mit sich selbst interferieren konnte, warum kann er es dann nachher nicht mehr?

Im Grunde also:

Warum sich die Zustandsfunktion genauso verhält, als ob sie reduziert worden wäre.

Eine Richtung der nichtreduktiven Interpretation versucht immerhin, Punkt 3 zu erklären. Eine Interferenz ist auch bei Wellen immer nur dann wahrnehmbar, wenn die einzelnen Anteile "interferenzfähig" sind. Beim Licht z.B. bedeutet das, daß die Lichtsignale eine bestimmte "Kohärenzlänge" haben. Angenommen, wir haben zwei Lichtimpulse, die jeweils über eine gewisse Zeit τ andauern. Sie sind dann im Raum über die Länge $c \cdot \tau$ als Wellenpakete ausgedehnt. Wenn der zeitliche Abstand zwischen diesen beiden Lichtimpulsen größer als τ ist, dann haben sie natürlich keine Möglichkeit mehr, zu interferieren, weil sie sich nicht überlagern können. Der eine Impuls kann den nächsten ja niemals einholen. Wenn man Lichtquellen hat, die Lichtimpulse im durchschnittlichen Abstand $= \tau$ emittieren und darüberhinaus von gleicher Frequenz sind, dann spricht man von "interferenzfähigem Licht" und man kann durch geeignete Versuche Interferenzen beobachten. Diese Bedingungen werden nur von Laserlicht erfüllt, weil es monochromatisch (von gleicher Frequenz) und kohärent ist. Aus diesem Grund kann man keine Interferenz beobachten, wenn man unter einer Neonröhre oder auch einer Glühbirne oder der Sonne hin und herläuft, weil diese Lichtquellen einfach zu viele verschiedene Frequenzen ausstrahlen und sich die einzelnen Interferenzen einfach so überlagern, daß im Mittel nur ein gleichmäßiges Leuchten zu beobachten ist. Übertragen auf die Wellenmechanik von Teilchen bedeutet dies: Zwar kann ein einzelnes Teilchen sehr schön mit sich selbst interferieren und damit seine Superposition sichtbar machen, ein makroskopisches Objekt wie ein Meßapparat ist dazu aber nicht mehr fähig, weil viel zu viele Teilchen beteiligt sind, die mit ihren eigenen individuellen Superpositionen zur Gesamtsuperposition beitragen, an welcher keine Interferenzerscheinungen mehr festgestellt werden können. Die Superposition des einzelnen gemessenen Teilchens wird also bei Verstärkung durch den Meßapparat "weginterferiert". Ähnlich ist natürlich auch unser gesamter Wahrnehmungsapparat als System von unvorstellbar vielen Teilchen nicht mehr als "interferenzfähig" zu bezeichnen, womit erklärt wäre, warum wir an unserer Wahrnehmung ebenfalls keine Superposition mehr feststellen. Interferenz und Superposition verschwindet also bei der Messung.

Wie erklärt sich aber, daß der Meßapparat **überhaupt** einen Meßwert mißt? Wenn sich nämlich alle Superpositionen gegenseitig aufheben, wie ist es dann möglich, daß sich irgendein Zustand gegenüber allen anderen durchsetzt? Noch dazu mit einer Wahrscheinlichkeit, die exakt der Amplitude des jeweiligen Zustands (der Koeffizient vor dem Zustandsvektor) entspricht. Warum empfinden wir nicht auch wie beim Licht ein "gleichmäßiges Leuchten", also eine gleichmäßige Anwesenheit aller Zustände? Stattdessen ist die Entscheidung für einen spezifischen Meßwert durch die Meßapparatur eindeutig und wiederholbar. Wenn die Messung die Zustandsfunktion nicht reduziert, dann müßte ich bei jeder erneuten Messung auch mal andere Meßwerte feststellen können. Stattdessen legt eine einzige Messung den Zustand des Teilchens für alle Zukunft fest, solange ich keine unverträgliche Messung mache, die die vorhergehende Messung teilweise oder vollständig aufhebt. Dies bleibt meiner Ansicht nach ungeklärt.

Ein weiterer Versuch von **Kochen** (1985 "A New Interpretation Of Quantum Mechanics") fußt auf der formalen Eigenschaft von Matrizen, daß es generell eine Eigenbasis gibt, in der sie in Diagonalform darstellbar sind. Eine Diagonalform einer ganz speziellen Matrix, die man als den "Dichteoperator" des Systems bezeichnet, entspricht übertragen einem statistisch "gemischten" Zustand, also einem klassischen Zustand, indem keine Superposition existiert, sondern nur eine wahrscheinlichkeitsgewichtete Verteilung von Zuständen. Wenn ich also den "gemischten Zustand" als

etwas natürliches, weil klassisch handhabbares betrachte, so läßt sich natürlich auch das kombinierte System Teilchen-Meßapparat durch eine solche diagonalisierte Matrize beschreiben. Die Eigenbasis, die ich dazu wählen muß entspricht dann gewissermaßen einer neuen "Eigenschaft", bezüglich derer das System betrachtet wird. Unsere Interpretation, daß bei einem bestimmten Zeigerausschlag oder einem Aufleuchten eines Schirms oder einer sonstigen Anzeige das Teilchen in einem dazu korrelierten Zustand befindet, ist ja nur ein mentaler Prozeß. Wir **schließen** aus dem einen das andere. Was wir tatsächlich beobachten ist ja nicht das Teilchen, was sich in irgendeinem Zustand befindet, sondern das System Teilchen-Meßapparat. Wenn die beobachtbaren Eigenschaften dieses Systems korreliert sind mit jener Eigenbasis, dann finden wir statt einer Superposition einen "gemischten Zustand" vor, welcher uns nicht mehr die philosophischen Schwierigkeiten bereitet, wie ein superpositionierter Zustand.

Diese Erklärung erscheint beruhigend, da man so Quantenphysik auf statistische Physik zurückführen kann. Allerdings nur, wenn man dies wirklich beruhigend findet. Warum ist denn aber dieser gemischte Zustand, dem wir dem Teilchen zuschreiben, an einem **einzelnen** Teilchen nicht beobachtbar? Wenn wir den gemischten Zustand einem Ensemble von Teilchen zuschreiben, dann ist das in der Weise sinnvoll, als eben jedes Teilchen sich in einem anderen Zustand befindet und das Ensemble der Teilchen in einem Gemisch der einzelnen Zustände. Welches Teilchen sich in welchem Zustand befindet ist dabei unbekannt und spielt für die statistische Betrachtung keine Rolle. Betrachtet man dann ein einzelnes Teilchen dieses Ensembles, so kann man nach derselben Statistik bestimmte Wahrscheinlichkeitsaussagen über seinen Zustand machen. In diesem Sinne, aber nur in diesem abstrakten Sinne, behandelt man das Teilchen, **als ob** es sich in einem gemischten Zustand befindet. In der Quantenphysik zwingt uns aber die Identität der Darstellung eines reinen Zustands bezüglich verschiedener Eigenschaften einmal als einzelnen Zustandsvektor und einmal als Superposition von Zustandsvektoren dazu, sogar dieses individuelle Teilchen **tatsächlich** als Gemisch von Zuständen zu akzeptieren. Dies geht fundamental über die Aussagen der Statistischen Physik hinaus. Ein Ensemble von Teilchen kann sich statistisch verhalten, kein Problem. Wie aber kann sich **ein einzelnes Teilchen** statistisch verhalten? Meiner Ansicht nach ist genau diese Anerkennung der Realität von probabilistischen Überlagerungen in einer individuellen Einheit das Problem, was wir mit der QM haben. Es liegt in der Gleichung:

$$|a\rangle = c_1|b_1\rangle + c_2|b_2\rangle + \dots$$

*

Ein weiterer Ansatz, die "**Modale Interpretation**" von *Bas van Fraasen* (1971) versucht die Zustandsreduktion zu umgehen, indem die Korrelation Eigenwert - Eigenzustand außer Kraft gesetzt wird. Die Tatsache, daß wir einen Meßwert a beliebig oft an einem System messen können, deutet nicht mehr unbedingt darauf hin, daß sich das System in einem Eigenzustand $|a\rangle$ befindet. Umgekehrt bleibt die Korrelation: Wenn sich das System in einem Eigenzustand $|a\rangle$ befindet, dann messen wir auch mit Sicherheit die Eigenschaft a .

$$|a\rangle \quad \emptyset \quad a$$

aber $a \quad \text{--}/> \quad |a\rangle$

Die modale Interpretation erlaubt also auch einer Superposition, eine bestimmte "reale" Eigenschaft zu haben und damit verfällt die ganze Mystik einer Superposition, nämlich, daß sie aus mehreren Zuständen gleichzeitig besteht, die voneinander verschiedene und sich gegenseitig ausschließende Eigenschaften haben. In der modalen Interpretation gibt es daher auch keine Zustandsreduktion. So raffiniert diese Hintertür gesägt wurde, sie führt uns nicht weiter. Zwar sind die problematischen Konsequenzen der theoretischen Überlegungen beseitigt, aber leider auch die Grundlagen, auf denen sie aufgebaut wurde. Denn wir haben zu Anfang gesehen, daß die Korrelation zwischen Eigenwert

und Eigenzustand nur eine Erklärung der Begriffe war. Wenn diese Korellation aufgehoben wird, werden die Begriffe sinnlos, auch wenn unser normaler Weltverstand beruhigt wird. Formal können wir natürlich dann rechnen und uns an den Resultaten freuen, die auch vorher schon richtig waren. Aber indem wir die wichtige **Sinnbeziehung** zu dem, was ein Zustand überhaupt bedeutet, geopfert haben, haben wir auch ein wirkliches Verständnis von dem geopfert, was Realität sein könnte.

*

Kommen wir schließlich zur radikalsten Interpretation des Meßproblems. Sie ist in der Tat nicht etwa wie die anderen Interpretationen eine "Lösung" des Paradoxons, sondern vielmehr eine "Radikalisierung" desselben. Sie interpretiert das Meßproblem nicht so, daß es wieder mit unserer normalen Weltsicht übereinstimmt und damit die Eigenschaft verliert, paradox zu sein, sie interpretiert es so, daß es noch viel weiter von unserer normalen Weltsicht abweicht und in diesem Sinner noch paradoxer wird.

Ich spreche von der "**Mehrwelten-Theorie**".

Sie wurde von **H. Everett** 1957 formuliert und zu einer konsequenten Quantentheorie ausgebaut.

Die Kernaussage der Mehrwelten-Theorie ist einfach:

Die Zustandsfunktion wird nie reduziert. Ihre zeitliche Entwicklung bleibt deterministisch und läßt sich mit der Schrödingergleichung vorausberechnen.

Bei einer Messung spaltet sich die Realität in der Weise auf, daß in jeder Einzelrealität ein bestimmter Meßwert verwirklicht wird.

Dem Beobachter kommt es so vor, als ob die Zustandsgleichung reduziert würde, weil er sich unmittelbar nach der Messung in einer jener Welten befindet, in der er einen bestimmten Eigenzustand verifiziert hat. Damit ist die Wahrscheinlichkeit, daß dieser Zustand vorliegt in dieser Welt natürlich Eins und die Wahrscheinlichkeiten der anderen Eigenzustände Null. Dies entspricht genau der Zustandsreduktion im herkömmlichen Sinne. Auch der Beobachter spaltet sich auf und verifiziert in jeder der Welten einen anderen Zustand.

Die Mehrwelten-Theorie ist damit eine Art Kopernikanische Wende in der QM. Nicht die Sonne dreht sich um die Erde, sondern die Erde um die Sonne. Nicht die Zustandsfunktion des gemessenen Systems wird reduziert sondern die Zustandsfunktion des Laborsystems spaltet sich auf. Ähnlich der Orthogonalität der Eigenzustände des gemessenen Systems sind auch die Bewußtseinszustände des Beobachters orthogonal zueinander und haben so keinerlei Wechselwirkung. Also "ahnen" die Bewußtseinszustände nichts voneinander. Wenn sie dies tun würden, über irgendeine Art von Wechselwirkung (die nicht linear in den Hamiltonoperator eingehen dürfte), dann wäre dieser Vorgang ebenfalls eine Messung und das Bewußtsein würde sich ein weiteres Mal aufspalten. In der Science-Fiction-Literatur wird manchmal von "parallelen Universen" gesprochen. Es handelt sich dabei um literarische Verarbeitungen der Everett'schen Mehrwelten-Theorie. Nur ist das Wort "parallel" unglücklich gewählt. Tatsächlich sind die Welten nicht parallel, sondern im Gegenteil orthogonal zueinander. Das Wort "parallel" ist eher so gemeint, daß sie gleichzeitig existieren. Da in jeder der Teilwelten der Zustand reduziert erscheint, haben wir damit automatisch alle Erklärungspflichten erfüllt. Die Mehrwelten-Theorie liefert also eine konsistente und schlüssige Deutung des Meßproblems. Selbst von Weizsäcker gesteht der Mehrwelten-Theorie als einzige Interpretation zu, "vollständig und fehlerlos" zu sein. Und dabei ist er im übrigen äußerst kritisch und zerlegt mit Scharfsinn und ohne Schonung einige der hier aufgeführten Interpretationen.

Das einzige Problem, was wir mit der Mehrwelten-Theorie haben, ist sicherlich, daß sie sämtliche Rahmen unserer Vorstellung sprengt.

Jeder makroskopische Vorgang ist bereits eine Messung, jedesmal spaltet sich die Realität in viele Realitäten auf und jede von diesen Realitäten spaltet sich im nächsten Moment bereits wieder auf. Unser individuelles Bewußtsein, mit Erinnerung ausgestattet, gleitet durch diesen unermesslich großen Raum der Realitäten hindurch wie eine Sardine durch den Pazifischen Ozean. Die verschiedenen Aufspaltungen unserer selbst leben unabhängig voneinander ihr eigenes Leben und erleben ihre

eigene Realität. Und doch ahnen wir nichts von ihnen. Daher ist eben die Mehrwelten-Theorie leider eine bislang noch unbeweisbare Theorie.

Es sei denn, es gibt eben doch irgendeine Art der Wechselwirkung zwischen den Teilrealitäten, die Informationsaustausch zwischen verschiedenen "parallelen" bzw. orthogonalen Realitäten ermöglichen würde. Wenn dies irgendwann einmal experimentell gelänge, so wäre dies ein Beweis, daß Realität nicht ausschließlich in der uns bekannten Form existiert, mit einer genau festgelegten Geschichte aber einer unbestimmten Zukunft, sondern daß die Gegenwart wie auch die Vergangenheit im gleichen Maße unbestimmt sind wie die Zukunft, und all ihre Realisierungen zu jedem Zeitpunkt nebeneinander existieren. Die Zeit wäre damit etwas vollkommen symmetrisches und dem Raum gleichgestelltes, was in der Tat bisher noch nicht theoretisch realisiert ist. Auch in der Realativitätstheorie unterliegt die Zeit noch einer Trennung von Vergangenheit und Zukunft, die sie vom Raume unterscheidet. Ist diese Trennung aber aufgehoben, die Symmetrie also perfekt, so ist die Zeit dem Raum gleichgestellt und sie verliert ihre beschränkende Rolle. Zeitreisen wie auch Raumreisen über beliebige Entfernungen wären denkbar, Präkognition und Synchronizitäten wären erklärbar und dem Menschen wird über eben diese Wechselwirkung zwischen den einzelnen Teilrealitäten geradezu wörtlich eine "Entscheidungskraft" gegeben, es wird ihm die Freiheit des Willens wiedergegeben. Vielleicht klingt diese Vision pathetisch, jedoch ist in der Tat eine solch weitreichende Folge von Konsequenzen einer einzigen leichten Abänderung einer physikalischen Theorie (und die Abänderung ist wirklich nicht tiefgreifend) erschütternd. Es wundert mich jedoch, daß sich offenbar nur die allerwenigsten über diese Konsequenzen im Klaren sind. Die Wissenschaftler halten die Mehrwelten-Theorie für unwichtig und unbeweisbar und die Nichtwissenschaftler kennen sie nicht. Es fehlt in der Wissenschaft nach wie vor die stete Verbindung formaler, wissenschaftlicher Gedanken mit deren philosophischen Konsequenzen. Sie werden zum Teil schlichtweg ignoriert oder sogar verleugnet. In der Philosophie andererseits fehlt die Verbindung zu den Erkenntnissen der Wissenschaft. Sie werden genauso ignoriert oder verleugnet. Wenn man dazu beitragen könnte, daß sich beide Denkrichtungen wieder vereinen würden, dann wäre die Qualität der menschlichen Einsicht bedeutend höher und die Gefahr ihrer zerstörerischen Auswirkungen bedeutend niedriger.

Ich danke für Ihre Aufmerksamkeit

Literatur

- Hans-Peter Dürr (Hrsg.). "Physik und Transzendenz". Scherz
- Lawrence Sklar. "Philosophy of physics". Oxford University Press
- Fritjof Capra. "Das Tao der Physik". Scherz
- Roger Penrose. "Computerdenken". Spektrum
- C. F. von Weizsäcker. "Aufbau der Physik". dtv wissenschaft

- Arthur Fine. "Probability and the interpretation of quantum mechanics". Brit.J.Phil.Sci.24 (1973).
- Arthur Fine. "Measurement and Quantum silence". Kluwer academic publishers (1993).
- Arthur Fine. "With complacency or concern: Solving the measurement problem". Aus "Kelvin Baltimore Lectures and Modern Theoretical Physics". Cambridge MIT Press (1987).
- Bas van Fraassen . "The modal interpretation of quantum mechanics". Aus B.v.Fr. "Quantum mechanics: an empiricist's view". Oxford University Press
- Rig Hughes. "The structure and interpretation of QM". Harvard University Press (1989).
- Eugene P. Wigner. "Remarks on the mind-body question" (1961).
Reprinted in E.P.Wigner. "Symmetries and reflections" . Indiana University Press
- Hilary Putnam. "QM and the observer". D. Reidel Publishing (1981).