



JOHANNES GUTENBERG
UNIVERSITÄT MAINZ

Messungen ohne Fakten?

Das Messproblem der Quantenmechanik und die Vielfalt der „Interpretationen“

Meinard Kuhlmann
Philosophisches Seminar, Universität Mainz

Symposium „Unbestimmt und relativ?
Das Weltbild der modernen Physik“
Nürnberg, 20.-22. September 2019

- (1) Das Problem des quantenmechanischen Messprozesses**
- (2) Mögliche Lösungen des Messproblems**

- (1) Das Problem des quantenmechanischen Messprozesses**
- (2) Mögliche Lösungen des Messproblems**
 - a) Bohmsche Mechanik
 - b) Ghirardi, Rimini und Weber (GRW)
 - c) Viele Welten-Interpretation

Überblick

(1) Das Problem des quantenmechanischen Messprozesses

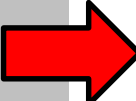
(2) Mögliche Lösungen des Messproblems

a) Bohmsche Mechanik

b) Ghirardi, Rimini und Weber (GRW)

c) Viele Welten-Interpretation

} Neue
Theorien!

- 
- (1) Das Problem des quantenmechanischen Messprozesses**
 - (2) Mögliche Lösungen des Messproblems**

Problem des quantenmechanischen Messprozesses

Ganz knapp formuliert:

- Was die Quantenmechanik behauptet, passt nicht zu dem, was wir tatsächlich beobachten.

Vorsichtiger formuliert:

- Was die Quantenmechanik zu behaupten scheint, passt nicht zu dem, was wir zu beobachten scheinen.

Problem des quantenmechanischen Messprozesses

Ganz knapp formuliert:

- Was die Quantenmechanik behauptet, passt nicht zu dem, was wir tatsächlich beobachten.

Vorsichtiger formuliert:

- Was die Quantenmechanik zu behaupten scheint, passt nicht zu dem, was wir zu beobachten scheinen.

Problem des quantenmechanischen Messprozesses

Etwas detaillierter:

- **Superpositionen:** Im Formalismus der Quantenmechanik sind Zustände (= Angabe aller Eigenschaften) von Quantenobjekten (z.B. Elektronen) so, dass nicht allen Größen ein bestimmter Wert zukommt, sondern auch Überlagerungen—“Superpositionen”— von Werten möglich sind. Das ist sogar der Normalfall.
- **Im Mikroskopischen** haben wir damit noch kein Problem.
- Und bei Messungen (also **im Makroskopischen**) erhalten wir ja auch immer einen bestimmten Wert.

Das Problem:

- Die Quantenmechanik liefert keinen solchen bestimmten Wert.

Problem des quantenmechanischen Messprozesses

Etwas detaillierter:

- **Superpositionen:** Im Formalismus der Quantenmechanik sind Zustände (= Angabe aller Eigenschaften) von Quantenobjekten (z.B. Elektronen) so, dass nicht allen Größen ein bestimmter Wert zukommt, sondern auch Überlagerungen—“Superpositionen”— von Werten möglich sind. Das ist sogar der Normalfall.
- **Im Mikroskopischen** haben wir damit noch kein Problem.
- Und bei Messungen (also **im Makroskopischen**) erhalten wir ja auch immer einen bestimmten Wert.

Das Problem:

- Die Quantenmechanik liefert keinen solchen bestimmten Wert.

Problem des quantenmechanischen Messprozesses

Etwas detaillierter:

- Es gibt in der Quantenmechanik **genau ein Gesetz** für die **Zeitentwicklung** von Zuständen: die **Schrödingergleichung**.
- **Wenn** wir die **Quantenmechanik** als **vollständige Theorie** der physikalischen Welt ernst nehmen, beschreibt die **Schrödingergleichung nicht nur**, wie sich Zustände von **mikroskopischen** Objekten in der Zeit entwickeln, sondern auch, wie sich **makroskopische** Messgeräte entwickeln.
 - Lax formuliert: Die **Schrödingergleichung kennt keinen Unterschied** von **mikroskopisch vs. makroskopisch**.

Problem des quantenmechanischen Messprozesses

Etwas detaillierter:

- Nehmen wir jetzt an: Das **zu messende Mikroobjekt** befindet sich bzgl. der Größe, die uns interessiert (z.B. Spin, zerfallen/nicht zerfallen) **in einer Superposition**, also einem Überlagerungszustand verschiedener Werte.
- Bei einer Messung muss das **Messgerät** auf geeignete Weise **mit dem Objektsystem wechselwirken**.
 - Wie sich das **Messgerät** bei dieser **Wechselwirkung** verändert, also in der Zeit entwickelt, wird **durch die Schrödingergleichung** beschrieben (es gibt kein anderes Gesetz!).

Problem des quantenmechanischen Messprozesses

Jetzt zwei entscheidende Zusatzinformationen:

- (i) Kalibrierungspostulat:** Wenn das Messgerät als Messgerät geeignet sein soll, muss es in dem Fall, dass das Objektsystem einen bestimmten Wert hat, diesen Wert auch anzeigen.
- (ii) Linearität der Schrödingergleichung (=SG):**
Bedeutet, dass die Zeitentwicklung, die die SG beschreibt, Superpositionen in ihrem Superpositionscharakter erhält.
Knapp: einmal Superposition, immer Superposition.

Problem des quantenmechanischen Messprozesses

Und jetzt das Problem:

- **Wenn** sich das zu messende **Objektsystem** bzgl. der Größe, die uns interessiert (z.B. Spin up/down, zerfallen/nicht zerfallen), vor der Messung **in** einer **Superposition** befindet, **dann** bedeutet die Linearität der Schrödingergleichung, dass sich das **Messgerät + Objektsystem** am Ende der Messwechselwirkung (die durch die SG beschrieben wird), ebenfalls in einer Superposition befindet.
 - Berühmtestes Beispiel:
Superposition Katze tot/Katze lebendig.
- Das beobachten wir aber nicht.

Problem des quantenmechanischen Messprozesses

Und jetzt das Problem:

- **Wenn** sich das zu messende **Objektsystem** bzgl. der Größe, die uns interessiert (z.B. Spin up/down, zerfallen/nicht zerfallen), vor der Messung **in** einer **Superposition** befindet, **dann** bedeutet die Linearität der Schrödingergleichung, dass sich das **Messgerät + Objektsystem** am Ende der Messwechselwirkung (die durch die SG beschrieben wird), ebenfalls in einer Superposition befindet.
 - Berühmtestes Beispiel:
Superposition Katze tot/Katze lebendig.
- **Das beobachten wir aber nicht.**
(Auch wenn die Grenze zwischen Leben und Tod nicht ganz so scharf ist, wie früher gedacht.)

**(1) Das Problem des quantenmechanischen
Messprozesses**

 **(2) Mögliche Lösungen des Messproblems**

Lösungsansätze für das Messproblem der QM

*Basierend auf **Maudlin (1995)** gibt es eine fast kanonische Weise, um zu motivieren, wieso es genau **drei denkbare Lösungsansätze** gibt.*

- Die zentrale Idee: Die QM gibt es **drei allgemein anerkannte Annahmen**, die aber nicht gleichzeitig wahr sein können, es gibt also ein **Konsistenzproblem**.
 - Das **Fallenlassen jeweils einer dieser Annahmen löst das Konsistenzproblem**, wobei aus diesen drei Weisen, das Konsistenzproblem zu lösen, jeweils ein Lösungsansatz für das Messproblem der QM erwächst.

Lösungsansätze für das Messproblem der QM

Die drei zentralen Annahmen der Quantenmechanik:

- (1) Die quantenmechanische Zustandsfunktion (die Wellenfunktion) ist eine vollständige Angabe aller Eigenschaften.
- (2) Die Schrödingergleichung beschreibt alle zeitlichen Entwicklungen von Zuständen.
- (3) Am Ende einer Messung gibt es ein bestimmtes Messergebnis.

Lösungsansätze für das Messproblem der QM

Die drei zentralen Annahmen der Quantenmechanik:

- ~~(1) Die quantenmechanische Zustandsfunktion (die Wellenfunktion) ist eine vollständige Angabe aller Eigenschaften.~~
- (2) Die Schrödingergleichung beschreibt alle zeitlichen Entwicklungen von Zuständen.
- (3) Am Ende einer Messung gibt es ein bestimmtes Messergebnis.

=> Bohmsche Mechanik

Lösungsansätze für das Messproblem der QM

Die drei zentralen Annahmen der Quantenmechanik:

- (1) Die quantenmechanische Zustandsfunktion (die Wellenfunktion) ist eine vollständige Angabe aller Eigenschaften.
- ~~(2) Die Schrödingergleichung beschreibt alle zeitlichen Entwicklungen von Zuständen.~~
- (3) Am Ende einer Messung gibt es ein bestimmtes Messergebnis.

=> GRW

Lösungsansätze für das Messproblem der QM

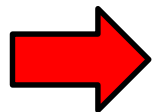
Die drei zentralen Annahmen der Quantenmechanik:

- (1) Die quantenmechanische Zustandsfunktion (die Wellenfunktion) ist eine vollständige Angabe aller Eigenschaften.
- (2) Die Schrödingergleichung beschreibt alle zeitlichen Entwicklungen von Zuständen.
- ~~(3) Am Ende einer Messung gibt es ein bestimmtes Messergebnis.~~

=> Viele-Welten-Interpretation

(1) Das Problem des quantenmechanischen Messprozesses

(2) Mögliche Lösungen des Messproblems



a) Bohmsche Mechanik

b) Ghirardi, Rimini und Weber (GRW)

c) Viele Welten-Interpretation

Lösungsansätze für das Messproblem der QM

Zur Erinnerung: Die Bohmsche Mechanik streicht die erste der drei zentralen Annahmen der Quantenmechanik:

- ~~(1) Die quantenmechanische Zustandsfunktion (die Wellenfunktion) ist eine vollständige Angabe aller Eigenschaften.~~
- (2) Die Schrödingergleichung beschreibt alle zeitlichen Entwicklungen von Zuständen.
- (3) Am Ende einer Messung gibt es ein bestimmtes Messergebnis.

Unterschied zur gewöhnlichen Quantenmechanik

- *Grundlegende Größen*

Nicht die Wellenfunktion allein beschreibt das System, sondern Wellenfunktion **und** Teilchenorte

- Die Trajektorien der Teilchen sind „**verborgene Parameter**“ der Theorie.

- *Dynamik*

Es gibt **zwei Grundgleichungen**:

(i) Die übliche **Schrödingergleichung**

(ii) **Bewegungsgleichung** („**Führungsgleichung**“) für die Teilchen, für abhängig von der Teilchensorte.

=> **Neue Theorie!**

Unterschied zur gewöhnlichen Quantenmechanik

- *Grundlegende Größen*

Nicht die Wellenfunktion allein beschreibt das System, sondern Wellenfunktion **und** Teilchenorte

- Die Trajektorien der Teilchen sind „**verborgene Parameter**“ der Theorie.

- *Dynamik*

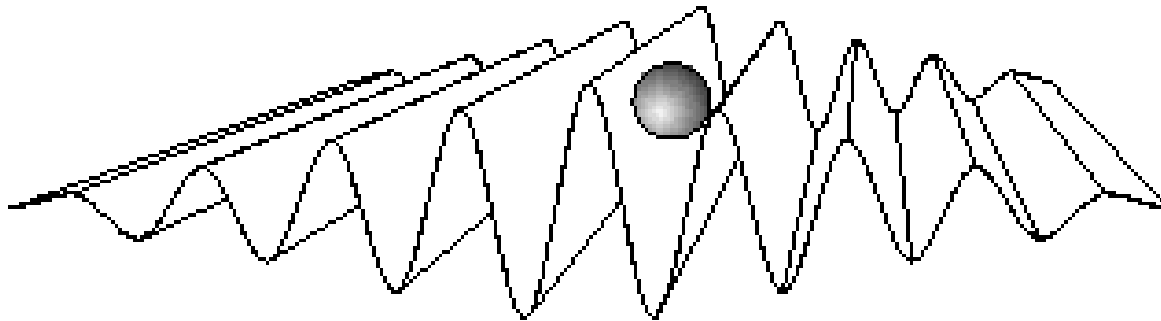
Es gibt **zwei Grundgleichungen**:

(i) Die übliche **Schrödingergleichung**

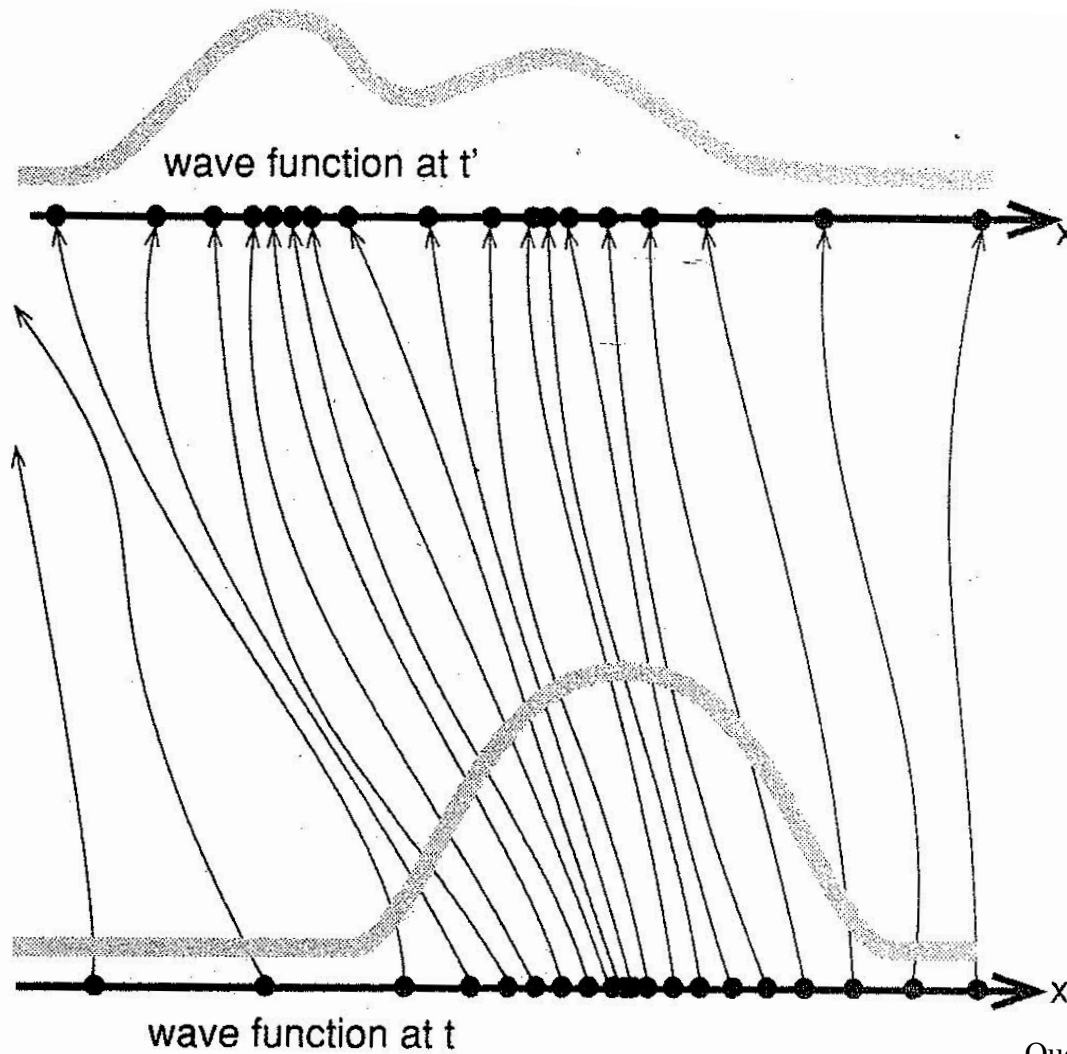
(ii) **Bewegungsgleichung** („**Führungsgleichung**“) für die Teilchen, für abhängig von der Teilchensorte.

=> Neue Theorie!

Analogie: Teilchen von (z.B. Wasser-) Welle geführt

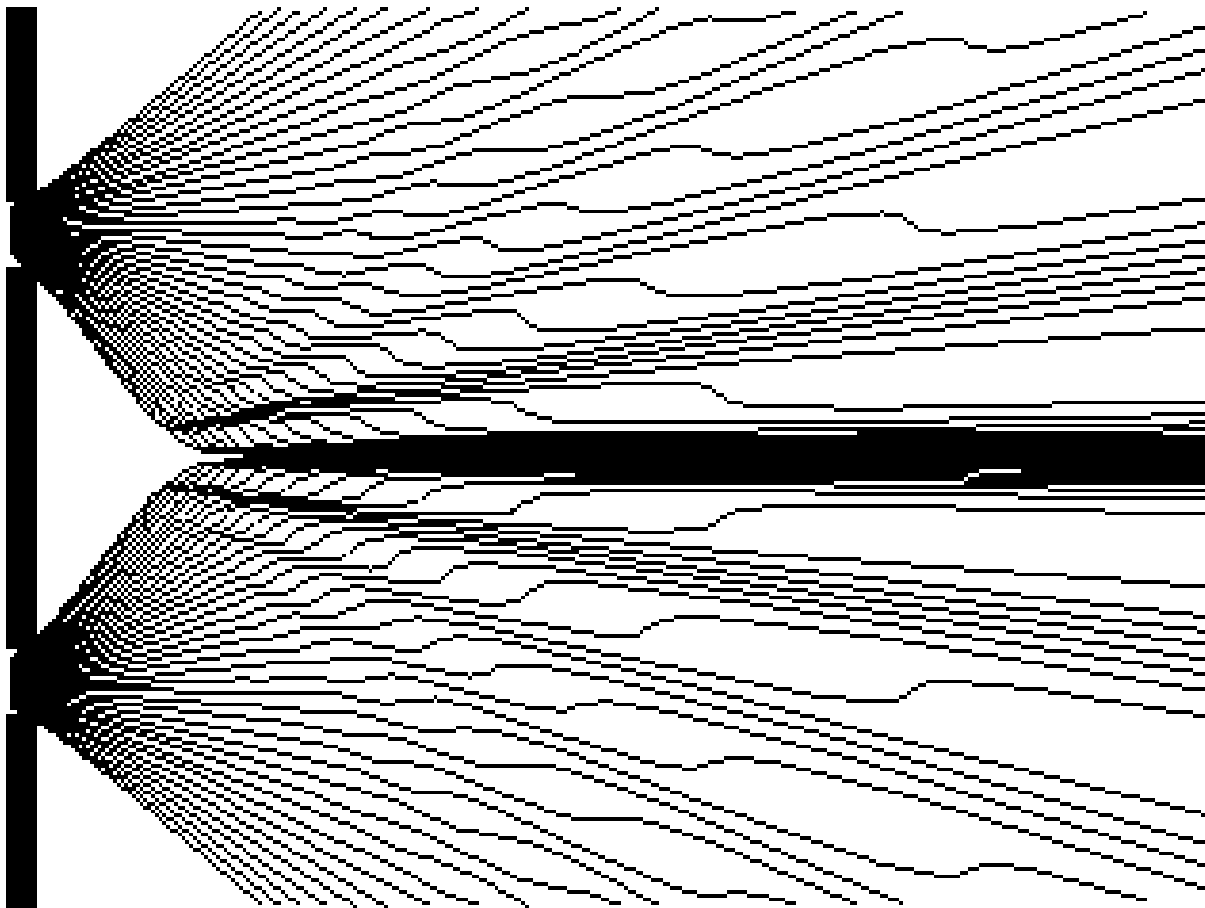


Quelle: <http://www.mathematik.uni-muenchen.de/~bohmmech/Poster/post/post.html>



Quelle: Albert 1992, S. 139.

Doppelspalt-Experiment in Bohmscher Mechanik



Quelle: <http://www.mathematik.uni-muenchen.de/~bohmmech/Poster/post/post.html>

Pro Bohmsche QM

“Here’s what's so cool about this theory:

this is the kind of theory whereby you can tell an absolutely low-brow [MK: unbedarft] story about the world, the kind of story (that is) that's about *the motions of material bodies*, the kind of story that contains nothing cryptic and nothing metaphysically novel and nothing ambiguous and nothing inexplicit and nothing evasive and nothing unintelligible and nothing inexact and nothing subtle and in which no questions ever fail to make sense and in which no questions ever fail to have answers and in which no two physical properties of anything are ever "incompatible" with one another and in which the whole universe always evolves *deterministically* and which recounts [dt.: erzählen] the unfolding of a perverse and gigantic conspiracy to make the world *appear* to be *quantum-mechanical*.”

[Albert, D.Z. (1992): *Quantum Mechanics and Experience*. Cambridge: Harvard University Press, S. 169.]

Pro Bohmsche QM

- Liefert vollständige realistische Beschreibung individueller Situationen.
- Ist deterministisch.

Kontra Bohmsche Mechanik

Gute Argumente gegen Bohm

- 1) Die Auszeichnung des Ortes (der Ortsbasis) **steht in Konflikt zur Speziellen Relativitätstheorie**, in der räumliche Abstände keine absolute Bedeutung mehr haben.
- 2) Der angeblich erreichte **Determinismus** ist **nur scheinbar**: da die Ausgangskonfiguration nicht genau bekannt ist, lassen sich doch wieder nur Wahrscheinlichkeitsaussagen machen, auch wenn diese epistemischer Natur sind.
- 3) Die extreme **Nichtlokalität** der Bohmschen Mechanik **passt nicht zum angeblich sehr klassischen Charakter**.

Kontra Bohmsche Mechanik

Speziellere Argumente gegen Bohm

- Da die Wellenfunktion eine Funktion im $3n$ -dim. Konfigurationsraum ist, kann ihr keine reale physikalische Existenz zugeschrieben werden, die die Bewegung eines Teilchens beeinflusst.
- Die Eigenschaft Spin kommt nicht den Teilchen zu, sondern wird „kontextualisiert“
 - (Verhalten bei Stern-Gerlach-Exp abhängig von Wellenfunktion und Anfangsort → keine Messung einer Eigenschaft i.e.S.)

Kontra Bohmsche Mechanik

Ältere und z.T. veraltete Argumente gegen Bohm:

- Geschwindigkeit eines freien Teilchens in einem Kasten ist gleich Null, im Ggs. zum q.m. Resultat. [Lit.: Jammer (1974) S. 284o, 284u, 285u]
- Impulsverteilung ergibt im Grundzustand des Wasserstoffatoms immer den Impuls 0, im Ggs. zur QM und im Widerspruch zur Unschärferelation. [Lit.: Scheibe S. 175u]
- V. Neumanns Beweis der Unmöglichkeit von Theorien verborgener Parameter? (Siehe dazu Jammer 1974, S. 287.)
- Einführung des Quantenpotentials ist ad hoc. [Lit.: Maudlin S. 120f]

Überblick

(1) Das Problem des quantenmechanischen Messprozesses

(2) Mögliche Lösungen des Messproblems

a) Bohmsche Mechanik

 b) Ghirardi, Rimini und Weber (GRW)

c) Viele Welten-Interpretation

Ghirardi, Rimini und Weber (GRW)

Die Grundidee: Die (Orts-) **Wellenfunktion** von N Teilchen entwickelt sich meist nach der Schrödingergleichung, **kollabiert** aber **manchmal** und zwar

- 1) **spontan**, d.h. ohne durch externe Wechselwirkung mit einem Messgerät hervorgerufen zu sein,
- 2) **stochastisch** bezüglich Ort und Zeitpunkt des Kollapses, so dass
- 3) **bei vielen Teilchen mit sehr hoher Wahrscheinlichkeit** ein Kollaps eintritt und bei wenigen **Teilchen mit sehr geringer Wahrscheinlichkeit**.

Ghirardi, Rimini und Weber (GRW)

Erforderlich für Umsetzung der Grundidee: Einführung der beiden neuen Naturkonstanten τ und α .

- **Naturkonstante τ :** Bestimmt die Wahrscheinlichkeit eines Kollapses pro Zeiteinheit, abhängig von der Teilchenzahl.
- **Naturkonstante α :** Bestimmt die Schärfe der Lokalisation eines Kollapses.

=> Neue Theorie!

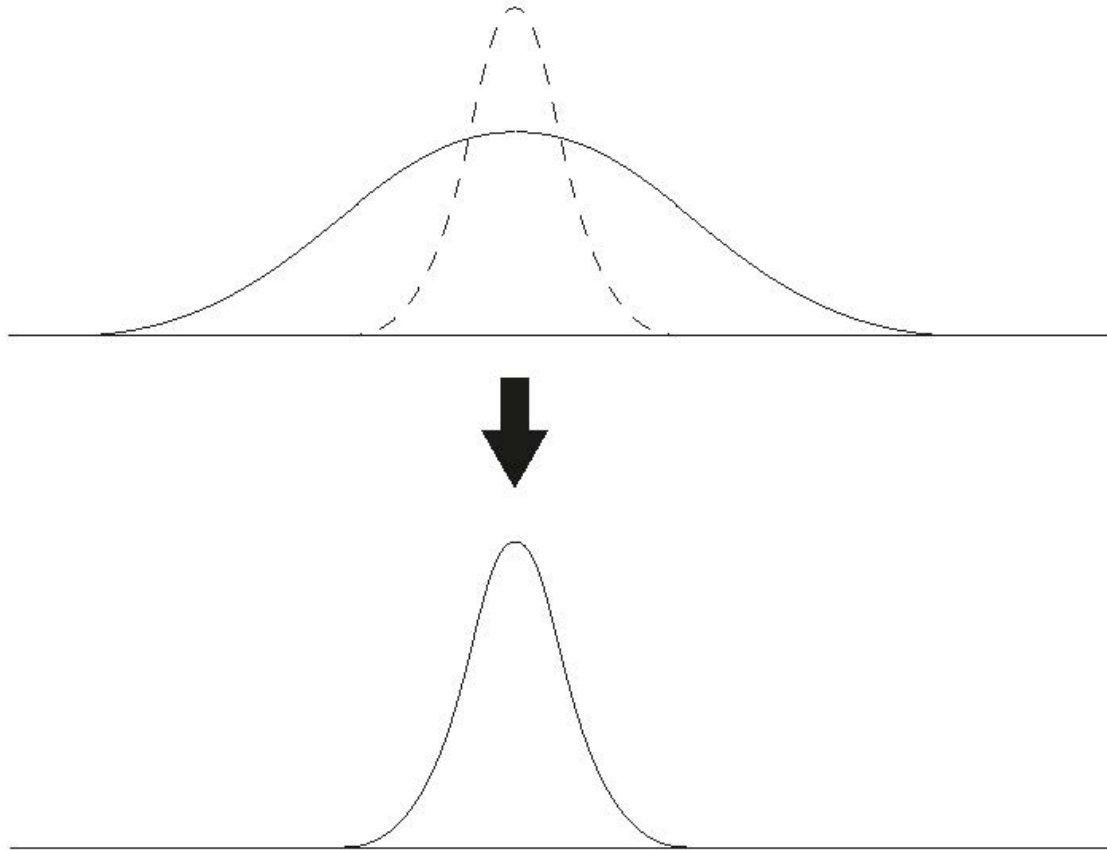
Ghirardi, Rimini und Weber (GRW)

Erforderlich für Umsetzung der Grundidee: Einführung der beiden neuen Naturkonstanten τ und α .

- **Naturkonstante τ :** Bestimmt die Wahrscheinlichkeit eines Kollapses pro Zeiteinheit, abhängig von der Teilchenzahl.
- **Naturkonstante α :** Bestimmt die Schärfe der Lokalisation eines Kollapses.

=> Neue Theorie!

Spontane Lokalisierung einer breiten Wellenfunktion



Spontane Lokalisierung einer breiten Wellenfunktion

(Dürr und Lazarovici 2018, S. 100)

Pro GRW

- 1) **Konflikt zwischen** fundamentaler physikalischer **Theorie** und **Erscheinungsbild** der Welt wird **aufgelöst**.
- 2) **Kein Bezug auf** schwer zu definierende Konzeptionen wie **makroskopische Systeme** und **Messgeräte** erforderlich.

Kontra GRW (und mögliche Verteidigung)

- 1) Die **Einführung der** beiden neuen **Naturkonstanten** τ und α ist *ad hoc*, da **nur zur Lösung des Messproblems** eingeführt.
 - a) Lassen sich nicht unabhängig messen.
 - b) Spielen in keinem anderen Kontext eine Rolle.

Kontra GRW (und mögliche Verteidigung)

2) **Ontologieproblem:** Der **Kollaps** findet nicht im 3-dimensionalen Anschauungsraum, sondern **im abstrakten 3N-dimensionalen „Konfigurationsraum“** statt.

Mögliche Verteidigung:

„Wellenfunktionsrealismus“

(Schluss auf die beste Erklärung)

Kontra GRW (und mögliche Verteidigung)

2) **Ontologieproblem:**

Andere Verteidigungslinie:

Der Kollaps findet zwar im abstrakten 3N-dimensionalen „Konfigurationsraum“ statt, führt aber zu einem **Blitz** (*flash*, Bell 1987) im **3-dimensionalen Anschauungsraum**.

→ ***Galaxy of flashes*** (Maudlin 2010).

Das Problem: zwischen den Blitzen existiert nichts, d.h. das Auftreten der Blitze ist unerklärlich.

Das ist die Variante **GRW_f** (flash ontology).

Kontra GRW (und mögliche Verteidigung)

2) **Ontologieproblem:**

Dritte Verteidigungslinie:

Statt **GRW_f** (*flash ontology*) andere Alternative:

GRW_m (*matter density ontology*)

Materie mit Disposition zu GRW-Kollaps ohne externen Trigger
(Dorato und Esfeld 2010)

Problem: Relativistische Verallgemeinerung fraglich

Überblick

(1) Das Problem des quantenmechanischen Messprozesses

(2) Mögliche Lösungen des Messproblems

a) Bohmsche Mechanik

b) Ghirardi, Rimini und Weber (GRW)

 c) Viele Welten-Interpretation

Lösungsansätze für das Messproblem der QM

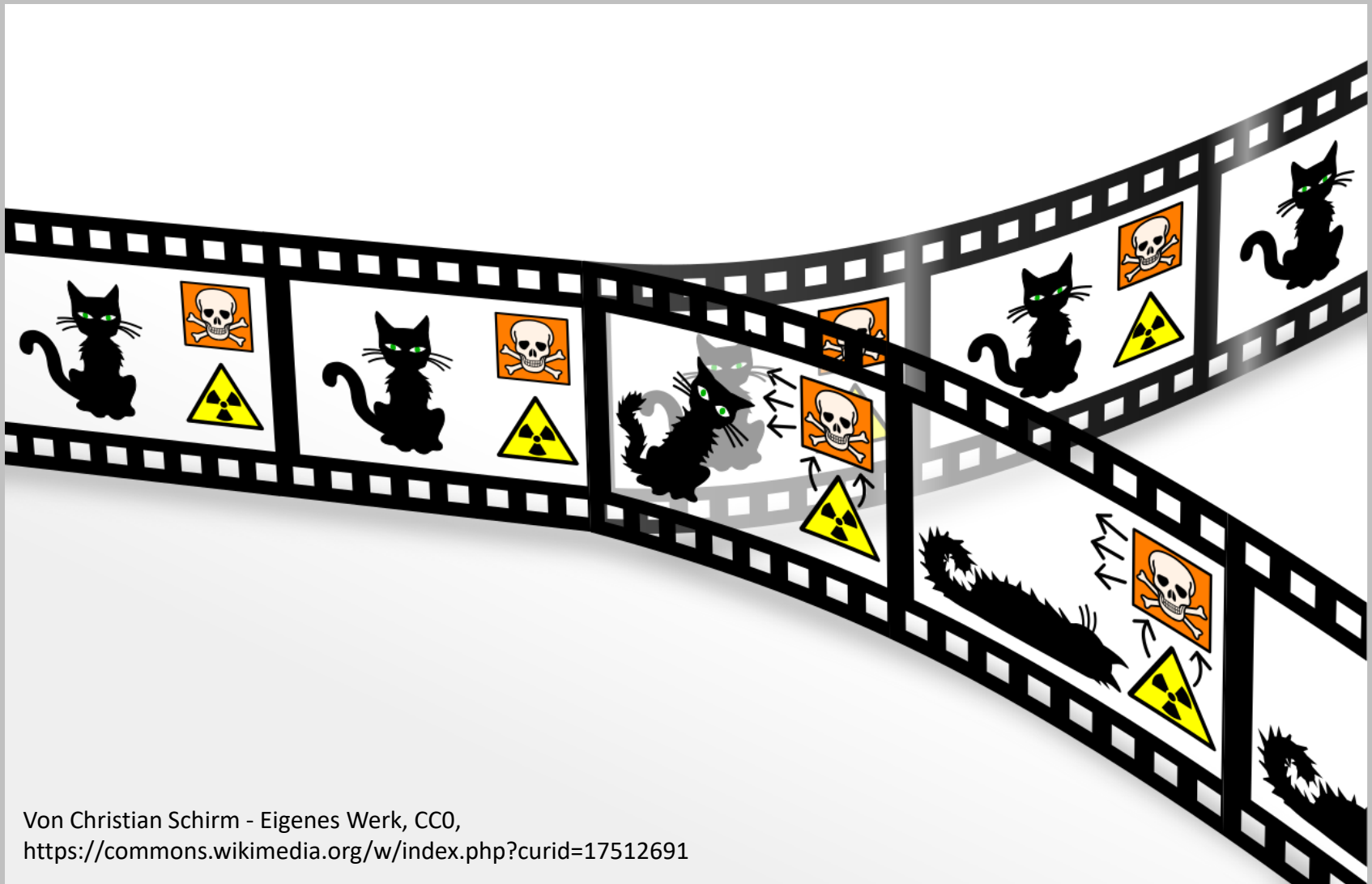
Die drei zentralen Annahmen der Quantenmechanik:

- (1) Die quantenmechanische Zustandsfunktion (die Wellenfunktion) ist eine vollständige Angabe aller Eigenschaften.
- (2) Die Schrödingergleichung beschreibt alle zeitlichen Entwicklungen von Zuständen.
- ~~(3) Am Ende einer Messung gibt es ein bestimmtes Messergebnis.~~

=> Viele-Welten-Interpretation

Viele-Welten-Interpretation der Quantenmechanik

- Nimmt die Tatsache ernst, dass es in der QM **nur eine Zeitentwicklung** gibt (durch Schrödinger-Gleichung festgelegt).
 - D.H. **keine zweite, indeterministische Dynamik** für Messprozess.
→ **Nicht-Kollaps-Theorie.**
- Postuliert, dass bei einer Messung **alle möglichen Ergebnisse realisiert werden.** (→ „Alles, was passieren kann, passiert auch.“)
- Erklärung des Widerspruchs mit der Erfahrung (Katze ist entweder tot oder lebendig): Eindruck eines einzelnen, definiten Messergebnisses ist eine Illusion.



Von Christian Schirm - Eigenes Werk, CC0,
<https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=17512691>

Viele-Welten-Interpretation der Quantenmechanik

- Frühe starke Version der Viele-Welten-Interpretation: Im Falle einer quantenmechanischen Messung spaltet sich das ganze Universum (inkl. des Beobachters) in so viele **parallele Welten** (*branches*, Zweige) auf, wie es Messergebnisse gibt.
 - In jeder Welt ist ein Messergebnis realisiert.
- **Heute oft: ‚definite macrorealms‘** (J. Butterfield).

Bewertung der Viele-Welten-Interpretation

Hauptargument für die Viel-Welten-Theorie:

- Liefert die unmittelbarste realistische Interpretation des Formalismus der QM, ohne Zusatzannahmen.

Bewertung der Viele-Welten-Interpretation

Ein pariertes Argument gegen die Viele-Welten-Theorie:

- **Das Basisproblem:** realistische verstandene Aufspaltung in parallele Welten hängt von Basiswahl ab, die eine willkürliche rein **mathematische** Angelegenheit ist.
- Weitgehend **gelöst durch Dekohärenztheorie:**
Bei einer „Messung“ wird eine Basis **dynamisch** ausgezeichnet, d.h. durch physikalische Prozesse, nicht durch eine math. Prozedur.
 - Meist ist die ausgezeichnete Basis die Ortsbasis.
- Tatsächlich ist die **Viele-Welten-Interpretation** der beste Partner der **Dekohärenztheorie**.

Bewertung der Viele-Welten-Interpretation

Gute Argumente gegen die Vielweltentheorie:

- **Sparsamkeitsargument:** Prinzip der ontologischen Sparsamkeit hochgradig verletzt.

Bewertung der Viele-Welten-Interpretation

Gute Argumente gegen die Vielweltentheorie:

- **Problem der Wahrscheinlichkeiten:** Welche Bedeutung haben die Wahrscheinlichkeit der einzelnen Messergebnisse?
 - Das Wetten auf jeden noch so unwahrscheinlichen Ausgang lohnt sich (solange Wahrscheinlichkeit nicht Null), da ja jeder mögliche Ausgang eintritt.
 - Insbesondere ist das Riskieren des eigenen Lebens kein Problem, solange es nur eine nicht verschwindende Wahrscheinlichkeit des Überlebens gibt.

Fazit

- Gegen jeden der vorliegenden Lösungsvorschläge für das quantenmechanische Messproblem gibt es Einwände.

Was also tun? Was sind die Perspektiven?

- Einwände entkräften durch Fortentwicklung der Vorschläge.
- Relativistische Varianten abwarten.
- Ganze neue Lösungen suchen.
- Abwarten auf neue Lage bei der nächsten Umwälzung in der fundamentalen Physik (BSM).

Fazit

- Gegen jeden der vorliegenden Lösungsvorschläge für das quantenmechanische Messproblem gibt es Einwände.

Was also tun? Was sind die Perspektiven?

- Einwände entkräften durch Fortentwicklung der Vorschläge.
- Relativistische Varianten abwarten.
- Ganze neue Lösungen suchen.
- Abwarten auf neue Lage bei der nächsten Umwälzung in der fundamentalen Physik (BSM).

Fazit

- Gegen jeden der vorliegenden Lösungsvorschläge für das quantenmechanische Messproblem gibt es Einwände.

Was also tun? Was sind die Perspektiven?

- Einwände entkräften durch Fortentwicklung der Vorschläge.
- Relativistische Varianten abwarten.
- Ganze neue Lösungen suchen.
- Abwarten auf neue Lage bei der nächsten Umwälzung in der fundamentalen Physik (BSM=Beyond the Standard Model).

Literatur

- Albert, D. Z (1992): *Quantum Mechanics and Experience*, Cambridge, Mass.: Harvard Univ. Press.
- Brown, H. und D. Wallace (2005). Solving the measurement problem: De Broglie-Bohm loses out to Everett, *Foundations of Physics* 35: 517.
- DeWitt, B. S. und N. Graham (Hg.) (1973): *The Many-Worlds Interpretation of Quantum Mechanics*. Princeton: Princeton University Press.
- Dorato, M., und M. Esfeld (2010): GRW as an ontology of dispositions. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 41: 41–49.
- Dürr, D., und D. Lazarovici (2018): *Verständliche Quantenmechanik—Drei mögliche Weltbilder der Quantenphysik*, Berlin: Springer Spektrum.
- Everett, H. (1957): „‘Relative State’ Formulation of Quantum Mechanics“. *Reviews of Modern Physics* 29: 454-462.
- Friebe, C., Kuhlmann, M., Lyre, H., Näger, P., Passon, O., und M. Stöckler (Hg.) (2018): *Die Philosophie der Quantenphysik*, Berlin: Springer.
- Frigg, R., und C. Hoefer (2007): Probability in GRW theory. *Studies in History and Philosophy of Modern Physics* 38B: 371–389.
- Jammer, M. (1974). *The Philosophy of Quantum Mechanics*. New York: Wiley.
- Maudlin, T. (1995): Three measurement problems. *Topoi* 14: 7–15.
- Maudlin, T. (2010): Can the World be Only Wavefunction? In: Saunders et al. (2010, 121–143).
- Saunders, S., Barrett, J., Kent, A., und David Wallace (Hg.) (2010). *Many Worlds? Everett, Quantum Theory, & Reality*. Oxford: Oxford University Press.
- Schlosshauer, M. (2007): *Decoherence and the Quantum-to-Classical Transition*, Berlin, Heidelberg: Springer.