

---

# Die Viele-Welten-Interpretation der Quantenmechanik

---

Sara Krieg

**3. Dezember 2020**

Big Questions Seminar

## Inhalt

- Motivation
- Dekohärenz
- Quantentheorie von Messungen
- Drei Wege aus der Krise
- Historische Interpretation
- Die Viele-Welten-Interpretation
- Die Born-Regel
- Frage der Anwendbarkeit
- Abschließende Bewertung

## Motivation

- QM soweit weg von der Intuition → Wie soll man sie interpretieren?

## Motivation

- QM soweit weg von der Intuition → Wie soll man sie interpretieren?
- Meinungsunterschiede: Beobachtungen beschreiben.

## Motivation

- QM soweit weg von der Intuition → Wie soll man sie interpretieren?
- Meinungsunterschiede: Beobachtungen beschreiben. → Superpositonszustände?

## Dekohärenz

- Beschreibt Verschwinden der lokalen Phasenkohärenz, herbeigeführt durch die Umgebung.
- Beispiel: System beschrieben durch Superposition von  $|\psi_1\rangle$  und  $|\psi_2\rangle$ .

---

<sup>1</sup>Maximilian A. Schlosshauer. Decoherence and the Quantum-To-Classical Transition. Springer, 2007.

<sup>2</sup>H.D. Zeh. „On the interpretation of measurement in quantum theory“. In: Foundations of Physics 1.1 (1970).

## Dekohärenz

- Beschreibt Verschwinden der lokalen Phasenkohärenz, herbeigeführt durch die Umgebung.
- Beispiel: System beschrieben durch Superposition von  $|\psi_1\rangle$  und  $|\psi_2\rangle$ .
- Vor Interaktion mit Umgebung:

$$|\psi\rangle |E_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle) |E_0\rangle$$

mit  $|E_0\rangle$ : Anfangszustand der Umgebung.

---

<sup>1</sup>Maximilian A. Schlosshauer. Decoherence and the Quantum-To-Classical Transition. Springer, 2007.

<sup>2</sup>H.D. Zeh. „On the interpretation of measurement in quantum theory“. In: Foundations of Physics 1.1 (1970).

## Dekohärenz

- Beschreibt Verschwinden der lokalen Phasenkohärenz, herbeigeführt durch die Umgebung.
- Beispiel: System beschrieben durch Superposition von  $|\psi_1\rangle$  und  $|\psi_2\rangle$ .

- Vor Interaktion mit Umgebung:

$$|\psi\rangle |E_0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle) |E_0\rangle$$

mit  $|E_0\rangle$ : Anfangszustand der Umgebung.

- Durch Interaktion mit der Umgebung passiert in der Von-Neumann Schreibweise:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle) |E_0\rangle \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle |E_1\rangle + |\psi_2\rangle |E_2\rangle)$$

<sup>1</sup>Maximilian A. Schlosshauer. Decoherence and the Quantum-To-Classical Transition. Springer, 2007.

<sup>2</sup>H.D. Zeh. „On the interpretation of measurement in quantum theory“. In: Foundations of Physics 1.1 (1970).



## Dekohärenz

- Ausspuren der unbekannten Freiheitsgrade der Umgebung.

---

<sup>3</sup>Maximilian A. Schlosshauer. Decoherence and the Quantum-To-Classical Transition. Springer, 2007.

<sup>4</sup>H.D. Zeh. „On the interpretation of measurement in quantum theory“. In: Foundations of Physics 1.1 (1970).

## Dekohärenz

- Ausspuren der unbekannten Freiheitsgrade der Umgebung.
- Dichtematrix für Beispiel:

$$\rho = \frac{1}{2} \left( |\psi_1\rangle\langle\psi_1| + |\psi_2\rangle\langle\psi_2| + \underbrace{|\psi_1\rangle\langle\psi_2|\langle E_2|E_1\rangle + |\psi_2\rangle\langle\psi_1|\langle E_1|E_2\rangle}_{\text{Interferenzterme}} \right)$$

↔ Beschreibt einen reinen Zustand.

<sup>3</sup>Maximilian A. Schlosshauer. Decoherence and the Quantum-To-Classical Transition. Springer, 2007.

<sup>4</sup>H.D. Zeh. „On the interpretation of measurement in quantum theory“. In: Foundations of Physics 1.1 (1970).

## Dekohärenz

- Ausspuren der unbekannten Freiheitsgrade der Umgebung.
- Dichtematrix für Beispiel:

$$\rho = \frac{1}{2} \left( |\psi_1\rangle\langle\psi_1| + |\psi_2\rangle\langle\psi_2| + \underbrace{|\psi_1\rangle\langle\psi_2|\langle E_2|E_1\rangle + |\psi_2\rangle\langle\psi_1|\langle E_1|E_2\rangle}_{\text{Interferenzterme}} \right)$$

↔ Beschreibt einen reinen Zustand.

- Durch Ausspuren ergibt sich reduzierte Dichtematrix:

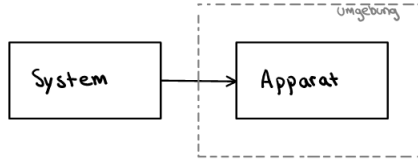
$$\rho = \frac{1}{2} (|\psi_1\rangle\langle\psi_1| + |\psi_2\rangle\langle\psi_2|)$$

↔ Beschreibt einen gemischten Zustand.

<sup>3</sup>Maximilian A. Schlosshauer. Decoherence and the Quantum-To-Classical Transition. Springer, 2007.

<sup>4</sup>H.D. Zeh. „On the interpretation of measurement in quantum theory“. In: Foundations of Physics 1.1 (1970).

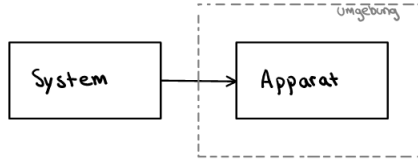
## Quantentheorie von Messungen



Welt = System + Apparat + Umgebung

- System und Apparat sind QM-Objekte:  $|s, A\rangle = |s\rangle |A\rangle$

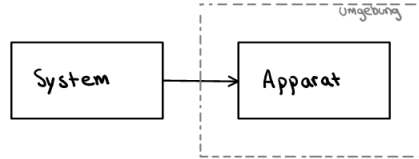
## Quantentheorie von Messungen



Welt = System + Apparat + Umgebung

- System und Apparat sind QM-Objekte:  $|s, A\rangle = |s\rangle |A\rangle$
- Annahme → System und Apparat: isoliert und unabhängig.

## Quantentheorie von Messungen



Welt = System + Apparat + Umgebung

- System und Apparat sind QM-Objekte:  $|s, A\rangle = |s\rangle |A\rangle$
- Annahme  $\rightarrow$  System und Apparat: isoliert und unabhängig.
- $s$  hat diskrete Werte,  $A$  erstreckt sich über Kontinuum.

Welt bei ursprünglichen Augenblick beschrieben durch:

$$|\psi_0\rangle = \underbrace{|\varphi\rangle}_{\text{System}} \underbrace{|\phi\rangle}_{\text{Apparat}}$$

Welt bei ursprünglichen Augenblick beschrieben durch:

$$|\psi_0\rangle = \underbrace{|\varphi\rangle}_{\text{System}} \underbrace{|\phi\rangle}_{\text{Apparat}}$$

- Betrachte Messung: System und Apparat müssen für bestimmte Zeit koppeln.



Welt bei ursprünglichen Augenblick beschrieben durch:

$$|\psi_0\rangle = \underbrace{|\varphi\rangle}_{\text{System}} \underbrace{|\phi\rangle}_{\text{Apparat}}$$

- Betrachte Messung: System und Apparat müssen für bestimmte Zeit koppeln.
- Kombierter Zustand dann verändert. → Beschreibung durch Anwenden eines unitären Operators  $U$ :

$$|\psi_1\rangle = U |\psi_0\rangle$$

Dabei gilt:

$$U |s, A\rangle = |s, A + gs\rangle = |s\rangle |A + gs\rangle$$

$g$ : Kopplungskonstante

Welt bei ursprünglichen Augenblick beschrieben durch:

$$|\psi_0\rangle = \underbrace{|\varphi\rangle}_{\text{System}} \underbrace{|\phi\rangle}_{\text{Apparat}}$$

- Betrachte Messung: System und Apparat müssen für bestimmte Zeit koppeln.
- Kombierter Zustand dann verändert. → Beschreibung durch Anwenden eines unitären Operators  $U$ :

$$|\psi_1\rangle = U |\psi_0\rangle$$

Dabei gilt:

$$U |s, A\rangle = |s, A + gs\rangle = |s\rangle |A + gs\rangle$$

$g$ : Kopplungskonstante

- Messung gespeichert in:  $|A\rangle \rightarrow |A + gs\rangle$

## Ist diese Definition adäquat?

- Wahl von  $\mathcal{U}$  (John von Neumann) wird kritisiert: Nicht allgemein genug.

## Ist diese Definition adäquat?

- Wahl von  $\mathcal{U}$  (John von Neumann) wird kritisiert: Nicht allgemein genug.
- Oft sind Messungen kompliziert → **Aber** Messungen können als Abfolge dieser Interaktionen gesehen werden.

## Ist diese Definition adäquat?

- Wahl von  $U$  (John von Neumann) wird kritisiert: Nicht allgemein genug.
- Oft sind Messungen kompliziert → **Aber** Messungen können als Abfolge dieser Interaktionen gesehen werden.
- Ursprünglich: Kopplung lässt  $s$  unverändert. → Wir gehen nicht davon aus.

## Unendliche Regression

Frage: Was passiert mit  $|\psi_0\rangle = |\varphi\rangle |\phi\rangle$  bei einer solchen Messung?

## Unendliche Regression

Frage: Was passiert mit  $|\psi_0\rangle = |\varphi\rangle |\phi\rangle$  bei einer solchen Messung?

$$|\psi_1\rangle = \sum_s c_s |s\rangle |\phi(s)\rangle \quad \text{mit} \quad c_s = \langle s|\varphi\rangle$$

Dabei gilt

$$|\phi(s)\rangle = \int |A + gs\rangle \phi(A) dA \quad \text{mit} \quad \phi(A) = \langle A|\phi\rangle$$

**Also:** Wellenfunktion des Apparats nimmt Form von Paket an.

## Unendliche Regression

Frage: Was passiert mit  $|\psi_0\rangle = |\varphi\rangle |\phi\rangle$  bei einer solchen Messung?

$$|\psi_1\rangle = \sum_s c_s |s\rangle |\phi(s)\rangle \quad \text{mit} \quad c_s = \langle s|\varphi\rangle$$

Dabei gilt

$$|\phi(s)\rangle = \int |A + gs\rangle \phi(A) dA \quad \text{mit} \quad \phi(A) = \langle A|\phi\rangle$$

**Also:** Wellenfunktion des Apparats nimmt Form von Paket an.  $\rightarrow$  Kopplung an das System.



## Unendliche Regression

Frage: Was passiert mit  $|\psi_0\rangle = |\varphi\rangle |\phi\rangle$  bei einer solchen Messung?

$$|\psi_1\rangle = \sum_s c_s |s\rangle |\phi(s)\rangle \quad \text{mit} \quad c_s = \langle s|\varphi\rangle$$

Dabei gilt

$$|\phi(s)\rangle = \int |A + gs\rangle \phi(A) dA \quad \text{mit} \quad \phi(A) = \langle A|\phi\rangle$$

**Also:** Wellenfunktion des Apparats nimmt Form von Paket an. → Kopplung an das System. → Aufspaltung in Vielzahl von gegenseitig orthogonalen Paketen. → Jedes für einen Wert von  $s$ .

## Unendliche Regression

Hier beginnt Kontroverse!

- Manche Leute: Keine richtige Messung.
- Apparat im Schizophrenem Zustand: Kann sich nicht für Wert von  $s$  entscheiden.
- Klassisch: Kopplung zwischen System und Apparat führt zu festen Wert.

## Unendliche Regression

Hier beginnt Kontroverse!

- Manche Leute: Keine richtige Messung.
- Apparat im Schizophrenem Zustand: Kann sich nicht für Wert von  $s$  entscheiden.
- Klassisch: Kopplung zwischen System und Apparat führt zu festen Wert. → Krise: Wie wird der Apparat dazu gebracht sich zu entscheiden?

## Unendliche Regression

Hier beginnt Kontroverse!

- Manche Leute: Keine richtige Messung.
- Apparat im Schizophrenem Zustand: Kann sich nicht für Wert von  $s$  entscheiden.
- Klassisch: Kopplung zwischen System und Apparat führt zu festen Wert. → Krise: Wie wird der Apparat dazu gebracht sich zu entscheiden?
- Idee: Zweiter Apparat der den ersten anguckt: Wigners Freund.

## Unendliche Regression

Hier beginnt Kontroverse!

- Manche Leute: Keine richtige Messung.
- Apparat im Schizophrenem Zustand: Kann sich nicht für Wert von  $s$  entscheiden.
- Klassisch: Kopplung zwischen System und Apparat führt zu festen Wert. → Krise: Wie wird der Apparat dazu gebracht sich zu entscheiden?
- Idee: Zweiter Apparat der den ersten anguckt: Wigners Freund. → Gleiches Problem.

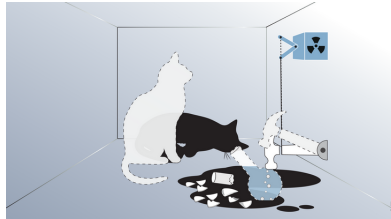
## Unendliche Regression

Hier beginnt Kontroverse!

- Manche Leute: Keine richtige Messung.
- Apparat im Schizophrenem Zustand: Kann sich nicht für Wert von  $s$  entscheiden.
- Klassisch: Kopplung zwischen System und Apparat führt zu festen Wert. → Krise: Wie wird der Apparat dazu gebracht sich zu entscheiden?
- Idee: Zweiter Apparat der den ersten anguckt: Wigners Freund. → Gleiches Problem.
- Kette aus Apparaten, jeder mit dem gleichen Problem. → "Von Neumann's catastrophe of infinite regression".

## Wigners Freund

Zunächst: Schrödingers Katze.



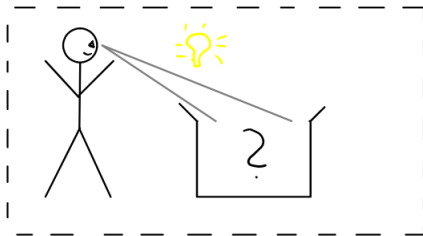
Zustand:

$$|\text{alive}\rangle_c + |\text{dead}\rangle_c$$

<sup>5</sup>Franziska Konitzer. „Schrödingers Katze“. In: Welt der Physik (). URL: <https://www.weltderphysik.de/mediathek/podcast/schroedingers-katze/>.

## Wigners Freund

Wigners Freund guckt in die Box.



Wigners Freund  $\hat{=}$  Apparat.

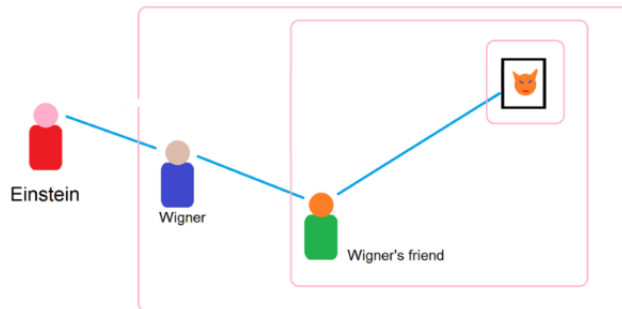
Zustand von Wigners Freund verschränkt mit Schrödingers Katze:

$$|alive\rangle_c |alive\rangle_f + |dead\rangle_c |dead\rangle_f$$



## Wigners Freund

Wigner guckt nach seinem Freund → Usw.



6

<sup>6</sup>Leonard Susskind. „Copenhagen vs Everett, Teleportation, and ER=EPR“. In: Fortschritte der Physik 64.6-7 (Juni 2016), S. 551–564. doi: [10.1002/prop.201600036](https://doi.org/10.1002/prop.201600036). arXiv: [1604.02589](https://arxiv.org/abs/1604.02589) [hep-th].

## Drei Wege aus der Krise

- Änderung der Theorie:

## Drei Wege aus der Krise

- Änderung der Theorie:
  - Eintritt der Messsignals in Bewusstsein → Entscheidung, Kette bricht.

## Drei Wege aus der Krise

- Änderung der Theorie:
  - Eintritt der Messsignals in Bewusstsein → Entscheidung, Kette bricht.
  - Änderung des Fundaments → "hidden variables".

## Drei Wege aus der Krise

- Änderung der Theorie:
  - Eintritt der Messsignals in Bewusstsein → Entscheidung, Kette bricht.
  - Änderung des Fundaments → "hidden variables".
  - Physikalischer Kollaps.
- Die Kopenhagener Interpretation.
- Die Viele-Welten-Interpretation.

## Historische Interpretation

Auch "Erfinder" der QM beschäftigten sich mit der Interpretation:

## Historische Interpretation

Auch "Erfinder" der QM beschäftigten sich mit der Interpretation:

- Heisenberg:
  - Gedankenexperimente. Leitfrage: "Können wir es durch den Formalismus beschreiben?"
  - Experimente, bei denen "ja" Antwort → Mit von Natur zugelassenen Menge identisch.

## Historische Interpretation

Auch "Erfinder" der QM beschäftigten sich mit der Interpretation:

- Heisenberg:
  - Gedankenexperimente. Leitfrage: "Können wir es durch den Formalismus beschreiben?"
  - Experimente, bei denen "ja" Antwort → Mit von Natur zugelassenen Menge identisch.
- Bohr: QM hat ohne Klassische Physik keine Bedeutung.



## Historische Interpretation

Auch "Erfinder" der QM beschäftigten sich mit der Interpretation:

- Heisenberg:
  - Gedankenexperimente. Leitfrage: "Können wir es durch den Formalismus beschreiben?"
  - Experimente, bei denen "ja" Antwort → Mit von Natur zugelassenen Menge identisch.
- Bohr: QM hat ohne Klassische Physik keine Bedeutung.

→ Mischung aus Physik und Metaphysik: Quantenreich als Geisterwelt, deren Symbole eher Potentialität als Realität repräsentieren.

## Historische Interpretation

Auch "Erfinder" der QM beschäftigten sich mit der Interpretation:

- Heisenberg:
  - Gedankenexperimente. Leitfrage: "Können wir es durch den Formalismus beschreiben?"
  - Experimente, bei denen "ja" Antwort → Mit von Natur zugelassenen Menge identisch.
- Bohr: QM hat ohne Klassische Physik keine Bedeutung.

→ Mischung aus Physik und Metaphysik: Quantenreich als Geisterwelt, deren Symbole eher Potentialität als Realität repräsentieren.

→ Die Quantenphysik liefert nur Wahrscheinlichkeiten für die klassische Welt.

## Die Viele-Welten-Interpretation

Sicht aus 1925 nochmal einnehmen.

## Die Viele-Welten-Interpretation

Sicht aus 1925 nochmal einnehmen. Dabei:

- Dem Mathematischen Formalismus der QM nichts hinzufügen.

## Die Viele-Welten-Interpretation

Sicht aus 1925 nochmal einnehmen. Dabei:

- Dem Mathematischen Formalismus der QM nichts hinzufügen.
- Existenz eines separaten klassischen Reiches leugnen.

## Die Viele-Welten-Interpretation

Sicht aus 1925 nochmal einnehmen. Dabei:

- Dem Mathematischen Formalismus der QM nichts hinzufügen.
- Existenz eines separaten klassischen Reiches leugnen.
- Kollabiert der Zustandsvektor nicht.

## Die Viele-Welten-Interpretation

Sicht aus 1925 nochmal einnehmen. Dabei:

- Dem Mathematischen Formalismus der QM nichts hinzufügen.
- Existenz eines separaten klassischen Reiches leugnen.
- Kollabiert der Zustandsvektor nicht.

→ Dritter Weg aus der Krise mit diesen Annahmen!

## Die Viele-Welten-Interpretation

Everett postulierte:

- Welt wird durch mathematische Objekte dargestellt:
  - Vektor im Hilbert-Raum.



## Die Viele-Welten-Interpretation

Everett postulierte:

- Welt wird durch mathematische Objekte dargestellt:
  - Vektor im Hilbert-Raum.
  - Satz dynamischer Gleichungen für Satz von Operatoren auf Hilbert-Raum.

## Die Viele-Welten-Interpretation

Everett postulierte:

- Welt wird durch mathematische Objekte dargestellt:
  - Vektor im Hilbert-Raum.
  - Satz dynamischer Gleichungen für Satz von Operatoren auf Hilbert-Raum.
  - Satz Kommutator-Relationen für diese Operatoren.

## Die Viele-Welten-Interpretation

Everett postulierte:

- Welt wird durch mathematische Objekte dargestellt:
  - Vektor im Hilbert-Raum.
  - Satz dynamischer Gleichungen für Satz von Operatoren auf Hilbert-Raum.
  - Satz Kommutator-Relationen für diese Operatoren.
- Ein weiteres Postulat nötig: Die Welt muss in System und Apparat zerlegbar sein.



<sup>7</sup>Bryce S. DeWitt. „Quantum mechanics and reality“. In: *Physics today* 23.9 (1970), S. 30–35. DOI: [10.1063/1.3022331](https://doi.org/10.1063/1.3022331).

## Die Viele-Welten-Interpretation

Auf Basis dieser Posulate kann gezeigt werden:

Der mathematische Formalismus der Quantentheorie kann eine eigene Interpretation liefern.

## Die Viele-Welten-Interpretation

Auf Basis dieser Posulate kann gezeigt werden:

Der mathematische Formalismus der Quantentheorie kann eine eigene Interpretation liefern.

Dabei ergeben sich Fragen:

- Wie kann die konventionelle Wahrscheinlichkeitsinterpretation aus Formalismus selbst hervorgehen?

## Die Viele-Welten-Interpretation

Auf Basis dieser Posulate kann gezeigt werden:

Der mathematische Formalismus der Quantentheorie kann eine eigene Interpretation liefern.

Dabei ergeben sich Fragen:

- Wie kann die konventionelle Wahrscheinlichkeitsinterpretation aus Formalismus selbst hervorgehen?
- Verbindung zur Realität, wenn Zustandsvektor niemals kollabiert?

## Born-Regel

### Die Born-Regel

Die Wahrscheinlichkeit ein Teilchen mit der Wellenfunktion  $\psi(r, t)$  zur Zeit  $t$  am Ort  $r$  zu finden:

$$P(r, t) = |\psi(r, t)|^2$$



## Born-Regel

- Prinzip der Gleichgültigkeit: Wenn nichts ein Ergebnis begünstigt, sind alle Ergebnisse gleich wahrscheinlich.

---

<sup>8</sup>Wojciech H. Zurek. „Quantum Darwinism, classical reality, and the randomness of quantum jumps“. In: *Physics Today* 67:10 (Okt. 2014), S. 44–50. doi: [10.1063/PT.3.2550](https://doi.org/10.1063/PT.3.2550) [arXiv: 1412.5206](https://arxiv.org/abs/1412.5206) [quant-ph].

## Born-Regel

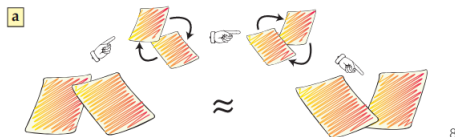
- Prinzip der Gleichgültigkeit: Wenn nichts ein Ergebnis begünstigt, sind alle Ergebnisse gleich wahrscheinlich.
- Beispiel: Kartenspiel. Wahrscheinlichkeit Pik zu ziehen:  $\frac{1}{4}$ .

---

<sup>8</sup>Wojciech H. Zurek. „Quantum Darwinism, classical reality, and the randomness of quantum jumps“. In: *Physics Today* 67:10 (Okt. 2014), S. 44–50. doi: 10.1063/PT.3.2550 arXiv: 1412.5206 [quant-ph].

## Born-Regel

- Prinzip der Gleichgültigkeit: Wenn nichts ein Ergebnis begünstigt, sind alle Ergebnisse gleich wahrscheinlich.
- Beispiel: Kartenspiel. Wahrscheinlichkeit Pik zu ziehen:  $\frac{1}{4}$ . → Ändert sich nicht beim Tausch von Karten.

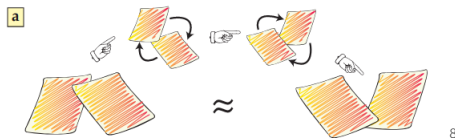


8

<sup>8</sup>Wojciech H. Zurek. „Quantum Darwinism, classical reality, and the randomness of quantum jumps“. In: *Physics Today* 67:10 (Okt. 2014), S. 44–50. DOI: 10.1063/PT.3.2550 arXiv: 1412.5206 [quant-ph].

## Born-Regel

- Prinzip der Gleichgültigkeit: Wenn nichts ein Ergebnis begünstigt, sind alle Ergebnisse gleich wahrscheinlich.
- Beispiel: Kartenspiel. Wahrscheinlichkeit Pik zu ziehen:  $\frac{1}{4}$ . → Ändert sich nicht beim Tausch von Karten.



→ Gleichgültigkeit gegenüber Tausch.

<sup>8</sup>Wojciech H. Zurek. „Quantum Darwinism, classical reality, and the randomness of quantum jumps“. In: *Physics Today* 67:10 (Okt. 2014), S. 44–50. DOI: 10.1063/PT.3.2550 arXiv: 1412.5206 [quant-ph].

## Born-Regel

- Symmetrierversuch beruht auf subjektiver Unwissenheit.

---

<sup>9</sup>Wojciech H. Zurek. „Quantum Darwinism, classical reality, and the randomness of quantum jumps“. In: *Physics Today* 67:10 (Okt. 2014), S. 44–50. doi: 10.1063/PT.3.2550 arXiv: 1412.5206 [quant-ph].

## Born-Regel

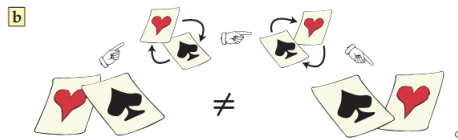
- Symmetrierversuch beruht auf subjektiver Unwissenheit.
- Karten werden umgedreht →

---

<sup>9</sup>Wojciech H. Zurek. „Quantum Darwinism, classical reality, and the randomness of quantum jumps“. In: *Physics Today* 67:10 (Okt. 2014), S. 44–50. doi: 10.1063/PT.3.2550 arXiv: 1412.5206 [quant-ph].

## Born-Regel

- Symmetrierversuch beruht auf subjektiver Unwissenheit.
- Karten werden umgedreht → Es ist klar, ob Pik oder nicht.

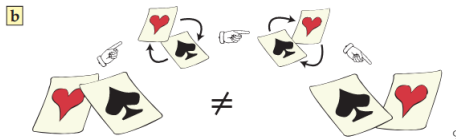


9

<sup>9</sup>Wojciech H. Zurek. „Quantum Darwinism, classical reality, and the randomness of quantum jumps“. In: *Physics Today* 67:10 (Okt. 2014), S. 44–50. DOI: 10.1063/PT.3.2550 [arXiv: 1412.5206 \[quant-ph\]](https://arxiv.org/abs/1412.5206).

## Born-Regel

- Symmetrierversuch beruht auf subjektiver Unwissenheit.
- Karten werden umgedreht → Es ist klar, ob Pik oder nicht.



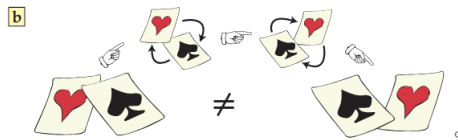
- Klassisch: Keine objektive Grundlage für Symmetrie. →

<sup>9</sup>Wojciech H. Zurek. „Quantum Darwinism, classical reality, and the randomness of quantum jumps“. In: *Physics Today* 67:10 (Okt. 2014), S. 44–50. DOI: 10.1063/PT.3.2550 [arXiv: 1412.5206 \[quant-ph\]](#).



## Born-Regel

- Symmetrierversuch beruht auf subjektiver Unwissenheit.
- Karten werden umgedreht → Es ist klar, ob Pik oder nicht.



- Klassisch: Keine objektive Grundlage für Symmetrie. → Also für objektiv gleiche Wahrscheinlichkeiten.

<sup>9</sup>Wojciech H. Zurek. „Quantum Darwinism, classical reality, and the randomness of quantum jumps“. In: *Physics Today* 67:10 (Okt. 2014), S. 44–50. DOI: 10.1063/PT.3.2550 arXiv: 1412.5206 [quant-ph].

## Born-Regel

- Quantenphysik lässt keinen Platz für subjektive Ignoranz.

## Born-Regel

- Quantenphysik lässt keinen Platz für subjektive Ignoranz.
- System startet als:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle)$$

## Born-Regel

- Quantenphysik lässt keinen Platz für subjektive Ignoranz.
- System startet als:

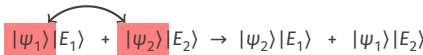
$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle + |\psi_2\rangle)$$

- Apparat führt zu:

$$\frac{1}{\sqrt{2}} (|\psi_1\rangle |E_1\rangle + |\psi_2\rangle |E_2\rangle)$$

## Born-Regel

- Unitäre Vertauschung  $|E_1\rangle |E_2\rangle + |E_2\rangle |E_1\rangle$  führt zu:

$$|\psi_1\rangle |E_1\rangle + |\psi_2\rangle |E_2\rangle \rightarrow |\psi_2\rangle |E_1\rangle + |\psi_1\rangle |E_2\rangle$$


## Born-Regel

- Unitäre Vertauschung  $|E_1\rangle |E_2\rangle + |E_2\rangle |E_1\rangle$  führt zu:

$$|\psi_1\rangle |E_1\rangle + |\psi_2\rangle |E_2\rangle \rightarrow |\psi_2\rangle |E_1\rangle + |\psi_1\rangle |E_2\rangle$$

- Vor dem Tausch:  $|\psi_i\rangle$  so wahrscheinlich wie  $|E_i\rangle$ .

## Born-Regel


- Unitäre Vertauschung  $|E_1\rangle |E_2\rangle + |E_2\rangle |E_1\rangle$  führt zu:

$$|\psi_1\rangle |E_1\rangle + |\psi_2\rangle |E_2\rangle \rightarrow |\psi_2\rangle |E_1\rangle + |\psi_1\rangle |E_2\rangle$$

- Vor dem Tausch:  $|\psi_i\rangle$  so wahrscheinlich wie  $|E_i\rangle$ .
- Danach:  $|\psi_1\rangle$  so wahrscheinlich wie  $|E_2\rangle$ .

## Born-Regel

- Um Gleichgültigkeit zu zeigen, noch ein Tausch:


$$|\psi_2\rangle |E_1\rangle + |\psi_1\rangle |E_2\rangle \rightarrow |\psi_2\rangle |E_2\rangle + |\psi_1\rangle |E_1\rangle$$


- Alle Vorhersagen von  $s$  wie sie ursprünglich waren.



## Born-Regel

- Um Gleichgültigkeit zu zeigen, noch ein Tausch:

$$|\psi_2\rangle|E_1\rangle + |\psi_1\rangle|E_2\rangle \rightarrow |\psi_2\rangle|E_2\rangle + |\psi_1\rangle|E_1\rangle$$


- Alle Vorhersagen von  $s$  wie sie ursprünglich waren.
- Wahrscheinlichkeiten von  $|\psi_1\rangle$  und  $|\psi_2\rangle$  vertauscht, aber unverändert.

## Born-Regel

- Um Gleichgültigkeit zu zeigen, noch ein Tausch:

$$|\psi_2\rangle|E_1\rangle + |\psi_1\rangle|E_2\rangle \rightarrow |\psi_2\rangle|E_2\rangle + |\psi_1\rangle|E_1\rangle$$

- Alle Vorhersagen von  $s$  wie sie ursprünglich waren.
- Wahrscheinlichkeiten von  $|\psi_1\rangle$  und  $|\psi_2\rangle$  vertauscht, aber unverändert.  $\rightarrow$  Wahrscheinlichkeiten  $\frac{1}{2}$ .

## Born-Regel

- Anstelle von subjektiver Ignoranz

---

<sup>10</sup>Wojciech H. Zurek. „Quantum Darwinism, classical reality, and the randomness of quantum jumps“. In: *Physics Today* 67:10 (Okt. 2014), S. 44–50. doi: [10.1063/PT.3.2550](https://doi.org/10.1063/PT.3.2550) arXiv: [1412.5206](https://arxiv.org/abs/1412.5206) [quant-ph].

## Born-Regel

- Anstelle von subjektiver Ignoranz → Objektive Symmetrie der Verschänkung.

---

<sup>10</sup>Wojciech H. Zurek. „Quantum Darwinism, classical reality, and the randomness of quantum jumps“. In: *Physics Today* 67:10 (Okt. 2014), S. 44–50. doi: [10.1063/PT.3.2550](https://doi.org/10.1063/PT.3.2550) arXiv: [1412.5206](https://arxiv.org/abs/1412.5206) [quant-ph].

## Born-Regel

- Anstelle von subjektiver Ignoranz → Objektive Symmetrie der Verschänkung.

**c**

$$|\spadesuit\rangle_S |\diamondsuit\rangle_A + |\heartsuit\rangle_S |\clubsuit\rangle_A$$

$$|\heartsuit\rangle_S |\diamondsuit\rangle_A + |\spadesuit\rangle_S |\clubsuit\rangle_A = |\spadesuit\rangle_S |\clubsuit\rangle_A + |\heartsuit\rangle_S |\diamondsuit\rangle_A$$

10

<sup>10</sup>Wojciech H. Zurek. „Quantum Darwinism, classical reality, and the randomness of quantum jumps“. In: *Physics Today* 67:10 (Okt. 2014), S. 44–50. DOI: 10.1063/PT.3.2550 arXiv: 1412.5206 [quant-ph].

## Zweite Frage

Ein spaltendes Universum!

- $10^{100+}$  Kopien von sich selbst → spalten sich kontinuierlich weiter → Schwierig zu verstehen.

---

<sup>11</sup>Max Tegmark und John Archibald Wheeler. „100 Years of the Quantum“. In: arXiv e-prints, quant-ph/0101077 (Jan. 2001), quant-ph/0101077. arXiv: [quant-ph/0101077 \[quant-ph\]](#).

## Zweite Frage

Ein spaltendes Universum!

- $10^{100+}$  Kopien von sich selbst → spalten sich kontinuierlich weiter → Schwierig zu verstehen.
- Wir teilen uns nicht wirklich → Nicht in der Lage eigene Spaltung zu erkennen.

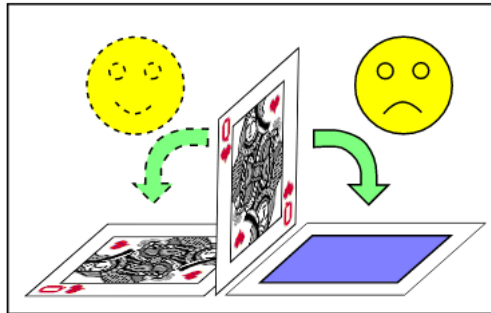
---

<sup>11</sup>Max Tegmark und John Archibald Wheeler. „100 Years of the Quantum“. In: arXiv e-prints, quant-ph/0101077 (Jan. 2001), quant-ph/0101077. arXiv: [quant-ph/0101077](#) [quant-ph].

## Zweite Frage

Ein spaltendes Universum!

- $10^{100+}$  Kopien von sich selbst → spalten sich kontinuierlich weiter → Schwierig zu verstehen.
- Wir teilen uns nicht wirklich → Nicht in der Lage eigene Spaltung zu erkennen.
- Dekohärenz: Information der Aufspaltung in Korrelation mit Freiheitsgraden in Umgebung abgewandert.



11

<sup>11</sup>Max Tegmark und John Archibald Wheeler. „100 Years of the Quantum“. In: arXiv e-prints, quant-ph/0101077 (Jan. 2001), quant-ph/0101077. arXiv: quant-ph/0101077 [quant-ph].



## Maverick-Welten

- Einführung eines nicht physischen Wahrscheinlichkeitkonzeptes: Messung eines Unterraums im Hilbert-Raum. → Konzept ist der exp. Physik unbekannt.

## Maverick-Welten

- Einführung eines nicht physischen Wahrscheinlichkeitskonzeptes: Messung eines Unterraums im Hilbert-Raum. → Konzept ist der exp. Physik unbekannt.
- Viele-Welten-Interpretation schließt dabei kein Element der Superposition aus. → Auch nicht die, in denen alles "schief" geht.

## Maverick-Welten

- Einführung eines nicht physischen Wahrscheinlichkeitskonzeptes: Messung eines Unterraums im Hilbert-Raum. → Konzept ist der exp. Physik unbekannt.
- Viele-Welten-Interpretation schließt dabei kein Element der Superposition aus. → Auch nicht die, in denen alles "schief" geht.
- Wenn Anfangsbedingungen stimmen würden: Im Universum könnte Wärme vom Kalten zum Warmen fließen. → Maverick Welt.
- Kann prinzipiell auch in jedem einzelnen Universum vorkommen.

## Frage der Praktikabilität

- Wieso kann ich soviel oder sowenig wie ich möchte in meinen Zustandsvektor aufnehmen?
- Wieso muss ich nicht mit dem Zustandsvektor des Universums arbeiten?

## Frage der Praktikabilität

- Wieso kann ich soviel oder sowenig wie ich möchte in meinen Zustandsvektor aufnehmen?
- Wieso muss ich nicht mit dem Zustandsvektor des Universums arbeiten?

→ Antwort in statistischen Implikationen.

## Abschließende Bewertung

- Experimentelle Vorhersagen von Viele-Welt und Kopenhagener-Interpretation sind identisch.

## Abschließende Bewertung

- Experimentelle Vorhersagen von Viele-Welt und Kopenhagener-Interpretation sind identisch.
  - Keine experimentelle Bestätigung möglich.

## Abschließende Bewertung

- Experimentelle Vorhersagen von Viele-Welt und Kopenhagener-Interpretation sind identisch.
  - Keine experimentelle Bestätigung möglich.
- Entscheidung zwischen Interpretationen vielleicht auf anderer Basis:



## Abschließende Bewertung

- Experimentelle Vorhersagen von Viele-Welt und Kopenhagener-Interpretation sind identisch.
  - Keine experimentelle Bestätigung möglich.
- Entscheidung zwischen Interpretationen vielleicht auf anderer Basis:
  - Beim Urknall: Universelle Wellenfunktion kann Gesamtkohärenz besessen haben.
  - Kann spürbare Auswirkungen auf die Kosmologie haben.

## Abschließende Bewertung

- Experimentelle Vorhersagen von Viele-Welt und Kopenhagener-Interpretation sind identisch.
  - Keine experimentelle Bestätigung möglich.
- Entscheidung zwischen Interpretationen vielleicht auf anderer Basis:
  - Beim Urknall: Universelle Wellenfunktion kann Gesamtkohärenz besessen haben.
  - Kann spürbare Auswirkungen auf die Kosmologie haben.

## Mögliche Auswirkungen einer anfänglichen Gesamtkohärenz

- Es gibt keine klaren Vorhersagen.

---

<sup>12</sup>Heinrich Päs. „Physics Beyond the Multiverse: Naturalness and the Quest for a Fundamental Theory“. In: *Foundations of Physics* 49.9 (Sep. 2019), S. 1051–1065. DOI: [10.1007/s10701-019-00247-1](https://doi.org/10.1007/s10701-019-00247-1). arXiv: [1809.06326](https://arxiv.org/abs/1809.06326) [physics.hist-ph].

## Mögliche Auswirkungen einer anfänglichen Gesamtkohärenz

- Es gibt keine klaren Vorhersagen.
- Eventuell könnte es scheinbare Zufälligkeiten in der Kosmologie erklären:<sup>12</sup>

---

<sup>12</sup>Heinrich Päs. „Physics Beyond the Multiverse: Naturalness and the Quest for a Fundamental Theory“. In: *Foundations of Physics* 49.9 (Sep. 2019), S. 1051–1065. DOI: [10.1007/s10701-019-00247-1](https://doi.org/10.1007/s10701-019-00247-1). arXiv: [1809.06326](https://arxiv.org/abs/1809.06326) [physics.hist-ph].

## Mögliche Auswirkungen einer anfänglichen Gesamtkohärenz

- Es gibt keine klaren Vorhersagen.
- Eventuell könnte es scheinbare Zufälligkeiten in der Kosmologie erklären:<sup>12</sup>
  - Hierarchieproblem.

---

<sup>12</sup>Heinrich Päs. „Physics Beyond the Multiverse: Naturalness and the Quest for a Fundamental Theory“. In: *Foundations of Physics* 49.9 (Sep. 2019), S. 1051–1065. DOI: [10.1007/s10701-019-00247-1](https://doi.org/10.1007/s10701-019-00247-1). arXiv: [1809.06326](https://arxiv.org/abs/1809.06326) [physics.hist-ph].

## Mögliche Auswirkungen einer anfänglichen Gesamtkohärenz

- Es gibt keine klaren Vorhersagen.
- Eventuell könnte es scheinbare Zufälligkeiten in der Kosmologie erklären:<sup>12</sup>
  - Hierarchieproblem.
  - Dunkle Energie.

---

<sup>12</sup>Heinrich Päs. „Physics Beyond the Multiverse: Naturalness and the Quest for a Fundamental Theory“. In: *Foundations of Physics* 49.9 (Sep. 2019), S. 1051–1065. DOI: [10.1007/s10701-019-00247-1](https://doi.org/10.1007/s10701-019-00247-1). arXiv: [1809.06326](https://arxiv.org/abs/1809.06326) [physics.hist-ph].

## Mögliche Auswirkungen einer anfänglichen Gesamtkohärenz

- Es gibt keine klaren Vorhersagen.
- Eventuell könnte es scheinbare Zufälligkeiten in der Kosmologie erklären:<sup>12</sup>
  - Hierarchieproblem.
  - Dunkle Energie.
  - Strong CP-Problem.

---

<sup>12</sup>Heinrich Päs. „Physics Beyond the Multiverse: Naturalness and the Quest for a Fundamental Theory“. In: *Foundations of Physics* 49.9 (Sep. 2019), S. 1051–1065. DOI: [10.1007/s10701-019-00247-1](https://doi.org/10.1007/s10701-019-00247-1). arXiv: [1809.06326](https://arxiv.org/abs/1809.06326) [physics.hist-ph].

## Abschließende Bewertung









- Die meisten grundlegenden Fragen der Messtheorie werden in Fokus gerückt.



## Abschließende Bewertung

- Die meisten grundlegenden Fragen der Messtheorie werden in Fokus gerückt.
- Wichtiger Beitrag zur Wissenschaftsphilosophie: Direkte Entsprechung zwischen Formalismus und Realität.

## Bibliography

-  Bryce S. DeWitt. „Quantum mechanics and reality“. In: *Physics today* 23.9 (1970), S. 30–35. DOI: [10.1063/1.3022331](https://doi.org/10.1063/1.3022331).
-  Franziska Konitzer. „Schrödingers Katze“. In: *Welt der Physik* (). URL: <https://www.weltderphysik.de/mediathek/podcast/schroedingers-katze/>.
-  Heinrich Päs. „Physics Beyond the Multiverse: Naturalness and the Quest for a Fundamental Theory“. In: *Foundations of Physics* 49.9 (Sep. 2019), S. 1051–1065. DOI: [10.1007/s10701-019-00247-1](https://doi.org/10.1007/s10701-019-00247-1). arXiv: [1809.06326](https://arxiv.org/abs/1809.06326) [physics.hist-ph].
-  Maximilian A. Schlosshauer. *Decoherence and the Quantum-To-Classical Transition*. Springer, 2007.
-  Leonard Susskind. „Copenhagen vs Everett, Teleportation, and ER=EPR“. In: *Fortschritte der Physik* 64.6-7 (Juni 2016), S. 551–564. DOI: [10.1002/prop.201600036](https://doi.org/10.1002/prop.201600036). arXiv: [1604.02589](https://arxiv.org/abs/1604.02589) [hep-th].
-  Max Tegmark und John Archibald Wheeler. „100 Years of the Quantum“. In: *arXiv e-prints*, quant-ph/0101077 (Jan. 2001), quant-ph/0101077. arXiv: [quant-ph/0101077](https://arxiv.org/abs/quant-ph/0101077) [quant-ph].
-  H.D. Zeh. „On the interpretation of measurement in quantum theory“. In: *Foundations of Physics* 1.1 (1970).
-  Wojciech H. Zurek. „Quantum Darwinism, classical reality, and the randomness of quantum jumps“. In: *Physics Today* 67.10 (Okt. 2014), S. 44–50. DOI: [10.1063/PT.3.2550](https://doi.org/10.1063/PT.3.2550). arXiv: [1412.5206](https://arxiv.org/abs/1412.5206) [quant-ph].