

Audretsch/Mainzer(Hrsg.),
Wieviele Leben hat Schrödingers Katze?, 1990

Naturphilosophie
und Quantenmechanik

Klaus Mainzer, Augsburg

daher schließen, daß keine lokal-realistische Interpretation mit allen Voraussagen der Quantenmechanik übereinstimmt. Da andererseits der quantenmechanische Formalismus als hochgradig bestätigt gilt (vgl. Abschnitt 1), gibt es gute Gründe, lokal-realistische Interpretationen auszuschließen. Um es an dieser Stelle noch einmal zu betonen: Damit ist eine naturphilosophische Frage, nämlich die Möglichkeit einer bestimmten Form von *Realismus logisch-mathematisch* und *experimentell* entschieden.

Die somit bestätigte Nicht-Lokalität der Quantenmechanik steht übrigens nicht im Widerspruch zur *Relativitätstheorie*. Quantenkorrelationen können nämlich nicht zur Übermittlung von Signalen mit Überlichtgeschwindigkeit verwendet werden: Ein Beobachter bei Polarisator P_1 in Abb. 4 versuche etwa einem Beobachter bei P_2 durch Einstellung von P_1 Signale zu senden. Je nach Orientierung von P_1 ergibt sich entweder eine vollständige oder teilweise Korrelation. Jeder der beiden Beobachter beobachtet, daß im Mittel die Hälfte der Photonen bei P_1 bzw. P_2 passiert bzw. absorbiert wird, d.h. unabhängig von der jeweiligen Orientierung ein statistisches Muster von Transmissionen und Absorptionen. Die Quantenkorrelationen zwischen den Photonen können nur durch statistischen Vergleich der registrierten Daten in beiden Detektoren geprüft werden.

5 Traditionelle Quantenmechanik und Meßproblem

5.1 Das traditionelle von Neumannsche Meßproblem

Damit sind wir zunächst wieder auf die Standardinterpretation des von Neumannschen Formalismus mit seinen — wenigstens für klassisch vorgebildete Zeitgenossen — ungewöhnlichen Merkwürdigkeiten verwiesen. Der Grund ist die *uneingeschränkte Gültigkeit des Superpositionsprinzips*, die auch das sogenannte Meßproblem der (von Neumannschen) Quantenmechanik bedingt.

Im Sinne der Standardinterpretation sei ein Quantensystem als Meßobjekt durch den Hilbertraum \mathcal{H}_1 mit der Observablen \hat{A} mit diskretem (nicht-degenerierendem) Spektrum a_1, a_2, \dots d.h. $\hat{A}\psi_n =$

$a_n\psi_n$ mit $(\psi_n, \psi_m) = \delta_{n,m}$ beschrieben, ein Meßapparat als Digitalanzeiger mit Werten b_1, b_2, \dots d.h. $B\varphi_n = b_n\varphi_n$ mit $(\varphi_n, \varphi_m) = \delta_{nm}$. Der Tensorraum $\mathcal{H} = \mathcal{H}_1 \otimes \mathcal{H}_2$ bezeichnet das Gesamtsystem aus Meßapparat und Meßobjekt. Der Anfangszustand der Messung zur Zeit 0 lautet dann

$$(15) \quad \Phi(0) = \psi \otimes \varphi$$

mit getrennten Zuständen von \mathcal{H}_1 und \mathcal{H}_2 . Der Meßprozeß wird dann im Sinne der Standardinterpretation als Wechselwirkung von Meßobjekt und Meßapparat durch die (zeitabhängige) Schrödingergleichung (4) beschrieben:

$$(16) \quad \Phi(t) = U(t)\Phi(0).$$

Der unitäre Operator $U(t)$ liefert wegen seiner Linearität aufgrund des Superpositionsprinzips verschränkte (korrelierte) Zustände von Quantensystem und Meßapparat. Daher ist der Endzustand $\Phi(t)$ korreliert mit unbestimmten System- und Meßwerten. Wie kommt es aber dann zu faktischen definiten Meßanzeigen?¹⁷

Auch hier dient *Schrödingers Katze* zur Veranschaulichung des Problems: Die Zustände „tot“ oder „lebendig“ werden dazu als Meßanzeigen für die Zustände des Radiumpräparats „zerfallen“ und „nicht zerfallen“ aufgefaßt. Die Quantenmechanik sagt dann (bei Standardinterpretation) einen korrelierten Zustand voraus, in dem die Katze zugleich „tot“ und „lebendig“ ist. Die Meßanzeige bzw. der Ableseprozeß entspricht also dem Öffnen des Kastens. Man spricht in dem Zusammenhang auch vom *Kollaps des Wellenpakets* und meint damit die „plötzliche“ Separation der Superposition in wohlbestimmte Einzelzustände mit definiten Meßanzeigen, die offenbar durch den von Neumannschen Formalismus bei Standardinterpretation nicht erklärt werden können.

5.2 Traditionelle physikalische und philosophische Deutungen des Meßproblems

Die Deutungen dieses „rätselhaften“ Meßphänomens haben in der Geschichte der Quantenmechanik alle philosophischen Positionen auf den Plan gerufen, die aus der Philosophiegeschichte wohlbekannt

sind.¹⁸ Sie sollen im folgenden im Bild von Schrödingers Katze anschaulich skizziert werden.

Nachdem der lokale Realismus ausgeschlossen werden mußte, stellt sich die Frage, ob überhaupt eine realistische Deutung noch möglich ist. Nach Abschnitt 4 müßte eine realistische Deutung auf jeden Fall *nicht-lokal* sein. Im Sinne des Realismus müßten also die Eigenschaften von Quantensystemen objektiv unbestimmt sein. Nach einem Vorschlag von W. Heisenberg könnte man im Anschluß an Aristoteles von „Potentialitäten“¹⁹ in der Quantenwelt sprechen, die jedenfalls prinzipiell sind und nicht von der subjektiven Unwissenheit des Forschers abhängen. Die Wahrscheinlichkeit von Erwartungswerten wäre also objektiv und keine subjektive Wahrscheinlichkeit.

Die Nicht-Lokalität würde bei unbeschränkter Gültigkeit des Superpositionsprinzips einen naturphilosophischen *Holismus* („Ganzheit“) der Quantenwelt zur Folge haben, nach dem Quantensysteme im Sinne Schrödingers durch Korrelationen „*verschränkt*“ wären: Das Ganze ist mehr als die Summe seiner Teile.

Für das Meßproblem würde folgen, daß Meßobjekte und Meßapparat ein verschränktes Gesamtsystem bilden. Der Meßprozeß wäre ein Beispiel für eine objektive Wechselwirkung physikalischer Systeme. Strenggenommen müßte im Sinne des Realismus eine Auszeichnung des Meßapparats bzw. Beobachters als Subjektivismus und Anthropozentrismus abgelehnt werden. Es würde also genau der von Schrödinger beschriebene Fall vorliegen, wonach der korrelierte Gesamtzustand „tot und lebendig“ der Katze objektiv und wirklich ist (vgl. Abb. 7).²⁰

Neben dieser *realistisch-ontologischen* Deutung wäre auch eine idealistisch-erkenntnistheoretische (*epistemische*) Deutung denkbar, sofern sie nur nicht-lokal ist. Hiermit würden sich viele Anhänger der *Kopenhagener Deutung* identifizieren können. Der subjektive Idealismus käme in der Annahme zum Ausdruck, daß die Eigenschaften von Quantensystemen subjektiv unbestimmt seien. Die Wahrscheinlichkeit von Erwartungswerten gibt danach unser mögliches Wissen über die Quantenwelt wieder. Dieses statistische Wissen wurde häufig auf Ensembles von Quantensystemen bezogen, an denen wiederholt Messungen durchgeführt werden.

Im Sinne Bohrs müssen zur Veranschaulichung von nicht-klassischen Observablen klassische Bilder wie Welle und Teilchen komple-

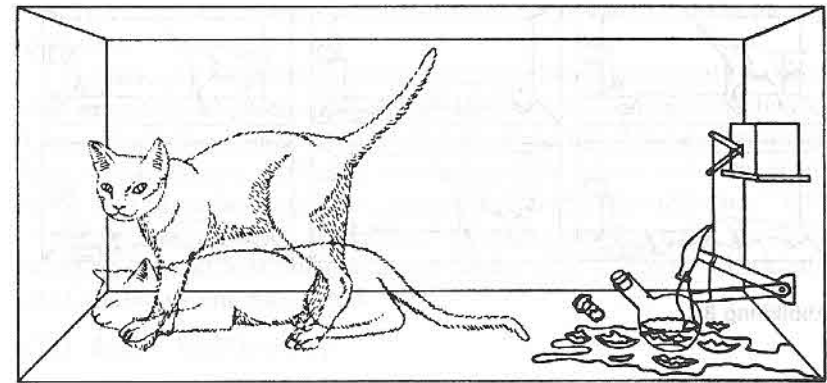


Abbildung 7

mentär verwendet werden, da der Beobachter als klassisches Makrosystem an klassische Vorstellungen gebunden ist. Das ist der Grundgedanke seines *Komplementaritätsbegriffs*.²¹ Die *Nicht-Lokalität* kommt in dieser Interpretation darin zum Ausdruck, daß die Korrelationen von Quantensystemen die Grenzen unseres Wissens über einzelne Systeme angeben.

Meßapparat und Beobachter sind klassische Makrosysteme. In einer epistemischen Interpretation werden sie a priori vorausgesetzt, um über physikalische Systeme (insbesondere Quantensysteme) sprechen zu können. Im Sinne von Kants transzendentaler Erkenntnistheorie ist das Erkenntnissubjekt die „Bedingung der Möglichkeit von Erfahrung überhaupt“.

Im Falle von Quantensystemen wird die Abhängigkeit vom Meßapparat (als instrumentale Verlängerung des Erkenntnissubjekts) durch Interferenzterme der Meßgrößen (vgl. Abschnitt 3) deutlich. Beim Ablesen der Meßanzeigen wird davon abstrahiert. In der epistemischen Deutung nennt man diese Abstraktion auch einen „*epistemischen Schnitt*“. Mathematisch wird dazu ein Projektionsoperator als Ad-hoc-Hypothese eingeführt, der das Gesamtsystem auf den Teilhilbertraum des gemessenen Systems projiziert.²²

In Schrödingers Katzenbild bezieht sich bei einer *Ensemble-Interpretation* der korrelierte Gesamtzustand „tot und lebendig“ auf

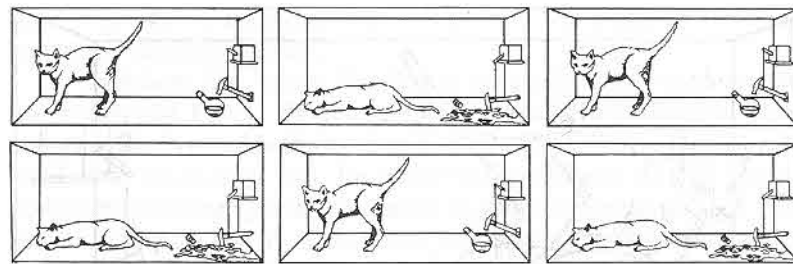


Abbildung 8

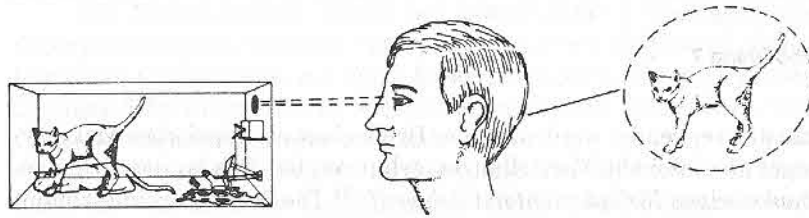


Abbildung 9

ein Ensemble von Katzen, an dem Messungen wiederholt durchgeführt werden (vgl. Abb. 8). Nur im statistischen Katzenensemble sind also nach dieser Deutung die Zustände „tot“ und „lebendig“ gleichermaßen verteilt. Eine extreme Form von *Idealismus* vertritt *Wigner*, die philosophisch geradezu als *Solipsismus* eingestuft werden kann.²³ Ausgangssituation ist hier zunächst der korrelierte Gesamtzustand „tot und lebendig“ im Sinne des Superpositionsprinzips. Nach *Wigner* löst die Registrierung des Meßsignals im Bewußtsein eines menschlichen Beobachters die Entscheidung aus, welche der beiden möglichen Meßergebnisse beobachtet wird — tot oder lebendig (vgl. Abb. 9).

Die Quantenwelt ist also nach *Wigner* durch das menschliche Bewußtsein als letzter Instanz des Meßprozesses objektiv beeinflussbar. Mathematisch schlägt *Wigner* beim Meßvorgang den Übergang von einem reinen in einen gemischten Zustand durch *nicht-lineare Evolutionsgleichungen* vor, die typisch seien für Wechselwirkungen mit dem menschlichen Bewußtsein. In diesem Fall würde jedoch der

von Neumannsche Formalismus mit seiner Schrödingergleichung abgeändert.

Analog zu *Wigners* extremer idealistischer Deutung gibt es auch eine extreme realistisch-ontologische Deutung der Quantenmechanik. Gemeint ist die sogenannte *Everett-Interpretation*.²⁴ Grundlegend ist hier die Annahme, daß alles, was möglich ist, auch realisiert wird, also die Unterscheidung von „möglichen“ und „aktualisierten“ Observablen fallengelassen wird. Man betrachte dazu einen der Wechselwirkung (9) von Systemen analogen Meßprozeß. Die Zeitentwicklung als Gesamtsystem wird durch

$$(17) \quad \Phi(t) = \sum c_i(t) \psi_i \otimes \varphi_i$$

beschrieben, wobei sich die Zustände (φ_i) auf die Anzeigewerte des Meßinstruments beziehen. Nach *Everett* zerfällt der Zustandsvektor $\Phi(t)$ nie in Teilzustände. Vielmehr werden alle Zweige $\psi_i \otimes \varphi_i$ als realisiert angenommen. Die Superposition $\Phi(t)$ beschreibt eine Vielfalt von gleichzeitig existierenden realen Welten, wobei jedes $\psi_i \otimes \varphi_i$ dem Zustand der i -ten parallelen Welt entspricht. Daher ist das gemessene Teilsystem nie in einem reinen Zustand. Nach *Everett* kann man aber vom relativen Zustand ψ_n sprechen, der vom Zustand des Beobachters oder des Meßinstruments abhängig und daher durch

$$(18) \quad \psi_n = c_n^{-1}(\varphi_n, \Phi)_{\mathcal{H}_2}$$

definiert wird. Falls man φ_n als Erinnerungszustände auszeichnet, dann kann ein Beobachter mit einem definiten Gedächtnis nur des eigenen Weltzweiges (z.B. $\psi_n \otimes \varphi_n$) bewußt sein. Er kann aber nicht die anderen Teilwelten wahrnehmen, so daß der Zerfall des Gesamtuniversums in Teilwelten für ihn prinzipiell unbeobachtbar bleibt (vgl. Abb. 10).

Auf den ersten Blick scheint der „*many-world-view*“ dieser Interpretation den mathematischen Vorteil zu haben, daß der Meßprozeß ohne jede mathematische Ad-hoc-Hypothese verstanden werden kann. Dieser methodische Vorteil muß jedoch durch die Annahme einer geradezu verschwenderischen Ontologie erkauft werden. Die *Everett-Interpretation* impliziert nämlich die Existenz einer beobachtbaren Welt, aber auch Myriaden von prinzipiell unbeobachtbaren Welten. Daher kann die Kernannahme dieser Interpretation experimentell im Labor prinzipiell nicht überprüft werden.

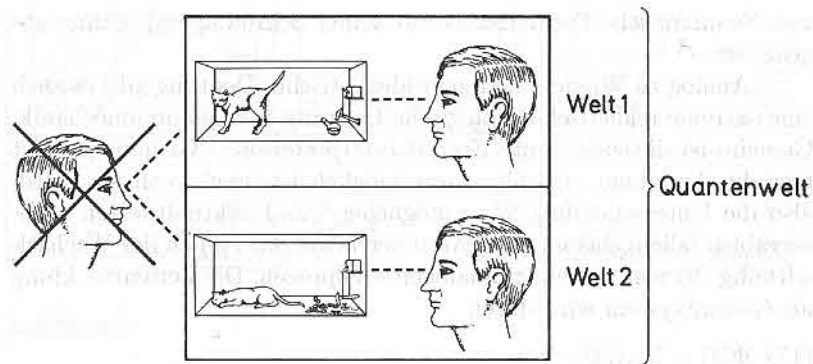


Abbildung 10

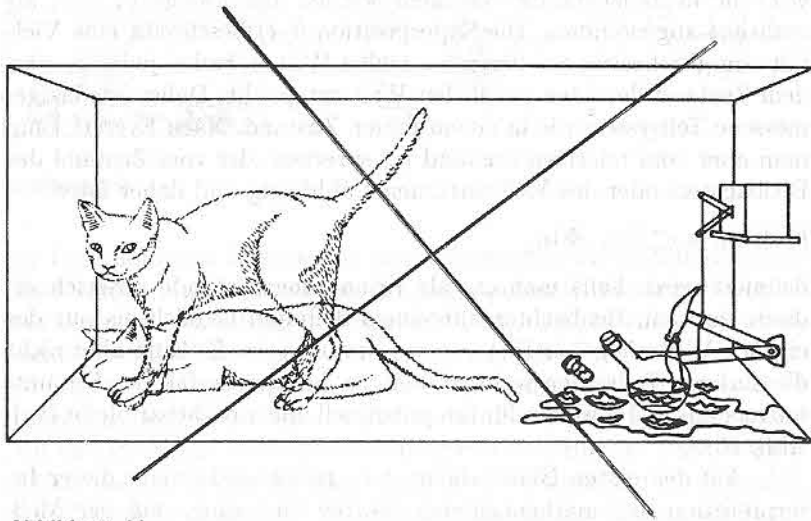


Abbildung 11

Als eine Radikalisierung epistemischer Interpretationen sei noch der *Instrumentalismus* erwähnt. Quantensysteme (Elektronen, Positronen etc.) haben danach strenggenommen keine Existenz an sich. Es gibt nur Präparationsverfahren mit makroskopischen Apparaten, die statistische Häufigkeiten mikroskopischer Effekte messen. Gegen-

stände der Messung sind also statistische Ensembles von Mikroeffekten, die nur relativ zu Meßinstrumenten definierbar sind.

Schrödingers Katze hat daher (z.B. nach Ludwig) keine eigene Existenz. Sie ist ein *ontologisches Scheinproblem* und in dieser Meta-Bedeutung „tot“ (vgl. Abb. 11). EPR-Experimente werden durch Korrelationen makroskopischer Apparate (Detektoren, Polarisatoren etc.) erklärt.²⁵ Mathematisch werden dazu Wahrscheinlichkeitsfunktionen verwendet. Die Menge der statistischen Ensemblezustände („Zustandsraum“) hat eine sog. konvexe Struktur, nach der man Zustände mischen und entmischen kann. Darin besteht der Unterschied zu klassischen statistischen Korrelationen.

6 Verallgemeinerte Quantenmechanik

Philosophisch eröffnet also die Quantenmechanik eine Skala von Interpretationsmöglichkeiten, die von einer bloß *instrumentalistischen* Akzeptanz des Rechenformalismus über *erkenntnistheoretische* Erklärungen bis zu *ontologischen* Deutungen reicht. Für jede dieser Positionen lassen sich bestimmte Vor- und Nachteile angeben, um sie gegeneinander abzuwägen. Manche Interpretationsmöglichkeiten wie der lokal-realistische Ansatz mußten aber ausgeschlossen werden. Historisch entstanden philosophische Interpretationsprobleme häufig dadurch, daß der traditionelle von Neumannsche Formalismus der Quantenmechanik nicht adäquat ist. So ist der Meßprozeß ein Beispiel für eine Wechselwirkung zwischen einem klassischen makroskopischen System (Meßinstrument) und nicht-klassischen mikroskopischen Quantensystemen. Der traditionelle von Neumannsche Formalismus mit seiner unbeschränkten Gültigkeit des Superpositionsprinzips beschreibt aber nur korrelierte Quantensysteme mit korrelierten Zuständen, deren inkompatible Observablen im allgemeinen nicht eindeutig bestimmt sind und bei denen die Reihenfolge der Messung nicht beliebig bzw. kommutativ ist. Um also auch klassische Systeme mit klassischen Observablen beschreiben zu können, wird das Superpositionsprinzip in den modernen Ansätzen einer *verallgemeinerten algebraischen Quantenmechanik* eingeschränkt.