

# Dekohärenz und andere Quantenmißverständnisse

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

H. D. Zeh – [www.zeh-hd.de](http://www.zeh-hd.de)

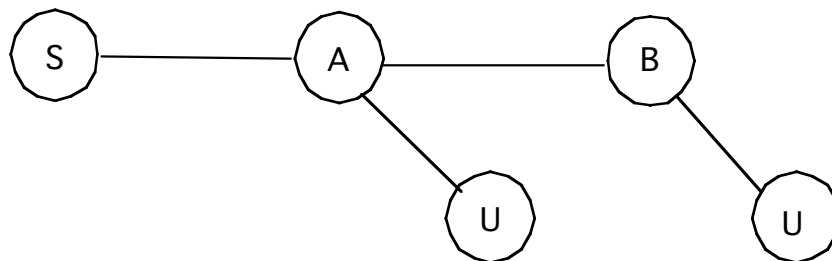
Ich möchte hier zunächst klarstellen, daß das Dekohärenzprogramm begrifflich vom Schrödingerbild ausgeht. Denn ihm liegt der Versuch zugrunde, der Schrödingergleichung – und damit dem Superpositionsprinzip – eine möglichst weitgehende (vielleicht sogar universelle) Gültigkeit zuzubilligen. Damit steht es in Gegensatz zur etablierten Kopenhagener Deutung, welche voraussetzende klassische Begriffe zur Beschreibung von Meßapparaten und Meßergebnissen für unumgänglich hält.

Bei dieser Beschreibung führen Wechselwirkungen zwischen zwei physikalischen Systemen zwangsläufig zu deren Verschränkung. Es sei daher noch 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 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 der Elektronen und Kerne in Atomen und Molekülen ist schon früh bestätigt worden. Aber insbesondere 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 direkt ablesen können, daß der Zeiger ständig Photonen reflektiert, deren Zustand nach der Reflektion vom Zeigerstand abhängen muß. Das ist also wieder eine Wechselwirkung vom von Neumannschen Typ. Es ist aber für das Dekohärenzphänomen *nicht nötig*, daß diese Abhängigkeit eine Information darstellt, denn der gleiche Effekt ist etwa auch durch thermische Photonen zu erreichen, die sich völlig ungeordnet verhalten. Es ist nur nötig, daß die finalen Photonenzustände für zwei verschiedene Zeigerstellungen orthogonal zueinander sind. Ist das nur annähernd der Fall, kann Dekohärenz noch immer praktisch vollständig durch eine größere Zahl von Photonenstreuungen erreicht werden.

### Vollständiger Quantenmeßprozeß



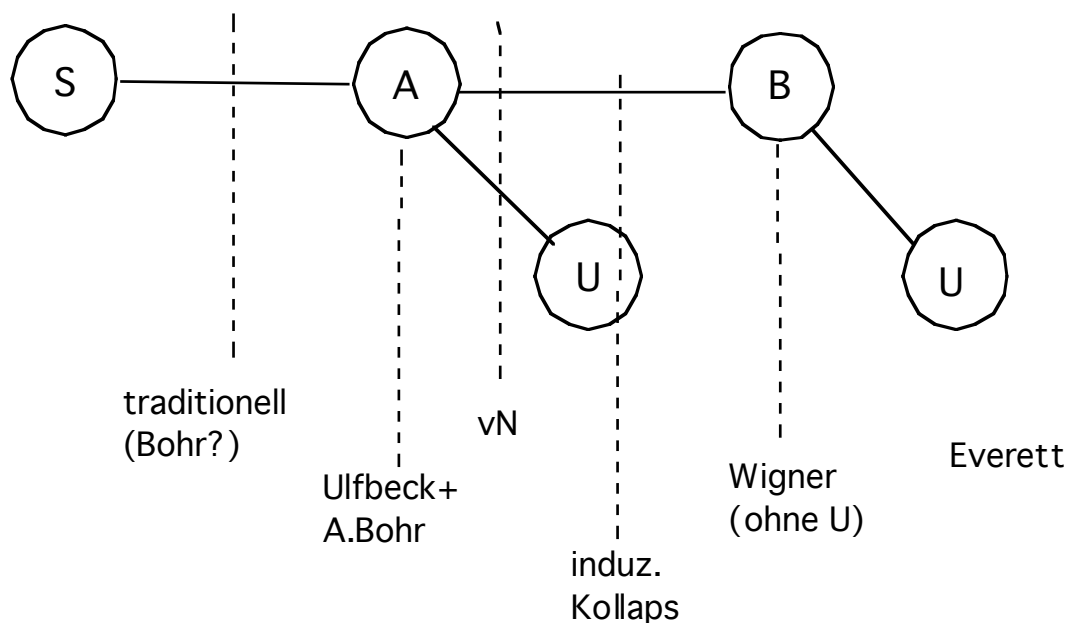
Ein vollständiges System für eine Beobachtung unter Vernachlässigung zwischen-geschalteter Informationsmedien würde etwa wie in obiger Figur aussehen, wobei B der Beobachter und U die jeweilige Umgebung ist. Die Umgebung ist dabei für ein makroskopisches System A auch unabhängig von einem Meßprozeß wesentlich, um dessen klassische Eigenschaften in diesem quantenmechanischen Schrödingerbild zu verstehen. Diese einheitliche Behandlung aller Systeme macht noch einmal den begrifflichen Gegensatz dieses Programms zur Kopenhagener Interpretation deutlich.\*

---

\* 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

Gewöhnlich stellt man hier die Frage, welche der Wechselwirkungen in der Figur man mit der Schrödingergleichung zu beschreiben hat oder wo man die Wahrscheinlichkeitsinterpretation in irgendeiner Form anzuwenden hat – nämlich entweder als einen Kollaps der Wellenfunktion oder durch einen begrifflichen Sprung von quantenmechanischen zu fundamental klassischen Begriffen. Diese Grenze wird auch als Heisenbergscher Schnitt bezeichnet, dessen Position in der “untrennbaren Kette” oft als frei wählbar angesehen wird. Allerdings darf er nicht so weit an ein mikroskopisches System S herangelegt werden, daß dessen Verschränkung mit einem weiteren System noch nachzuweisen ist, wie beim radioaktiven Zerfall mit innerer Konversion, “delayed choice” oder den Bellschen Experimenten (eben solange noch keine irreversible Dekohärenz aufgetreten ist).

## Heisenbergsche Schnitte



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 formuliert) wendet diese

---

nicht gemacht.“ Eine solche “handwerkliche” Auffassung mag zwar manchen praktizierenden Physikern entgegenkommen, sie ist aber aus weltanschaulichen Gründen bei Antireduktionisten sehr beliebt. Es ist viel zu wenig bekannt, daß solche Motive zur “Widerlegung von Materialismus und Determinismus” auch bei einigen Vätern der Quantentheorie eine wichtige Rolle gespielt haben. Nicht umsonst berufen sich bis heute esoterische Kreise gern auf die Quantentheorie. Mich erinnert etwa die Behauptung, die Wellenfunktion beschreibe kein reales Objekt, wohl aber “Information”, an Argumente aus der Homöopathie. Der wesentliche Unterschied bei diesem Vergleich ist allerdings, daß die “Wirksamkeit” der Wellenfunktion unstrittig ist – nach normalen Maßstäben ein klares Indiz für ihre Realität. Diese Situation sollte aber andererseits kein Grund sein, einfach zusätzliche, prinzipiell unbeobachtbare Variablen einzuführen, die nur den Zweck haben, mittels einer obskuren Dynamik einen künstlichen Determinismus von Meßergebnissen zu konstruieren – wie in der Bohmschen Theorie.

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 nur 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.

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 dadurch, daß wir sie beobachten”). Auch von Neumann nahm den Beobachter in die quantenmechanische Beschreibung auf, wobei er mittels Kollaps einen psycho-physischen Parallelismus zu ermöglichen suchte. Wigners Betrachtungen führten 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. Vor allem aber formulierte von Neumann die Wechselwirkung zwischen System und Apparat explizit mittels der unitären Dynamik der Schrödingergleichung, aber mit nachfolgendem Kollaps als explizit stochastischer Teildynamik, womit er in Kopenhagen nicht gerade auf Gegenliebe stieß.

Nachdem die Bedeutung der Umgebung im Zusammenhang mit Dekohärenz offensichtlich geworden war, wurden auch diverse Modelle vorgeschlagen, nach denen es die Umgebung ist, die einen Kollaps der Wellenfunktion dynamisch induziert. Dies verlangt ebenfalls eine objektiv stochastische Modifikation der Schrödingergleichung, die aber bisher niemals bestätigt werden konnte. Der vollständige Verzicht auf einen Kollaps oder eine andere Modifikation des Schrödingerbildes 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

traditionell:  $\sum_n c_n \psi_n^S \rightarrow: \psi_n^S$  mit  $p_n = |c_n|^2$  ,

wobei die Basis  $\psi_n^S$  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,

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

wobei nun die Meßwechselwirkung die Basis  $\psi_n^S$  festlegt. Sie kann also durch Konstruktion des Apparates verändert werden, wodurch “komplementäre” Meßapparate verständlich werden. Die “Zeigerbasis” für den Kollaps wird hier aber nach wie vor *ad hoc* gewählt. Es ist der erste Schritt dieser Beschreibung allein, der auf Schrödingers berühmte Katze führen würde, wenn man eine solche perverserweise als “Zeiger” benutzt. Ganz wesentlich ist aber, daß man in diesem Schrödingerbild Zeigerstellungen durch schmale Wellenpakete  $\psi_n^A$  und nicht durch fundamental vorauszusetzende klassische Variablen darstellt. Bekanntlich hat Schrödinger das gleich nach Einführung seiner Wellenmechanik zur Erklärung 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,

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

Die Zeigerstellung (oder Katze) bleibe also bis zu ihrer Beobachtung in einer Superposition. Die Basis für den Kollaps des Bewußtseinszustandes 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.

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

Dieser quantenmechanische Vorgang beschreibt eine Dislokalisierung der Superposition – weiter nichts! Dabei gilt diese Form der Beschreibung unabhängig von allen Komplikationen – etwa thermodynamisch irreversiblen Verstärkerprozessen im Apparat. Man kann auch unkontrollierbare Freiheitsgrade im Apparat als Teil der „Umgebung“ betrachten. Häufig werden solche Details – auch wenn sie im Prinzip realistisch sind – nur eingeführt um vermeintliche Näherungen zu rechtfertigen, die in Wahrheit entscheidende Abweichungen

von der Schrödingerdynamik verschleiern. 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.

Alle Prozesse, die durch die Schrödingergleichung beschrieben werden, laufen kontinuierlich ab und erfordern eine endliche, bei genauer Kenntnis der Wechselwirkungen berechenbare Zeit. Es ist aber entscheidend, daß die Wechselwirkung zwischen Apparat und Umgebung normalerweise unvermeidbar ist und somit die Zeigerbasis  $\psi_n^A$  festlegt. Das bedeutet, daß uns lokalen Wesen keine Superpositionen von Zeigerstellungen oder Katzen zugänglich sind. Man sagt, diese automatisch dekohärierten Eigenschaften seien “quasi-klassisch”. Bei makroskopischen Objekten oder etwa  $\alpha$ -Teilchen in der Nebelkammer sorgt die permanente Dekohärenz auch dafür, eine Dispersion der quasi-klassischen Wellenpakete zu kompensieren, bei Objekten geringer Masse jedoch auf Kosten einer spürbaren inkohärenten Streuung.

Nun sind in dem oben angegebenen Endzustand des Dekohärenzprozesses gar keine Zustände der Subsysteme definiert, die wir 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 wohldefinierte 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 aber 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

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

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  $\psi_n^A$  darstellte. Damit *scheint* das Problem des Meßprozesses gelöst! Diese plausibel erscheinende Interpretation stellt aber vielmehr das verbreitetste Mißverständnis der 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 Ortdarstellung 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 ursprünglichen 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 auf ein zirkuläres Argument führen und unzutreffende Voraussagen für 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 (wie ein echter Kollapsprozess), wodurch sie nachfolgende state vector revival oder delayed choice Experimente unmöglich macht und
7. die dekohärierten n-Komponenten der globalen Wellenfunktion fortan dynamisch völlig unabhängig voneinander (“autonom”) sind.
8. Man darf also so tun, *als ob* ein Kollaps in eine der autonomen Komponenten – was immer er bedeutet – 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, wie uns die Natur erscheint? 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) Heisenberg-Schnittes (nicht aber bereits die Dekohärenz) dient somit nur der Vermeidung der unbeliebten Everettschen Konsequenz “Vieler Welten”.

Als Beispiel sei noch einmal der radiaktive Zerfall eines initialen Atomkerns  $N_i$  in einen finalen Zustand  $N_f$  plus auslaufende Welle eines emittierten Teilchens  $e$  betrachtet. Bei Beschreibung mittels der Schrödingergleichung hat er die Form

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

wobei  $e$  für  $\gamma$ ,  $\alpha$  usw. stehen kann. Die auslaufende Welle ist hier offenbar eine 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 und der Umgebung wesentlich wird (z.B. für  $\alpha$ -Teilchen oder Photonen in absorbierender Materie), müssen diese Partialwellen voneinander dekohärieren. (Die Umgebung “registriert” die Zerfallszeit.) Das führt nicht nur zu einem scheinbar stochastischen, sondern auch zu einem exakt exponentiellen Zerfall.

In diesem Sinne lassen sich alle scheinbaren “Quantensprünge” durch einen schnellen aber stetigen Dekohärenzprozeß beschreiben, was mehrfach experimentell bestätigt worden ist. Zur weiteren Diskussion führe ich nachfolgend noch eine Liste schon erwähnter oder weiterer Fehlinterpretationen der Quantentheorie auf, die im Lehrbetrieb immer noch eine große Rolle zu spielen scheinen. Weitere Argumente mit Literaturhinweisen finden sich auf meiner Internetseite [www.zeh-hd.de](http://www.zeh-hd.de) – s. insbesondere “Quantum Discreteness is an Illusion” (/NoDiscreteness.pdf) oder den Essay “Wozu braucht man Viele Welten in der Quantentheorie?” (/VieleWelten.pdf).

### **Einige der m.E. verbreitesten Irrtümer und Mißverständnisse über die Quantentheorie**

1. Die Schrödingergleichung beschreibt eine Wellenfunktion in Raum und Zeit.
  - 1a. Jedes Elektron besitzt eine Wellenfunktion.
  - 1b. Quantennichtlokalität heißt, daß Partikel im Raum verteilt ist.
2. Verschränkung ist eine gelegentlich auftretende, aber normalerweise instabile Quanteneigenschaft, die spezifisch präpariert werden muß.
3. Verschränkung beschreibt nur eine statistische Korrelation zwischen Quantensystemen.
4. (Anti-)Symmetrisierung der Wellenfunktion ist eine Form von Verschränkung.
5. Die Dirac-Gleichung ist eine relativistische Verallgemeinerung der Schrödinger-Glg.
6. Atome verändern ihren Zustand (nur oder u.a.) durch diskrete Quantensprünge.
7. Makroskopische Eigenschaften (z.B. Meßergebnisse) müssen mit vorauszusetzenden klassischen Begriffen beschrieben werden.



8. Der Heisenbergschnitt ist beliebig zwischen Objekt und Beobachter positionierbar.
9. Heisenberg- und Schrödingerbild sind äquivalent.
10. Dekohärenz entsteht durch einen störenden Einfluß der Umgebung auf das System.
11. Dekohärenz erklärt den indeterministischen Kollaps der Wellenfunktion.  
(wie man z.B. mit Hilfe der Dichtematrix sieht).
12. Die von Bell diskutierte Nichtlokalität erfordert eine “geisterhafte Fernwirkung”.
13. Bei der “Quantenteleportation” wird
  - (a) ein Objekt von einem Ort zum anderen transportiert, oder aber
  - (b) der Zustand eines entfernten Objekts (instantan?) verändert.
14. Beim „Quantenradierer“ wird (nur) die Information über ein früheres Meßergebnis vernichtet (“ausradiert”), um damit die Interferenz (Superposition) zurückzugewinnen.
15. Linien in Feynman-Diagrammen repräsentieren Partikel.
16. Zähler-Klicks, Spuren in der Wilson-Kammer, usw. sind Indizien für das Auftreten von mikroskopischen Partikeln oder Ereignissen.
17. Quantentheorie und (allgemeine?) Relativitätstheorie sind inkompatibel.