

Dekohärenz und andere Quantenmißverständnisse

Beitrag zum Didaktik-Workshop Physik an der TU Karlsruhe (12. Juni 2009)

– zuletzt verändert und ergänzt: Mai 2011 –

H. D. Zeh – www.zeh-hd.de

Ich möchte hier zunächst klarstellen, daß das Dekohärenzprogramm begrifflich vom Schrödingerbild ausgeht. Denn ihm liegt der Versuch zugrunde, der Schrödingergleichung – und damit dem Superpositionsprinzip – eine möglichst weitgehende (vielleicht sogar universelle) Gültigkeit zuzubilligen. Damit steht es in Gegensatz zur etablierten Kopenhagener Deutung, die klassische Begriffe zur Beschreibung von Meßapparaten und Meßergebnissen als eine unumgängliche Voraussetzung ansieht, was mit einer universellen unitären Dynamik unvereinbar ist.

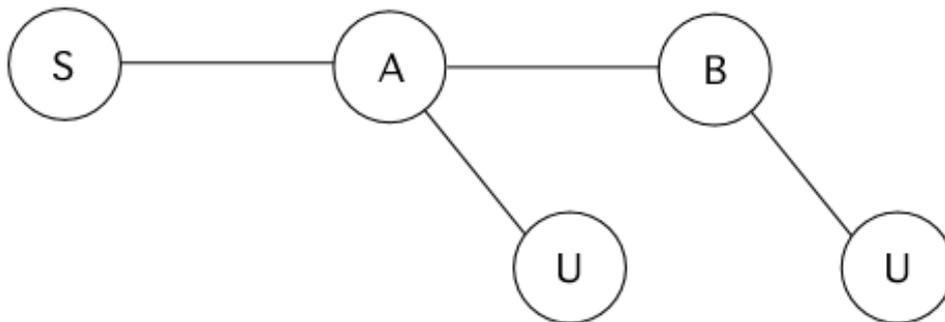
Bei dieser Beschreibung führen Wechselwirkungen zwischen zwei physikalischen Systemen zwangsläufig zu deren Verschränkung. Es sei daher historisch angemerkt, daß Schrödinger seine Gleichung ursprünglich aus einer Analogie zu den hamiltonschen partiellen Differentialgleichungen gewann, wodurch sich direkt eine Wellenfunktion im Konfigurationsraum ergab (wofür auch heute noch der Buchstabe q steht), die solche Verschränkungen als Normalfall enthält. Er wandte diese Gleichung zunächst jedoch erfolgreich auf Einteilchenprobleme wie das Elektron im Zentralpotential (Wasserstoffatom) an, wo der Konfigurationsraum ausnahmsweise mit dem Ortsraum identisch ist. Leider wird dieses plausibel erscheinende aber äußerst irreführende Vorbild heute noch in den meisten Vorlesungen übernommen. Da Schrödinger aber einerseits der Wellenfunktion realen Charakter zuschreiben wollte, andererseits davon überzeugt war, daß die Realität auf der Bühne von Raum und Zeit ablaufen müsse, versuchte er später seine Wellenfunktion für Mehrteilchenprobleme umzuinterpretieren. Erst 1935 (im Zusammenhang mit dem Erscheinen der Arbeit von Einstein, Podolski und Rosen) bezeichnete er die Verschränkung als die größte Herausforderung der Quantenmechanik. Es ist heute müßig zu spekulieren, wie er auf den Ausgang der Experimente zur Bellschen Ungleichung reagiert hätte.

Die Verschränkung von Elektronen und Kernen in Atomen und Molekülen ist schon früh bestätigt worden. Aber auch meßprozeßartige Wechselwirkungen zwischen System S und Apparat A vom von Neumannschen Typ $\psi_n^S \psi_0^A \rightarrow \psi_n^S \psi_n^A$ führen dazu, daß eine ursprünglich in S lokalisierte Superposition $\sum_n c_n \psi_n^S$ “dislokalisiert” wird, was – wenn irreversibel – lokal

für das System S als Dekohärenz wahrgenommen wird. Im Heisenbergbild wäre eine allgemeine Dynamik offener Systeme nur sehr umständlich zu beschreiben.

Bei einem Meß- oder Beobachtungsprozeß sind aber noch mehr Systeme beteiligt. Schon von Weizsäcker sprach von der “untrennbaren Kette zwischen Objekt und Subjekt”, die man aber ursprünglich immer isoliert betrachtet hat. Erst im Zusammenhang mit dem Dekohärenzprogramm hat man realisiert, daß alle Systeme stets auch wesentlich mit ihrer weiteren Umgebung wechselwirken müssen. Nur bei mikroskopischen Systemen unter bestimmten Laborbedingungen mag das vernachlässigbar sein. Es ist z.B. ohne Rechnung unmittelbar einzusehen, daß wir eine makroskopische Zeigerstellung nur dadurch ablesen können, daß der Zeiger ständig Photonen reflektiert, deren Zustand nach der Reflektion vom Zeigerstand abhängen muß (auch ohne daß wir sie wahrnehmen). Das ist also wieder eine Wechselwirkung vom von Neumannschen Typ. Es ist aber für das Dekohärenzphänomen *nicht nötig*, daß diese Abhängigkeit Information beschreibt, denn der gleiche Effekt ist auch durch Streuung thermischer Photonen zu erreichen. Es ist nur nötig, daß die aus zwei verschiedenen Zeigerstellungen resultierenden finalen Photonenzustände orthogonal zueinander sind. Ist das nur annähernd der Fall, kann Dekohärenz noch immer praktisch vollständig durch eine größere Anzahl von Photonenstreuungen erreicht werden.

Vollständiger Quantenmeßprozeß

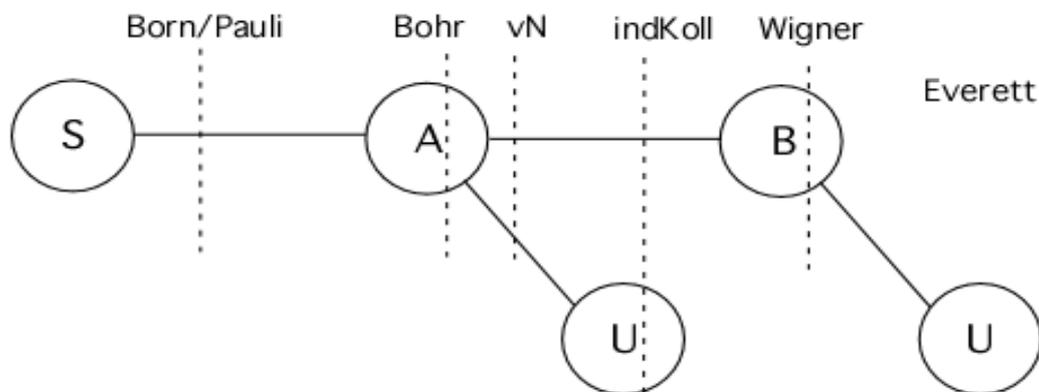


Ein vollständiges System für eine Beobachtung unter Vernachlässigung zwischengeschalteter Informationsmedien würde etwa wie in obiger Figur aussehen, wobei B der Beobachter und U die jeweilige Umgebung ist. Die Umgebung ist dabei für ein makroskopisches System A auch unabhängig von einem Meßprozeß wesentlich, um dessen klassische Eigenschaften in diesem quantenmechanischen Schrödingerbild zu verstehen. Die einheitliche Be-

handlung aller Systeme macht noch einmal den begrifflichen Gegensatz dieses Programms zur Kopenhagener Interpretation deutlich.*

Gewöhnlich stellt man hier die Frage, welche der Wechselwirkungen in der Figur man mit der Schrödingergleichung beschreiben muß und wo man die Wahrscheinlichkeitsinterpretation in irgendeiner Form anzuwenden hat – nämlich entweder als einen Kollaps der Wellenfunktion oder durch einen begrifflichen Sprung von quantenmechanischen zu vorausgesetzten klassischen Begriffen. Diese Grenze wird auch als Heisenbergscher Schnitt bezeichnet, dessen Position in der “untrennbaren Kette” von ihm als frei wählbar angesehen wurde. Allerdings darf er nicht bereits zwei Teile von S trennen, die auf relevante Weise verschränkt sind, wie beim radioaktiven Zerfall mit innerer Konversion, im Falle von “delayed choice” oder bei den Bellschen Experimenten (eben solange noch keine irreversible Dekohärenz aufgetreten ist).

Heisenbergsche Schnitte



* Nachtrag: Der Erfolg des Dekohärenzprogramms sollte auch dazu beitragen, die unsägliche, in Deutschland immer noch recht populäre Ludwigsche Aufteilung der Welt in Präparationen, Messungen und eine nur dazwischen gültige Quantenmechanik ad absurdum zu führen. Als ich in den siebziger Jahren versuchte, meinen Kollegen die Dekohärenzidee näher zu bringen, erhielt ich die stereotype Antwort: “Dafür ist die Quantentheorie nicht gemacht.” Eine solche “handwerkliche” Auffassung mag praktizierenden Physikern entgegenkommen, sie ist aber auch bei Antireduktionisten sehr beliebt. Es ist viel zu wenig bekannt, daß solche Motive bei einigen Vätern der Quantentheorie eine wichtige Rolle gespielt haben. Nicht umsonst berufen sich bis heute esoterische Kreise gern auf die kopenhagener Deutung. Mich erinnert etwa die Behauptung, die Wellenfunktion sei nicht real, beschreibe aber “Information”, an Argumente, die in der Homöopathie verbreitet sind. Der wesentliche Unterschied bei diesem Vergleich ist allerdings, daß die “Wirksamkeit” der Wellenfunktion unstrittig ist – nach normalen Maßstäben ein klares Indiz für ihre Realität. Anstatt aus der experimentellen Bestätigung der Dekohärenz nun zu lernen, daß die Schrödingergleichung sehr wohl auch auf makroskopische Objekte anwendbar ist, verschieben die meisten beteiligten Physiker die traditionelle Interpretation, also den Heisenbergschen Schnitt, einfach um einen Schritt. Die Situation sollte aber andererseits auch kein Grund sein, einfach zusätzliche, prinzipiell unbeobachtbare Variablen einzuführen, die nur den Zweck haben, mittels einer obskuren Dynamik Meßergebnisse auf nicht nachprüfbarer Weise zu determinieren – wie es in der Bohmschen Theorie geschieht.

Die zweite Figur zeigt eine Auswahl von möglichen Heisenbergschen Schnitten für das obige Schema. Die traditionelle Wahrscheinlichkeitsinterpretation von Born und Pauli (Born hatte sie ursprünglich als einen Kollaps der Wellenfunktion im Schrödingerbild postuliert) wendet diese direkt auf mikroskopische Systeme an. So formulierte Pauli, daß das Auftreten von Ort oder Impuls eines Elektrons als ein "außerhalb der Naturgesetze stehendes Ereignis" anzusehen sei. Bohr forderte dagegen klassische Eigenschaften erst für makroskopische Meßapparate. Das wird besonders deutlich in einer jüngeren Arbeit von Ulfbeck und Aage Bohr (Niels Bohrs Sohn), in der sie schreiben, daß der Klick im Zähler "out of the blue" geschehe – "ohne daß ihm ein Ereignis in der Quelle vorangeht" (also etwa ein Zerfallsereignis im Atom). Nach dem Klick soll dann aber die Wellenfunktion "ihre Bedeutung verlieren", was offenbar Ludwigs Vorstellungen nicht unähnlich ist. Von Neumann (vN) schließlich beschrieb auch den Zeigerzustand des Meßgeräts durch ein Wellenpaket.

Wenn man etwa das Verschwinden von Interferenzen beim Beobachten des Schlitzdurchgangs in einem Doppelspaltexperiment beschreiben will, so kann man das innerhalb der Quantentheorie entweder durch einen Kollaps der Wellenfunktion in ein Ensemble, das aus den beiden Partialwellen als *möglichen* Endzuständen besteht und über das man dann zu mitteln hat, oder aber „effektiv“ (s.u.) durch die unitär entstehende Verschränkung mit dem den Schlitzdurchgang „messenden“ Objekt – das kann schon ein gestreutes Gasmolekül sein – tun. Wichtig ist aber, festzustellen, daß die gleiche Entscheidung bei der abschließenden Messung der Einzelereignisse auf dem Interferenzbildschirm erneut ansteht.

Die Verlegung des Heisenbergschnittes in das Bewußtsein des Beobachters wird oft Wigner zugeschrieben, aber der Beobachter hatte schon bei Heisenberg eine wichtige Rolle gespielt ("die Bahn des Teilchens entsteht erst dadurch, daß wir sie beobachten"). Auch von Neumann nahm den Beobachter in die quantenmechanische Beschreibung auf, wobei er durch einen stochastischen Kollaps in Produktzustände einen psycho-physischen Parallelismus zu ermöglichen suchte, für den der Beobachter einen *bestimmten* Zustand annehmen müßte. Wigners Vorschlag führte zu einem Disput, ob die Rolle des Beobachters subjektiv oder objektiv zu verstehen sei, das heißt, ob ein zwischengeschalteter weiterer Beobachteter ("Wigners Freund") bereits einen Kollaps auslöst oder erst (von seinem Standpunkt aus) der subjektive Endbeobachter, dem sein „Freund“ nur das Ergebnis berichtet. Um diese Fragen überhaupt stellen zu können, mußte von Neumann aber zunächst eine explizite Wechselwirkung zwischen System und Apparat im Rahmen der Schrödingergleichung formulieren, womit er in Kopenhagen nicht gerade auf Gegenliebe stieß.

Nachdem die Bedeutung der Umgebung (etwa bestehend aus unvermeidbaren Gasmolekülen) im Zusammenhang mit Dekohärenz offensichtlich geworden war, wurden auch diverse Dynamiken vorgeschlagen, nach denen die Umgebung selber einen realen Kollaps der Wellenfunktion auslöst (oder induziert: „indKoll“ in der Figur). Dies verlangt ebenfalls eine stochastische Modifikation der Schrödingergleichung, die aber bisher niemals bestätigt werden konnte. Der vollständige Verzicht auf einen Kollaps und auf jede andere Modifikation der Schrödingergleichung führt schließlich zwangsläufig auf die extreme Viele-Welten-Konsequenz von Everett.

Hier seien nun einige dieser Heisenbergschnitte explizit im Schrödingerbild formuliert. Der ideale (“non-demolition”) Meßprozeß hätte dabei die Form

$$\text{Born:} \quad \sum_n c_n \psi_n^S \quad \rightarrow: \quad \psi_k^S \quad \text{mit } p_k = |c_k|^2 \quad ,$$

wobei die Basis ψ_n^S phänomenologisch (durch Wahl einer “Observablen”) zu bestimmen ist. Ein Pfeil mit Doppelpunkt bezeichnet den probabilistischen Kollaps, ein nackter Pfeil im folgenden die Schrödingerdynamik. Bei von Neumann benötigt dieser Prozeß zwei Schritte,

$$\text{vN:} \quad (\sum_n c_n \psi_n^S) \psi_0^A \rightarrow \sum_n c_n \psi_n^S \psi_n^A \rightarrow: \psi_k^S \psi_k^A \quad ,$$

wobei nun die Meßwechselwirkung die Basis ψ_n^S festlegt. Sie kann also durch Konstruktion des Apparates verändert werden, wodurch das Konzept “komplementärer Meßapparate“ physikalisch verständlich wird. Die “Zeigerbasis” ψ_n^A wird hier aber nach wie vor *ad hoc* eingeführt. Es ist der erste Schritt dieser Beschreibung allein, der auf Schrödingers berühmte Katze führen würde, wenn man eine solche perverserweise als “Zeiger” benutzte. Ganz wesentlich ist aber, daß man in diesem Schrödingerbild Zeigerstellungen durch schmale Wellenpakete ψ_n^A und nicht durch fundamental vorauszusetzende klassische Variablen beschreibt. Bekanntlich hat auch Schrödinger das gleich nach Einführung seiner Wellenmechanik zur Beschreibung scheinbarer Teilchen versucht, was aber wegen der Dispersion des Wellenpakets nur für harmonische Oszillatoren erfolgreich war.

Bei Wigner haben wir noch einen weiteren Schritt einzufügen,

$$\begin{aligned} \text{Wigner:} \quad (\sum_n c_n \psi_n^S) \psi_0^A \psi_0^B &\rightarrow (\sum_n c_n \psi_n^S \psi_n^A) \psi_0^B \\ &\rightarrow \sum_n c_n \psi_n^S \psi_n^A \psi_n^B \rightarrow: \psi_k^S \psi_k^A \psi_k^B \end{aligned}$$

Die Zeigerstellung (oder Katze) bleibe also *bis zu ihrer Beobachtung* in einer Superposition. Die Basis für den Kollaps des Bewußtseinszustandes ψ_n^B wird aber weiterhin *ad hoc* bestimmt.

Betrachten wir nun die Messung gefolgt von einem Dekohärenzprozeß unter dem Einfluß der Umgebung, wobei der Beobachter zunächst keine Rolle spielt:

$$\begin{aligned} \text{Dekohärenz:} \quad (\sum_n c_n \psi_n^S) \psi_0^A \psi_0^U &\rightarrow \sum_n c_n \psi_n^S \psi_n^A \psi_0^U \\ &\rightarrow \sum_n c_n \psi_n^S \psi_n^A \psi_n^U \quad (\text{kein Kollaps}) \quad . \end{aligned}$$

Dieser quantenmechanische Vorgang beschreibt eine Dislokalisierung der Superposition – weiter nichts! Man kann auch unkontrollierbare Freiheitsgrade *im* Apparat schon als Teil der „Umgebung“ ansehen. Dabei gilt diese Form der Beschreibung unabhängig von allen Komplikationen – etwa von thermodynamisch irreversiblen Verstärkerprozessen im Apparat. Häufig werden solche Komplikationen – auch wenn sie im Prinzip realistisch sind – nur eingeführt um vermeintliche Näherungen zu rechtfertigen, die die in Wahrheit angenommenen Abweichungen von der Schrödingerdynamik verschleiern sollen. Die immer wiederkehrende Behauptung, Dekohärenz bringe einzelne Komponenten der nichtlokalen Superposition (oder alle bis auf eine) zum Verschwinden, ist nicht nur reines Wunschdenken, sondern ganz offensichtlich auch falsch. Man darf Dekohärenz auch nicht mit einem schon klassisch möglichen Mitteln über ein Ensemble aus unvollständig bestimmten Anfangszuständen ψ^S oder ψ^A verwechseln, denn sie betrifft jeden quantenmechanischen Einzelprozeß.

Alle Prozesse, die durch die Schrödingergleichung beschrieben werden, laufen kontinuierlich ab und erfordern eine ausgedehnte, wenn auch im wesentlichen begrenzte Zeit. Es ist aber entscheidend, daß die Wechselwirkung zwischen Apparat und Umgebung normalerweise unvermeidbar ist und somit die Zeigerbasis ψ_n^A festlegt. Das bedeutet, daß uns lokalen Wesen keine Superpositionen unterschiedlicher Zeiger- oder Katzenzustände zugänglich sind. Man sagt, diese gemäß der Wellenmechanik für zusammengesetzte Systeme dekohärieren Eigenschaften seinen “quasi-klassisch”. Bei makroskopischen Objekten oder etwa α -Teilchen in der Nebelkammer sorgt die permanente Dekohärenz auch dafür, eine Dispersion der quasi-klassischen Wellenpakete zu kompensieren, jedoch auf Kosten einer inkohärenten Streuung, die bei Objekten geringer Masse (mit nicht vernachlässigbarem Rückstoß) auch spürbar ist.

Nun sind in dem oben angegebenen Endzustand des Dekohärenzprozesses aber gar keine Zustände der Subsysteme definiert, die wir im klassischen Sinne beobachten könnten.

Was kann denn dann die globale Superposition überhaupt bedeuten? Da solche nichtlokalen Zustände uns nicht als Ganzes zugänglich sind, haben wir auch keine Begriffe für sie. Trotzdem haben sie gelegentlich auch eine *nachprüfbar* individuelle (also nicht nur statistische) Bedeutung, wie z.B. die des Gesamtspins zweier räumlich getrennter Photonen oder Atome.

In solchen Fällen verschränkter Zustände benutzt man häufig ein formales Hilfskonzept für die Subsysteme: die reduzierte Dichtematrix. Sie ist ein wichtiges Instrument in der Theorie der Dekohärenz, gibt allerdings auch Anlaß zu wesentlichen Mißverständnissen. Zum Beispiel ist die Dichtematrix für den Meßapparat A durch das “Ausspuren” aller übrigen Systeme, mit denen er verschränkt ist, definiert gemäß

$$\rho^A := \text{Spur}_{\text{Rest}} \{ | \psi^{\text{total}} \rangle \langle \psi^{\text{total}} | \} \approx \sum_n |c_n|^2 | \psi_n^A \rangle \langle \psi_n^A | \quad .$$

Die auf der rechten Seite ersichtliche Dekohärenz gilt, sobald die n-Zustände im “Rest” orthogonal zueinander sind. Die reduzierte Dichtematrix sieht genau so aus, *als ob* sie das gewünschte statistische Ensemble von Zeigerstellungen ψ_n^A darstellte. Damit *scheint* das Problem des Meßprozesses gelöst! Diese plausibel erscheinende Interpretation stellt aber vielmehr das verbreitetste Mißverständnis über die Dekohärenztheorie dar. Zwar ist es richtig, daß

1. die Orthogonalisierung der Umgebung sehr schnell erfolgt, so daß sie trotz ihres kontinuierlichen Charakters einen Quantensprung vortäuscht, und
2. die normale Wechselwirkung zwischen Apparat und Umgebung die Ortsdarstellung bevorzugt, so daß dies zu quasiklassischen Zeigerstellungen führt, *aber*
3. schon die Spur über das System S allein würde danach ausreichen, wenn nach der Messung nur der Apparat A betrachtet wird. Wozu braucht man dann noch die Umgebung? Der Grund für das Mißverständnis rührt daher, daß
4. eine Dichtematrix schlichtweg nicht zwischen Verschränkung und einem Ensemble unterscheiden kann, wie man an der globalen Wellenfunktion ersieht.

Die Dichtematrix wurde eingeführt als eine Größe, die alle am Subsystem zu messenden Eigenschaften *im Sinne der Wahrscheinlichkeitsinterpretation* richtig und vollständig wiedergeben kann. Sie würde zu deren Begründung selber aber auf ein zirkuläres Argument führen und unzutreffende Voraussagen für solche Messungen machen, die nicht nur das Subsystem betreffen (wie etwa bei Bellschen Experimenten). Andererseits bleibt aber festzustellen, daß

5. die Dichtematrix für alle *praktischen* Zwecke im genannten Sinne ein gerechtfertigtes Instrument ist,
6. die Wechselwirkung mit der Umgebung praktisch irreversibel ist (sich in dieser Beziehung also wie ein echter Kollapsprozess verhält), wodurch sie nachfolgende *state vector revival*, *delayed choice* oder Quantenradierer-Experimente unmöglich macht und
7. die dekohärierten n -Komponenten der obigen globalen Wellenfunktion fortan dynamisch völlig unabhängig voneinander (“autonom”) sind.
8. Man darf also *so tun, als ob* ein Kollaps in eine der autonomen Komponenten schon beim ersten irreversiblen Dekohärenzvorgang stattgefunden *hätte*.

Dekohärenz beschreibt also einen *scheinbaren* Kollaps in quasi-klassische Zustände. Die Frage ist: Genügt das, wenn wir nur beschreiben wollen, was wir beobachten? Dazu müssen wir zwar akzeptieren, daß wir nur eine der n -Komponenten wahrnehmen, aber ob und wann die übrigen durch einen Kollaps aus der Realität verschwinden, bleibt uns verborgen. Das Postulat irgendeines (späteren) Kollaps-Prozesses dient somit nur der Vermeidung der ansonsten unvermeidbaren aber ungeliebten Everettschen Konsequenz “Vieler Welten”, während sich die Dekohärenz aus der unitären Dynamik ergab, die diese gerade *verlangen*.

Als Beispiel sei noch einmal der radioaktive Zerfall eines initialen Atomkerns N_i in einen finalen Zustand N_f plus auslaufende Kugelwelle $\psi_{aus}^e(r,t)$ eines emittierten Teilchens e betrachtet. Bei Beschreibung mittels der Schrödingergleichung hat er die Form

$$a(t) \psi_i^N + \psi_{aus}^e(r,t) \psi_f^N \text{ mit } a(0) = 1 \text{ und } \psi_{aus}^e(r,0) = 0,$$

wobei e für γ , α usw. stehen kann. Die auslaufende Welle ist hier offenbar eine kohärente Superposition verschiedener Zerfallszeiten (Partialwellen), was etwa durch *state vector revival* nachprüfbar ist, solange keine Dekohärenz eingetreten ist. Diese Kohärenz führt auch zu Abweichungen vom exponentiellen Zerfall, die z.B. für emittierte Photonen im Hohlraum meßbar sind. Wenn aber die Wechselwirkung zwischen emittiertem Teilchen oder Restkern und deren Umgebung wesentlich wird (z.B. für α -Teilchen oder für Photonen in absorbierender Materie), müssen diese Partialwellen voneinander dekohärieren. (Die Umgebung “registriert” die Zerfallszeit.) Das führt nicht nur zu einem scheinbar stochastischen, sondern damit auch zu einem praktisch exakt exponentiellen Zerfall. In diesem Sinne lassen sich alle scheinbaren “Quantensprünge” durch einen schnellen aber stetigen Dekohärenzprozeß beschreiben, was mehrfach experimentell bestätigt worden ist.

Als Einladung zur weiteren Diskussion hatte ich im Anschluß an den Vortrag noch einige verbreitete Fehlinterpretationen der Quantentheorie aufgelistet, die auch im Lehrbetrieb immer noch eine Rolle spielen und häufig auch als “richtige” Antworten im Examen erwartet werden (soviel als Warnung!). Da ich mit einigen meiner Behauptungen aber auch häufig bei Kollegen auf Zweifel stoße, habe ich hier noch kurze Begründungen hinzugefügt:

Einige der m.E. verbreitetsten Irrtümer und Mißverständnisse über die Quantentheorie

1. *Die Schrödingergleichung beschreibt eine Wellenfunktion in Raum und Zeit.*

1a. *Jedes Elektron besitzt eine Wellenfunktion.*

1b. *Quantennichtlokalität bedeutet, daß die Wellenfunktion räumlich ausgedehnt ist.*

Richtig ist vielmehr: Die Wellenfunktion ist im Konfigurationsraum definiert. Nur für Massenpunkte (einzelne „Teilchen“) ist dieser ausnahmsweise zum Ortsraum isomorph. Diese Eigenschaft der Wellenfunktion definiert auch die spezifisch quantenmechanische „Nichtlokalität“, die aber durchaus im Einklang mit einer lokalen Dynamik (auch „Einstein-Lokalität“ oder „relativistische Kausalität“ genannt) steht.

2. *Mikroskopische Systeme existieren immer in Eigenzuständen ihres Hamiltonoperators (historisch als Bohrsche Bahnen interpretiert).*

Richtig ist vielmehr: Mikroskopische Systeme können in beliebigen Lösungen der zeitabhängigen Schrödingergleichung existieren. Ihr bevorzugtes Auftreten in Energieeigenzuständen ist eine spezifische Konsequenz von Dekohärenz für mikroskopische Systeme.

3. *Verschränkung ist eine gelegentlich auftretende, aber normalerweise instabile Quanteneigenschaft, die speziell präpariert werden muß.*

Richtig ist vielmehr: Verschränkung ist eine ganz allgemeine Eigenschaft quantenmechanischer Systeme, die im Prinzip immer als Subsysteme des ganzen Universums zu betrachten sind. Daher müssen umgekehrt *separierende* Zustände speziell präpariert werden. Sie sind normalerweise instabil – umso mehr, je dichter die Energiespektren der wechselwirkenden Systeme sind. Das läßt auch die Konstruktion von makroskopischen Quantencomputern ziemlich aussichtslos erscheinen.

4. *Verschränkung beschreibt eine statistische Korrelation zwischen Quantensystemen.*

Richtig ist vielmehr: Verschränkung ist eine Eigenschaft individueller Quantenzustände. Sie wird aber gewöhnlich durch die Dekohärenz bei Messungen in „effektive“ statistische Korrelationen umgewandelt, wobei die Interpretation dieses Vorgangs eines der strittigen Grundprobleme darstellt.

5. *(Anti-)Symmetrisierung der Wellenfunktion ist eine Form von Verschränkung.*

Richtig ist vielmehr: Die (Anti-)Symmetrisierung der Wellenfunktion beschreibt lediglich eine rein *formale* (unphysikalische) Verschränkung mit bedeutungslosen Teilchennummern, die man einfach eliminieren kann, indem man den Formalismus der zweiten Quantisierung (Besetzungszahldarstellung) benutzt. Physikalisch sinnvoll sind dagegen Einteilchenwellenfunktionen (also auch Ortseigenzustände), die daher normalerweise untereinander und mit den zugehörigen Spinvariablen verschränkt sind.

6. *Die Dirac-Gleichung ist eine relativistische Verallgemeinerung der Schrödingergleichung.*

Richtig ist vielmehr: Da die Schrödingergleichung im Konfigurationsraum definiert ist, kann die Dirac-Gleichung nicht ihre Verallgemeinerung darstellen. Relativistische Quantenmechanik verlangt vielmehr eine Quantenfeldtheorie, bei der die Feldamplituden an allen Orten (gekoppelte Oszillatoren) den Konfigurationsraum bilden. Spinorfelder (wie das Diracfeld) können jedoch nicht als *klassische* Felder auftreten, da sie z.B. unter Drehungen um 2π ihr Vorzeichen wechseln. Deshalb wurde das Elektronenfeld (zunächst in nichtrelativistischer Form) als „Eielektronenwellenfunktion“ entdeckt. Diese ist aber eigentlich eine Superposition verschiedener Feldmoden im einfach angeregten Oszillatorzustand (was man als „ein Teilchen“ interpretiert).

7. *Atome verändern ihren Zustand (nur oder gelegentlich) durch diskrete Quantensprünge.*

Richtig ist vielmehr: Atomzustände verändern sich stetig gemäß der zeitabhängigen Schrödingergleichung. Falls diese Dynamik auch Wechselwirkungen mit anderen Systemen (wie Meßapparaten) oder mit der Umgebung einschließt, kann die Veränderung wegen der Schnelligkeit des Dekohärenzprozesses lokal als spontaner Quantensprung erscheinen.

8. *Makroskopische Eigenschaften (insbesondere Meßergebnisse) müssen mit voraussetzenden klassischen Begriffen beschrieben werden.*

Richtig ist vielmehr: Quasi-klassische Begriffe lassen sich durch Dekohärenz begründen und rein quantenmechanisch verstehen.

9. *Der Heisenbergschnitt ist beliebig zwischen Objekt und Beobachter positionierbar.*

Richtig ist vielmehr: Das ist nur möglich, solange man klassische Konzepte (wie Partikeleigenschaften) nicht schon im mikroskopischen Bereich verwendet und dadurch relevante Superpositionen ausschließt. Laut Bohr ist der Schnitt jedoch an das Ende des Meßprozesses zu legen, wo er mittels Dekohärenz auch *effektiv* begründbar ist. Weitergehende Superpositionen sind deswegen zwar phänomenologisch nicht mehr erforderlich, ergeben sich aber notwendigerweise aus einer als allgemein angenommenen Unitarität der Dynamik.

10. *Heisenberg- und Schrödingerbild sind äquivalent.*

Richtig ist vielmehr: Eine Äquivalenz gilt lediglich für phänomenologische Erwartungswerte bei abgeschlossenen Systemen, deren Hamilton-Operator wohldefiniert ist. Auf keinen Fall betrifft sie die Dynamik von Messprozessen, wie sie erstmals konsequent durch von Neumann formuliert wurde, oder die Dynamik anderer offener Systeme mit unbestimmtem (weil verschränktem) Umgebungszustand. Der Begriff eines zeitabhängigen Hamilton-Operators ist ein in der Quantentheorie grundsätzlich nicht mehr gerechtfertigtes klassisches Relikt.

11. *Dekohärenz entsteht durch einen störenden Einfluß der Umgebung auf das System.*

Richtig ist vielmehr: Bei reiner Dekohärenz „stört“ (beeinflußt) das System die Umgebung und nicht umgekehrt. Der Dekohärenzeffekt am System selber ergibt sich nur als Konsequenz der daraus resultierenden Verschränkung.

12. *Dekohärenz erklärt den indeterministischen Kollaps der Wellenfunktion, wie man z.B. mit Hilfe der Dichtematrix sieht.*

Richtig ist vielmehr: Die Dichtematrix ist lediglich ein formales Werkzeug, das selber auf der statistischen Interpretation beruht und diese daher nicht erklären kann.

13. *Die von Einstein und Bell diskutierte Nichtlokalität erfordert eine „geisterhafte Fernwirkung“.*

Richtig ist vielmehr: Der Quantenzustand *ist* bereits nichtlokal und erfordert daher *keine* Fernwirkung mehr. Das Problem lautet eher umgekehrt: Wieso können wir diese nichtlokalen Zustände makroskopisch durch lokale (klassische) Eigenschaften beschreiben? Der kopenhagener Verzicht auf jede Quantenrealität erscheint mir u.a. als ein Versuch, diese Nichtlokalität zu „vertuschen“.

14. *Bei der „Quantenteleportation“ wird*

(a) ein Objekt von einem Ort zum anderen transportiert oder aber

(b) der Zustand eines entfernten Objekts (instantan?) verändert.

Richtig ist vielmehr: Wegen der Nichtlokalität des Quantenzustands *ist* die zu teleportierende Eigenschaft (oder eine kausale Vorstufe dazu) bereits nach dessen Präparation in einer seiner Komponenten am gewünschten Ort. Diese Komponente muß dann nur noch durch Dekohärenz zu einer eigenständigen „Welt“ werden (ähnlich wie eine Spinkomponente im Bellschen Experiment durch Messung des entfernten Spinors).

15. *Beim „Quantenradierer“ wird die Information über ein früheres Meßergebnis vernichtet („ausradiert“), wodurch die komplementäre Eigenschaft, z.B. in Form eines Interferenzbildes, wieder beobachtbar wird.*

Richtig ist vielmehr: Ein „Radieren“ (also eine Transformation der physikalisch vorliegenden Information in unkontrollierbare, also etwa thermische Freiheitsgrade) würde die Dekohärenz

nur verstärken. Der sogenannte Quantenradierer erfordert eine Refokussierung der Superposition auf das lokale System – also den physikalischen Vorgang einer Rekohärenz, der nur bei mikroskopischen Systemen realisierbar ist.

16. *Linien in Feynman-Diagrammen repräsentieren Partikel.*

Richtig ist vielmehr: Diese Linien symbolisieren ebene Wellen oder andere Feldmoden in bestimmten Integralen, welche S-Matrixelemente oder andere Übergangsamplituden im Sinne der unitären Schrödingergleichung darzustellen vermögen.

17. *Zähler-Klicks, Spuren in der Wilson-Kammer, usw. sind Indizien für das Auftreten von mikroskopischen Partikeln oder Ereignissen.*

Richtig ist vielmehr: Diese Phänomene lassen sich mit Hilfe von Dekohärenz als Konsequenzen einer globalen Wellenfunktion verstehen.

18. *Erzeugungs- und Vernichtungsoperatoren beschreiben diskrete Ereignisse.*

Richtig ist vielmehr: Diese Operatoren treten dynamisch im Hamiltonoperator auf, der eine kontinuierliche, unitäre Entwicklung zu beschreiben gestattet. Diese führt zu Superpositionen unterschiedlicher Teilchenzahlen („virtuelle“ Teilchenerzeugung). Erst deren irreversible Dekohärenz vermag das Phänomen „realer“ Teilchenerzeugung in Form scheinbar diskreter Ereignisse zu erklären.

19. *Im Vakuum oder in anderen Grundzuständen wechselwirkender Systeme treten wegen der Unschärferelation ständig Fluktuationen, z.B. in Form virtueller Teilchen, auf.*

Richtig ist vielmehr, daß Energieeigenzustände absolut statisch sind. Das Bild von zeitabhängigen Fluktuationen ist ein irreführender klassischer Hilfsbegriff, der nur dazu dient, die Nichtanwendbarkeit klassischer Begriffe, die Existenz verschränkter Zustände oder die Unbestimmtheit der Ergebnisse *potentieller* Messungen klassisch aber keineswegs konsistent zu umschreiben.

20. *Quantentheorie und (allgemeine?) Relativitätstheorie sind inkompatibel.*

Richtig ist vielmehr: Die Allgemeine Relativitätstheorie wurde (in ihrer erst später entwickelten Hamiltonschen Formulierung) im gleichen Sinne wie etwa die Mechanik oder die Elektrodynamik quantisiert, was auf die Wheeler-DeWitt-Gleichung führt (auch Einstein-Schrödinger-Gleichung genannt). Dabei treten allerdings neuartige (wenngleich lösbare) Interpretationsprobleme auf. Daß die Quantengravitation bei hohen Energien eine Modifikation der Theorie (etwa im Zusammenhang mit einer Vereinheitlichung aller Kräfte) zu erfordern scheint, ist kaum überraschend und kein Argument gegen ihre kanonische Niederenergienäherung, verstanden als eine „effektive Theorie“ wie die QED.

S.a.: [Wie löst Dekohärenz das Quantenmeßproblem?](http://www.zeh-hd.de/Messprozess.pdf) (www.zeh-hd.de/Messprozess.pdf)