

**Institut für Geschichte der Naturwissenschaften**

Institute for the History of Science

Johann Wolfgang Goethe-Universität

---

Frank Linhard

Interpretation der Quantenmechanik, Holismus und Weltbild

Juli 1997

**Preprint No. 34**

---

**The IGN Preprint Series**



# Interpretation der Quantenmechanik, Holismus und Weltbild

Frank Linhard

Institut für Geschichte der Naturwissenschaften  
Johann Wolfgang Goethe-Universität  
Robert-Mayer-Str.1  
D-60054 Frankfurt am Main  
( [+49] 069 798 28397  
e-mail: linhard@rz.uni-frankfurt.de  
<http://www.rz.uni-frankfurt.de/~linhard/people/flin.html>

## Teil I: Doppelspalt und Einführung in die Quantenmechanik

Diese Arbeit untersucht zunächst die Frage, warum und inwiefern die Quantenmechanik als physikalische Theorie interpretiert werden muß. Die Standard-Interpretation und die prinzipielle Problematik in der Beschreibung der Welt der Quanten sollen anhand des einfachen Doppelspaltexperimentes untersucht werden. Die Superposition von Zuständen und der daraus folgende *Holismus* sind wesentliche Eigenschaften quantenmechanischer Theorien. Dadurch wird ein mathematischer Formalismus notwendig, der auch als Erkenntnismittel dieses Bereiches unserer Welt dienen muß. Der EPR-Holismus der Quantenmechanik wird in einem konstruierten „klassischen Äquivalent“ verdeutlicht. Dann soll die mit dem „Kollaps“ der Kopenhagener Interpretation verbundene Problematik der *VON NEUMANNschen Kette* zur Sprache gebracht werden.

Im zweiten Teil soll unter Bezugnahme auf das *Prinzip der kleinsten Wirkung* der *Pfadintegralformalismus* FEYNMANS plausibel gemacht werden. Anhand dieser Darstellung kann dann ein Gefühl für den möglichen Übergang von der quantenmechanischen Domäne unserer Welt in die klassische vermittelt werden. Auf der Basis des Formalismus wird dann die EVERETTSche Viele-Welten-Interpretation der Quantenmechanik favorisiert, wobei die *Dekohärenz* komplexer Systeme, sowie eine *Indefunktion des Individuums* (Beobachters) als Ergänzungen hinzukommen. Aus den drei Elementen

- FEYNMANScher Pfadintegralformalismus
- EVERETTSche Viele-Welten-Interpretation
  - Dekohärenz

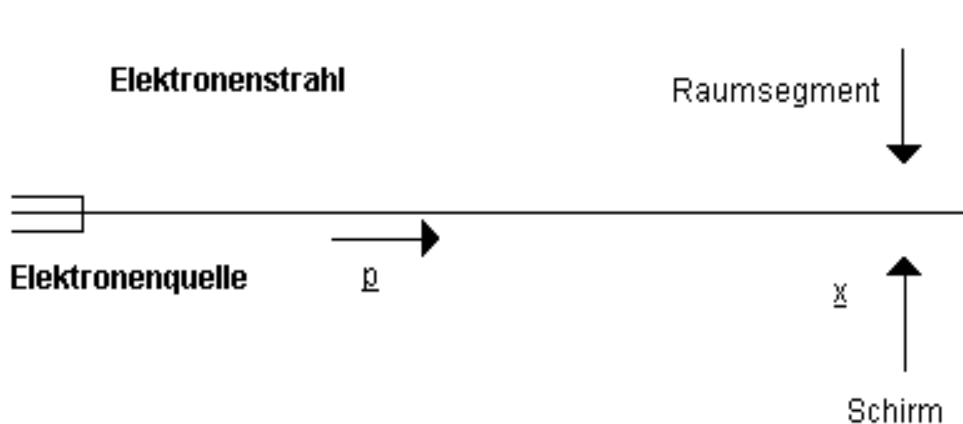
entsteht eine Interpretation der Quantenmechanik, die den Formalismus unverändert läßt und den Kollaps vermeidet.

Die Welt der quantenmechanischen Domäne ist außerhalb unserer täglichen Erfahrung und ihre Entdeckung gehört gänzlich der neuen Zeit des einsetzenden 20. Jahrhunderts an. A priori, d.h. ohne äußeren Anlaß, ist es unmöglich, sich die Zusammenhänge der Quantenwelt zu erschließen. Vielmehr sind diese Zusammenhänge dergestalt, daß sie sich unserer gewohnten Begrifflichkeit versagen. Der Beginn des 20. Jahrhunderts hielt für die einsetzende Wissenschaft der Atomphysik ein ganzes Feuerwerk neuer Entdeckungen von experimenteller Seite bereit, von denen hier nur besonders wichtige und herausragende Meilensteine genannt seien. Ohne solche experimentellen Anhaltspunkte, wäre es nie zur Formulierung einer Quantenmechanik gekommen.

- 1900 *Planck*: Strahlung des Schwarzen Körpers, Wirkungsquantum
- 1905 *Einstein*: Photoelektrischer Effekt (Teilcheneigenschaft von Strahlung)
- 1911 *Rutherford*: Atom-Streueversuch
- 1913 *Franck-Hertz*: Atomanregung in Energiequanten

Die allen experimentellen Erkenntnissen gemeinsame Pointe war im wesentlichen die Aussage, daß *alle materiellen Teilchen Welleneigenschaften haben, die unter bestimmten Umständen hervortreten*. Unter diesen Umständen muß dann die klassische Theorie konzeptuell versagen. Die Formulierung der Quantenmechanik setzt bei diesem Versagen an und überbrückt es gewissermaßen durch einen neuartigen Formalismus. Der ursprüngliche Versuch, auch eine begriffliche Veränderung durchzuführen, die den neuartigen Verhältnissen gerecht wird, kann wohl in groben Zügen als gescheitert gelten. Bezüglich des Verständnisses bleiben wir also auf den quantenmechanischen Formalismus angewiesen.

Eine Vorstellung von den Vorgängen in der intuitiv paradox anmutenden quantenmechanischen Domäne unserer Welt, soll das bekannte Doppelspaltexperiment liefern, das die genuin quantenmechanischen Eigenarten besonders deutlich werden läßt, weil es von der Konzeption her so einfach anmutet. Für Elektronen ursprünglich nur als *Gedankenexperiment* formuliert, ist es heutzutage - etwa seit den 80er Jahren - möglich geworden, weitgehend alle Modifikationen des Doppelspaltexperimentes auch experimentell zu realisieren.

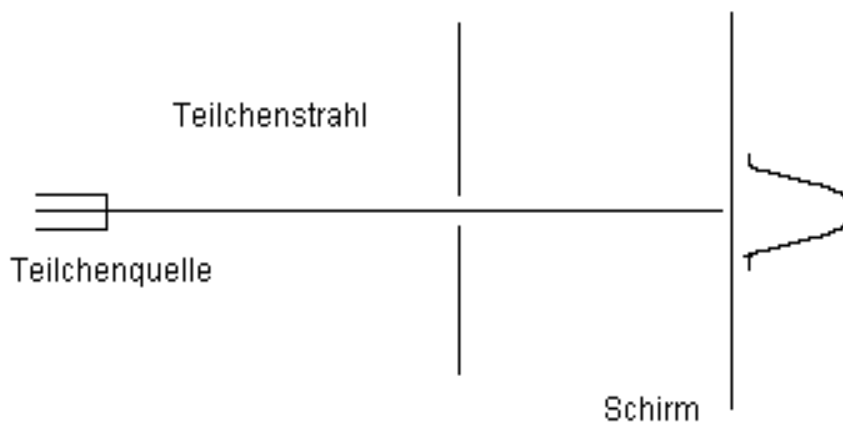


Der Aufbau ist in der Graphik wiedergegeben. Hierbei trifft ein Elektronenstrahl auf einen Schirm. Information über Ort und Impuls des Elektronenstrahles liefern die dem

Raumsegment zugeordnete Variable  $\underline{x}$  und die Impulsvariable  $\underline{p}$ , wobei die Unterstreichung zum Ausdruck bringen soll, daß es sich bei diesen Variablen um *Vektoren* handelt.

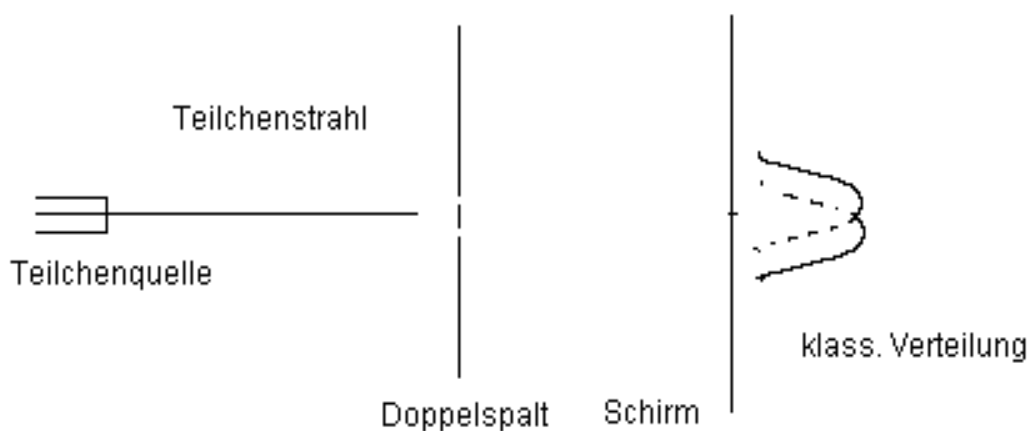
Zur Durchführung des Doppelspaltexperimentes wird zwischen die Elektronenquelle und den Schirm eine Blende gebracht, die zwei nahe beieinander liegende Spalte, eben den Doppelspalt, aufweist.

Betrachten wir zunächst das Experiment mit klassischen Partikeln, wie z. B. Sandkörnern. Befindet sich nur ein Spalt in der Blende, so ist das Ergebnis nicht weiter überraschend:



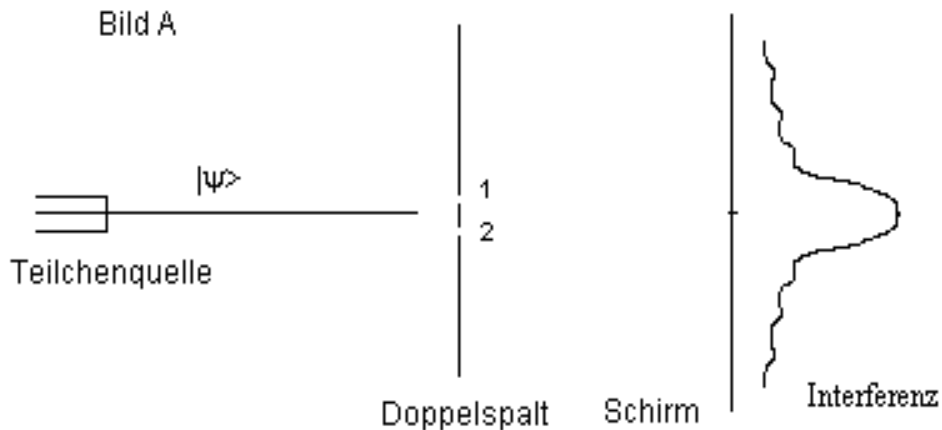
Der Strahl der Teilchen streut an der Blende und bildet einen klassischen „Verteilungsbuckel“, der sich um die Verbindungslinie von Teilchenquelle und Blendenloch häuft.

Wiederholt man das Experiment mit kleinen Partikeln am Doppelspalt, so findet gewissermaßen eine Überlagerung der Buckel statt, in der die Anteile jedes der beiden Spalte noch deutlich auszumachen sind. Es findet eine additive Überlagerung statt:



Im Falle, daß es sich um einen Strahl von quantenmechanischen Teilchen handelt, sieht das Ergebnis anders aus. Die Elektronen, oder Photonen, die hier durch ihren

Wellenvektor, oder ihre Wellenfunktion  $|\Psi\rangle$  bezeichnet sind, erzeugen auf dem Detektorschirm ein Interferenzmuster, wie es für Wellen üblich ist:



Man erklärt dieses Muster üblicherweise, indem man eine Teilung des  $|\Psi\rangle$  am Doppelspalt annimmt und die Interferenz durch Überlagerung der zu je einem Spalt gehörigen Komponenten erklärt:

$$|\Psi\rangle = 1/\sqrt{2} |\Psi_1\rangle + 1/\sqrt{2} |\Psi_2\rangle$$

Um das Verhalten quantenmechanischer Teilchen zu verstehen, ist es wesentlich, zwei experimentelle Fakten ernst zu nehmen:

1. Das Interferenzmuster tritt auch auf, wenn sichergestellt ist, daß sich nur *ein* Teilchen in der Apparatur befindet. Die Interferenz wird also nicht durch Wechselwirkung mit anderen streuenden Teilchen hervorgerufen.
2. Jeder Versuch, zu bestimmen, durch welchen der beiden Spalte (1 oder 2) das Teilchen hindurch getreten ist, *zerstört* das Interferenzmuster. Man sagt *die Wellenfunktion  $|\Psi\rangle$  kollabiert*. Die Verteilung aus Bild A wird dann zu einem der klassischen „Buckel“.

Die Wellenfunktion  $|\Psi\rangle$  ist die Beschreibungsgröße der Quantenmechanik. Diese Größe enthält alle Informationen über die Physik des zu untersuchenden Objektes. Die Notwendigkeit einer Interpretation der Quantenmechanik entspringt unter anderem daraus, daß diese Größe notwendig *unanschaulich* ist. Dies muß sie allein schon deshalb sein, weil der Formalismus erfordert, daß  $\Psi$  im allgemeinen eine *komplexe* Größe ist, d. h., daß sie neben einem reellen Teil auch einen Imaginärteil hat. Imaginäre Größen können in der Physik nicht beobachtet werden.

Betrachtet man beispielsweise die Bahnkurve  $r(t)$  der klassischen Mechanik als die Größe, die - zusammen mit der Impulsgröße  $p$  - jede physikalische Information über das mechanische System enthält, so kann sie nicht nur direkt beobachtet werden, nein: auch ihre Interpretation ist evident: Die Bahnkurve ist der Weg, den ein Massepunkt in Raum und Zeit zurücklegt.

Die Interpretation der quantenmechanischen Basisgröße ist nicht evident. MAX BORN hat 1926 in seiner Arbeit *Zur Quantenmechanik der Stoßvorgänge* (Z.Physik **37**, p.863-7 (1926)), die Größe  $\Psi$  interpretiert:

»Will man nun dieses Resultat korpuskular umdeuten, so ist nur eine Interpretation möglich:  $\Psi_{nm}(\alpha, \beta, \gamma)$  bestimmt die Wahrscheinlichkeit<sup>1</sup> dafür, daß das aus der z-Richtung kommende Elektron in die durch  $\alpha, \beta, \gamma$  bestimmte Richtung (und mit einer Phasenänderung  $\delta$ ) geworfen wird, wobei seine Energie  $\tau$  um ein Quant  $h\nu_{nm}^0$  auf Kosten der Atomenergie zugenommen hat[...].

Die SCHRÖDINGERSche Quantenmechanik gibt also auf die Frage nach dem Effekt eines Zusammenstoßes eine ganz bestimmte Antwort; aber es handelt sich um keine Kausalbeziehung. Man bekommt keine Antwort auf die Frage, „wie ist der Zustand nach dem Zusammenstoße“, sondern nur auf die Frage, „wie wahrscheinlich ist ein vorgegebener Effekt des Zusammenstoßes“ (wobei natürlich der quantenmechanische Energiesatz gewahrt sein muß).

Hier erhebt sich die ganze Problematik des Determinismus. Vom Standpunkt unserer Quantenmechanik gibt es keine Größe, die im Einzelfalle den Effekt eines Stoßes kausal festlegt; aber auch in der Erfahrung haben wir bisher keinen Anhaltspunkt dafür, daß es innere Eigenschaften der Atome gibt, die einen bestimmten Stoßerfolg bedingen. Sollen wir hoffen, später solche Eigenschaften (etwa Phasen der inneren Atombewegungen) zu entdecken und im Einzelfalle zu bestimmen? Oder sollen wir glauben, daß die Übereinstimmung von Theorie und Erfahrung in der Unfähigkeit, Bedingungen für den kausalen Ablauf anzugeben, eine prästabilisierte Harmonie ist, die auf der Nichtexistenz solcher Bedingungen beruht? Ich selber neige dazu, die Determiniertheit in der atomaren Welt aufzugeben. Aber das ist eine philosophische Frage, für die physikalische Argumente nicht allein maßgebend sind.«

Soweit die *Wahrscheinlichkeitsdeutung* der Wellenfunktion. Eine wesentliche Eigenschaft quantenmechanischer Systeme ist der Umstand, daß sie sich - wie im Doppelspaltexperiment gezeigt - in einer Überlagerung von Zuständen befinden können. Im einfachsten Fall (dem von oben) in einer Überlagerung von zwei Zuständen:

$$|\Psi\rangle = 1/\sqrt{2} |\Psi_1\rangle + 1/\sqrt{2} |\Psi_2\rangle$$

Diese Überlagerung von Zuständen heißt *Superposition*. Im Formalismus ist das sog. Superpositionsprinzip eine Folge der Linearität der Basisgleichung. Die Basisgleichung heißt SCHRÖDINGERgleichung und ist eine partielle Differentialgleichung, die den Wellenvektor  $|\Psi\rangle$  vollständig determiniert.

P.A.M. DIRAC beschreibt die Superposition in seinen *Principles of Quantum Mechanics* folgendermaßen:

»Zwischen Zuständen bestehen Beziehungen, so daß ein System in einem Zustand immer so aufgefaßt werden kann, als ob es sich in jedem von zwei oder mehreren Zuständen befindet.«

---

<sup>1</sup>Anmerkung bei der Korrektur: Genauere Überlegung zeigt, daß die Wahrscheinlichkeit dem Quadrat der Größe  $\Psi_{nm}$  proportional ist. (Fußnote von MAX BORN)

Eine *Entwicklung von Zuständen* hat dann die Form, daß sich die Gesamtwellenfunktion  $|\Psi\rangle$  aus einer Summe von Zustandsfunktionen zusammensetzt:

$$\Psi = \sum_n a_n \varphi_n$$

Selbstverständlich hat eine solche Auffassung für Teilchen kein klassisches Äquivalent.

Die Zustandsentwicklung ist eine wesentliche Eigenschaft der Quantenmechanik, die auch wichtige Besonderheiten der experimentellen Ergebnisse erklären kann - z. B. das Auftreten von Interferenz im Doppelspalt.

Die physikalische Theorie hat drei voneinander unabhängige, jedoch vollständig äquivalente mathematische Darstellungen gefunden, die die quantenmechanischen Besonderheiten abbilden. 1925 hat HEISENBERG in Zusammenarbeit mit JORDAN und BORN den *Matrizenkalkül* entwickelt, der den Neuartigkeiten auch gleichsam eine neue Mathematik zugesellen wollte. Bereits ein Jahr später legte jedoch SCHRÖDINGER seinen *Differentialgleichungsformalismus* vor, der an die formalen Traditionen der klassischen Physik anknüpfte. Freilich folgt daraus nichts für den Status der experimentellen Neuartigkeiten. Bezüglich der formalen Grundlagen interessant, durch die Anknüpfung an das Prinzip der kleinsten Wirkung, aber auch von besonderem physikhistorischem Reiz, ist der Pfadintegralformalismus FEYNMANS, der 1948 formuliert wurde.<sup>2</sup>

Die Wahrscheinlichkeitsdeutung von MAX BORN ist eine Aussage über den konkreten - anschaulichen - Gehalt der Wellenfunktion. Eine Deutung der Quantenmechanik als physikalischer Theorie erfordert eine Aussage über den Zusammenhang der formalen Aussagen mit den Ergebnissen, die der Experimentalphysiker im Labor erzielt. NIELS BOHR und WERNER HEISENBERG haben in den Jahren 1926 und 1927 am Heimatinstitut BOHRs in Kopenhagen einen intensiven Gedankenaustausch über die begrifflichen Inhalte der neuen Theorie und insbesondere über ihren Bezug zur konkreten Physik gehabt. Die Ergebnisse dieses Austausches fanden ihren Eingang in die Literatur unter der Bezeichnung *Kopenhagener Deutung*. Sowohl BOHR als auch HEISENBERG haben auf der Basis ihrer Diskussionen ganze Philosophien entwickelt. Die Basisaussagen bezüglich der Physik haben sich als minimale Interpretationslösungen insbesondere unter pragmatischen Gesichtspunkten bewährt. Hier sollen diese Basisaussagen kurz dargestellt werden.

Der meßtheoretische Inhalt der Deutung kann mit WHEELERS Zitat:

»Nur ein irreversibel registriertes Quantenphänomen ist ein physikalisches Phänomen.«

kurz und knapp zusammengefaßt werden. Die irreversible Registrierung erfordert eine physikalische Beobachtung (Messung). Während man in den klassischen Theorien den Einfluß des Beobachters auf das System abschätzen kann, stellt in der Quantenmechanik jede Messung eine äußere Beeinflussung des ursprünglichen Systemes dar. Der Zustand des ungestörten Systemes kann dann faktisch nicht beobachtet werden. Somit sind nach obigem Satz in diesem System aber keine physikalischen Phänomene möglich.

---

<sup>2</sup>Hierauf wird später noch ausführlich eingegangen werden.



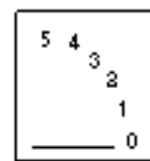
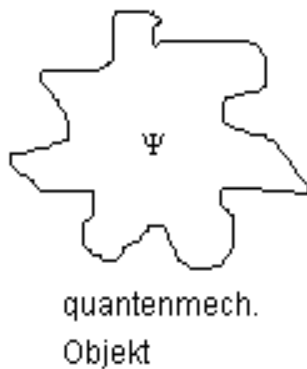
Insbesondere wird damit auch eine eindeutige Definition des Systemzustandes erunmöglicht.

Durch *unkontrollierbare Störungen* (Messung) kann das weitere Verhalten des Objektes nicht mehr vorhergesagt werden. Damit ist die klassische Kausalität aufgehoben.<sup>3</sup>

In der Sichtweise der Kopenhagener Deutung nimmt das quantenmechanische System durch die irreversible Registrierung einen eindeutigen Zustand ein, d. h., daß sich die Teilzustände der Zustandsentwicklung gewissermaßen für einen entscheiden. Formal wichtig ist, daß jede Wellenfunktion in eine beliebige Basis von Zuständen entwickelt werden kann, solange die Zustandsfunktionen die mathematische Eigenschaft aufweisen, eine sog. „vollständige Orthonormalbasis“ zu bilden.

Sehen wir uns den Kopenhagener Kollaps an einem Beispielsystem an, das die Eigenschaft haben soll, nur 5 Zustände annehmen zu können:

$\Psi$  sei wieder die Wellenfunktion des quantenmechanischen Systemes. Ein klassischer Meßapparat kann die 5 Zustände und den Nullausschlag anzeigen.

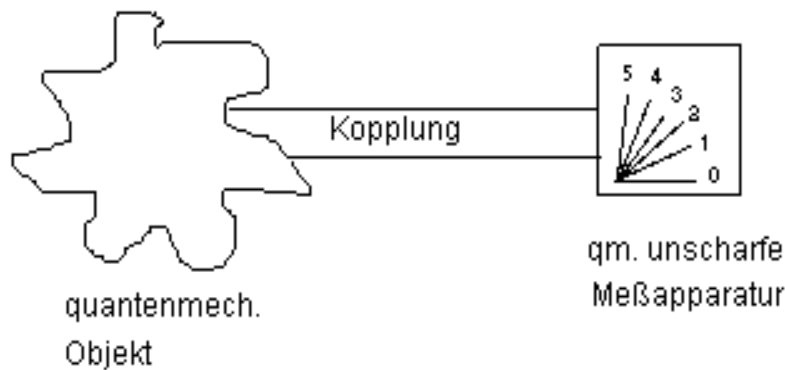


klassische  
Meßapparatur

In der Ausgangssituation läßt sich über das ungemessene quantenmechanische Objekt keine konkrete Aussage treffen. Es wird durch die Funktion  $\Psi$  beschrieben, die in beliebige Orthonormalzustände entwickelt werden kann. Die Meßapparatur hat den Zustand  $\varphi = 0$ .

Koppelt man das Meßgerät an das Objekt, so befindet sich das Objekt in einer Superposition von Zuständen, die durch die möglichen Zustände des Meßgerätes bestimmt ist.

<sup>3</sup>Das ist es auch, was MAX BORN in obigem Zitat meint.



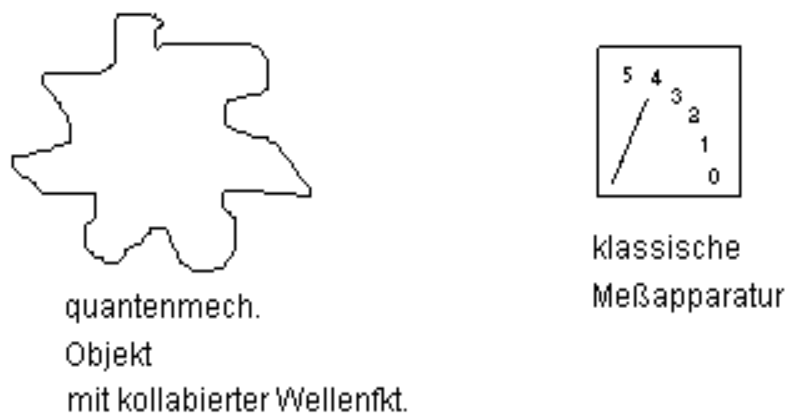
Für das quantenmechanische Objekt gilt

$$\Psi = \sum_n a_n \varphi_n \quad (n = 1, 2, 3, 4, 5)$$

und das klassische Meßgerät bleibt bis zur Ablesung unscharf, also im Zustand

$$\varphi = \sum_n a_n \varphi_n \quad (n = 1, 2, 3, 4, 5).$$

Durch die Ablesung der Meßapparatur *kollabiert* die Wellenfunktion:



Die Systemzustände werden eindeutig. Es ist  $\Psi = \varphi_4$  der Zustand des quantenmechanischen Objektes und  $\varphi = \varphi_4$  der der Meßapparatur.

Problematisch hierbei ist der „Zeitpunkt“ des Kollapses, sowie der Umstand, daß man eines klassischen Systemes zur Zustandsbestimmung bedarf. Das ist mit dem Universalitätsanspruch der Quantenmechanik nicht vereinbar und führt auf Probleme in der Quantenkosmologie.

Doch sehen wir uns zuerst die Problematik des Zeitpunktes an, die in der sog. „v. NEUMANNschen Kette“ zum Ausdruck kommt.

JOHN VON NEUMANN hat in seinem Buch *Mathematische Grundlagen der Quantenmechanik* von 1932 die Problematik folgendermaßen geschildert:

»Zunächst ist es an und für sich durchaus richtig, daß das Messen, bzw. der damit verknüpfte Vorgang der subjektiven Apperzeption eine gegenüber der physikalischen Umwelt neue, auf diese nicht zurückführbare Wesenheit ist. Denn sie führt aus dieser hinaus, oder richtiger: sie führt hinein, in das unkontrollierbare, weil von jedem Kontrollversuch schon vorausgesetzte, gedankliche Innenleben des Individuums (...). Trotzdem ist es aber eine für die naturwissenschaftliche Weltanschauung fundamentale Forderung, das sog. Prinzip vom psychophysikalischen Parallelismus, daß es möglich sein muß, den in Wahrheit außerphysikalischen Vorgang der subjektiven Apperzeption so zu beschreiben, als ob er in der physikalischen Welt stattfände - d. h. ihren Teilen physikalische Vorgänge in der objektiven Umwelt, im gewöhnlichen Raume, zuzuordnen. (Natürlich ergibt sich bei diesem Zuordnungsprozeß immer wieder die Notwendigkeit, diese Prozesse in solche Punkte zu lokalisieren, die im von unserem Körper eingenommenen Raumteile liegen. Dies ändert aber nichts an ihrer Zugehörigkeit zur Umwelt.) Auf ein einfaches Beispiel wäre diese Auffassung etwa so anzuwenden: Es werde eine Temperatur gemessen. Wenn wir wollen, können wir diesen Vorgang rechnerisch so weit verfolgen, bis wir die Temperatur der Umgebung des Quecksilberbehälters des Thermometers haben, und dann sagen: diese Temperatur wird vom Thermometer gemessen. Wir können aber die Rechnung weiterführen, und aus den molekularkinetisch erklärbaren Eigenschaften des Quecksilbers seine Erwärmung, Ausdehnung und die resultierende Länge des Quecksilberthermometers errechnen, und dann sagen: diese Länge wird vom Beobachter gesehen. Noch weitergehend könnten wir, seine Lichtquelle mit in Betracht ziehend, die Reflexion der Lichtquanten am undurchsichtigen Quecksilberfaden, und den Weg der übrigen Lichtquanten in sein Auge ermitteln, sodann deren Brechung in der Linse und das Entstehen eines Bildes auf der Retina, und erst dann würden wir sagen: diese Länge wird von der Retina des Beobachters registriert. Und wären unsere physiologischen Kenntnisse genauer als sie es heute sind, so könnten wir noch weiter gehen, die chemischen Reaktionen verfolgend, die dieses Bild an der Retina, in der Nervenbahn und im Gehirn verursacht, und erst am Ende sagen: diese chemischen Veränderungen seiner Gehirnzellen apperzipiert der Beobachter. Aber einerlei, wie weit wir rechnen: bis ans Quecksilbergefäß, bis an die Skala des Thermometers, bis an die Retina, oder bis ins Gehirn, einmal müssen wir sagen: und dies wird vom Beobachter wahrgenommen. D. h. wir müssen die Welt immer in zwei Teile teilen, der eine ist das beobachtete System, der andere der Beobachter. In der ersteren können wir alle physikalischen Prozesse (prinzipiell wenigstens) beliebig genau verfolgen, in der letzteren ist dies sinnlos. Die Grenze zwischen beiden ist weitgehend willkürlich, so sahen wir im obigen Beispiel vier verschiedene Möglichkeiten für sie, insbesondere braucht der Beobachter in diesem Sinne keineswegs mit dem Körper des wirklichen Beobachters identifiziert zu werden - rechneten wir doch im obigen Beispiel einmal sogar das Thermometer dazu, während das andere Mal seine Augen und Nervenbahnen nicht dazugerechnet wurden. Daß diese Grenze beliebig tief ins Innere des Körpers des wirklichen Beobachters verschoben werden kann, ist der Inhalt des Prinzips vom psychophysikalischen Parallelismus - dies ändert aber nichts daran, daß sie bei jeder Beschreibungsweise irgendwo gezogen werden muß, wenn dieselbe nicht leer laufen, d. h. wenn ein Vergleich mit der Erfahrung möglich sein soll. Denn die Erfahrung macht nur Aussagen von diesem

Typus: ein Beobachter hat eine bestimmte (subjektive) Wahrnehmung gemacht, und nie eine solche: eine physikalische Größe hat einen bestimmten Wert.«

Im Jahre 1935 stellten EINSTEIN, PODOLSKY und ROSEN die Frage nach der Vollständigkeit der quantenmechanischen Beschreibung. Ausgangspunkt ihrer Untersuchungen, die dann zur Hypothese verborgener Variabler und die Kontroverse darum führten, war die *Nicht-Lokalität* quantenmechanischer Systeme. Diese Nicht-Lokalität läßt sich einfach formulieren, stellt aber auch eine der Neuartigkeiten der quantenmechanischen Domäne dar. Die Problematik ist die, daß zwei quantenmechanische Systeme, beschrieben durch  $\Psi_{S_1}$  und  $\Psi_{S_2}$ , so sie zu einem Zeitpunkt (t) in Wechselwirkung standen, nicht mehr separiert werden können.

Im Formalismus könnte man das als

$$\Psi_{S_1+S_2} = \Psi_{S_1} \times \Psi_{S_2} \quad t' < t$$

$$\Psi_{S_1+S_2} \neq \Psi_{S_1} \times \Psi_{S_2} \quad t' \geq t$$

schreiben. Es bleibt also ein dauerhafter Einfluß jedes Teilsystems auf die weitere Entwicklung des anderen bestehen.

Bei EPR heißt es:

»Wir sehen daher, daß als Folge zweier verschiedener Messungen, die an dem System ausgeführt werden, das zweite System in Zuständen mit zwei verschiedenen Wellenfunktionen vorliegt. Da andererseits die beiden Systeme zum Zeitpunkt der Messung nicht mehr miteinander in Wechselwirkung stehen, kann nicht wirklich eine Änderung in dem zweiten System als Folge von irgend etwas auftreten, das dem ersten System zugefügt werden mag. Es handelt sich hierbei natürlich nur um eine Äußerung dessen, was mit der Abwesenheit der Wechselwirkung zwischen den beiden Systemen gemeint ist. *Es ist daher möglich, zwei verschiedene Wellenfunktionen (...) der gleichen Wirklichkeit zuzuordnen* (nämlich dem zweiten System nach der Wechselwirkung mit dem ersten).«

Ich will versuchen, die hinter der EPR Problematik steckende Struktur durch ein „klassisches Beispiel“ zu veranschaulichen. Klassisch gibt es natürlich keine Nicht-Lokalität, gäbe es sie, so wäre folgender Vorgang denkbar, den ich aus einem Manuskript von PETER EISENHARDT entnommen habe:

»Wenn zum Beispiel zwei Photonen einmal nahe zusammen waren und nun Lichtjahre voneinander entfernt sind, bilden sie - bis zu einer möglichen Messung - *ein ganzes System*. Beide sind nicht voneinander separiert. Die Messung einer Eigenschaft eines Photons, etwa spin up, hat die sofortige Zuschreibung der Komplementäreigenschaft des anderen Photons zur Folge, hier spin down, wobei die Koordinaten frei gewählt werden können. Was heißt das? Auf der Quantenebene scheinen magische Gesetze zu herrschen. Sie zerschneiden einen Geldschein, stecken die zwei Teile in jeweils einen Umschlag und schicken den einen zu einer Freundin in Passau, den anderen zu einem Freund in Kiel. Beide Personen sind über das informiert was sie getan haben, wissen aber nicht, welchen Teil sie bekommen. Wenn die Freundin in Passau ihren Umschlag öffnet... „Kennt sie sofort den Inhalt des anderen Umschlages“, ist man versucht zu

sagen. Das stimmt, ist nicht sehr verwunderlich, und ist keineswegs alles. Sehr verwunderlich ist aber, daß zum Beispiel die Freundin in Passau *wählen kann, wie der Schein zerschnitten sein soll*. Nehmen wir an es gibt nur drei Möglichkeiten: längs, quer und diagonal. Die Freundin sagt zum Beispiel „Quer“, öffnet ihren Umschlag, findet eine quer geschnittene Hälfte vor und weiß instantan, daß die andere quer geschnittene Hälfte sich im Kieler Umschlag befindet. Sagt sie „Längs“, findet sie eine längs geschnittene Hälfte vor..., und so weiter! Sie haben den Geldschein nicht *zerschnitten*, sondern ihn in einen *überlagerten Zustand gebracht*, der lautet: #Geldschein längs zerschnitten in Passau und Kiel# & #Geldschein quer zerschnitten in Passau und Kiel# & #Geldschein diagonal zerschnitten in Passau und Kiel#. Der Geldschein war immer einer, war immer ganz, war immer zusammenhängend, bis ein Umschlag geöffnet worden ist, eine Messung vorgenommen wurde.«

Es ist vielleicht noch interessant, sich vor Augen zu führen, daß die Diskussion von 1935 auf rein formaler Basis stattfand, d. h., daß die Folgen der mathematischen Beschreibung in Gedankenexperimenten diskutiert wurden. Alle wirklichen Experimente, die technisch erst in den 80er Jahren möglich geworden sind, haben die Gedankenexperimente bestätigt, wodurch der Formalismus eine Stützung erfährt. Früher, nämlich 1966 hatte BELL bereits gezeigt, daß die Quantenmechanik in der Tat eine nicht-lokale Theorie sein muß.

Diese Nicht-Lokalität der Quantenmechanik wird innerhalb dieser meist als *Holismus* bezeichnet, wobei der Holismusbegriff von J. C. SMUTS in begrifflicher Hinsicht Pate stand. Zum klassischen Holismusbegriff der Philosophie sei hier ein kurzes Zitat<sup>4</sup> angeführt:

»*Holismus*, [...] eine bes. Art der Ganzheitslehre, die sich als Überwindung verschiedener einseitiger Auffassungen des Lebensgeschehens (Monismus, Pluralismus, Mechanismus, Vitalismus) versteht und Anspruch darauf macht, als „Metabiologie“ an Stelle der Metaphysik treten zu können. Vgl. A. MEYER, *Ideen und Ideale der biolog. Erkenntnis* (1934, S.35): „Im Gegensatz zum Vitalismus glauben wir an einen bestehenden Ableitungszusammenhang zwischen biologischen und physikalischen Gesetzen, und im Gegensatz zum Mechanismus sind wir überzeugt, daß wir die biologischen Gesetze als die komplexeren keinesfalls aus den einfacheren physikalischen ableiten können. Dann bleibt uns als dritte Möglichkeit aber noch die Hoffnung, daß wir vielleicht umgekehrt die physikalischen Prinzipien aus den biologischen ableiten können. Wäre das möglich, dann hätten wir den positiven Gehalt sowohl der mechanistischen wie der vitalistischen Idee in einer diesen beiden Antithesen überlegenen höheren Synthese zusammengefaßt. Wir würden dann mit dem Vitalismus die Eigengesetzlichkeit des Organischen gegenüber dem Unorganischen und mit dem Mechanismus den zwischen beiden Wirklichkeitsbereichen bestehenden Ableitungszusammenhang vertreten können. Diese zuerst von dem hervorragenden englischen Physiologen J. S. HALDANE (1908) vertretene Anschauung nennt man Organizismus oder Holismus.“«

## Teil II:

<sup>4</sup>JOHANNES HOFFMEISTER: *Wörterbuch der Philosophischen Begriffe*, Meiner 1955

## Das Prinzip der kleinsten Wirkung, Feynmans Pfade und die vielen Welten

### Prinzip der kleinsten Wirkung

Basierend auf dem Vorbild der klassischen Mechanik hat sich in den Teilbereichen der Physik eine Form der Beschreibung etabliert, die eine einheitliche Basis zumindest auf der Ebene des Formalismus nahe legt. Diese formale Basis aller Theorien der Physik bildet das Prinzip der kleinsten Wirkung.

Das Prinzip der kleinsten Wirkung ist ein Variationsprinzip. Zweifelsohne geht es - auch wenn LEIBNIZ keine Anwendung oder mathematische Formulierung gibt - auf den LEIBNIZschen Ansatz einer Verfaßtheit der Welt in Prinzipien zurück. Im 19. Jahrhundert hat HAMILTON das Prinzip in seiner modernen Form formuliert. Sein Verdienst bestand darin, daß er in der Lage war, die isoenergetische Einschränkung bezüglich der Pfade im Variationsprinzip zu vermeiden. Er hat gezeigt, daß LAGRANGEgleichungen aus dem Prinzip der kleinsten Wirkung ohne Beschränkungen bezüglich der virtuellen Pfade im Konfigurationsraum abgeleitet werden können.

Das Wirkungsfunktional hat die Form

$$S[q(t)] = \int_{t_1}^{t_2} L(q', q, t) dt$$

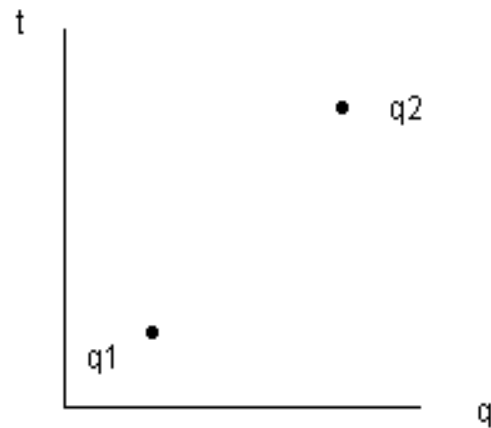
wobei  $t_1$  und  $t_2$  die Anfangs- und Endzeiten, sowie  $L$  die LAGRANGEFUNKTION des gegebenen Systemes sind. Die LAGRANGEFUNKTION  $L$  setzt sich aus kinetischer Energie  $T$  und potentieller Energie  $U$  nach  $L=T-U$  zusammen.

Diese Form des Variationsprinzipes liefert einen erweiterten Zugang zur Dynamik. Man betrachte den Anfangspunkt im Konfigurationsraum eines Systemes, der durch die Koordinaten

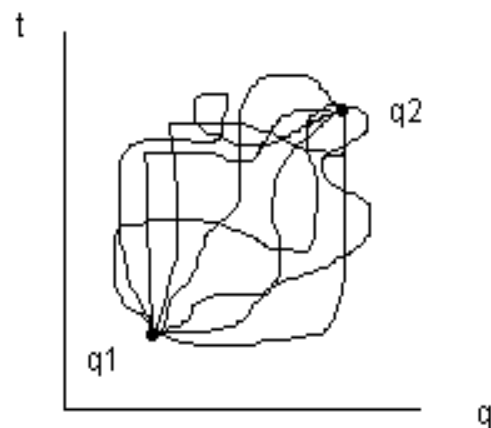
$$q_\alpha(t_1) \quad (\alpha=1, \dots, f)$$

gegeben ist, sowie durch den Endpunkt:

$$q_\alpha(t_2) \quad (\alpha=1, \dots, f).$$



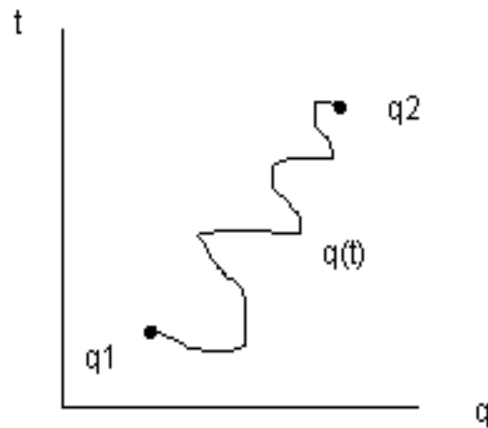
Nun stelle man sich vor, diese beiden Punkte des Phasen- oder Konfigurationsraumes wären durch *alle möglichen Pfade* dieses Raumes verbunden. Damit hat man die virtuellen Pfade.



Die Frage nach dem „wirklich“ realisierten dieser Pfade wird dann durch das Prinzip der kleinsten Wirkung beantwortet: Es ist derjenige aus der hier „anschaulich“ definierten Klasse von Pfaden, der die Wirkung  $S$  des obigen Ausdruckes minimiert. Es gibt einen Pfad  $q_r(t)$  für den die Wirkung  $S[q_r(t)]$  kleiner ist als für alle anderen Pfade:

$$S[q_r(t)] < S[q_{\alpha \neq r}(t)]$$

Dieser Pfad ist der realisierte, die Lösung der LAGRANGEgleichung.



Diese Form des Prinzips der kleinsten Wirkung ist extrem allgemein und steht in einer großen Zahl physikalischer Theorien an fundamentaler Position. Darüber hinaus hat das Prinzip der kleinsten Wirkung in dieser Form die Art in der Rechnungen in der theoretischen Physik durchgeführt werden verändert: Alle modernen Feldtheorien wie klassische und Quanten-Elektrodynamik, Gravitationstheorie, Quantenchromodynamik, Theorie der elektro-schwachen Wechselwirkungen, Theorie der Supergravitation, Superstringtheorie, wurden aus einem verallgemeinerten Prinzip der kleinsten Wirkung für Systeme mit unendlich vielen Freiheitsgraden abgeleitet. Heutzutage ist das prinzipielle Problem jeder neuen fundamentalen Theorie die Angabe der entsprechenden LAGRANGEDICHTE. Ganz abgesehen davon ist das Prinzip auch in der Berechnung konkreter Probleme von großem Nutzen.

Man sieht also, daß das Prinzip der kleinsten Wirkung ganz offenbar eine Art fundamentales Naturgesetz ist. Darüber hinaus drängt sich die Frage nach dem Hintergrund dieses Prinzips auf, nach seiner Bedeutung und wodurch die ubiquitäre Generalität gewährleistet ist. Der FEYNMANSche Pfadintegralformalismus wird auf die Antwort dieser Fragen verweisen.

## Feynmans Formalismus

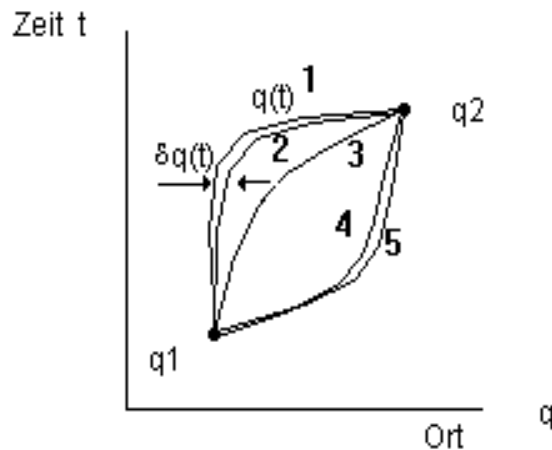
Im Jahre 1949 hat RICHARD P. FEYNMAN seine Arbeit *Space-Time Approach to Non-Relativistic Quantum Mechanics* vorgelegt, die den Pfadintegralformalismus der Quantentheorie als dritten gangbaren Weg vorstellt.

Jeder der Pfade von  $q_1$  nach  $q_2$  ( $q_i(t)$ ) hat einen korrespondierenden Wirkungs Ausdruck  $S[q_i(t)]$ . Das Vorgehen FEYNMANS besteht nun darin, formal jedem der Pfade eine *Amplitude* zuzuschreiben. Die *Phasen* dieser Amplituden sind der Wirkung proportional:

$$\varphi \sim e^{i/\hbar S}$$

Im FEYNMAN Formalismus wird auch der Übergang von der quantenmechanischen Domäne in die klassische plausibel, sehen wir uns nochmals das Zeit-Orts-Diagramm an:





Der klassische Pfad 1, oder  $q(t)$ , ist derjenige, für den die Wirkung  $S$  ein Minimum ist. Variiert man den Pfad um  $\delta q(t)$  nach 2, so ändert sich das Wirkungsintegral in erster Ordnung nicht. Daraus läßt sich die Bewegungsgleichung bestimmen.

In der quantenmechanischen Beschreibung setzt sich die Amplitude - also der Ausdruck, der nach der BORNschen Deutung die Wahrscheinlichkeit bestimmt - für einen Übergang von  $q_1$  nach  $q_2$  aus den Amplituden für jeden interferierenden Pfad zusammen, wobei die Phase jeder Amplitude der jeweiligen Wirkung, die zu dem Pfad gehört, proportional ist.

Im Falle, daß die Wirkung im Vergleich zum PLANCKSchen Wirkungsquantum  $h$  sehr groß ist, haben nahe beieinander liegende Pfade, wie 4 und 5, leicht unterschiedliche Wirkungen. Wegen der „Kleinheit“ von  $h$  haben sie jedoch höchst unterschiedliche Phasen (starke Oszillation) - ihre Beiträge heben sich auf. In der Nachbarschaft des klassischen Pfades  $q(t)$  jedoch, wo die Wirkung sich mit variierendem Pfad nur geringfügig verändert, tragen benachbarte Pfade, wie 1 und 2, in derselben Phase bei und interferieren konstruktiv, d. h. sie verstärken sich gegenseitig. Hierdurch wird die klassische Näherung, nämlich nur den Beitrag des Pfades  $q(t)$  zu betrachten, gültig, wenn die Wirkung groß gegen  $h$  ist.

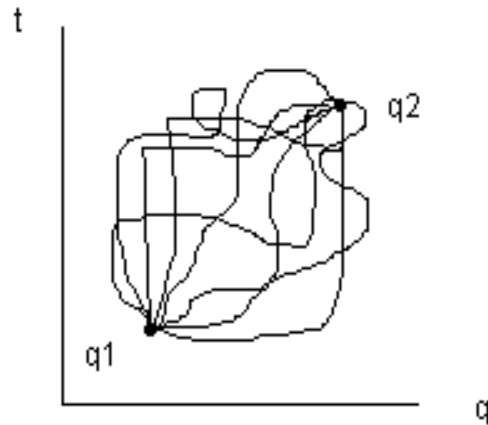
## Viele Welten

Im Jahre 1957 hatte HUGH EVERETT III die Idee, die dann auch von seinem Doktorvater JOHN A. WHEELER vertreten wurde, daß der quantenmechanische Formalismus seine eigene Interpretation liefert:

»The mathematical formalism of the quantum theory is capable of yielding its own interpretation.«

FEYNMANS Ansatz, der die Amplituden der Zustandsentwicklung, also Teilwellenfunktionen, mit den Pfaden im Variationsprinzip der Wirkung verknüpft, verleitet dazu, seine Aussage zu ontologisieren. D. h., man kann versuchen, die Zustandsentwicklung für ihren „Wert“ zu nehmen. Im FEYNMAN Formalismus setzt sich die Amplitude des quantenmechanischen Gesamtzustandes  $\Psi$  aus den Einzelzuständen  $\varphi_i$  zusammen, also

$$\Psi = \sum_n a_n \varphi_n \quad .$$



Jedem der  $\varphi_n$  ist dann einer der Pfade zwischen  $q_1$  und  $q_2$  zugeordnet. EVERETTS Anliegen war es, den quantenmechanischen Formalismus, der sich als über die Maßen erfolgreich erwiesen hatte, nicht zu verändern. Der Kollaps der Kopenhagener ist letztlich nämlich genau das: Eine durch Ausführung der Messung motivierte, un stetige Veränderung der Wellenfunktion. Nimmt man hingegen die Zustandsentwicklung für ihren „Wert“, so führt das dazu, daß jeder der Pfade zwischen  $q_1$  und  $q_2$  auch wirklich realisiert ist. Wir - als Beobachter - nehmen jedoch nur einen Ausgang, also einen der Pfade, z. B.  $\varphi_j$ , wahr. Dadurch erhalten wir gewissermaßen eine *Indexfunktion*, wir indizieren nämlich genau diejenige „Welt“, in der der  $\varphi_j$  zugeordnete Pfad realisiert ist. Die durch den Formalismus beschriebene Position, nämlich die Betrachtung der Wellenfunktion für *alle* „Welten“ können wir nicht einnehmen, wir beobachten immer nur den durch uns indizierte Pfad - gewissermaßen des Weltverlaufes.

Beim Kopenhagener Kollaps hat jeder der möglichen Zustände eine Wahrscheinlichkeit für seine Realisierung (im Sinne der BORNSchen Deutung). Nach dem Kollaps ist die Wahrscheinlichkeit kollabiert. (Es gibt keine Wahrscheinlichkeit mehr für ein mögliches Eintreten des eingetretenen Zustandes). Aus der Sicht der vielen Welten ist ohnedies jede „Welt“ realisiert, hier ist die Wahrscheinlichkeitsaussage sinnlos. Für uns als Indikatoren des Pfades jedoch nicht. Wir kennen den Verlauf nicht vorab, weil wir nicht die Perspektive aller Welten einnehmen können. Pragmatisch ist es also sinnvoll mit Wahrscheinlichkeiten zu operieren.

Als Indikatoren eines „Weltzweiges“ ist es uns unmöglich, in andere Zweige zu wechseln, also gewissermaßen den Index zu ändern. Von daher gesehen sind auch möglich Weltzustände in parallelen Welten für uns ohne Interesse, sie sind uns ohnedies unzugänglich, ob wir dort nun Bettler oder Könige wären, oder was auch immer...

Problematisch an der Aufspaltung in Pfade ist die *mathematische Beliebigkeit* der Zustandsentwicklung, schließlich kann die Wellenfunktion  $\Psi$  formal in jede sog. vollständige Orthonormalbasis entwickelt werden. Die Zustandsentwicklung erfolgt als unendliche Summation, d. h., daß es unendlich viele Weltzweige - ebenso wie Pfade zwischen  $q_1$  und  $q_2$  - geben müßte. Philosophisch erscheint dieser *metaphysische*

*Overhead*, auf den WHEELER selbst hingewiesen hatte, unschön, in Anbetracht unserer Indexfunktion ist er jedoch genauso unerheblich, wie die Vorgänge in uns unzugänglichen Weltzweigen.

Die mathematische Beliebigkeit der Basisentwicklung läßt sich mit Hilfe neuerer experimenteller Erkenntnisse der quantenmechanischen Grundlagenforschung ausschalten. Der Ansatz der sog. *Dekohärenz*, in den 80er Jahren als theoretisches Konzept entwickelt von ZUREK, ZEH, JOOS, et.al., hat in den letzten Jahren zunehmend auch experimentelle Bestätigung erfahren.

Prinzipiell knüpfen die Dekohärenz-Überlegungen an die Meßtheorie der Kopenhagener an.

In der Meßtheorie der Kopenhagener erfolgt die Ankopplung des quantenmechanischen Systemes an ein *klassisches* Meßgerät.

Im Sinne der VON NEUMANNschen Kette ist die Trennung von klassisch und quantenmechanisch jedoch willkürlich. Außerdem ist in der Kopenhagener Meßtheorie eine das Meßgerät ablesende Instanz erforderlich, was letztlich immer auf die Auszeichnung irgendeiner Art von *Bewußtsein* hinausläuft.

Der Dekohärenz-Ansatz vermeidet genau diese Punkte: Das quantenmechanische System wird einfach an seine Umgebung angekoppelt. Wesentlich dabei ist eine eigentlich triviale Aussage:

Physikalische Systeme sind *niemals isoliert*. Sie koppeln in realistischen Situationen stets an die Freiheitsgrade der Umgebung an.

D. h. man treibt die meßtheoretische Erweiterung des Systemes sogar noch weiter als die Kopenhagener, wenn folgende symbolische Schreibweise gilt,

- Quantensystem  $\Psi_Q$
- Meßapparat  $\Psi_M$
- Umgebung  $\Psi_U$

also

Kopenhagen  $\Psi_Q \otimes \Psi_M$

und

Dekohärenz  $\Psi_Q \otimes \Psi_M \otimes \Psi_U$ .

Zunächst war das Dekohärenzkonzept unter theoretischen Physikern aufgrund seiner formalen Eleganz beliebt, seit 1996 liegen nun aber auch experimentelle Nachweise vor, die dem Ansatz darüber hinaus Bedeutung verleihen. Im *Abstract* der Publikation einer Gruppe französischer Experimentatoren<sup>5</sup> heißt es:

»A mesoscopic superposition of quantum states involving radiation fields with classically distinct phases was created and its progressive decoherence observed. The experiment involved Rydberg atoms interacting one at a time with a few photon coherent field trapped in a high Q microwave cavity. The mesoscopic Superposition was the equivalent of an ‘atom + measuring apparatus’ system in which the ‘meter’ was pointing simultaneously towards two different directions - a ‘Schrödinger cat’. The

<sup>5</sup>M. BRUNE, E. HAGLEY, J. DREYER, X. MAÏTRE, A. MAALI, C. WUNDERLICH, J.M. RAIMOND, und S. HAROCHE: *Observing the Progressive Decoherence of the „Meter“ in a Quantum Measurement*, Phys. Rev. Lett., vol. 77, No. 24, 9 December 1996

decoherence phenomenon transforming this superposition into a statistical mixture was observed while it unfolded, providing a direct insight into a process at the heart of quantum measurement.«<sup>6</sup>

Die Ergebnisse dieser Gruppe wurden auch in einem Artikel in der Juni Ausgabe von *Scientific American* thematisiert.<sup>7</sup> Dort heißt es:

»More interesting, however, was the team's ability to control crucial variables and to determine how coherent states become classical ones. By varying the interval between the two atoms sent into the cavity (from 30 to 250 microseconds), they could see how the collapse of the superposition varied as a function of time, and by enlarging the electromagnetic field (...), they could see how the collapse changed with size. „This is the first time we can observe the progressive evolution of quantum to classical behavior“, HAROCHE says.«

Der Dekohärenzvorgang ist also direkt der Beobachtung zugänglich, was heißt, daß der Ausgangszustand, nämlich die Kohärenz der möglichen Zustände, d. i. die *Interferenz* der FEYNMANSchen Pfade, in gewisser Weise *gesehen* werden kann.

Im *Scientific American* Artikel wird nochmals der Vorteil gegenüber der Kopenhagener Sicht betont:

»Having the environment define the quantum-classical boundary has the advantage of removing some of the mystical aspects of quantum theory that certain authors have promulgated. It does away with any special need for a consciousness or new physical forces to effect a classical outcome.«

Für unseren Ansatz entscheidend ist die Frage, ob durch den Dekohärenzprozeß die Klasse der kohärenten Zustände festgelegt ist:

»Still Zurek's decoherence model is flawed in some eyes. „In my view, decoherence doesn't select a particular outcome“, opines ANTHONY J. LEGETT of the University of Illinois. „In real life, you get definite macroscopic outcomes.“

Zurek argues that the environment does indeed dictate the quantum possibilities that end up in the real world. The process, which he refers to as environment-induced superselection, or einselection, tosses out the unrealistic, quantum states and retains only those states that can withstand the scrutiny of the environment and thus might become classical.«

Es findet also gleichsam ein *Auswahlprozeß* statt, der sicherstellt, daß der Zustand des Systemes im Einklang mit der Umgebung steht. Die quantenmechanischen Freiheitsgrade des Systemes wandern in die Umgebung ab, sind also noch vorhanden. Die Umgebung bestimmt die Klasse der *möglichen Welten* und wir als Teil der Umgebung nehmen die realisierte Welt wahr, die wir selbst indizieren.

Fassen wir nochmals die Hauptpunkte der hier vorgestellten Sichtweise zusammen:

---

<sup>6</sup>Der experimentelle Aufbau entspricht genau unserer Darstellung aus der Einleitung, die den 'Kollaps' verdeutlichen sollte.

<sup>7</sup>Scientific American, June 1997, *Bringing Schrödingers Cat to Life*

Der *unmodifizierte* Formalismus der Quantenmechanik kennt keinen Kollaps der Wellenfunktion. Innerhalb des Formalismus gibt es keinen zureichenden Grund einen der interferierenden oder superponierten Zustände der Systemwellenfunktion auszuzeichnen. Dadurch, daß wir als Beobachter nur einen Zustand erfahren, kommt uns die Funktion eines Index zu. Bezüglich der aufgespaltenen Wellenfunktion nimmt der Formalismus gewissermaßen eine uns unzugängliche Perspektive ein: Er trifft Aussagen über eine Klasse von Welten. Durch den Dekohärenzmechanismus ist diese Klasse spezifiziert.

Die vorgestellte Sichtweise ist im Einklang mit quantenkosmologischen Erklärungsmodellen.

## Literatur

Zur Einführung in die Quantenmechanik:

- K. BAUMANN, R. U. SEXL: *Die Deutungen der Quantentheorie*, Vieweg 1987
- B. D'ESPAGNAT: *Veiled Reality*, Addison-Wesley 1995

Spezielle Problematiken:

- W. SALTZER, P. EISENHARDT, D. KURTH, R. E. ZIMMERMANN: *Die Erfindung des Universums?*, Insel 1997
- D. DEUTSCH: *Die Physik der Welterkenntnis*, Birkhäuser 1996