



JOHANNES GUTENBERG  
UNIVERSITÄT MAINZ

# Das Messproblem der Quantenmechanik und die Vielfalt der „Interpretationen“

Meinard Kuhlmann  
Philosophisches Seminar, Universität Mainz

7. Workshop der  
Heisenberg-Gesellschaft  
Schloss Schweinsburg, 16.-18. Juli 2021

- (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**

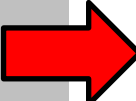
**(2) Mögliche Lösungen des Messproblems**

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 (= max. mögliche Angabe von 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. (Math.: Jede Linearkomb. v. Zuständen ist auch ein Z.)
- **Im Mikroskopischen** haben wir damit noch kein Problem.
- Und bei Messungen (also **im Makroskopischen**) erhalten wir ja auch immer einen bestimmten Wert.

**Aber:**

Die Quantenmechanik liefert keinen solchen bestimmten Wert.



# Problem des quantenmechanischen Messprozesses

*Etwas detaillierter:*

- **Superpositionen:** Im Formalismus der Quantenmechanik sind Zustände (= max. mögliche Angabe von 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. (Math.: Jede Linearkomb. v. Zuständen ist auch ein Z.)
- **Im Mikroskopischen** haben wir damit noch kein Problem.
- Und bei Messungen (also **im Makroskopischen**) erhalten wir ja auch immer einen bestimmten Wert.

**Aber:**

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 up/down in x-Richtung, 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.)

# Eigenwertgleichungen und Messungen

## Bestimmung möglicher Messwerte

$$A|\psi_i\rangle = a_i|\psi_i\rangle \quad (1)$$

- (i) Mit dieser Eigenwertgleichung kann man bei vorgegebener Observable  $A$  die möglichen Messwerte  $a_i$  bestimmen (mathematisch die Eigenwerte des Operators  $A$ ).
- (ii) Jedem Eigenwert ist mindestens ein Eigenzustand  $|\psi_i\rangle$  zugeordnet, welcher im Falle einer Messung mit Sicherheit zum Eigenwert  $a_i$  als Messwert führen würde.
- (iii) Geht zurück auf Erwin Schrödinger (1926): Quantisierung als Eigenwertproblem I, *Annalen der Physik* 79: 361–376.

# Messung von Systemen in Eigenzuständen

**Fall 1:** Der Zustand  $|\psi\rangle$  des q.m. Systems  $S$  ist ein **Eigenzustand** der Observablen  $A$  bzw. Operators  $\hat{A}$ , also  $|\psi\rangle = |\psi_k^A\rangle$ , wobei  $a_k$  der zum Eigenvektor  $|\psi_k^A\rangle$  zugehörige Eigenwert ist.

→ In diesem Fall wird eine Messung der Observablen  $A$  mit Sicherheit den Messwert  $a_k$  liefern.

Zusatzinfo: Jedem quantenmechanischen System wird ein eigener Hilbertraum zugeschrieben. Die auf diesem Hilbertraum wirkenden selbstadjungierten Operatoren repräsentieren die Observablen bzgl. des betrachteten Systems. Jedes System hat also quasi seine eigenen Observablen, so dass Eigenzustände dieser Observablen systemspezifisch sind.



## Messung von Systemen in Superpositionen

**Fall 2:** Zustand  $|\psi\rangle$  ist **kein Eigenzustand** von  $\hat{A}$ .

- (i) In diesem Fall lassen sich bzgl. des Ergebnisses einer Messung der Observablen  $\hat{A}$  nur Wahrscheinlichkeitsaussagen machen.
- (ii) Dazu wird der Zustand  $|\psi\rangle$  nach den Eigenzuständen des Operators  $\hat{A}$  in einer Reihe entwickelt:

$$|\psi\rangle = \sum c_i |\psi_i^A\rangle, \text{ mit } c_i = \langle \psi_i^A | \psi \rangle. \quad (2)$$

- (iii) Die Koeffizienten der Reihenentwicklung liefern gerade die Wahrscheinlichkeiten von oben, nämlich  $\text{prob}^A(\psi, a_i) = c_i^2$ .

## Problem des q.m. Messprozesses (mathematisch)

Messwechselwirkung (formal):

$$\Phi(S + M) \xrightarrow{U} \Phi'(S + M) \quad (3)$$

$U$  ist aber nicht bekannt. Eines scheint aber klar zu sein (“Kalibrierungspostulat”), nämlich wie sich ein für die Messung von Observable  $A$  geeignetes Messgerät verhält, wenn  $S$  vor der Messung in einem Eigenzustand von  $A$  ist (Fall 1 von oben):

$$|\psi_k^S\rangle |\Psi_{\text{messbereit}}^M\rangle \xrightarrow{U} |\psi_k^S\rangle |\Psi_{a_k \text{ gemessen}}^M\rangle \quad (4)$$

wobei  $|\Psi_{a_k \text{ gemessen}}^M\rangle$  der Zustand von Meßgerät  $M$  ist, der anzeigt, dass als Messwert  $a_k$  gefunden wurde (Abkürzung:  $|\Psi_k^M\rangle$ ).

# Problem des q.m. Messprozesses (mathematisch)

**Anwendung von Kalibrierungspostulat:**

$$|\uparrow_z\rangle|\Psi_{\text{messbereit}}^M\rangle \xrightarrow{U} |\uparrow_z\rangle|\Psi_{\uparrow_z\text{gemessen}}^M\rangle$$

## Problem des q.m. Messprozesses (mathematisch)

Was passiert aber, wenn S vor der Messung **nicht in einem Eigenzustand** von A ist?

$$|\psi^S\rangle|\Psi_{\text{messbereit}}^M\rangle \xrightarrow{U} ??? \quad (5)$$

## Problem des q.m. Messprozesses (mathematisch)

Was passiert aber, wenn S vor der Messung **nicht in einem Eigenzustand** von A ist?

$$U \left( |\psi^S\rangle |\Psi_{\text{messbereit}}^M\rangle \right) = ??? \quad (6)$$

Trick: Kalibrierungspostulat nutzen!

## Problem des q.m. Messprozesses (mathematisch)

Nehmen wir als einfaches Beispiel eine Spin-Superposition, also z.B.  $|\psi^S\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow_z\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\downarrow_z\rangle$ . Einsetzen ergibt:

$$\Phi'(S + M) = U \left[ \left( \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow_z\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\downarrow_z\rangle \right) |\psi_{\text{messbereit}}^M\rangle \right] \quad (7)$$

## Problem des q.m. Messprozesses (mathematisch)

Wegen der Linearität des aus der Schrödingergleichung resultierenden Zeitentwicklungsoperators  $U$  ergibt sich schließlich:

$$\Phi'(S + M) = \frac{1}{\sqrt{2}}|\uparrow_z\rangle|\Psi_{\uparrow_z\text{gemessen}}^M\rangle + \frac{1}{\sqrt{2}}|\downarrow_z\rangle|\Psi_{\downarrow_z\text{gemessen}}^M\rangle \quad (8)$$

(Zur Erinnerung: Bei Linearität gilt  $f(ax + by) = af(x) + bf(y)$ )

**Was bedeutet das?**

# Überblick

**(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

Folgende drei Behauptungen scheinen alle zuzutreffen:

- (1) Die Wellenfunktion eines Systems liefert eine vollständige Angabe aller seiner physikalischen Eigenschaften. D.h. es gibt keine weiteren phys. Eigenschaften, die nicht durch die Wellenfunktion festgelegt sind.
- (2) Die Wellenfunktion entwickelt sich immer gemäß der (linearen!) Schrödingergleichung. D.h. es gibt keine andere zeitliche Zustandsentwicklung.
- (3) Am Ende einer Messung gibt es ein bestimmtes Messergebnis.

Frage: Können tatsächlich alle drei Behauptungen gleichzeitig aufrecht erhalten werden? – Nein!

# Lösungsansätze für das Messproblem der QM

Folgende drei Behauptungen scheinen alle zuzutreffen:

- (1) Die Wellenfunktion eines Systems liefert eine vollständige Angabe aller seiner physikalischen Eigenschaften.
- (2) Die Wellenfunktion entwickelt sich immer gemäß der (linearen!) Schrödingergleichung.
- (3) Am Ende einer Messung gibt es ein bestimmtes Messergebnis.

# Lösungsansätze für das Messproblem der QM

Folgende drei Behauptungen scheinen alle zuzutreffen:

- ~~(1) Die Wellenfunktion eines Systems liefert eine vollständige Angabe aller seiner physikalischen Eigenschaften.~~
- (2) Die Wellenfunktion entwickelt sich immer gemäß der (linearen!) Schrödingergleichung.
- (3) Am Ende einer Messung gibt es ein bestimmtes Messergebnis.

**=> Bohmsche Mechanik**

# Lösungsansätze für das Messproblem der QM

Folgende drei Behauptungen scheinen alle zuzutreffen:

- (1) Die Wellenfunktion eines Systems liefert eine vollständige Angabe aller seiner physikalischen Eigenschaften.
- ~~(2) Die Wellenfunktion entwickelt sich immer gemäß der (linearen!) Schrödingergleichung.~~
- (3) Am Ende einer Messung gibt es ein bestimmtes Messergebnis.

**=> GRW (Ghirardi, Rimini und Weber )**

# Lösungsansätze für das Messproblem der QM

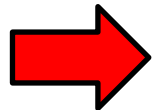
Folgende drei Behauptungen scheinen alle zuzutreffen:

- (1) Die Wellenfunktion eines Systems liefert eine vollständige Angabe aller seiner physikalischen Eigenschaften.
- (2) Die Wellenfunktion entwickelt sich immer gemäß der (linearen!) Schrödingergleichung.
- ~~(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 Wellenfunktion eines Systems liefert eine vollständige Angabe aller seiner physikalischen Eigenschaften.~~
- (2) Die Wellenfunktion entwickelt sich immer gemäß der (linearen!) Schrödingergleichung.
- (3) Am Ende einer Messung gibt es ein bestimmtes Messergebnis.

**=> Bohmsche Mechanik**



# Bohmsche Mechanik

## Unterschied zur gewöhnlichen Quantenmechanik

- Grundlegende Größen:

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

- Die Teilchenorte sind „**verborgene Parameter**“ der Theorie.

- Dynamik:

Es gibt **zwei Grundgleichungen:**

(i) Die übliche **Schrödingergleichung** (für die Wellenfunktion)

*und zusätzlich zur gewöhnlichen QM noch*

(ii) eine **Bewegungsgleichung („Führungsgleichung“)** für die **Teilchenorte**. Gibt an, wie die Wellenfunktion (deren Zeitentwicklung durch die SG festgelegt ist) die Teilchenbahnen führt.

=> **Neue Theorie!**

# Bohmsche Mechanik

## Unterschied zur gewöhnlichen Quantenmechanik

- Grundlegende Größen:

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

- Die Teilchenorte sind „**verborgene Parameter**“ der Theorie.

- Dynamik:

Es gibt **zwei Grundgleichungen:**

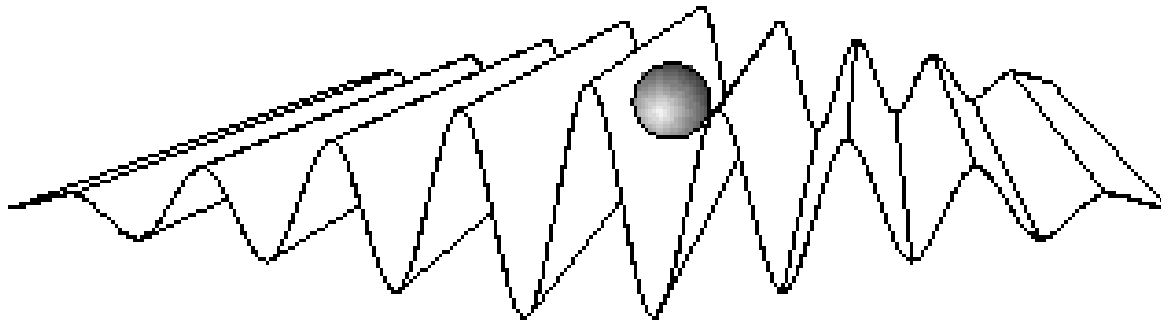
(i) Die übliche **Schrödingergleichung** (für die Wellenfunktion)

*und zusätzlich zur gewöhnlichen QM noch*

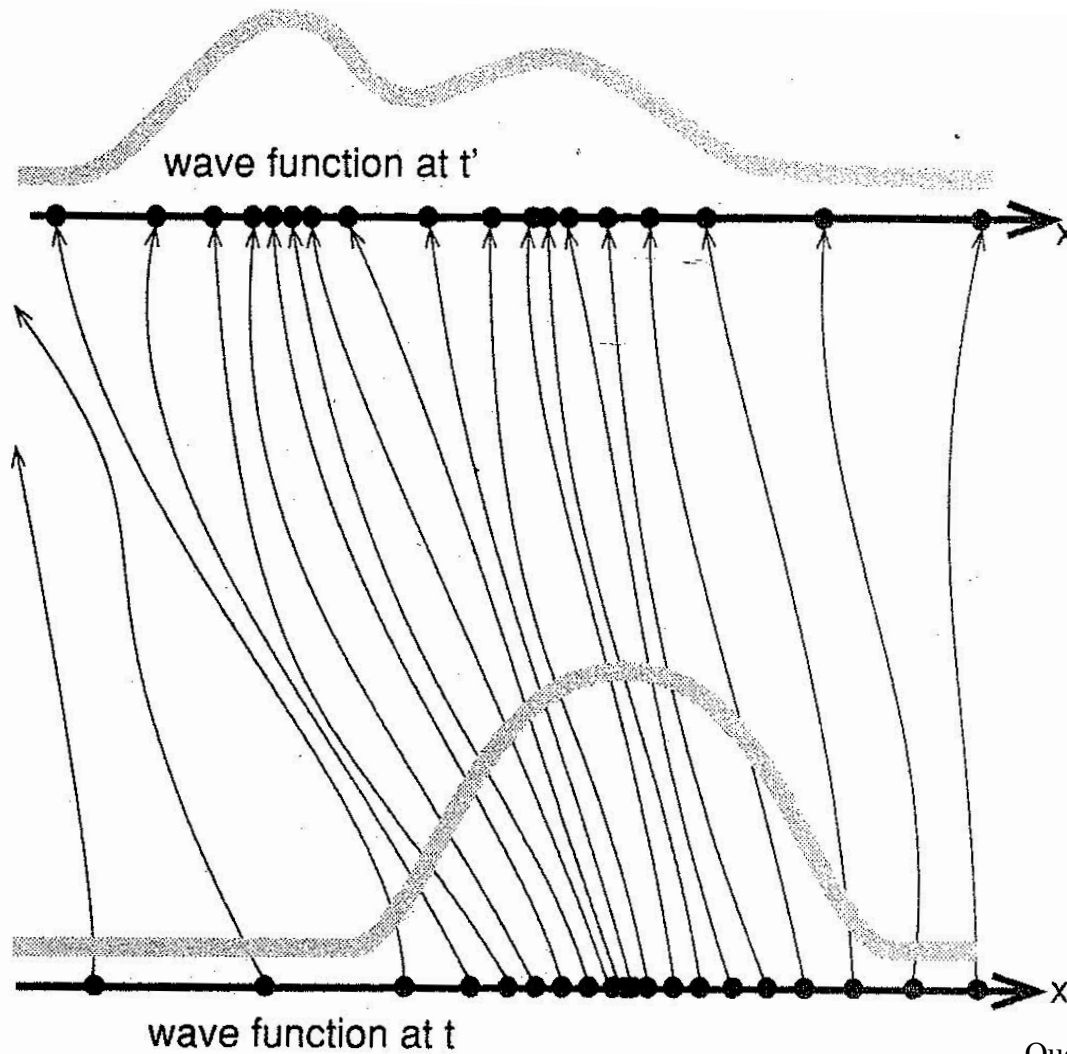
(ii) eine **Bewegungsgleichung („Führungsgleichung“)** für die **Teilchenorte**. Gibt an, wie die Wellenfunktion (deren Zeitentwicklung durch die SG festgelegt ist) die Teilchenbahnen führt.

**=> Neue Theorie!**

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



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



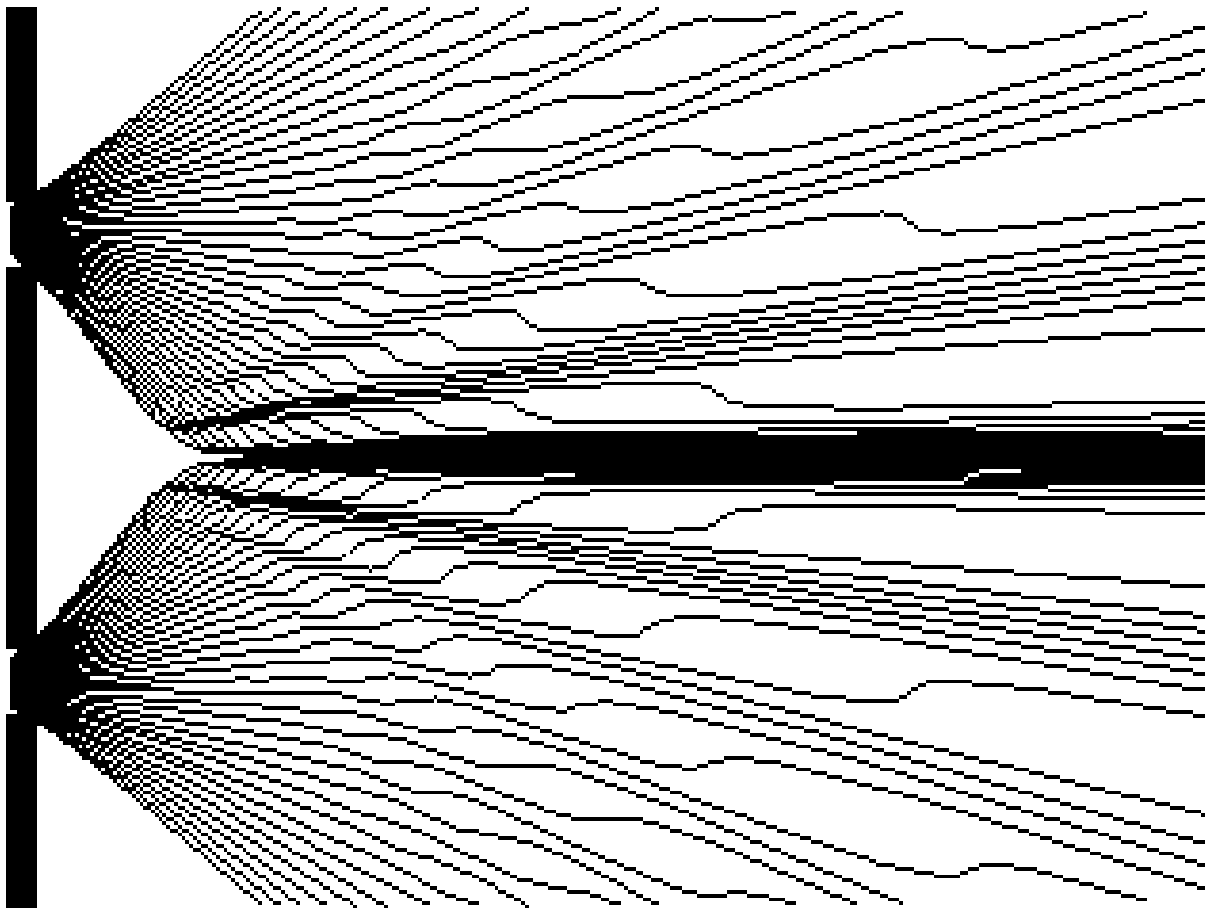
Quelle: Albert 1992, S. 139.

“**Imagine** a gigantic swarm of **possible initial positions**, and imagine the swarm of positions at some particular later time  $t'$ , which that initial swarm [...] evolves into. [...] Imagine, then, that our swarm of possible initial positions happens to be distributed (with respect to the wave function) just as the quantum-mechanical probabilities are [...] Here's a more compact way to put it: What happens (and this is what the **algorithm was explicitly cooked up in order to guarantee** [...]) is that the **particle gets carried along with the flows of the quantum-mechanical probability amplitudes** in the wave function, just like (say) a cork floating on a river.”

Albert 1992, S. 138f.

[Meine Hervorhebungen]

# Doppelspalt-Experiment in Bohmscher Mechanik



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

# Pro Bohmsche QM

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

# Kontra Bohmsche Mechanik

## Gute Argumente gegen Bohm

- 1) Änderung einer erfolgreichen Theorie (QM) nötig. Unattraktiv, falls es auch ohne geht (Everett).
- 2) Die Auszeichnung des Ortes (der Ortsbasis) **steht in Konflikt zur Speziellen Relativitätstheorie**, in der räumliche Abstände keine absolute Bedeutung mehr haben.
- 3) 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.
- 4) 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.)

# 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

Folgende drei Behauptungen scheinen alle zuzutreffen:

- (1) Die Wellenfunktion eines Systems liefert eine vollständige Angabe aller seiner physikalischen Eigenschaften.
- ~~(2) Die Wellenfunktion entwickelt sich immer gemäß der (linearen!) Schrödingergleichung.~~
- (3) Am Ende einer Messung gibt es ein bestimmtes Messergebnis.

**=> GRW (Ghirardi, Rimini und Weber )**

# 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  $\tau$  und  $\alpha$ .**

- **Naturkonstante  $\tau$ :** Bestimmt die Wahrscheinlichkeit eines Kollapses pro Zeiteinheit, abhängig von der Teilchenzahl.
- **Naturkonstante  $\alpha$ :** Bestimmt die Schärfe der Lokalisation eines Kollapses.

=> Neue Theorie!

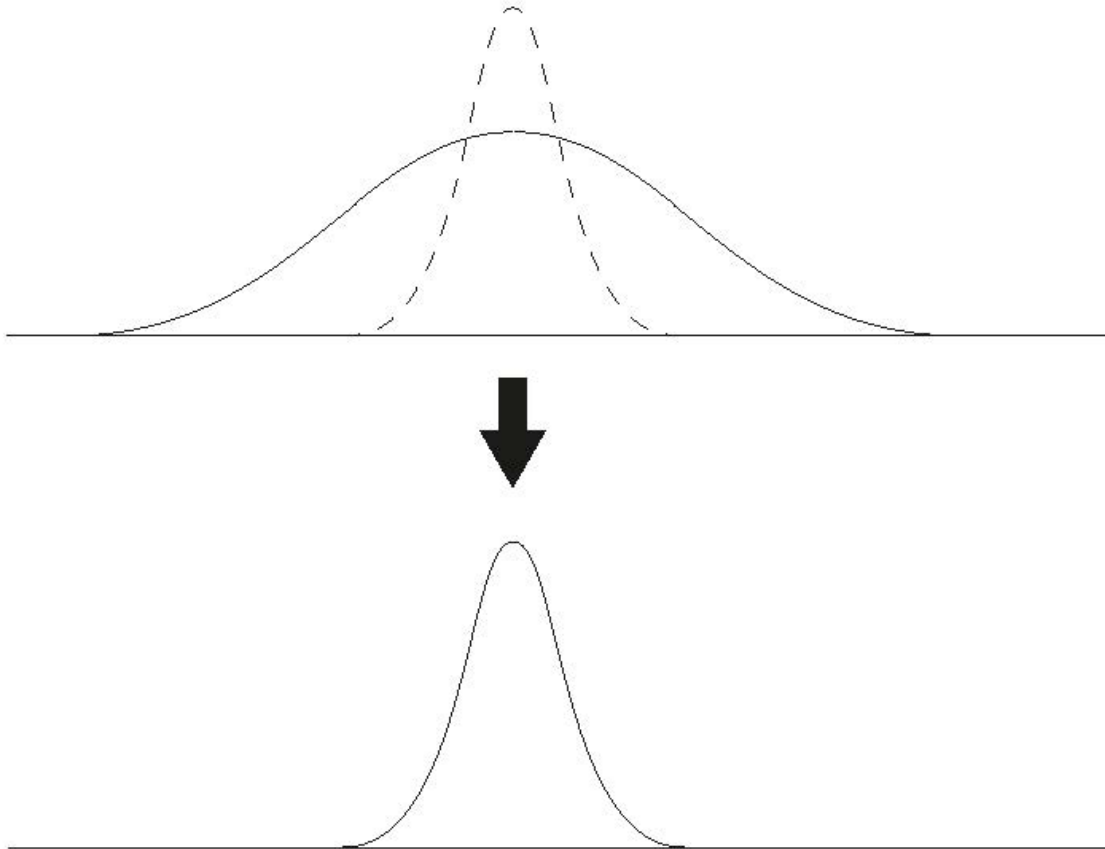
# Ghirardi, Rimini und Weber (GRW)

**Erforderlich für Umsetzung der Grundidee: Einführung der beiden neuen Naturkonstanten  $\tau$  und  $\alpha$ .**

- **Naturkonstante  $\tau$ :** Bestimmt die Wahrscheinlichkeit eines Kollapses pro Zeiteinheit, abhängig von der Teilchenzahl.
- **Naturkonstante  $\alpha$ :** 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) Änderung einer erfolgreichen Theorie (QM) nötig. Unattraktiv, falls es auch ohne geht (Everett).
- 2) Die Einführung der beiden neuen **Naturkonstanten**  $\tau$  und  $\alpha$  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<sub>f</sub>** (flash ontology).

# Kontra GRW (und mögliche Verteidigung)

## 2) **Ontologieproblem:**

Dritte Verteidigungslinie:

Statt **GRW<sub>f</sub>** (*flash ontology*) andere Alternative:

**GRW<sub>m</sub>** (*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

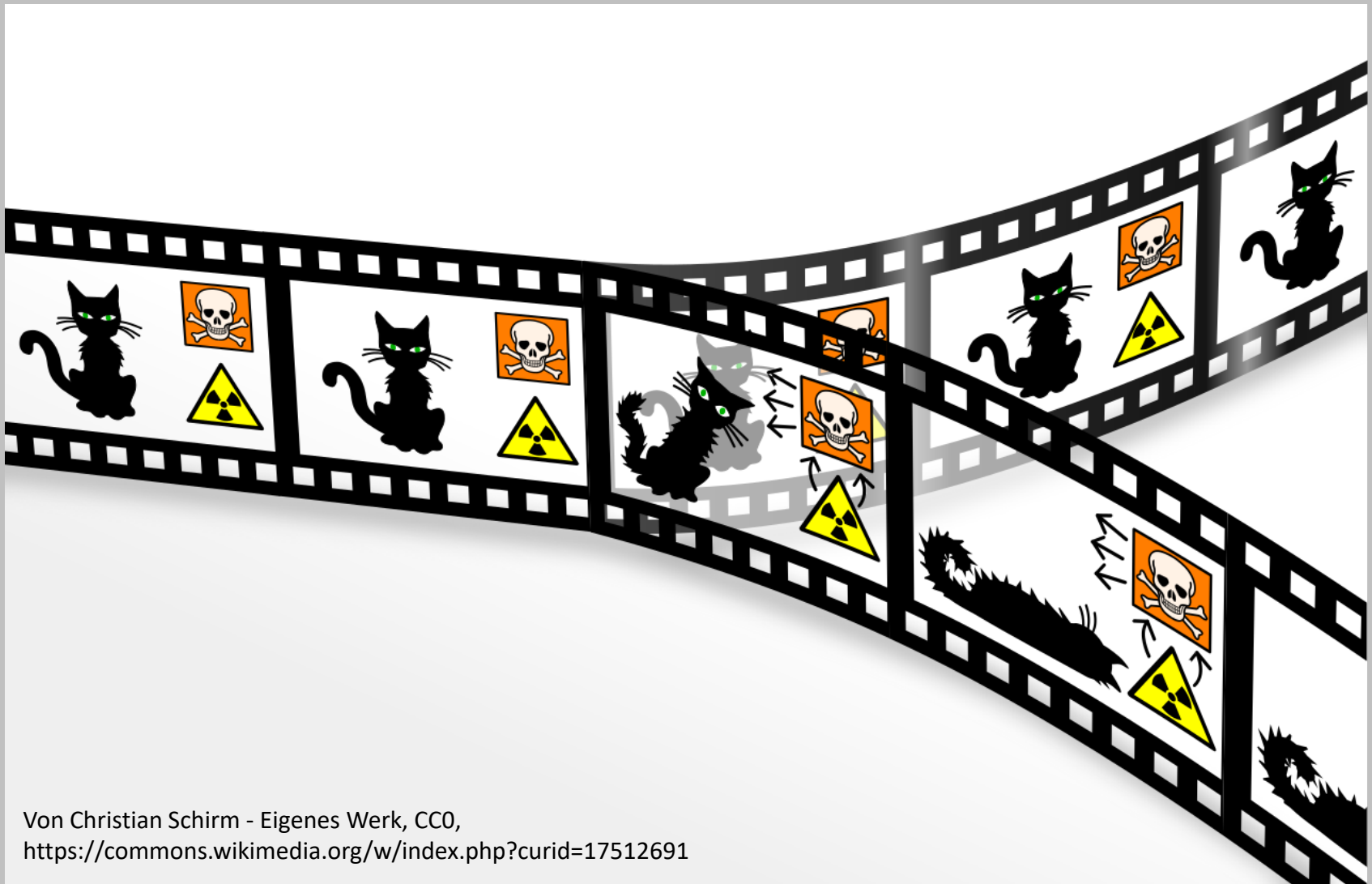
Folgende drei Behauptungen scheinen alle zuzutreffen:

- (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 vorherrschend („Everettian Interpretation“):
  - **Dekohärenz** passiert nur **näherungsweise**, entsprechend auch die Verzweigung in Welten. => Verzweigung kein Phänomen auf fundamentaler ontologischer Ebene, sondern ein emergentes Phänomen auf höherer Ebene.  
=> "emergent multiverse" (Wallace)
  - **„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.

## Gute Argumente gegen die Vielweltentheorie:

- **Problem der Wahrscheinlichkeiten:**
  - Das Kohärenzproblem.
  - Das quantitative Problem.
  - [Lit.: Graeves 2007]

# Bewertungskriterien generell

- **Innere Konsistenz**
- **Äußere Konsistenz (im Verhältnis zu anderen akzeptierten Theorien oder evtl. bzgl. andere Hintergrundannahmen)**
- **Sparsamkeit (Ockhams Rasiermesser)**
  - Ontologie
  - Math. Einfachheit
  - Anzahl neuer Parameter
  - Bruch mit erfolgreichen Theorien (insb. QM selbst!)
- **Fruchtbarkeit**

# 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.