

## Wie Dekohärenz das Problem des quantenmechanischen Meßprozesses löst\*

H. Dieter Zeh [www.zeh-hd.de](http://www.zeh-hd.de) - April 2012 (zuletzt geändert: 7. November 2013)

Man kann Dekohärenz am knappsten als die unkontrollierbare und daher praktisch irreversible Dislokalisierung quantenmechanischer Superpositionen definieren, wodurch diese für lokal operierende Beobachter unzugänglich werden (auch wenn sie weiterhin existieren):

$$\left(\sum_n c_n \psi_n\right) \psi^{E_1} \psi^{E_2} \psi^{E_3} \dots \rightarrow \left(\sum_n c_n \psi_n \psi_n^{E_1}\right) \psi^{E_2} \psi^{E_3} \dots \rightarrow \left(\sum_n c_n \psi_n \psi_n^{E_1} \psi_n^{E_2}\right) \psi^{E_3} \dots \rightarrow \dots$$

Dies ist eine Konsequenz der durch eine Schrödingergleichung beschriebenen Wechselwirkung aller lokalen Systeme mit ihrer natürlichen Umgebung  $E$ , die hier symbolisch in zunehmend weiter entfernte Teile  $E_1, E_2, E_3, \dots$  aufgeteilt ist. Sie beschreibt eine unvermeidliche „Störung“ der Umgebung durch das betreffende System, während die Störung des Systems durch die Umgebung bei „reiner Dekohärenz“ (die eine gute Näherung für makroskopische Objekte darstellt) vernachlässigt wird. Da sich eine solche Dislokalisierung normalerweise unbegrenzt durch lokale Wechselwirkungen ausbreitet, verlangt das Konzept der Dekohärenz auch keine genaue Spezifikation der Grenzen des jeweils betrachteten „Systems“. Sobald diese Dislokalisierung unkontrollierbar und somit irreversibel geworden ist, betrachtet man ein Messergebnis oder ein „Quantenereignis“ (wie etwa einen Zerfall oder eine Teilchenerzeugung) als real und nicht mehr als nur virtuell.

*Alle* Systeme werden auf diese Weise ständig zunehmend mit ihrer näheren und im Verlauf auch weiteren Umgebung verschränkt, so daß sie, objektiv betrachtet, niemals einen reinen Quantenzustand für sich besitzen können. Quantenzustände sind also grundsätzlich „nichtlokal“, auch wenn ihre Dynamik lokal ist. Wie kommt es dann zu den beobachteten definitiven lokalen Meßergebnissen und der Möglichkeit, überhaupt reine Zustände für mikroskopische Systeme zu präparieren? Hierzu wird gewöhnlich *ad hoc* ein nich-

---

\* Übersetzte und erweiterte Fassung meines WebEssays „How decoherence can solve the measurement problem“ vom Mai 2005

tunitärer „Kollaps der Wellenfunktion“ in Abänderung der unitären Dynamik angenommen, der aber nie als fundamentaler dynamischer Prozeß beobachtet werden konnte.

Formal lassen sich lokale Systeme noch durch eine reduzierte Dichtematrix  $\rho$  beschreiben, bei der die auf der rechten Seite der obigen Gleichung dargestellte Verschränkung mit der Umgebung einfach ignoriert (die Umgebung „ausgespart“) wird. Ihre von-Neumann-Entropie  $S = -\text{Spur}\{\rho \ln \rho\}$  kann im Mittel nur zunehmen, wenn man die Existenz einer „avancierten“ (konspirativen oder antikausalen) globalen Verschränkung ausschließt – was einen universellen Zeitpfeil (angedeutet durch die Pfeile in der Gleichung) definiert. Die sich dann ergebende ständige Zunahme der Verschränkung aller Systeme ist zwar formal ganz analog zu durch Boltzmannsche Stöße entstehenden und für die weitere Dynamik normalerweise irrelevanten statistischen Korrelationen zwischen Gasmolekülen, beruht aber im Gegensatz zu diesen nicht auf einer unvollständigen (statistischen) Beschreibung, sondern auf der erwähnten fundamentalen kinematischen Nichtlokalität (auch als „Quantenkorrelation“ bezeichnet). Sie entspricht der Eigenschaft von Wellenfunktionen, nicht im dreidimensionalen Raum sondern auf einem hochdimensionalen Raum definiert zu sein, den wir klassisch als „Konfigurationsraum“ (auch für *mögliche* Meßergebnisse) interpretieren, was aber quantenmechanisch bereits einen potentiellen Kollaps voraussetzen würde. Die reduzierte Dichtematrix ist nur von beschränktem Wert, da sie nicht durch lokale Operationen (Experimente) von einem echten *Ensemble* von Quantenzuständen auf Grund unvollständigen Wissens unterscheiden kann. Sie wird daher häufig mit einem solchen Ensemble verwechselt, was zu grundsätzlichen Mißverständnissen führt.

So wurde häufig behauptet (auch von einigen Mitbegründern der Dekohärenztheorie), daß Dekohärenz stochastische Phänomene, wie Quantensprünge, im Sinne eines solchen Ensembles aus einer globalen Schrödinger-Dynamik *erklärt*. Das würde aber ganz offensichtlich der dabei gemachten Annahme einer unitären, also deterministischen Dynamik widersprechen. Diese erlaubt es auch, eine Messung *im Prinzip* wieder „ungeschehen“ zu machen („Rekohärenz“), was für mikroskopische Meßapparate auch realisiert werden konnte. Der Denkfehler rührt daher, daß der Begriff einer Dichtematrix nur zur Berechnung von „Erwartungswerten“ für lokale Messungen, also bereits unter *Voraussetzung* der probabilistischen Interpretation, gerechtfertigt ist. Schon im Bellschen Experiment wäre eine Beschreibung der beiden verschränkten Partner durch ihre jeweiligen reduzierten Dichtematrizen unzureichend.

Um dieser „naiven“ Fehlinterpretation entgegenzutreten, habe ich in früheren Arbeiten wiederholt angemerkt, daß Dekohärenz für sich allein das Meßproblem der Quantentheorie *nicht* löst. Diese Bemerkung wird aber gern von solchen Physikern in ihrem Sinne mißbraucht, die nach Argumenten entweder für eine fundamentale Modifikation der Schrödingerdynamik durch stochastische Zusatzterme (einen echten Kollaps der Wellenfunktion) oder aber für eine epistemische Interpretation (bedingt durch eine noch unbekannte Realität hinter der Quantentheorie) suchen. Ihre Erwartungen lassen sich in der Tat auf keinen Fall durch Dekohärenz erfüllen, scheinen mir allerdings gerade wegen dieses Phänomens auch nur auf Vorurteilen zu beruhen. Mir ist insbesondere kein Beispiel eines Meßprozesses oder Quantensprungs bekannt, das nicht quantitativ durch Dekohärenz im Sinne eines *scheinbaren* Ensembles beschreibbar wäre. So hat Erich Joos direkt nach Erscheinen der ersten Arbeit von Ghirardi, Rimini und Weber zu dem von ihnen vorgeschlagenen Kollapsmechanismus darauf hingewiesen, daß die von ihnen *postulierten* nichtunitären Mastergleichungen vom Lindblad-Typ (für eine Dichtematrix) im wesentlichen identisch mit denen sind, die sich für lokale Systeme automatisch mit Hilfe von Dekohärenz aus einer global unitären Dynamik ergeben. Was bedeutet diese Tatsache dann aber, wenn Dekohärenz doch gar keinen wirklichen Kollaps beschreibt?

Lassen Sie mich zunächst einmal annehmen, daß eine der diversen Kollapstheorien eines Tages tatsächlich experimentell bestätigt würde. Um die in sie gesetzten Erwartungen zu erfüllen, müßte sie so konstruiert sein, daß Superpositionen unterschiedlicher Stellungen eines makroskopischen Zeigers (oder der Werte sonstiger makroskopischer Variablen) indeterministisch und mit den von Max Born postulierten Wahrscheinlichkeiten in jeweils *eines* von mehreren möglichen schmalen Wellenpaketen übergehen, die praktisch jeweils eine *bestimmte* Zeigerstellung darstellen. Solche Wellenpakete ähneln Schrödingers „kohärenten“ Oszillatorzuständen, mit denen er ursprünglich gehofft hatte, alle scheinbar klassischen Objekte (insbesondere scheinbare Teilchen) beschreiben zu können. Das Adjektiv „kohärent“ bezeichnet hier Superpositionen unterschiedlicher Energieeigenzustände, die im Gegensatz zu diesen erst eine quasi-klassische Zeitabhängigkeit ermöglichen. Schrödingers Hoffnungen sind wegen der normalerweise auftretenden dynamischen Dispersion der Wellenpakete aber seinerzeit gescheitert, während sich die kohärenten Zustände später zur Beschreibung zeitabhängiger klassischer Felder in der Quantenelektrodynamik, wo sie als Oszillator-Wellenpakete keiner Dispersion unterliegen, durchaus bewährt haben.

Die Kollapshypothese, die den Meßprozeß im Sinne eines resultierenden Ensembles von *möglichen* Wellenpaketen beschreibt, würde im Gegensatz zur Kopenhagener Interpretation aber jedenfalls bedeuten, daß keine fundamental klassischen Konzepte mehr erforderlich sind. Eines (und nur eines) der resultierenden Wellenpakete beschriebe die Realität. Formale „Observable“, wie sie von Heisenberg im Rahmen seiner Matrixmechanik eingeführt wurden, werden dabei zu einem reinen Hilfskonzept, das sich aus der Struktur der Meßwechselwirkung ableiten läßt. Der Kollaps wäre also ein realer, oftmals symmetriebrechender physikalischer Prozeß, während eine Informationsvergrößerung erst auftritt, wenn ein Beobachter das Ergebnis registriert. In der Kopenhagener Interpretation werden diese beiden Aspekte gewöhnlich vermischt, insbesondere wenn man die Wellenfunktion mit Heisenberg als Ausdruck „menschlichen Wissens“ interpretiert. (Bei einer apparativen Registrierung würde man von einer Informationsvermehrung erst dann sprechen, wenn man das Resultat als „gegeben“ anzusehen bereit ist.)

Betrachten wir zum Beispiel eine „Teilchenspur“ in einer Nebel- oder Blasenkammer. Sie läßt sich in diesem Sinne als eine Folge von Kollapsereignissen beschreiben, wenn alle sichtbaren Tröpfchen als makroskopische „Zeiger“ oder Dokumente angesehen werden können. Wie Neville Mott schon 1929 gezeigt hat, wird die Wellenfunktion des hier scheinbar beobachteten Teilchens derart mit den Wellenfunktionen aller Tröpfchenorte verschränkt (ohne daß er diesen erst später entstandenen Terminus bereits benutzen konnte), daß eine Superposition vieler verschiedener Spuren entsteht, die jeweils quasi-klassischen Bahnen folgen. Unregelmäßige Spuren, die nicht längs solcher Bahnen verlaufen, besitzen nur eine extrem kleine Norm (also vernachlässigbare Wahrscheinlichkeit im Sinne der Bornschen Interpretation). Nach der Kollapshypothese würden dann alle als Komponenten der Gesamtwellenfunktion realisierten Spuren bis auf eine entsprechend diesen Wahrscheinlichkeiten aus der Realität verschwinden. Die einzelnen Spuren werden quantenmechanisch in guter Näherung durch Produkte schmaler Wellenpakete für die Schwerpunkte aller Tröpfchen beschrieben, die sowohl untereinander als auch mit dem verbleibenden Wellenpaket des ursprünglichen Quantenobjekts und, wie wir heute wissen, den Zuständen einer unkontrollierbaren Umgebung korreliert sind. Im Gegensatz zur Kopenhagener Interpretation oder zu einer solchen mit Hilfe von Feynman-Pfaden oder Bohm-Trajektorien wird die kollabierende Wellenfunktion bei dieser Beschreibung also als kinematisch vollständig angenommen. Mott hat seinerzeit allerdings die Verschränkung mit der Umgebung noch nicht berücksichtigt, da ihm das

Dekohärenzkonzept und seine Unvermeidbarkeit unbekannt war und er kein Problem darin sah, die Gesamtwellenfunktion abschließend im bornschen statistischen Sinne zu interpretieren. Es genügte ihm also, eine mit den Bahnen konsistente statistische Korrelation zwischen den nacheinander gemessenen Teilchenorten zu begründen.

Im Rahmen der Kollapstheorien läßt sich auch der eigentliche Beobachtungsprozeß durch den Experimentator (das Ablesen des Ergebnisses) nach dem Vorbild von Neumanns problemlos beschreiben, wenn man ihn in die formale Betrachtung einbezieht. Denn obwohl weitere Kollapsereignisse realistischerweise bei quantenmechanischer Beschreibung im weiteren Verlauf auch noch im Beobachter auftreten müssen, sind diese im Prinzip irrelevant für einen „psycho-physischen Parallelismus“ nach klassischem Vorbild (also bezogen auf einen eindeutig definierten Gedächtnis- und Bewußtseinszustand des Beobachters), den von Neumann ausdrücklich durch den Kollaps ermöglichen wollte. Im Rahmen einer universell gültigen Schrödingergleichung wäre dieser Beobachter dagegen ebenfalls in die verschränkte Superposition von Objekt, Tröpfchen, gestreutem Licht und sonstiger Umgebung mit aufzunehmen. Seine Dichtematrix entspräche zwar formal einem statistischen Ensemble von unterschiedlichen Wahrnehmungszuständen, würde aber objektiv nicht erklären, warum tatsächlich nur ein *einzig*er davon auftritt. Es wäre daher auch möglich, den eigentlichen Kollapsprozeß nach dem Vorschlag Eugene Wigners bis in den Beobachter zu verschieben, was dann sogar Schrödingers Katzensuperpositionen zuließe, solange man die Katze nicht selber als „Beobachter“ in diesem Sinne ansieht.

Ohne jeden Kollaps verbleibt aber weiterhin eine globale Superposition aller Meßergebnisse und deren sich dynamisch daraus ergebender Konsequenzen – einschließlich der entstehenden Verschränkung mit der Umgebung und gegebenenfalls dem Beobachter. Eine eindeutige Wahrnehmung gemäß einem psycho-physischen Parallelismus kann es dann nur noch separat in den individuellen, weitgehend faktorisierten *Komponenten* der universellen Wellenfunktion geben – und zwar ganz unabhängig davon, ob die übrigen Komponenten weiterhin existieren oder nicht! Wenn diese „übrigen“ Komponenten nicht durch einen echten Kollapsprozeß verschwinden, erfordert die neue Situation also eine ungewohnte neue Form für den Parallelismus, da es ja nun in allen Komponenten (im allgemeinen unterschiedliche) Zustände des Beobachters gibt. Tatsächlich bestimmt der Dekohärenzmechanismus eine „bevorzugte“ Basis, deren Zustände in allen makroskopischen Variablen (einschließlich der Neuronenzustände des Beobachters) in

sehr guter Näherung faktorisieren – also *innerhalb der einzelnen Komponenten* bezüglich dieser Basis *nicht* mehr verschränkt sind. Diese bevorzugte (wenn auch vielleicht nur ungenau, aber ausreichend definierte) Basis ist „robust“, indem sie dynamisch autonome Zweige der Wellenfunktion charakterisiert, in denen auch verschiedene Beobachter genau so untereinander korreliert sind wie die diversen Tröpfchen auf einer Bahn in der Wilson-Kammer. In diesem Sinne bilden sie eigenständige quasiklassische „Welten“, die nichts mehr voneinander spüren. Unter Umständen definieren diese Welten ein über-vollständiges System (ein Kontinuum von Zuständen), dem man wegen der verbleiben-den kleinen aber endlichen Kohärenzlängen jedoch eine endliche, wenn auch sehr große Zahl von Mitgliedern eines scheinbaren Ensembles (und entsprechend eine endliche effektive Informationsentropie) zuordnen kann. Auch die Beobachtung eines Zerfalls entspricht der Messung einer kontinuierlichen Variablen (der Zerfallszeit). Dabei garanti-ert die unkontrollierbare Umgebung in einem kausalen, also thermodynamisch zeitge-richteten Universum, daß makroskopisch verschiedene Zweige irreversibel getrennt bleiben – eine diese erzeugende Messung also praktisch nie mehr rückgängig gemacht werden kann. Zwar existiert das Universum unter dieser Annahme einer universell gül-tigen Schrödingergleichung nach wie vor in einer Superposition aller dieser Zustände, aber ein physikalisch wohldefinierter (lokaler) Beobachter kann nur durch den „relati-ven Zustand“ seiner Restwelt, zu der auch die mit ihm korrelierten Zustände anderer Beobachter im Sinne von „Wigners Freund“ gehören, physikalisch beeinflusst werden (diese also erkennen). Operationell definiert dieser relative Zustand – gegebenenfalls mittels Dekohärenz objektiviert auf ein ganzes Kollektiv von korrelierten Beobachtern – also das was wir traditionell die „Realität“ nennen.

Selbst wenn man in diesem Sinne die Annahme einer Realität der übrigen, für uns unbe-obachtbaren „Welten“ für extravagant und überflüssig hält (Realität ist auch eine Defini-tionssache), muß man akzeptieren, daß eine konsequent angewandte Schrödingerglei-chung bei Berücksichtigung der realistischen Umgebung aller Objekte uns lehrt, daß weder eine stochastische Modifikation der objektiven, unitären Dynamik erforderlich ist, noch fundamental klassische Begriffe oder versteckte Variablen zwecks Interpretati-on der Wellenfunktion vorausgesetzt oder erwartet werden müssen. Phänomenologisch erfolgreiche Kollapsmodelle würden dann nur eine effektive und aus der Schrödinger-gleichung ableitbare Dynamik für den relativen Zustand unserer Restwelt beschreiben. Die große Frage nach der genauen Struktur und Funktionsweise von physikalischen,

aber Bewußtsein tragenden Beobachtersystemen, einschließlich ihrer Abgrenzung und Entstehungsgeschichte, stellt sich in diesem Rahmen nicht anders als in anderen ontischen (z.B. klassischen oder Kollaps-) Theorien. Sie müssen jedenfalls hinreichend komplexen und semistabilen Gebilden aus dynamisch stark gekoppelten Teilen entsprechen, die aber sowohl einen Stoffwechsel zur Abgabe von Entropie wie eine der Informationsübertragung dienende kontrollierte Wechselwirkung mit ihrer Umwelt erlauben. Dabei sorgt die Lokalität aller Wechselwirkungen auch für die Lokalität solcher Systeme; keineswegs sind dafür lokale Bausteine, wie Teilchen oder klassische Felder, nötig.

Bei angenommener (weil durch die Schrödingergleichung geforderter) Existenz der anderen „Welten“ erhalten die weiterhin zu postulierenden Bornschen Wahrscheinlichkeiten eine neuartige, nämlich eine rein subjektive Bedeutung. Denn unter *allen* sich ergebenden Welten müssen ja auch diejenigen sein, in denen Serien von gleichartigen Experimenten auf im Bornschen Sinne „unwahrscheinliche“ Häufigkeiten der Ergebnisse geführt haben. Die Bornsche Regel kann also nichts Objektives besagen, sondern nur etwas über „unsere“ unter den vielen Welten. Nach einer Untersuchung von Neill Graham (einem Schüler von Bryce DeWitt) haben alle *nicht* in guter Näherung die Bornsche Regel bestätigenden Welten zwar in ihrer Gesamtheit nur eine sehr kleine Norm, sie bereits deswegen als unwahrscheinlich auszuschließen wäre aber wieder ein Zirkelschluß. Auch Everett hat sich in seiner ursprünglichen Arbeit darauf beschränkt, lediglich die rein formale Eignung des Normquadrats als einer Wahrscheinlichkeit für die von ihm nur noch unzureichend definierten Zweige zu bestätigen. Im Grunde stellt aber die Wahrscheinlichkeitsgewichtung nach wie vor ein Postulat (jedoch nur für die Auswahl „unserer Welt“) dar. Allerdings wies Everett später auch bereits darauf hin, daß im wesentlichen nur das Normquadrat ein *dynamisch konsistentes* Maß definiert, da es im Gegensatz zu anderen Definitionen unter der Schrödingerdynamik erhalten bleibt. Er betrachtete das sogar als einen Beweis für die Bornsche Regel. Aus einem ähnlichen Grunde verwendet man auch in der klassischen statistischen Mechanik das Phasenraumvolumen als Wahrscheinlichkeitsmaß. Beispielsweise würde die oft geforderte Gleichwahrscheinlichkeit aller Zweige (unabhängig von ihrer Norm) dazu führen, daß sich das relative statistische Gewicht eines aus einer Messung resultierenden Zweiges später vergrößert, wenn man nur in diesem weitere Messungen durchführt. Ich vermag aber auch nicht einzusehen, warum ein Postulat des Wahrscheinlichkeitsmaßes (oder einer „Gewichtung“) in diesem „subjektiven“ Sinne weniger akzeptabel sein soll als ein solches

in objektiver Form – sei es nun als objektive Born-Regel für das Auftreten klassischer Eigenschaften, durch einen Kollapsmechanismus oder durch eine postulierte statistische Anfangsverteilung der Bohmschen Trajektorien. Im Gegensatz zu diesen Vorschlägen ergibt sich aus der Dekohärenz immerhin die noch ungewichtete Verzweigung als „bevorzugte“ Basis allein aus der Schrödinger-Dynamik.

In einem reinen Gedankenexperiment kann man in dieser Interpretation auch einmal einen unrealistischen, nämlich von der Umgebung isolierbaren Beobachter eines quantenmechanischen Systems (etwa eines einzelnen Photons) diskutieren. Für ihn wäre keine robuste Basis definiert, so daß ein weiterer, äußerer Beobachter ihn in Superpositionen unterschiedlicher Wahrnehmungszustände auffinden könnte. Unter ähnlich unrealistischen Voraussetzungen könnte man im Prinzip ein Experiment konzipieren, in dem ein solcher Beobachter anstelle eines Atoms oder Photons durch einen Doppelspalt geschickt wird. Sofern er seinen eigenen Schlitzdurchgang dabei irreversibel registriert (sich also später daran erinnern kann), würde er jede Interferenz im gleichen Sinne zerstören wie es nachprüfbar der Spinflip eines mikroskopische Teilchens beim Durchgang durch einen der beiden Schlitze tut. Um die Beobachtung von Interferenzen zu ermöglichen, müßte der Beobachter den Schlitzdurchgang umgehend vergessen, was einem „Quantenradierer“ entspräche. Dafür genügt es aber nicht, die Information über den Schlitzdurchgang einfach zu „thermalisieren“ (also nur praktisch unbrauchbar zu machen, wie es bei einem realen Radiergummi oder beim Reset eines Apparats zur Realisierung von Maxwells Dämon in einem thermodynamischen Kreisprozeß geschieht), sondern man muß die ursprünglich lokale Superposition entweder in Form eines antikausalen, die Phasenbeziehungen im Konfigurationsraum refokussierenden „Rekohärenzprozesses“ wiederherstellen oder aber erneut präparieren. Ersteres würde verlangen, daß alle Dekohärenzprozesse in diesem Fall nur virtuell, also reversibel waren.

Siehe auch:

Dekohärenz und andere Quantenmißverständnisse

([www.zeh-hd.de/KarlsruheText.pdf](http://www.zeh-hd.de/KarlsruheText.pdf))

Die seltsame Geschichte von Teilchen und Wellen

([www.zeh-hd.de/Teilchen+Wellen.pdf](http://www.zeh-hd.de/Teilchen+Wellen.pdf))

Quantum nonlocality vs. Einstein locality ([www.zeh-hd.de/nonlocality.html](http://www.zeh-hd.de/nonlocality.html))



The problem of conscious observation in quantum mechanical description

(<http://arxiv.org/abs/quant-ph/9908084>)

E. Joos: Comment on „Unified dynamics for microscopic and macroscopic systems“.

Phys. Rev. D36, 3286 (1987)

[www.decoherence.de](http://www.decoherence.de)