

I. VOLLSTÄNDIGKEIT DER QUANTENMECHANIK

Bisher wurden im Prinzip nur Einteilchenprobleme behandelt. Z.B. wurde die Interferenz eines Quantenteilchens 'mit sich selbst' diskutiert. Dabei stellte sich der Begriff der **Unbestimmtheit** als zentral heraus. Eng verbunden damit ist das Vorhandensein der 'Interferenzterme' in der Dichtematrix. Dies hat zwei wichtige Konsequenzen:

- (i) Wir hatten gesehen, dass in diesem Fall von einem objektiven Vorliegen **ALLER** möglichen Eigenschaften nicht sinnvoll gesprochen werden kann.
- (ii) Das Vorliegen dieser Interferenzterme verbietet zudem, auch bei sehr grossen Objekten, eine klassische Interpretation des Geschehens.

Wie ist also der Übergang zur klassischen Physik zu verstehen, insbesondere, wie ist das Funktionieren klassischer Messgeräte zu verstehen (Messproblem)?

Bisher war die sogenannte 'orthodoxe' QM, wie sie z.B. in den Lehbüchern vermittelt wird, Grundlage der Interpretation. Auf dieser Grundlage haben wir eine realistische Beschreibung der Quantenwelt, d.h. eine Beschreibung, in der beliebige Eigenschaften unabhängig von einer Messung vorliegen (d.h. 'objektivierbar' sind), zurückgewiesen. Dabei wurde die Adäquatheit des QM Formalismus vorausgesetzt. Aber genau dies wurde u.a. von Einstein angezweifelt.

A. Vollständigkeit: die EPR Korrelationen

Dennoch bleibt die Vorstellung, dass trotz Allem QM Systeme klassisch beschrieben werden können. D.h. in 'Wirklichkeit' kann man alle Eigenschaften objektivieren, wir haben nur noch nicht herausgefunden wie.

1. Begrifflichkeiten

Um die Diskussion verstehen zu können, müssen wir zunächst einige zentrale Begriffe klären:

Separabilität: Diesen Begriff haben wir oben kennengelernt. Eine Mehrteilchen-Wellenfunktion ist [separabel](#), wenn sie sich als [Produktwellenfunktion](#) von Einteilchen-

Wellenfunktionen schreiben lässt. Dies hat die wichtige Konsequenz, dass die Teilchen unkorreliert sind. So kann man Messungen an einem Teilchen durchführen, ohne das Andere zu stören. Wir hatten oben eine Produktwellenfunktion folgendermassen notiert:

$$|\Psi_{tot} \rangle = \left(\sum_n c_n |\phi_n \rangle \right) \left(\sum_m c_m |\psi_m \rangle \right) = \sum_{nm} c_n c_m |\phi_n \rangle |\psi_m \rangle \quad (1)$$

Wenn man nun in einem Teilsystem misst, und damit z.B. den Zustand $|\phi_k \rangle$ festlegt (präpariert), ist die Wellenfunktion nach der Messung (mit Wahrscheinlichkeit c_k^2):

$$|\Psi'_{tot} \rangle = |\phi_k \rangle \sum_m c_m |\psi_m \rangle, \quad (2)$$

d.h. das andere System ist immer noch in einer Superposition und der 'Kollaps' findet' nur in dem einen Subsystem statt. Man kann also ein Subsystem messen, ohne das Andere zu stören.

Ganz anders ist das bei der oben diskutierten **korrelierten (verschränkten)** Wellenfunktion:

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0 \rangle |0 \rangle + |1 \rangle |1 \rangle) \quad (3)$$

D.h. die Messung des rechten Photons 'beeinflusst' instantan das linke Messergebnis. Wie ist das zu verstehen? Wenn man die Photonen 'rechts' oder 'links' misst, so findet man sie zu 50% jeweils in den Zuständen $|0\rangle$ und $|1\rangle$. Allerdings weisen die Messergebnisse von 'rechts' und 'links' eine starke Korrelation auf. Angenommen die Messung 'rechts' ergibt $|1\rangle$, dann kollabiert die Wellenfunktion in $|1\rangle|1\rangle$, man misst links also auch $|1\rangle$. Daher gilt das Prinzip der Separabilität nicht. Wir treffen hier also wieder auf den **'Kollaps der Wellenfunktion'**, der im Doppelspaltexperiment noch in etwas unscheinbarerem Gewand daherkam. Dieser Kollaps ist **nicht-lokal**, d.h. er geschieht instantan auch über grosse Abstände. In diesem Fall sind die Subsysteme nicht unabhängig voneinander.

Lokalität: Dieser Begriff ist in der EPR Diskussion verschwommen, was die Diskussion sehr unklar macht. Man kann zwei Formulierungen herausdestillieren;

(a) Räumlich getrennte Systeme sind separabel. D.h., genau solche mysteriösen Nichtlokalitäten wie die Verschränkung treten nicht auf. Diese ist eine naheliegende Forderung wenn man an Vorstellungen der klassischen Physik festhält. Wenn zwei Teilchen weit voneinander

getrennt sind, dann kann man sie als unabhängig voneinander betrachten, d.h. man kann an dem Einem messen ohne das Andere zu stören. Lokalität ist hier nur ein besonderer (eingeschränkter) Fall von Separabilität.

(b) Es gilt das Nahwirkungsprinzip: dies besagt, dass wenn A und B sehr entfernt voneinander sind und A durch eine Störung beeinflusst wird, dies keinen instantanen Einfluss auf B hat. Anders ausgedrückt, man kann Systeme separieren und Wechselwirkungen werden kausal vermittelt.

Objektivierbarkeit: Wir wollen diesen Begriff zunächst rein technisch betrachten. Wir nennen Eigenschaften gleichzeitig objektivierbar (messbar), wenn die entsprechenden Operatoren vertauschen. Gewöhnlich interpretiert man dies dann so, dass diese Eigenschaften im System vorliegen, unabhängig vom Beobachter. Wie in der klassischen Physik wird dann vom Beobachter abstrahiert und auf ein Vorliegen dieser Eigenschaften in der 'Realität' geschlossen.

Realismus: In der Philosophiegeschichte wurden viele Realismus-Varianten entwickelt. Der Realismus, der unserem Alltagsverständnis entspricht, wird in der Philosophie als 'naiver Realismus' bezeichnet. Demnach gibt es eine 'Aussenwelt' unabhängig von einem Beobachter, die wir durch unsere naturwissenschaftlichen Aktivitäten nach und nach entschlüsseln. Da unsere Theorien 'funktionieren', d.h. wir mit Ihnen erfolgreich in der Welt operieren, wird oft auch darauf geschlossen, dass diese die Welt 'spiegeln' (Wissenschaftlicher Realismus). Der im Kontext von EPR gebräuchliche 'Realismus' soll nun eng an den Begriff der 'Objektivierbarkeit' anknüpfen. Wenn Eigenschaften gleichzeitig objektivierbar sind, so liegen sie 'in der Realität' vor. Die Messung zeigt nur die Werte von Eigenschaften an, die im Objekt vorliegen. Das Gegenteil wäre die Auffassung, dass bestimmte Eigenschaften vor ihrer Messung nicht vorliegen, d.h. umgangssprachlich keine 'Realität' haben. (siehe auch T. Norsen, arxiv:quant-ph/0607057)

Die Diskussion um die QM dreht sich darum, ob sie sich **realistisch** interpretieren lässt. Z.B. Ort und Impuls: Liegen diese in der Realität vor und wir können sie nur nicht gleichzeitig scharf messen, oder liegen sie nicht vor. Gibt es eine 'Realität unabhängig von unserer Beobachtung, oder entsteht die Realität erst in der Beobachtung. Dies wurde

zugespitzt durch den Satz: 'Existiert der Mond, auch wenn wir nicht hinsehen?' Realismus bedeutet in diesem Kontext nun, dass alle Eigenschaften objektivierbar sind, d.h. unabhängig vom Beobachter vorliegen, auch wenn die QM ihre gleichzeitige Messbarkeit verneint.

Lokaler Realismus: Hier kondensiert sich die gesamte Komplexität der obigen Diskussion. Gemeint ist, dass räumlich separierte Objekte bestimmte Eigenschaften unabhängig voneinander besitzen. Lokalität meint hier Separabilität, räumlich getrennte Systeme sind separabel. Realismus bedeutet, dass alle Eigenschaften unabhängig vom Beobachter vorliegen. Der 'lokale Realismus' nimmt also an, dass die Welt im Kleinen klassisch beschreibbar bleibt.

2. EPR Paradoxon

Einstein, Podolski und Rosen (EPR) haben ein Gedankenexperiment vorgeschlagen das die Unvollständigkeit der QM demonstrieren sollte. Ausgangspunkt ist der **lokale Realismus**. Für dieses Gedankenexperiment gibt es unterschiedliche (mögliche) Realisierungen. Ausgesendet werden immer 2 Teilchen in unterschiedliche Richtungen, so dass sie räumlich klar separierbar sind. Zudem gibt es eine Erhaltungsgrösse. Z.B. 2 Teilchen mit entgegengesetztem Impuls, Spin oder Polarisation. Damit kann durch die Messung an einem Teilchen direkt auf den Wert der Grösse des anderen Teilchens geschlossen werden.

Es werden zwei Teilchen betrachtet, wobei $|0\rangle$ und $|1\rangle$ für die zwei Spineinstellungen stehen soll (wir nehmen hier der Einfachheit halber die verschränkte Wellenfunktion von oben).

$$\Psi = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle|0\rangle + |1\rangle|1\rangle) \quad (4)$$

Durch die Korrelation ist durch Messung z.B. der p_z Komponente des Spins an Teilchen 1 diese Komponente auch bei Teilchen 2 festgelegt. Daher könnte man an dem Teilchen 2 die p_x Komponente des Spins messen, im Widerspruch zur Vorhersage der Quantenmechanik (Verletzung der UR). In diesem Gedankenexperiment ist die Annahme des lokalen Realismus explizit. Durch die (klassische) Korrelation ist die eine Spinkomponente festgelegt, die 'Lokalität' verbietet sozusagen die Änderung der Wellenfunktion von Teilchen 2 durch

Messung an 1. Einstein argumentierte, dass die QM **unvollständig** sei, da sie es nicht erlaubt, die beiden Spinkomponenten gleichzeitig festzulegen, im Gegensatz zu der Situation in dem plausiblen Gedankenexperiment.

Dem **lokalen Realismus** liegt nun folgende Vorstellung zugrunde: In der Quelle werden zwei Teilchen mit entgegengesetzten Spins erzeugt. Die Korrelation der Teilchen entsteht damit in der Quelle. **Realismus**: Welche Spinrichtung die einzelnen Teilchen haben, wissen wir nicht, es kann up oder down sein, jedoch **liegt eine der Spinrichtungen definitiv vor** (Ignoranzinterpretation), ist also unabhängig von der Messung existent (während sie gemäss der QM **unbestimmt** ist). **Lokal**: Sobald die Teilchen räumlich genügend separiert sind, kann bei dem einen Teilchen die Spinrichtung **ausgelesen** werden, ohne das Andere zu stören. Diese komplett klassische Vorstellung erzeugt im Gedankenexperiment den Widerspruch zur QM.

3. *Verborgene Parameter*

Eine mögliche Unvollständigkeit der QM würde bedeuten dass es Parameter gibt, die es durchaus erlauben z.B. Ort und Impuls gleichzeitig zu messen (d.h. die UR auszuhebeln), wobei diese Parameter uns jedoch verborgen sind. Eine vollständige Theorie würde daher unter Bezugnahme auf diese Parameter die Unbestimmtheiten der QM aushebeln.

Eine solche Theorie wurde, im Anschluss an de Broglie, von Bohm ausgeführt. Die Wellenfunktion ist eine Führungswelle die, sozusagen in ihrem Schlepptau, definierte Orte mit sich zieht.

Eine Theorie **lokaler verborgener Parameter** würde also eine **lokal realistische** Interpretation stützen.

4. *Vollständigkeit der QM: v. Neumann, Bell und Kochen & Specker*

Eine Reihe von Arbeiten (v. Neumann, Bell, Kochen & Specker) haben zu zeigen versucht, dass eine lokal-realistische Vervollständigung der QM nicht möglich ist, d.h. dass die QM **keine** klassische Theorie ist. Damit ist die Vorstellung einer 'klassischen' Realität 'hinter' einer unzureichenden QM Beschreibung obsolet.

Wir wollen uns hier auf die sogenannten Bell'schen Ungleichungen konzentrieren:

Bell hat dabei die folgenden Annahmen verwendet:

(L) Lokalität: Messungen an den Einzelsystemen sind voneinander unabhängig

(R) Realität: Ergebnisse von Messung liegen schon am Objekt vor, Messen = Ergebnis auslesen, d.h. das Ergebnis ist unabhängig von der Messung.

Ein entsprechendes 2-Teilchen Experiment sieht z.B so aus: Jedes Teilchenpaar wird an der Quelle so präpariert, dass beide Teilchen entweder mit Spin up, oder down ausgesendet werden (bzw. sind die Spins antikorreliert).

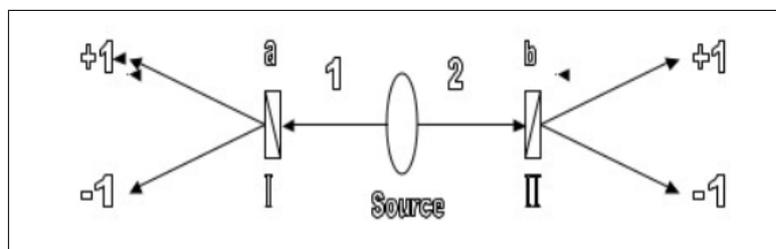


Abbildung 1: from: Bell's Theorem (Stanford Encyclopedia of Philosophy)

Die Annahmen (L) und (R) bedeuten dann Folgendes: Die Korrelationen in den EPR-artigen Experimenten entstehen durch eine gemeinsame Präparation des Teilchenpaares. D.h., die Teilchen haben schon VOR der Messung ihre bestimmten Eigenschaften (z.B. bestimmten Spin, bestimmte Polarisationsrichtung), die Messung liest diese nur aus. Es handelt sich also um **klassische** Korrelationen, wie z.B.: aus Versehen habe ich nur einen Handschuh in die Tasche gesteckt, weiss aber nicht welchen. Es ist also 50/50, welchen ich dabei habe, und welcher zu Hause ist (unabhängige Messung an den beiden Einzelsystemen). Wenn ich also in der Tasche nachsehe weiss ich automatisch, welcher zu Hause ist.)

Die Detektoren führen die Messungen $a, a', a'' \dots$ und $b, b', b'' \dots$ aus. Dies können z.B. verschiedene Polarisationsrichtungen sein (Photonen, Spin). Jede Messung an \mathbf{a} ($\mathbf{a}' \dots$) ergibt den Wert s ($=-1,1$) d.h. der Detektor registriert ein Ergebnis oder nicht. Jede Messung an \mathbf{b} ($\mathbf{b}' \dots$) ergibt den Wert t ($=-1,1$) d.h. der Detektor registriert ein Ergebnis oder nicht.

Wir nehmen nun an, dass der Zustand des Teilchenpaares vollständig durch λ beschrieben ist, d.h. durch λ ist festgelegt, welches Teilchen mit welcher Polarisierung die Quelle verlässt

(analog den Handschuhen: 'Realitätsannahme'). Dann kann man die Wahrscheinlichkeit

$$p_{\lambda}^1(s|a, b, t) \quad (5)$$

definieren die angibt, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Wert s gemessen wird, wenn die Messungen \mathbf{a} und \mathbf{b} durchgeführt werden und bei \mathbf{b} der Wert t gemessen wird.

Analog:

$$p_{\lambda}^2(t|a, b, s). \quad (6)$$

Und:

$$p_{\lambda}(s, t|a, b) \quad (7)$$

ist die Wahrscheinlichkeit, den Wert s und t gleichzeitig bei den Messungen \mathbf{a} und \mathbf{b} zu erhalten.

Lokalitätsannahme:

$$p_{\lambda}(s, t|a, b) = p_{\lambda}(s|a)p_{\lambda}(t|b) \quad (8)$$

Nun muss noch bedacht werden, dass die Wahrscheinlichkeiten p_{λ} pro Teilchenpaar definiert wurden. Wir müssen daher die Verteilung der Eigenschaften über eine klassische Verteilungsfunktion ρ beschreiben.

$$p_{\rho} = \int p_{\lambda}(s, t|a, b)d\rho \quad (9)$$

Nun kann man die Ergebnisse verschiedener Detektorstellung $\mathbf{a}, \mathbf{a}', \mathbf{b}, \mathbf{b}'$ in einer Korrelationsfunktion kombinieren, die eine obere Schranke von 2 aufweist, die sogenannte Bell'sche Ungleichung (oder Ungleichungen Bell'schen Typs, da es mehrerer Formulierungen gibt).

Diese Bell'sche Ungleichung wird nun sowohl vom Experiment (z.B. Aspect et al), als auch von den QM Vorhersagen verletzt.

Die Annahmen in der Herleitung waren die **Lokalität** und der **Realismus**. Daher wird die Verletzung der Bell'schen Ungleichungen oft dergestalt interpretiert, dass eine der beiden Voraussetzungen fallen gelassen werden muss.

B. Der klassische Grenzfall

Nichtlokalität und Nichtobjektivierbarkeit kennzeichnen die Welt der QM, was die Frage aufwirft, warum wir diese Erfahrungen nicht auch im Meso- und Makrokosmos machen. Es ist die Frage nach der Grenze zwischen der QM und der KM, und wie diese mathematisch zu formulieren sei.

In der Bohrschen Interpretation gibt es keine Quantenwelt, es gibt nur die Klassische, die es uns erlaubt Messgeräte zu betreiben, die distinkte Zeigerausschläge charakterisieren. Die Mehrheit der Physiker heute würde jedoch die QM als die fundamentalere Theorie charakterisieren. Kann man die KM aus der QM ableiten?

In Lehbüchern wird oft die KM als Grenzfall der QM dargestellt, etwa durch den Grenzfall

$$\hbar \rightarrow 0$$

vermittelt (auch: Ehrenfest Theorem, kohärente Zustände). Das macht nun leider in vieler Hinsicht keinen Sinn. Zum Einen ist \hbar eine Naturkonstante, man kann diese nicht gegen 0 gehen lassen. Zudem wurde darauf hingewiesen (z.B. Primas, Quantenchemie), dass ein Grenzwert gar nicht existieren muss, also mathematisch problematisch ist. Die Intuition hinter dieser Grenzwertbildung besteht darin, dass für grosse Systeme die QM in die KM übergeht. Jedoch gibt es auch hier keine exakte Grenze. Z.B. redet der Chemiker von der Struktur des Wassermoleküls, d.h. einer manifest klassischen Eigenschaft. Auf der anderen Seite gibt es Interferenzversuche mit C60, einem viel grösserem Molekül. D.h., man muss sich darüber Gedanken machen, unter welchen Umständen die Interferenzterme in der Dichtematrix verschwinden.

C. Partielle Spurbildung

Die 'Spur' eines Operators \hat{A} ist:

$$Sp(\hat{A}) = \sum_n \langle \phi_n | \hat{A} | \phi_n \rangle \quad (10)$$

(für jedes ONS ϕ_n). Wenn die ϕ_n Eigenzustände zu \hat{A} sind, ist die Spur die Summe der Eigenwerte a_n von \hat{A} .

Mit Hilfe des Dichteoperators

$$\rho = \sum_{nm} c_m^* c_n |\phi_n\rangle \langle \phi_m|$$

können Erwartungswerte wie folgt geschrieben werden ($p_n = c_n^2$):

$$\begin{aligned} \langle \hat{A} \rangle &= \sum_n p_n a_n = \sum_n p_n \langle \phi_n | \hat{A} | \phi_n \rangle = \sum_n \langle \phi_n | \hat{A} \left(\sum_{nm} c_m^* c_n |\phi_n\rangle \langle \phi_m| \right) | \phi_n \rangle \\ &= Sp(\hat{A}\rho) \end{aligned} \quad (11)$$

Nun betrachten wir ein 2-Teilchensystem,

$$\rho_{12} = \sum_{nm} c_m^* c_n |\phi_n\rangle |\psi_n\rangle \langle \psi_m| \langle \phi_m|$$

\hat{A} repräsentiert eine Observable in System 1 (ϕ_n),

$$\langle \hat{A} \rangle = \sum_n p_n \langle \psi_n | \langle \phi_n | \hat{A} | \phi_n \rangle | \psi_n \rangle = Sp_1(\hat{A}\rho_1), \quad (12)$$

wobei

$$\rho_1 = Sp_2(\rho_{12}) = \sum_n \langle \psi_n | \rho_{12} | \psi_n \rangle = \sum_{nm} c_n^2 |\phi_n\rangle \langle \phi_n|$$

ist. ρ_1 wird **reduzierte Dichtematrix** genannt. Da A eine Observable im System 1 ist, kann man über 2 die Spur bilden, um den Erwartungswert von A zu bekommen. Allerdings ist diese Spurbildung keine harmlose Operation. Sie abstrahiert von Korrelationen zwischen den Systemen 1 und 2, d.h. sie gibt nur wieder, was ein Beobachter lokal am System 1 messen kann. Zudem wird der **Kollaps** induziert, d.h. die Interferenzterme werden zerstört. Damit zerfällt das System in ein **statistisches Ensemble**. d'Espagnat nennt dies ein **improper Ensemble** (Conceptual Foundations of Quantum Mechanics), da das Gesamtsystem 1 & 2 nicht durch einen statistischen Operator beschrieben wird, die Korrelationen sind noch vorhanden, sie sind nur lokal am System 1 nicht beobachtbar, wie durch ρ_1 indiziert.

Dies kann man sich anhand der verschränkten Wellenfunktion, wie oben diskutiert, verdeutlichen.

$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle |0\rangle + |1\rangle |1\rangle)$$

Die Dichtematrix ist:

$$|\Psi\rangle\langle\Psi| = \frac{1}{2} (|0\rangle|0\rangle + |1\rangle|1\rangle) (\langle 0|\langle 0| + \langle 1|\langle 1|)$$

Bildet man nun die Spur über ein Subsystem, so erhält man:

$$Sp_2(|\Psi\rangle\langle\Psi|) = \frac{1}{2} (|0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1|)$$

also ein 'klassisches Gemisch' aus den beiden Zuständen. Das ist was der lokale Beobachter am System 1 misst. die 50/50 Wahrscheinlichkeit für einen der Spinzustände. Die Korrelationen mit den System 2 sind dabei vernachlässigt.

D. Dekohärenz

Die Theorie der Dekohärenz versucht nun den Übergang der QM in die KM durch An-
koppelung an die Umgebung zu erklären, wie in der Abb. 2 skizziert. Das verschränkte System
QM-Teilchen + Messgerät tritt in Wechselwirkung mit der Umgebung (mit Zuständen E_n):

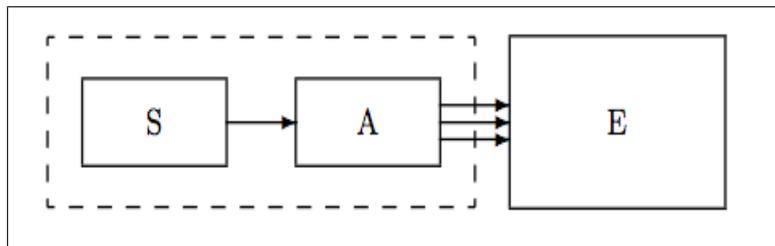


Abbildung 2: from: Kiefer, arXiv:quant-ph/0210152v1

$$\left(\sum_n c_n |\phi_n\rangle |\psi_n\rangle \right) |E\rangle \rightarrow \sum_n c_n |\phi_n\rangle |\psi_n\rangle |E_n\rangle, \quad (13)$$

d.h. durch die Wechselwirkung mit der Umgebung wird ein erweiterter verschränkter Zustand gebildet, die Umgebung wird zunächst nur in eine Superposition versetzt. D.h. im ersten Schritt wurde nichts gewonnen, da nun die Umgebungszustände auch nicht objektiverbar sind. Erst wenn man annimmt, dass die Zustände der Umgebung orthogonal sind, so kann man die Spur der Dichtematrix über die Umgebung bilden:

$$\begin{aligned}
Sp_3 \left(\sum_{nm} c_m^* c_n |\phi_n\rangle |\psi_n\rangle |E_n\rangle \langle E_m| \langle \psi_m| \langle \phi_m| \right) &= \quad (14) \\
= \sum_k \langle E_k| \sum_{nm} c_m^* c_n |\phi_n\rangle |\psi_n\rangle |E_n\rangle \langle E_m| \langle \psi_m| \langle \phi_m| |E_k\rangle &= \\
= \sum_k c_k^2 |\phi_k\rangle |\psi_k\rangle \langle \psi_k| \langle \phi_k| &
\end{aligned}$$

Wie wir oben diskutiert haben, ist die partielle Spurbildung nur ein Rechentrick, der zu einem 'improper' Ensemble führt, also einem Ensemble, das lokal wie ein Statistisches aussieht. Die Korrelationen sind noch vorhanden, denn diese können nicht durch die unitäre Dynamik der Schrödingergleichung zerstört werden. Partielle Spurbildung induziert den Wellenfunktionskollaps, also setzt sie das voraus, was eigentlich erklärt werden sollte (O. Pessoa, Synthese 113 (1998) 323). Die Ankopplung an die Umgebung kann also das Messproblem nicht lösen. Das Gesamtsystem ist immer noch in einer Superposition. Für einen Beobachter, der keine Kontrolle über die Umgebung hat, erscheint das System in einem statistischen Ensemble. Dies ist natürlich unbefriedigend. Uns erscheinen die Dinge nur klassisch, 'objektiv' sind sie es aber nicht.

E. QM als Teilsystem oder die ganze Welt

Wie wir gesehen haben, gibt es 2 Probleme: Zum einen die Nichtdiagonalterme der Dichtematrix, die unter der Dynamik der SG nicht zerfallen. Es gibt zwar Modellrechnungen für z.B. ein Teilchen gekoppelt an ein Wärmebad, für das gezeigt wird, dass diese Terme relativ schnell abklingen, jedoch setzt dies die partielle Spurbildung voraus (Pessoa, Synthese 113, 323).

Zum Anderen der Kollaps selbst, d.h. welcher der statistisch möglichen Messwerte realisiert wird, d.h. in welchem Eigenzustand ϕ_n das System schliesslich landet. Wenn die QM auf ein Teilsystem angewendet wird, gilt für den Beobachter die Ignoranzinterpretation. Die c_n^2 geben das Wissen über das System wieder. Was aber, wenn die QM auf das gesamte Universum angewendet werden soll, einschliesslicher aller 'Beobachter'?

F. Interpretationen der Quantenmechanik

1. Wigner

Die vielleicht radikalste Interpretation stammt von E. Wigner. Wenn das reine Nachschauen den Kollaps verursacht, was ist dann der Grund dafür. Wigner sah den Übergang vom reinen zum gemischten Zustand durch das Bewusstsein verursacht.

2. Einteilchen Interpretation

Diese Interpretation hat, wie oben genannt, zwei Probleme: Zum Einen das Problem, wie die Interferenzterme verschwinden. Hier bietet die Dekohärenztheorie einen Ansatz. Zum Andern, wie der Kollaps zu verstehen ist. Dazu nochmals der Doppelspalt:

Versteht man Ψ auf ein Teilchen (Photon, Elektron, Atom ...) bezogen, so sieht man hinter den Spalten eine Verbreiterung von Ψ . Wird Ψ analog einer klassischen Streuwelle (durch Spalte) verstanden, so bewegt sich das Teilchen gleichmässig in alle Richtungen auf den Schirm zu. Aber es gibt nur eine Schwärzung am Schirm. Wie wird verhindert, daß das Teilchen nicht gleichzeitig an 2 (oder mehreren) Punkten mit dem Schirm wechselwirkt? Offensichtlich gibt es dann eine 'geisterhafte' Fernwirkung, die alle anderen möglichen Schwärzungen verhindert. Eine räumlich ausgedehnte Wellenfunktion wird instantan an allen Punkten verändert!

Dies ist das Problem hinter der Rede vom Kollaps und zeigt, daß die Vorstellung Ψ repräsentiert die Ausbreitung eines Teilchens sehr eigenartig ist.

Der Kollaps bedeutet ein Abänderung der Dynamik von der der SG! Wie das passiert und was das passiert ist völlig unklar und reines Postulat. Zudem ist es nicht leicht zu formalisieren, ohne mit der Relativitätstheorie in Konflikt zu kommen.

3. Everett: Viele Welten

Ein 'Lösung' versucht hier die Viele Welten Theorie: Der Kollaps findet

$$\Psi = \sum_n c_n \phi_n \rightarrow \phi_m$$

findet nicht statt. Es gibt unendlich viele Universen, in denen jede der Möglichkeiten realisiert ist.

Konkret: Wenn Wigner den Deckel öffnet und eine tote Katze sieht, gibt es ein Paralleluniversum, in dem er den Deckel öffnet und die Katze lebt noch.

Elegante Lösung, doch a) unbeweisbar und b) hoher philosophischer Preis. Dennoch die Einzige Lösung, wenn die QM auf den Kosmos als Ganzes angewendet werden soll. Daher kann man fragen, ob Bohr nicht doch partiell Recht hatte mit der Meinung, dass die QM immer nur auf Teilsysteme anwendbar ist.

4. Bohmsche QM: verborgene Parameter

In der Theorie von D. Bohm ist die gewöhnliche QM unvollständig. Man muss nur eine Richtige Theorie aufstellen, in der die QM Objekte wie in der KM Trajektorien folgen. Es gibt **verborgene Parameter** die die Eigenschaften der Qantenobjekte vollständig bestimmen. Interessanter Weise ist Bohm eine Theorie gelungen, die auch eine Vielzahl der Quanteneffekte beschreibt.

5. Dekohärenz

Die QM hat das Messproblem und damit verbunden das Problem, wie klassische Objekte verständlich sind. Offensichtlich sterben wir alle und verfallen nicht nur in Superpositionen. Wie sind solch eindeutige Befunde möglich?

Salopp gesprochen: Nur $\hbar \rightarrow 0$ reicht nicht. Zunächst müssen die Superpositionen verschwinden, dann erst wird der Grenzübergang die Unschärfe 'beseitigen'.

Das Problem ist das Folgende:

Die Systemwellenfunktion wird bei der Messung mit der Detektorwellenfunktion verschränkt, die Gesamtwellenfunktion ist in einer Superposition.

Bei dem Beispiel mit den Kavitäten hatten wir aber angenommen, der Detektor sei in klar definierten Zuständen. Dann sind in der Gesamtwellenfunktion die Superpositionen

verschwunden.

Wenn man nun die Umgebung des Messgerätes wieder als Messgerät versteht, das allein durch seine schiere Grösse in definiten Zuständen ist, dann verschwinden sofort die Superpositionen der System/Detektor Wellenfunktion. Die Wechselwirkung mit der Umgebung lässt die Superpositionen verschwinden. Dennoch ist das Messproblem damit noch nicht gelöst, auch nicht das Problem des Kollaps. Um mit der QM Kosmologie bereiben zu können, muss sich hier die Everett-Interpretation anschliessen.

6. Ensembleinterpretation

Ensemble: Ψ nimmt bezug auf viele Teilchen, ist eine abstrakte statische Funktion. Ψ beschreibt nur ein statistisches Ensemble, eine sehr grosse Zahl gleich präparierter Teilchen/Systeme. c_n^2 beschreibt die gemessenen relativen Häufigkeiten, es gibt keinen Kollaps. Das Katzenexperiment wird N mal gemacht, man registriert die relativen Häufigkeiten und es gibt kein Problem. Das Problem entsteht nur auf der Einzelsystemebene. Die Ensemble Interpretation bezieht sich auf eine typische Messsituation, in der immer Ensembles gemessen werden, d.h. man prinzipiell kein Wissen über ein Einzelsystem hat. Die Wellenfunktion beschreibt nicht ein Elektron oder ein Universum, sondern nur die Statistik der Messergebnisse.

G. Fazit

In der QM liegen die Dinge fundamental anders als in unserer klassischen Welt. Paradoxien entstehen, wenn wir die Quantenvorgänge auf unsere klassischen Erwartungen treffen lassen. Ein Problem ist sicherlich der QM Formalismus, speziell die ausgedehnte Anwendung des **Superpositionsprinzips**. Viele Eigenschaften, wie etwa die Masse, fallen ja nicht darunter. Wie werden diese Ausnahmen geregelt? (Superauswahlregeln). Dennoch:

- Es ist ein vorsichtiger Umgang mit Interpretation angemahnt. Sicher ist ein **operationalistischer Zugang** angebracht. Man muss nun explizit definieren, wie man Eigenschaften erhält.

Objektivierbarkeit: nicht alle Eigenschaften sind gleichzeitig objektivierbar.

- Dies verlangt auch eine sprachliche Zurückhaltung. Man sollte nicht sagen, das Teilchen geht durch beide Spalte, sondern die Wegeigenschaft ist nicht objektivierbar. Der Weg liegt nicht fest!
- Messung ist nicht **Störung**, sondern **Verschränkung** (Korrelation). Dabei kommt es nicht auf den Beobachter (Subjekt, Bewusstsein) an, sondern auf die Wechselwirkung, bei der die Teilsysteme ihre Identität verlieren. Dies haben wir intensiv am Beispiel der Elektronenkorrelation diskutiert.
- Wichtig ist also eine **objektivierende** Sprechweise. Dies nimmt der QM alles mystisch esoterische wie 'Realität ist ohne Beobachter nicht zu verstehen' etc. Chemie, Computer etc. funktionieren ohne Beobachter, sie basieren auf den QM Gesetzen. Gerade die merkwürdig anmutenden Quanteneigenschaften sind der Schlüssel für diese Techniken. Und in den neuen Entwicklungen der QM (Quantenkryptographie, Teleportation, Quantencomputer) werden explizit Superpositionen und Verschränkung benutzt). Diese Phänomene sind also nicht irgendwelche Obskuritäten, sondern könnten technisch nutzbar sein. Um diese technischen Anwendungen zu verstehen, muss man eine objektivierende Haltung einnehmen. Die UR drückt demnach keine subjektive Unsicherheit aus, sondern eine 'objektive' Unbestimmtheit. D.h., nicht mehr alle möglichen Eigenschaften eines Objekts sind objektivierbar, man kann nicht sagen, dass sie unabhängig von einer Messung vorliegen.