Zur Interpretation der QM

S. Bauberger, Hochschule für Philosophie,
“Work in progress”

Warum Interpretation?

a) Pionierzeit der QM: Unklarheiten in der Anwendung.
Heute: nur noch in der Q-Kosmologie unklar

b) Für das “Verständnis”

Übersicht

1. Problem: Realismus
2. EPR
3. Bellsche Ungleichung
4. Kochen-Specker-Theorem
5. Bub: Uniqueness Theorem
6. Das Meß-“problem”
7. Dekohärenz: Wie “entsteht” klassisches Verhalten?
8. Konsistente Geschichten
9. ‘T Hooft: Verborgene Parameter
10. Vier Lösungen

Die drei wichtigsten Bücher

Jeffrey Bub: *Interpreting the Quantum World.* Cambridge 1997, 1999.

H. Dieter Zeh: *The Physical Basis of the Direction of Time.* Berlin 1989, 1992, 1999.

Roland Omnès: *The Interpretation of Quantum Mechanics.* Princeton 1994.

1. Problem: Realismus

Grundfrage: Ist die QM verträglich mit einer “realistischen” Auffassung von naturwissenschaftlicher Erkenntnis?

Zwei Ebenen:

a) Kann der Formalismus der QM realistisch verstanden werden?

→ Nein! (vgl. unten: Kochen-Specker-Theorem)

b) Gibt es eine, noch unbekannte, fundamentale Theorie, die realistisch verstanden werden kann?

→ Einschränkungen an eine solche Theorie.

Kriterium für Realismus:

“Wenn wir an einem System, ohne es irgendwie zu stören, den Wert einer physikalischen Größe mit Sicherheit, (d.h. mit Wahrscheinlichkeit Eins) voraussagen können, dann gibt es ein Element der physikalischen Wirklichkeit, das dieser physikalischen Größe entspricht.” (EPR-Artikel)

Definition?: “... ***es (gibt) ein Element der physikalischen Wirklichkeit***, das dieser physikalischen Größe entspricht.”

2. EPR

(Einstein, Podolsky, Rosen, 1935)

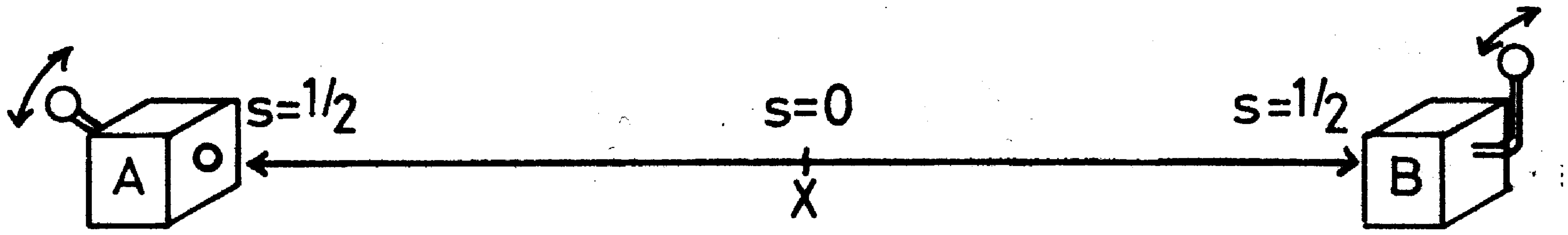


Abb. 6: Stern-Gerlach-Apparate (A und B) zur Messung der Spin-Komponente der Zerfallsprodukte.

3. Bellsche Ungleichung

(Clauser-Horner-Version)

Ja-Nein-Messungen am Objekt A: *a,a’*
Am Objekt B: *b,b’*

a) Realismus: Wahrscheinl. $p(a)$, $p(a')$, $p(b)$, $p(b')$

Implizit vorausgesetzt: Diese Wahrscheinlichkeiten liegen “objektiv” vor. Ein Einfluß des Meßvorgangs ist dabei aber nicht ausgeschlossen.

“Verborgene” Parameter: λ mit Dichte $\varrho(\lambda)$, d.h.

$$p(a) = \int d\lambda\ \varrho(\lambda)\ p_\lambda(a)$$

b) Lokalität & Separabilität: $p_\lambda(a\&b) = p_\lambda(a)p_\lambda(b)$

$$K := \alpha[\alpha'(1-\beta)+(1-\alpha')(1-\beta')]+(1-\alpha)[\alpha'\beta'+(1-\alpha')\beta]$$
$$= \alpha+\beta+\alpha'\beta'-\alpha\beta-\alpha'\beta-\alpha\beta'$$

Mit $0\leq\alpha,\beta,\alpha',\beta'\leq 1$ folgt $0\leq K\leq 1$

Mit

$$\alpha=p_\lambda(a),\ \alpha'=p_\lambda(a'),\ \beta=p_\lambda(b),\ \beta'=p_\lambda(b')$$

ergibt sich aus Lokalität und Separabilität:

$$\int d\lambda\varrho(\lambda)K(\lambda) =$$
$$= p(a)+p(b)+p(a'\&b')-p(a\&b)-p(a'\&b)-p(a\&b')$$

Wegen $\int d\lambda\varrho(\lambda)=1$, $\varrho(\lambda)\geq 0$ gilt $0\leq\int d\lambda\varrho(\lambda)K(\lambda)\leq 1$

Ergebnis:

$$\boxed{0\leq p(a)+p(b)+p(a'\&b')-p(a\&b)-p(a'\&b)-p(a\&b')\leq 1}$$

Verletzung der Bellschen Ungleichung

$$\boxed{0 \leq p(a)+p(b)+p(a'\&b')-p(a\&b)-p(a'\&b)-p(a\&b') \leq 1}$$

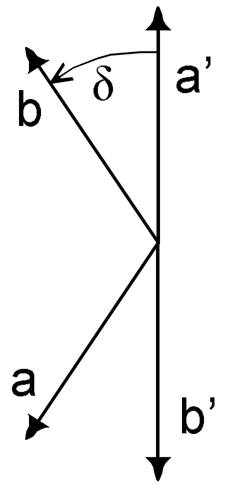
Verschränkte Teilchen mit Spin ½, Gesamtspin 0:

$$\Psi = (|s_{z1}+\rangle|s_{z2}-\rangle + |s_{z1}-\rangle|s_{z2}+\rangle) /\sqrt{2}$$

Wahrscheinlichkeit, am Teilchen A/B Spin +½ zu messen, bei Drehung des Detektors um Winkel α gegenüber der z-Achse: $p_{A/B}(\alpha)=1/2$

Kombinierte Wahrscheinlichkeit: Drehung des Detektors A um α, des Detektors B um β

$$p(\alpha,\beta)=1/2 \sin^2((\alpha-\beta)/2)$$



$$p_A(\pi-\delta)+p_B(\delta)+p(0,\pi)-p(\pi-\delta,\delta)-p(0,\delta)-p(\pi-\delta,\pi)$$
$$= [1 + 1 + 1 - \sin^2(\pi/2-\delta) - 2 \sin^2(\delta/2)]/2$$
$$= 1 + \cos(\delta)(1 - \cos(\delta))/2 >1, \text{ für } -\pi/2\leq\delta\leq\pi/2$$

EMPIRISCH BESTÄTIGT!

Verletzung der Bellschen Ungleichung: Ergebnis

QM: Messung → “Reduktion des Zustandsvektors”

⇒ Messung am Objekt A “beeinflußt” den Zustandsvektor des (entfernten) Objekts B

Wie ist dieser “Einfluß” zu verstehen?

Realistische Deutung:

Es gibt “objektive Eigenschaften” des physikalischen Systems, die das Ergebnis einer Messung (evtl. probabilistisch, evtl. mit einem Einfluß des Meßapparates) festlegen.

Dann folgt aus der Bell-Verletzung:

Der Einfluß der Messung im EPR-Fall bewirkt eine physikalische Wechselwirkung, *die instantan und entfernungsunabhängig ist!*

Unausweichlich in jeder realistischen Deutung, unabhängig vom jeweils postulierten Mechanismus.

Epistemische Deutung:

Die jeweiligen *“Eigenschaften”* der physikalischen Objekte liegen vor der Messung gar nicht vor, sondern werden *durch die Messung erst konstituiert*.

Epistemische Deutung:

Die jeweiligen *“Eigenschaften”* der physikalischen Objekte liegen vor der Messung gar nicht vor, sondern werden *durch die Messung erst konstituiert*.

Der Begriff der Eigenschaft ist nur sinnvoll im Zusammenhang einer jeweiligen Messung. Der “Zustandsvektor” beschreibt also keine Eigenschaften einer physikalischen Wirklichkeit.

Aus dem Zustandsvektor lassen sich die Wahrscheinlichkeiten für Meßergebnisse errechnen, die jeweiligen *Parameter haben aber diese Werte nicht getrennt von der Messung*. (Bohr: System und Messung bilden ein untrennbares *Phänomen*.)

Zustandsvektor: Nicht eine Repräsentation einer objektiven Wirklichkeit. Sondern: Repräsentation des maximal möglichen empirischen Wissens über ein System, der Informationen über das System.

Natur-“gesetze”: Keine Abbildung der Natur, sondern Algorithmen, um, aufgrund von Beobachtungen in der Vergangenheit, Vorhersagen für die Zukunft zu machen. Bzw.: Algorithmen, die Meßergebnisse verknüpfen.

Reduktion des Zustandsvektors: **Sprunghaft**, weil neue Information über das System gewonnen wird, repräsentiert also eine **sprunghafte Veränderung nicht der Natur, sondern des Wissens**.

Häufige Auffassung: notwendige Störung des Systems durch die Messung, weil dieses mikroskopisch ist.
Keine Lösung: Bell-Verletzung → Die Wirkung dieser Störung wird instantan und entfernungsunabhängig übertragen.

Interpretation von EPR: Messung am Objekt A → Neue Informationen über das System → Zerlegung in zwei Objekte, neuer Zustandsvektor.

4. Kochen-Specker-Theorem

(Kochen, Specker 1967)

Aufgabe: Verschiedenen möglichen Propositionen im Hilbertraum Wahrheitswerte zuordnen, so daß diese logisch konsistent sind.

Vorausgesetzt wird: Wenn mehrere Propositionen im Hilbertraum zueinander orthogonal sind, und die entsprechenden Zustandsvektoren diesen aufspannen, ist genau eine davon wahr.

Z.B.: Im H_3: Spin-1-Teilchen, Messung der z-Komponente des Spins: P_1: s_Z=+1, dem entspricht ein Zustandsvektor, entspr. P_2: s_Z=0, P_3: s_Z=-1. Genau eine dieser Propositionen ist wahr.

Ergebnis: Diese Zuordnung ist nur in zweidimensionalen Hilberträumen allgemein möglich.

Interpretation: Es ist logisch inkonsistent, allen meßbaren Eigenschaften eines quantenmechanischen Systems unabhängig von der Messung Wahrheitswerte zuzusprechen. Die Logik gilt nur für tatsächlich gemessene Werte, nicht für angenommene Eigenschaften vor der Messung.

Weiterführende Frage (für Bub): Was ist der maximale Set von Eigenschaften, den man einem quantenmechanischen System *realistisch* zusprechen kann? → Uniqueness theorem.

Table 3.5. 33 *uncolourable rays in* $\mathscr{H}_3$

(1)	0	0	1	(18)	1	0	2
(2)	0	1	0	(19)	1	0	−2
(3)	1	0	0	(20)	2	0	1
(4)	0	1	1	(21)	2	0	−1
(5)	0	1	−1	(22)	1	1	2
(6)	1	0	1	(23)	1	1	−2
(7)	1	0	−1	(24)	1	−1	2
(8)	1	1	0	(25)	1	−1	−2
(9)	1	−1	0	(26)	1	2	1
(10)	1	1	1	(27)	1	2	−1
(11)	1	−1	1	(28)	1	−2	1
(12)	1	1	−1	(29)	1	−2	−1
(13)	1	−1	−1	(30)	2	1	1
(14)	0	1	2	(31)	2	1	−1
(15)	0	1	−2	(32)	2	−1	1
(16)	0	2	1	(33)	2	−1	−1
(17)	0	2	−1				

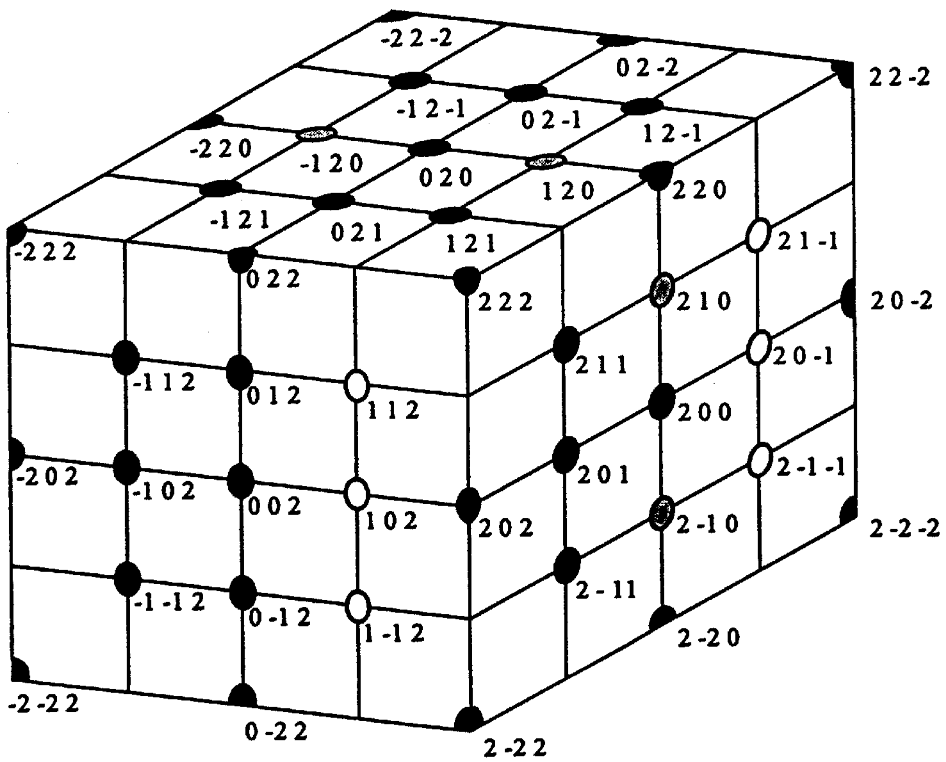


Figure 3.2. Cube representing the 31 rays of the Conway and Kochen proof and the 33 rays derived from Schütte's tautology. From a diagram in Peres (1993, p. 114).

5. Bub: Uniqueness theorem

Was ist der maximale Set von Eigenschaften, den man einem quantenmechanischen System *in einem realistischen Sinn* zusprechen kann? (Formal: Eigenschaften, deren Wahrheitswerte auf einen Boolschen Verband abgebildet werden können.) → Uniqueness theorem.

Zustand: $|e\rangle$

Eine **Observable R**
kann frei gewählt werden, so daß die Werte dieser Observablen als objektiv gegeben, in einem realistischen Sinn, angesehen werden können.

Dann ist maximale Set von realistischen Eigenschaften eindeutig vorgegeben:

Projektionen von $|e\rangle$ auf die Eigenräume von R:

$|e_{R1}\rangle$, $|e_{R2}\rangle$, **...**, $|e_{Rn}\rangle$

Diese Projektionen, zusammen mit allen Vektoren im Orthogonalraum $(|e_{R1}\rangle \vee |e_{R2}\rangle \vee \ldots \vee |e_{Rn}\rangle)^{\perp}$, generieren einen Boolschen Verband $\mathscr{L}(|e\rangle)$.

Physikalisch: $\mathscr{L}(|e\rangle)$ repräsentiert die Projektionen aller Parameter, die, falls der Zustand $|e\rangle$ vorliegt, strikt korreliert sind mit den Werten von R.

Bub: Uniqueness theorem: Beispiele

Dirac-von Neumann-Interpretation:

$$R = \mathbb{I}$$

Die Propositionen in $\mathcal{L}(|e_{Ri}\rangle)$ werden repräsentiert durch die Unterräume, die entweder $|e\rangle$ enthalten, oder dazu orthogonal sind.

Also: In einem realistischen Sinn ist (bei der Wahl $R=\mathbb{I}$) nur die Frage erlaubt: Liegt $|e\rangle$ vor (Ja!), oder ein Zustand, der dazu orthogonal ist (Nein!)?

Bohrs Interpretation:

R wird durch die Versuchsanordnung vorgegeben (Messapparat und quantenmechanisches Objekt bilden zusammen ein Phänomen.)

Bohms Interpretation ("ontologisch statt episte-misch"):

R = Position im Ortsraum

6. Das Meß-“problem”

Die klassische Formulierung (Kopenhagener Deutung): Meßapparat in klassischen Begriffen beschreiben. Aber: Verschieblichkeit des Schnitts (Konsistenz).

Interpretation mit dem Begriff “Realismus”:

Klassische Begriffe für den Meßapparat, weil die Meßergebnisse realistisch verstanden werden müssen. (Aussagen über Meßergebnisse gehorchen einer klassischen Logik.)

Also ein Dualismus:

Messung – klassische Begriffe – Realismus

Zustandsvektor – QM-Begriffe – Nicht-Realismus

Dualismus auch in der Definition epistemischer Naturgesetze: Algorithmen, um, aufgrund von *Beobachtungen in der Vergangenheit* (Fakten, realistisch verstanden), *Vorhersagen für die Zukunft* (nicht-realistisch) zu machen.

→ Konsistenz?

Messtheorie klassisch

System, Ausgangszustand: $|\alpha\rangle = \sum c_i |a_i\rangle$

Meßapparat, Ausgangszustand: $|r_0\rangle$

Messung (erster Art im Sinn von Pauli):

$$|\alpha\rangle|r_0\rangle \rightarrow \sum c_i'|a_i\rangle|r_i\rangle, \quad \text{mit} \quad |c_i'| = |c_i|$$

Korrelation zwischen den Zeigerstellungen $|r_i\rangle$ und den Eigenzuständen des Systems $|a_i\rangle$

→ Verschränktes System zwischen System und Meßapparat!

Z.B.: Spin ½ - System:

$$(|s_z+\rangle + |s_z-\rangle)|r_0\rangle /\sqrt{2} \rightarrow |\Psi\rangle=(|s_z+\rangle|r+\rangle + |s_z-\rangle|r-\rangle) /\sqrt{2}$$

Vgl. EPR → Realismusproblem

7. Dekohärenz: Fragestellung

$|\Psi\rangle = (|s_z+\rangle|r_z+\rangle + |s_z-\rangle|r_z-\rangle)/\sqrt{2}$

Dichtematrix: $P_{|\Psi\rangle} = |\Psi\rangle\langle\Psi| = W$ + interference terms

$W = ½\, |s_z+\rangle\langle s_z+| \otimes |r_z+\rangle\langle r_z+| + ½\, |s_z-\rangle\langle s_z-| \otimes |r_z-\rangle\langle r_z-|$

$\quad = ½\, P_{z+} \otimes P_{rz+} + ½\, P_{z-} \otimes P_{rz-}$

W repräsentiert alle statistischen Informationen, außer denen, die korrelierten Messungen an beiden Systemen entsprechen.

Auch klassische Korrelationen sind in W repräsentiert, aber keine Bell-Verletzung.

Die Koeffizienten ½ in W können als klassische Wahrscheinlichkeiten aufgefaßt werden.

Also: Übergang zu dieser reduzierten Dichtematrix entspricht dem Übergang zu klassischen Wahrscheinlichkeiten → “realistische” Meßwerte.

Probleme:

a) Die Zerlegung ist nicht eindeutig:

$(|s_z+\rangle|r_z+\rangle + |s_z-\rangle|r_z-\rangle)/\sqrt{2} = (|s_x+\rangle|r_x+\rangle + |s_x-\rangle|r_x-\rangle)/\sqrt{2}$

Also: Es ist gar nicht eindeutig, was da gemessen wurde!

b) Warum (Wann) können die Korrelationen vernachlässigt werden?

Wechselwirkung des Meßinstruments mit der Umgebung:

$$(|s_z+\rangle|r_z+\rangle + |s_z-\rangle|r_z-\rangle)/\sqrt{2}$$

$$\rightarrow (|s_z+\rangle|r_z+\rangle|\varepsilon_z+\rangle + |s_z-\rangle|r_z-\rangle|\varepsilon_z-\rangle)/\sqrt{2}$$

Zum Problem a):

Diese Zerlegung ist eindeutig (tridecompositional theorem, vgl. Bub).

→ Wechselwirkung mit der Umgebung “wählt aus”, was mögliche Zeigervariablen sind.

Zum Problem b): Warum (Wann) können die Korrelationen vernachlässigt werden?

1. Die reduzierte Dichtematrix

$$W = \tfrac{1}{2}\, P_{z+} \otimes P_{rz+} + \tfrac{1}{2}\, P_{z-} \otimes P_{rz-}$$

(Spurbildung über die Umgebungsvariable) repräsentiert jetzt alle statistischen Informationen, außer denen, die Korrelationen mit dem betrachteten System der Umgebung berücksichtigen.

Wechselwirkung mit vielen Untersystemen der Umgebung → faktisch unkontrollierbar, also ist W eine sinnvolle Näherung.

Vernachlässigung von Korrelationen mit der Umgebung, quantitativ:

2. Nichtdiagonale Elemente in einer reduzierten Dichtematrix (nach Spurbildung über die Umgebung) verschwinden sehr schnell, wenn diese aus vielen Untersystemen besteht.

(Zeh: Übliche Def. von Dekohärenz: Praktisch unumkehrbares Verschwinden von bestimmten nichtdiagonalen Elementen in der Dichtematrix eines beschränkten, aber offenen Systems.)

Bsp.: Abschätzung (Joos 1986): “Lokalisierungsrate”

$$W(q,q',t) = W(q,q') \exp[-\Lambda(q-q')^2 t]$$

von Staubteilchen mit Durchmesser 10^{-5} cm in bestem Laborvakuum:

$$\Lambda \approx 10^{19}\ \text{cm}^{-2}\ \text{s}^{-1}$$

Interpretation: Die Stöße des Staubteilchens an Luftmolekülen messen seinen Ort so genau (und so oft), daß es sich auf einer quasi-klassischen Bahn bewegt.

3. Die Zeitskala für Rekohärenz durch einen gemeinsamen Hamiltonian ist sehr lang.

Ergebnis:

Klassisches (realistisches) Verhalten “entsteht” aus der quantenmechanischen Beschreibung.

Aber:

→ Es entsteht im Sinn einer (praktisch perfekten) Näherung: Reduzierte Dichtematrix.

→ Erklärt wird der Übergang zu klassischen Wahrscheinlichkeiten, aber nicht der zu Fakten (vgl. unten)

8. Konsistente Geschichten

(Gell-Mann, Hartle 1991)

Geschichte = Serie von Ereignissen, repräsentiert durch Projektionsoperatoren:

$$h = \{ P_1(t_1), P_2(t_2), ..., P_N(t_N) \}$$

Wahrscheinlichkeit einer Geschichte:

$$\text{prob}_W(h) = \text{tr}(W\, P_1(t_1))\ \text{tr}(W'\, P_2(t_2))\ ...\ \text{tr}(W'^{\cdots}{}'\, P_N(t_N))$$

W': Projektion von W auf den Unterraum, der $P_1(t_1)$ entspricht.

Einer "Familie" von Geschichten können klassische Wahrscheinlichkeiten zugeordnet werden, wenn die Wahrscheinlichkeiten additiv sind = wenn die Geschichten *konsistent* sind.

Beispiel: Doppelspalt-Experiment: Durchgang des Teilchens durch Spalt 1 oder Spalt 2, dann Auftreffen an einem bestimmten Ort auf dem Schirm: Nicht additiv → nicht konsistent.

Bedingung für konsistente Geschichten h, h':

$$\text{Re}(\text{tr}(\, P_N'(t_N)\ ...\ P_1'(t_1)\ W\ P_1(t_1)\ ...\ P_N(t_N)\,)) = 0$$

Dekohärenz-Funktional:

$$D_W(h,h') = \text{tr}(\, P_N'(t_N)\ ...\ P_1'(t_1)\ W\ P_1(t_1)\ ...\ P_N(t_N)\,)$$

"Grobkörnige" Geschichten → Verschwinden der nichtdiagonalen Elemente in D_W → klassisches Verhalten.

Dekohärenz nicht nur durch Wechselwirkung mit der Umgebung, sondern auch durch Grobkörnigkeit. Klassische Begriffe sind grobkörnig.

Beispiel: Schrödingers Katze: Die tote und die lebendige Katze interferieren nicht miteinander. Grobkörnigkeit → löscht Interferenz.

Das erklärt die logische Konsistenz unter den jeweils vielen alternativen Geschichten, aber nicht, daß eine Alternative faktisch ausgewählt wird. (Dualismus: Fakten – Vorhersagen)

Gell-Mann/Hartle: “Erweiterung, Klärung, Vervollständigung von Everetts Interpretation”:

- “Viele-Welten” (oder “Viele-Bewußtseine”)

- Evolution → IGUS (Information Gathering and Utilizing Systems): Nur in konsistenten Geschichten sind Vorhersagen möglich.

→ Faktizität nur eine Illusion?

Omnès (1994): “Contrary to the dynamics, the logical structure of quantum mechanics must select a definite direction of time, which necessarily coincides with the one occurring in thermodynamics. The theory is unable to give an account to the existence of facts, as opposed by their uniqueness to the multiplicity of possible phenomena.”

“Neue Orthodoxie”

Dekohärenz & Konsistente Geschichten → “Neue Orthodoxie” in der Interpretation der QM.

Fazit: Was leisten diese Mechanismen?

Antwort: Eine Erklärung dafür, daß man in bestimmten Systemen (z. B. Meßapparaten) in einer sinnvollen Näherung den Übergang von quantenmechanischem Indeterminismus zu klassischen Wahrscheinlichkeiten machen kann.

Es fehlt aber der Übergang von Wahrscheinlichkeit zu Faktizität: Nur eine Möglichkeit wird in der Messung tatsächlich verwirklicht.

Auswege:

- Viele-Welten bzw. Viele-Bewußtseine
- Expliziter Zeitpfeil (Konsistenz?)
- Erklärung umdrehen in einer nichtrealistischen Deutung. (vgl. unten) Dann ist Dekohärenz eine wichtige Konsistenzbetrachtung, aber keine Erklärung von “klassischem” Verhalten. Dieses wird im Sinne Bohrs schon vorausgesetzt. (Meßergebnisse sind faktisch.)

9. ‘T Hooft: Verborgene Parameter

(Quantum Gravity as a Dissipative Deterministic System, 1999).

Argumente:

- Holographisches Prinzip: Entropie schwarzer Löcher ⇒ Die Zahl der Freiheitsgrade der Quantenfelder muß am Ereignishorizont (1) konvergent sein und (2) wächst mit der Oberfläche, nicht mit dem Volumen.
- Auch erklärbar mit String-Theorie bzw. M-Theorie, aber: “... the description of what really constitutes concepts such as space, time, matter, causality, and the like is becoming increasingly and uncomfortably obscure.”
- Konzeptuelle Probleme der Q-Kosmologie

Lösung:

- Auf der Planck-Skala: Klassische (deterministische, unitäre, dissipative, lokale) Kontinuums-Physik
- QM-Zustände: Äquivalenzklassen auf dem Raum dieser Zustände (→ Nichtlokalität)

‘T Hooft:

a) Eigentliche Physik auf der Planckskala, mit chaotischen Fluktuationen

b) “QM-Objekte”: Bildung von Äquivalenzklassen. Die chaotischen Fluktuation auf der Planckskala können auf größeren Skalen nicht erfaßt werden → Scheinbarer Indeterminismus. QM als bestmögliche Beschreibung auf dieser Skala.

c) Nur auf makroskopischen Skalen gibt es Regelmäßigkeit. Die Regelmäßigkeit von Messungen an QM-Objekten werden durch die Schrödinger-Gleichung beschrieben.

Konsequenz:

Apparently we are forced to deny the existence of electrons, and other microscopic objects, even if they appear to be obvious explanations of observed phenomena. Only macroscopic oscillations, such as the movements of planets and people, are undeniable realities.

10. Vier Lösungen

1) Verborgene Parameter

2) Viele-Welten, Viele-Bewußtseine

3) QM + Zeitpfeil für Kollaps (Konsistenz?)

4) Nicht-Realistische Interpretation, wobei Dekohärenz + Konsistente Geschichten vom Kopf auf die Füße gestellt werden:

Ausgangspunkt: Notwendige *Form* der empirischen Erkenntnis (eines IGUS): Fakten in der Vergangenheit, Vorhersagen für die Zukunft. Fakten werden also vorausgesetzt.

Inhalt der empirischen Erkenntnis: QM

Dekohärenz, konsistente Geschichten: Erklärt die Möglichkeit der Form empirischer Erkenntnis als pragmatisch gute Näherung aus der QM.

→ Konsistenz dieser Form empirischer Erkenntnis mit der physikalischen Wirklichkeit (Inhalt)

→ Aber: Konsistenz “nur” im Sinn einer Näherung und Einschränkungen für “Fakten”: Grobkörnigkeit und Dekohärenz. Daher: Unvermeidlicher Nicht-Realismus.

Philosophisch: Eine moderne Form des Subjekt-Objekt-Problems in der Erkenntnis, bzw. des Form-Inhalt-Problems.