

## **Dekohärenz und Schrödingers Katze**

Holger Lyre

Deutsche Ursprungsversion des Artikels: *Le chat a la peau dure! (Mécanique quantique et les théories de la décohérence)*. Sciences et Avenir 148: 42-46, Octobre/Novembre 2006.

---

In ihrem Artikel "100 Years of the Quantum" (Scientific American, Februar 2001) schreiben Max Tegmark und John Wheeler, dass es an der Zeit sei, die Lehrbücher der Quantenmechanik zu aktualisieren. Nach Ansicht der überwiegenden Mehrheit der heutigen Physiker, so Tegmark und Wheeler, hat der Kollaps der Wellenfunktion seine Bedeutung als zusätzliche und über die Schrödinger-Dynamik hinausgehende Anforderung an die Quantenmechanik verloren. Und genau dies ist das Resultat moderner Dekohärenz-Ansätze. Wenn dies aber so ist, dann ließe sich womöglich noch weitergehend folgern, dass das Messproblem, die Frage nach Schrödingers Katze, nunmehr ebenso gelöst ist. Ein solch vereinfachter Schluss ist, wie wir sehen werden, nicht haltbar.

### **Schrödingers Katze und das Messproblem**

Beginnen wir historisch: Schrödinger entwickelte sein Gedankenexperiment von 1935, um zu zeigen, dass die Quantenmechanik in ihrer bestehenden Form die Wirklichkeit nicht genau abbildet und insofern – hier befand sich Schrödinger in guter Gesellschaft mit Einstein – unvollständig ist. Im Falle einer makroskopischen Verstärkung superponierter, also überlagerter Quantenzustände erhält man den, wie Schrödinger sagt, „burlesken Fall“ der Überlagerung der entsprechenden makroskopischen Zustände, etwa des Lebendig- oder Todseins einer Katze. Reale Katzen befinden sich jedoch, nach allem was Menschen je beobachtet haben, nicht in ominösen Überlagerungen von tot und lebendig.

Um dies zu verstehen, müssen wir den formalen Apparat der Quantenmechanik ein wenig erläutern (ohne jedoch allzu technisch zu werden). In der Quantenmechanik werden physikalische Zustände durch Vektoren eines linearen Vektorraums, des

Hilbertraums, dargestellt. Aus der Schulmathematik ist bekannt, dass sich bei einfacher Addition zweier Vektoren ein neuer Vektor ergibt. Sei nun  $\mathbf{l}$  derjenige Vektor, der die lebendige und  $\mathbf{t}$  derjenige, der die tote Katze repräsentiert, dann ist auch  $\mathbf{l} + \mathbf{t}$  ein quantenmechanisch erlaubter Vektor, dem ein physikalischer Zustand entspricht. Das Problem ist jedoch, dass sich diese formal erlaubte Addition kaum anschaulich machen lässt, denn  $\mathbf{l} + \mathbf{t}$  scheint eben so etwas Unanschauliches wie eine Überlagerung der lebenden und der toten Katze zu sein.

Gleichwohl liegt in der Möglichkeit der Zustandssuperposition der entscheidende Wesenszug der Quantenmechanik. Im Doppelspalt, dem vielleicht elementarsten und paradigmatischsten aller Quantenexperimente, zeigt sich dies im Interferenzmuster. Es zeigt die Aufenthaltswahrscheinlichkeit der Teilchen an – formal durch Quadrieren der Wellenfunktion berechenbar. Hierbei ergibt sich das Quadrat der Summe der Einzelspaltfunktionen und nicht die Summe der Quadrate der Einzelfunktionen. Die beim Quadrieren der Summe entstehenden Mischterme werden Interferenzterme genannt. Noch genauer kann dies durch den Dichtematrixformalismus verdeutlicht werden (siehe Box).

Das Vorhandensein der Interferenzterme beim Doppelspalt muss so angesehen werden, als wären die Teilchen nicht entweder durch den einen *oder* den anderen Spalt gegangen, sondern „irgendwie“ durch den einen *und* den anderen Spalt. Erst bei Verschwinden der Interferenzterme wird ein Vorgang beschrieben, der dem klassisch-anschaulichen „oder“-Fall entspricht. Für Schrödingers Katze heißt das, dass die Quantenmechanik aus sich heraus nicht explizit machen kann, wie aus  $\mathbf{l}$  *und*  $\mathbf{t}$  ein  $\mathbf{l}$  *oder*  $\mathbf{t}$  wird. Es ist dieser logische Übergang vom „und“ zum „oder“, der das Messproblem kennzeichnet. Eine andere Fassung dieses Sachverhalts ist, dass die Quantenmechanik nicht zugleich ihre eigene Theorie der Messung bereitstellt. Und in nochmals anderer Fassung kann man sagen, dass die Quantenmechanik nur auf Wahrscheinlichkeiten führt, die *nicht ignoranzinterpretierbar* sind, d.h. die nicht von der bloß subjektiven Unkenntnis des Beobachters zeugen. Hierauf werden wir weiter unten noch eingehen.

## **Dekohärenz**

Wie hängt nun Schrödingers Szenario mit Dekohärenz zusammen? Schrödinger geht

von der Möglichkeit aus, die Zustände eines Mikroobjekts, eines radioaktiven Atoms, auf ein Makroobjekt zu „verlängern“; denn der Zustand des Tötungsmechanismus, der mit der Katze gemeinsam in den Kasten eingebracht wird – und mit ihm der Zustand der Katze – hängen direkt vom Zustand des radioaktiven Präparats ab. Falls man eine Zustandsfunktion für das radioaktive Atom annehmen kann, die einer Superposition aus „zerfallen“ und „nicht zerfallen“ entspricht, so kann man im Prinzip auch eine entsprechende Wellenfunktion für die Katze ansetzen. „Im Prinzip“ heißt nun aber, dass in der Praxis einige Feinheiten zu beachten sind – und hier kommt Dekohärenz ins Spiel.

Die Schrödinger-Dynamik gilt nämlich nur für abgeschlossene Systeme – faktisch sind jedoch alle Systeme offen. Dies ist zunächst kein Makel der Quantenmechanik, sämtliche physikalischen Theorien operieren zu einem wesentlichen Teil mit der Idealisierungsannahme, dass die jeweils betrachteten Systeme abgeschlossen sind. Auch das Verhältnis der Zahl von Freiheitsgraden zueinander spielt eine entscheidende Rolle. Gegenüber einem einzelnen Atom besitzt ein Makroobjekt wie eine Katze eine praktisch unendliche Anzahl an Freiheitsgraden. Das Aufkommen von Dekohärenz-Ansätzen in den 70er und 80er Jahren (an vorderster Rangstelle durch Hans-Dieter Zeh und Wojciech Zurek) beleuchtet im Detail die Tatsache, dass bei Ankopplung eines Quantensystems an ein System mit einer enorm größeren Zahl an Freiheitsgraden (bestenfalls unendlich vielen) die typischen Quanten-Superpositionen mehr und mehr unterdrückt werden. Dekohärenz ist daher als eine Folge der Dynamik offener Systeme anzusehen – der besondere grundlegende Verdienst des Dekohärenz-Mechanismus liegt darin verständlich zu machen, wieso uns die Welt, die grundsätzlich eine Quantenwelt ist, makroskopisch als klassische Welt, d.h. ohne Superpositionen erscheint.

Abschätzungen zeigen, dass Dekohärenz für relevante Anwendungsfälle auf einer phantastisch schnellen Zeitskala einsetzt. Selbst die unvermeidbare Streuung an den Photonen des kosmischen Mikrowellen-Strahlungshintergrundes führt für Moleküle bereits zu einer für praktische Zwecke scharfen räumlichen Lokalisierung – entgegen der einfachen Schrödinger-Dynamik, die ein Zerfließen des Wellenpakets verlangt. Ist durch diesen physikalischen Automatismus also nicht eigentlich das Messproblem gelöst? In der Tat lässt sich durch Dekohärenz plausibel machen, dass ein Quantensystem bei Ankopplung an einen makroskopischen Messapparat in einen Zustand zerfällt, der effektiv keine Superposition aus Zeigerzuständen mehr

darstellt, sondern für alle praktischen Zwecke diagonal ist in der Zeigerbasis (siehe Box). Dabei wird auch die ebenfalls zum Messprozess gehörende Problematik gelöst, dass nämlich die Zerlegung des Zustandes in die Zeigerbasis des Messgeräts tatsächlich praktisch gegenüber allen weiteren mathematisch möglichen Zerlegungen ausgezeichnet ist. Die vorsichtigen Formulierungen „effektiv“ und „für alle praktischen Zwecke“ deuten jedoch an, dass das bereits beschriebene eigentliche Messproblem, der Übergang von der Lesart  $l$  und  $t$  zu  $l$  oder  $t$ , hierbei nicht gelöst wird. Beträgt die Wahrscheinlichkeit für den lebendigen oder toten Zustand der Katze je 50 Prozent, so lässt sich mit Hilfe von Dekohärenz zwar verständlich machen, wieso wir Zustände der Art  $l + t$  in der Praxis niemals beobachten, weil aber die Überlagerung nicht echt, sondern nur effektiv zum Verschwinden gebracht wurde, lässt sich die Wahrscheinlichkeitsaussage nicht so deuten, dass tatsächlich einer der Zustände definit vorliegt, uns aber subjektiv nicht bekannt ist. Anders als Wahrscheinlichkeiten im Rahmen der Statistischen Mechanik sind quantenmechanische Wahrscheinlichkeiten nicht ignoranzinterpretierbar.

### **Dekohärenz und Interpretationen der Quantenmechanik**

Der Dekohärenz-Formalismus ist zunächst neutral bezüglich einer speziellen Interpretation der Quantenmechanik. Er lässt sich aber je unterschiedlich in die verschiedenen Deutungsprogramme integrieren. Nun ist die traditionell älteste Deutung, die Kopenhagener Interpretation, in gewisser Hinsicht die problematischste, da nämlich unklar ist, was unter Kopenhagener Interpretation genau zu verstehen ist. Da selbst die beiden entscheidenden Protagonisten, Niels Bohr und Werner Heisenberg, keine *gemeinsame* Kodifikation dieser Position angeboten haben, lässt sich vielleicht nur sagen, was die Kopenhagener Interpretation sicher nicht ist. So sah man in Kopenhagener Kreisen zwar die Reduktion der Wellenfunktion (auf  $l$  oder  $t$ ) als eine methodische Notwendigkeit an, wollte dies aber weder als einen physikalischen Prozess in der Welt noch als einen spezifischen Prozess im Bewusstsein des Beobachters verstehen. Letzteres war beispielsweise die Ansicht von Johann von Neumann und Eugen Wigner.

Die Auffassung, der Kollaps der Wellenfunktion sei ein über die Schrödingerdynamik hinausgehender zusätzlicher physikalischer Prozess, ist die Grundannahme so genannter Kollapstheorien. Hierbei handelt es sich ersichtlich

nicht mehr um eine reine Interpretation des ursprünglichen Formalismus, sondern um Abänderungen der Quantentheorie. Der Zugang von Ghirardi, Rimini und Weber ist in diesem Zusammenhang am bekanntesten. Die Grundidee ist, einen spontanen, scharf umgrenzten Lokalisierungsprozess auf einer geeignet angepassten, schnellen Zeitskala zu postulieren. Über die Natur dieses zusätzlichen Prozesses werden keine präzisen Aussagen gemacht, man verhindert aber so ein Verschmieren des Wellenpakets in makroskopischen Dimensionen. Ein Vorzug dieser Vorgehensweise ist, dass auf diese Weise das Messproblem umgangen wird. Anders als im Zusammenhang mit Dekohärenz-Mechanismen führt der spontane Kollaps eindeutig nur auf definite Zustände. Die Katze ist demnach entweder lebendig oder tot, die Verwendung von Wahrscheinlichkeiten ist ignoranzinterpretierbar und rührt daher, dass die Ebene der spontanen Lokalisierungsprozesse statistisch beschrieben wird. Der entscheidende Nachteil von Kollapstheorien ist jedoch ihr offensichtlicher Ad-hoc-Charakter: die von ihnen eingeführten Parameter werden in den jeweiligen Modellen der Theorie von Hand so angepasst, dass sie mit den experimentellen Daten in Einklang stehen. Eine tiefer liegende Erklärung des Wesens dieser Prozesse steht jedoch aus.

Roger Penrose hat in diesem Zusammenhang darüber spekuliert, dass die Erklärung in der Lösung des Problems der Quantentheorie der Gravitation zu suchen ist. In Ermangelung einer genaueren Skizze einer solchen Theorie kann man sich jedoch des Eindrucks nicht erwehren, dass dieser Vorschlag zunächst nur beinhaltet, ein ungelöstes Problem – dasjenige der Quantenmessung – mit einem anderen ungelösten Problem – demjenigen der Vereinheitlichung von Quantenfeld- und Gravitationstheorie – zu „beantworten“. Zum gegenwärtigen Zeitpunkt kann dies kaum als allseits befriedigende Strategie angesehen werden.

Diejenige Interpretation, die zu Dekohärenz-Ansätzen in einer gleichsam natürlichen Nähe steht, ist der Viele-Welten-Zugang. Der zunächst wahnwitzig wirkende Umstand, dass sämtliche Zweige der Quantendynamik, etwa sowohl die Entwicklung zur toten als auch zur lebendigen Katze, ontologisch ernst genommen werden, erlangt vor dem Hintergrund der Dekohärenz-Theorien eine gewisse Plausibilität. Die Viele-Welten-Deutung ist dann konsequenter Ausdruck einer weitverbreiteten philosophischen Grundhaltung: dem wissenschaftlichen Realismus. Dieser Position zufolge ist der unstrittige überwältigende Anwendungserfolg der Quantenmechanik nur dadurch zu erklären, dass die in ihr auftretenden zentralen

theoretischen Terme realistisch interpretiert werden. Eine entsprechende Realinterpretation der Wellenfunktion bzw. der mit ihr einhergehenden Wahrscheinlichkeiten führt dann folgerichtig dazu, dass sämtliche quantenmechanischen Möglichkeiten eine Realinterpretation erhalten. Man mag dies für phantastisch halten, aber *prima facie* handelt es sich um eine konsequente und konsistente Position (die gleichwohl in vielen Details auch technische Schwächen zeigt, auf die wir hier jedoch nicht eingehen können).

Die Analyse von Dekohärenz-Mechanismen hat also einige Bewegung in die Interpretationsdebatte gebracht. Tegmark und Wheeler haben recht: Es ist an der Zeit, die Rolle der Dekohärenz im Verständnis der quantenhaften Natur in den Lehrbüchern gebührend zu berücksichtigen. Auch mag es hilfreich sein, den belasteten Begriff vom „Kollaps der Wellenfunktion“ aufzugeben. Das Messproblem aber sollte im gleichen Atemzug ebenso in jedem Lehrbuch dargestellt werden. Denn gerade durch Dekohärenzansätze wird es in seiner ganzen Schärfe nur noch deutlicher hervorgehoben und präzisiert.

---

### **Box: Dekohärenz und Messproblem**

Formal lässt sich das quantenmechanische Messproblem durch den Dichtematrix-Formalismus wiedergegeben. Zunächst entspricht der Wellenfunktion von Schrödingers Katze  $|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|l\rangle + |t\rangle)$  folgende Dichtematrix

$$\rho = |\psi\rangle\langle\psi| = \frac{1}{2}(|l\rangle\langle l| + |t\rangle\langle t| + |l\rangle\langle t| + |t\rangle\langle l|).$$

Dieser Ausdruck kann auch als 2x2-Matrix verstanden werden. Während die Terme  $|l\rangle\langle l|$  und  $|t\rangle\langle t|$  auf der Hauptdiagonalen der Matrix eine anschauliche Interpretation im Sinne des lebendigen oder toten Zustandes der Katze bedeuten, gestatten die so genannten Nebendiagonalelemente  $|l\rangle\langle t|$  und  $|t\rangle\langle l|$ , die Interferenzterme von lebend und tot, keine derart anschauliche Interpretation.

Wünschenswert wäre es, bei Messung eines Quanten-Zustandes zu einem Gemisch der Form

$$\rho_G = \frac{1}{2}(|l\rangle\langle l| + |t\rangle\langle t|)$$

zu gelangen, bei dem keine Interferenzterme mehr vorhanden sind und das nur noch Hauptdiagonalterme besitzt; denn seine anschauliche Interpretation ist es, dass die Katze entweder lebendig oder tot ist.

Durch Dekohärenz, also durch die faktisch immer vorliegende Ankopplung an die Umgebung, werden nun die Nebendiagonalelemente unterdrückt und aus  $\rho$  wird so effektiv eine Dichtematrix, die tatsächlich wie gewünscht dem Gemisch entspricht:  $\rho^{eff} = \rho_G$ . Wenngleich die Interferenzterme durch den Dekohärenz-Mechanismus für alle praktischen Zwecke zu Null gemacht werden, gestattet  $\rho^{eff}$  als so genanntes „uneigentliches Gemisch“ aber dennoch nicht dieselbe (Ignoranz-) Interpretation wie  $\rho_G$  – das Messproblem besteht in diesem Sinne weiter.

### **Addendum: Wigner's views about the measurement problem**

A possible resolution to the measurement problem is proposed by the views of authors like London and Bauer, von Neumann and, most notably, Eugene Wigner. Such views could very well be called “consciousness interpretations.” Wigner had claimed that since we know from introspection that our conscious mental states are never in something weird as a superposition, it must be the case that quantum mechanics (and physics at all) doesn't apply to consciousness. Stated like this, this is outright mind-body dualism and should therefore not be confused with the Copenhagen interpretation which essentially claims that the results of a measurement should be communicable in the language of classical physics.

But neither Bohr nor Heisenberg ever claimed that it is explicitly the observer's consciousness which reduces the wave function in a measurement process – as consciousness interpreters do. Remarkably, such a position can in principle be tested empirically. In a scenario which Wigner himself inaugurated (and which became known as “Wigner's friend”) an observer A performs a measurement on a system S and due to the collapse of the wave function in his mind also destroys the quantum superpositions between A and S. A second observer B could then perform an appropriate measurement on the combined system S+A and could either detect that the superpositions between S and A are still there (as a universal application of

quantum theory would have it) or did in fact vanish (as Wigner would have it). Because of the enormously complex macroscopic nature of a human observer (made out of  $10^{27}$  atoms!) such a measurement is of course far beyond any practicability.

Remarkably, the late Wigner who in the 1970's and 80's heard about the upcoming decoherence approach by Zeh considerably changed his view. In his later writings he endorsed the decoherence view – together with assumptions he had already made earlier regarding possible non-linear changes of the Schrödinger dynamics. Hence he varied between decoherence and GRW-like spontaneous collapse approaches. But also philosophically he admitted that besides the mind-body dualism he was ready to accept his earlier consciousness interpretation is beset with the threat of solipsism – and that this is no tenable position.

---

## Literatur

E. Joos, H.D. Zeh, C. Kiefer, D. Giulini, J. Kupsch & I.O. Stamatescu: *Decoherence and the Appearance of a Classical World in Quantum Theory*. Berlin: Springer, 2nd ed. 2003.

R. Penrose: *The Emperor's New Mind: Concerning Computers, Minds, and The Laws of Physics*. Oxford: Oxford University Press, 1989.

M. Tegmark & J.A. Wheeler (2001): *100 Years of Quantum Mysteries*. Scientific American 284(2), 54-61

E. P. Wigner: *Philosophical reflections and syntheses*. Annotated and with an introduction by G. G. Emch. Berlin: Springer, 1997.

## Internet

<http://www.decoherence.de>

<http://plato.stanford.edu/entries/qm-decoherence>

<http://plato.stanford.edu/entries/qm-collapse>