

Quantentheorie und Realität

Christoph Leuenberger

24. März 2026

We may be in the Universe as dogs and cats are in our libraries, seeing the books and hearing the conversation, but having no inkling of the meaning of it all.

William James, *A Pluralistic Universe*

Tempelgarten der Philosophie (*Tetsugaku-do*)



Schrein der vier Weltweisen

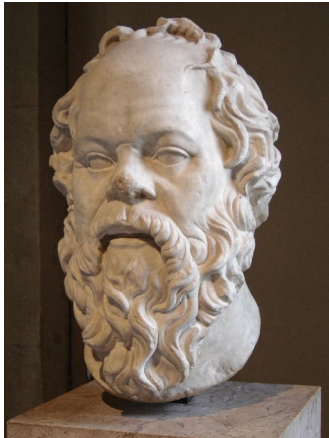


K'ung-fu-tzu, ca. 550 - 480 v. Chr.

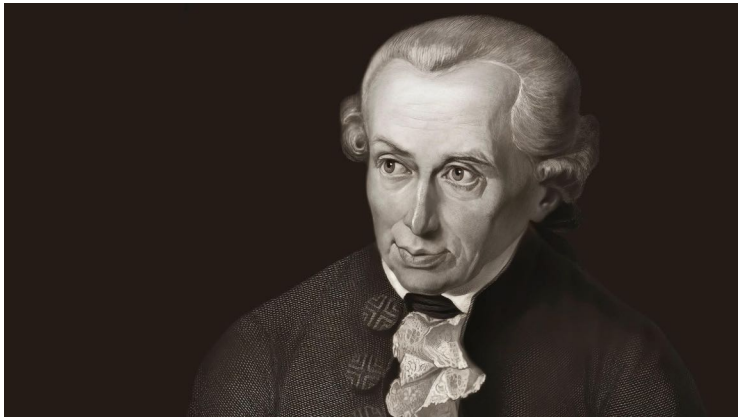
Buddha



Siddharta Gautama, um 500. v. Chr.



Sokrates 469 – 399 v. Chr.



Immanuel Kant 1724 – 1804

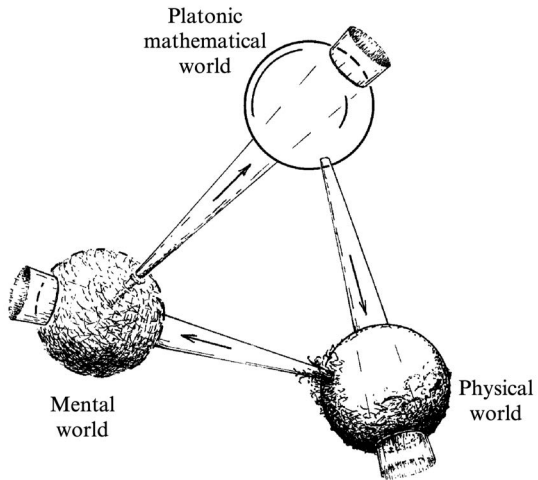


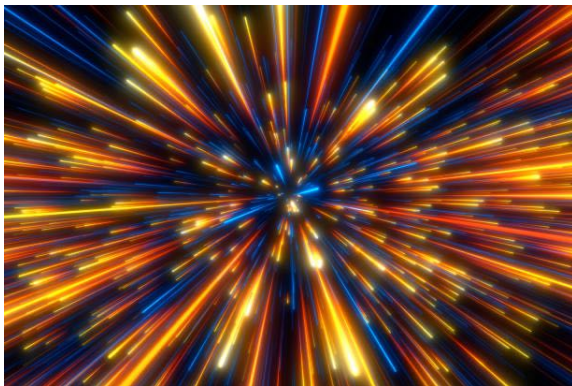
Primäre Qualitäten: objektiv, unabhängig von der Wahrnehmung.

Beispiel: Ausdehnung, Gewicht der Rose

Sekundäre Qualitäten: subjektiv, abhängig von der Wahrnehmung.

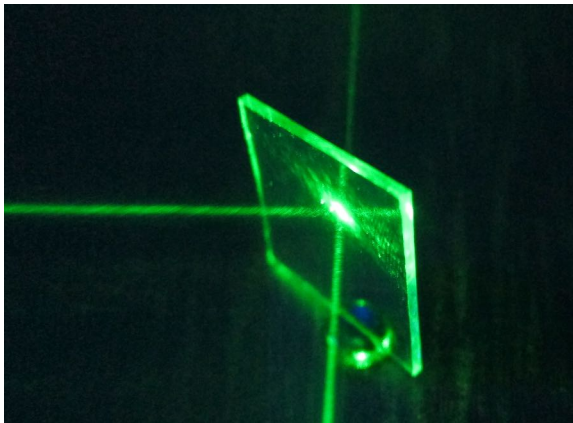
Beispiel: Farbe, Duft der Rose



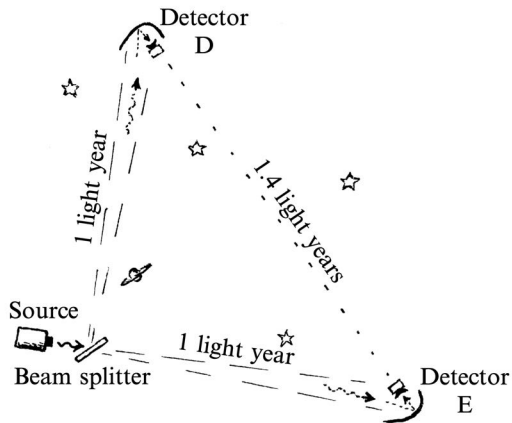


Glühbirne

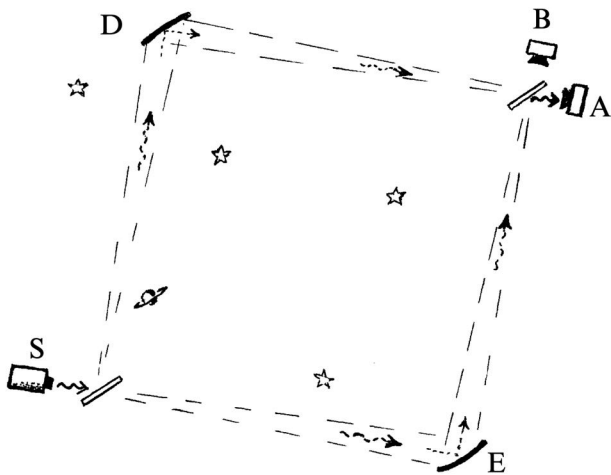
Ca. 100 000 000 000 000 000 000 000 Photonen pro Sekunde



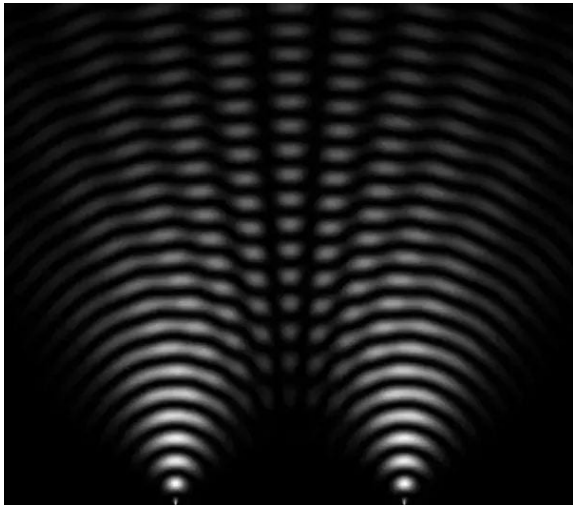
Strahlteiler



Mach-Zehnder Interferometer



Welcher Weg ?	Welcher Lichtsensor ?
$ D\rangle$	A oder B
$ E\rangle$	A oder B
$ D\rangle + E\rangle$	immer A



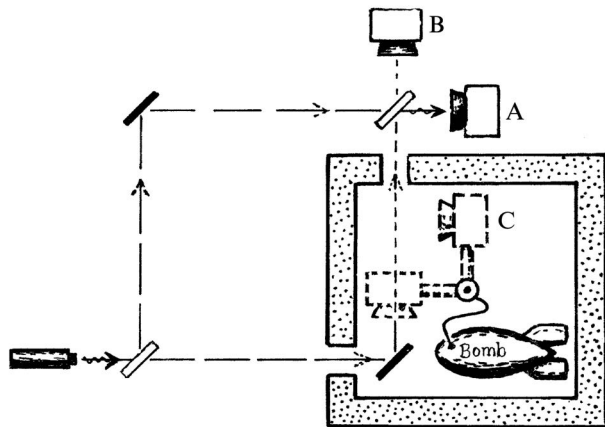




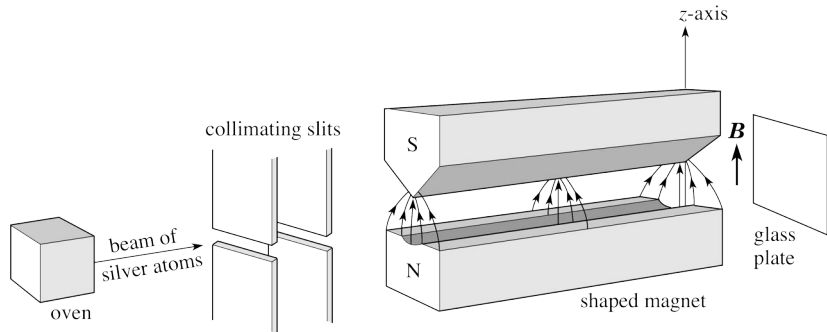
Zen-Garten in Ryoan-ji



Die Wirklichkeit des Möglichen



Das Experiment von Stern und Gerlach

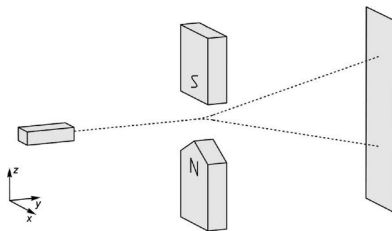


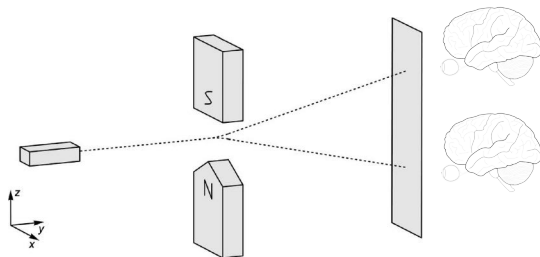


Otto Stern und Walther Gerlach

Überlagerter Quantenzustand

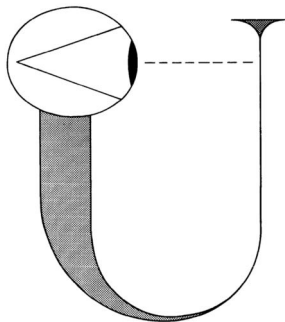
$$|\psi\rangle \sim |\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle$$





Reduktion des Quantenzustandes

$$|\Psi\rangle \sim |\uparrow\rangle + |\downarrow\rangle \xrightarrow{\text{Messung}} |\uparrow\rangle \text{ oder } |\downarrow\rangle$$



No phenomenon is a real phenomenon until it is an observed phenomenon.

J. A. Wheeler



“Die verdammte Quantenspringerei!”

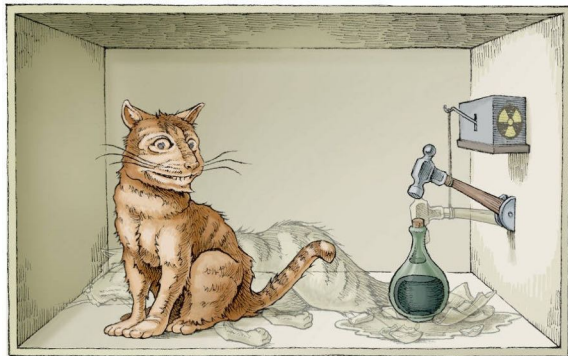
$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \psi(\mathbf{x}, t) = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 + V(\mathbf{x}, t) \right) \psi(\mathbf{x}, t)$$

E. Schrödinger, *Quantisierung als Eigenwertproblem* (1926)

Man kann auch ganz burleske Fälle konstruieren. Eine Katze wird in eine Stahlkammer gesperrt, zusammen mit folgender Höllenmaschine: in einem Geigerschen Zählrohr befindet sich eine winzige Menge radioaktiver Substanz, so wenig, dass im Laufe einer Stunde vielleicht eines von den Atomen zerfällt, ebenso wahrscheinlich aber auch keines; geschieht es, so spricht das Zählrohr an und betätigt über ein Relais ein Hämmerchen, das ein Kölbchen mit Blausäure zertrümmert. Hat man dieses ganze System eine Stunde lang sich selbst überlassen, so wird man sich sagen, dass die Katze noch lebt, wenn inzwischen kein Atom zerfallen ist. Der erste Atomzerfall würde sie vergiften haben. Die Psi-Funktion des ganzen Systems würde das so zum Ausdruck bringen, dass in ihr die lebende und die tote Katze zu gleichen Teilen gemischt oder verschmiert sind. Das Typische an solchen Fällen ist, dass eine ursprünglich auf den Atombereich beschränkte Unbestimmtheit sich in grobsinnliche Unbestimmtheit umsetzt, die sich dann durch direkte Beobachtung entscheiden lässt. Das hindert uns, in so naiver Weise ein verwaschenes Modell als Abbild der Wirklichkeit gelten zu lassen.

E. Schrödinger, *Die gegenwärtige Situation in der Quantenmechanik* (1935)

Schrödingers Katze (*Felis paradoxicalis* Schrödingeri)

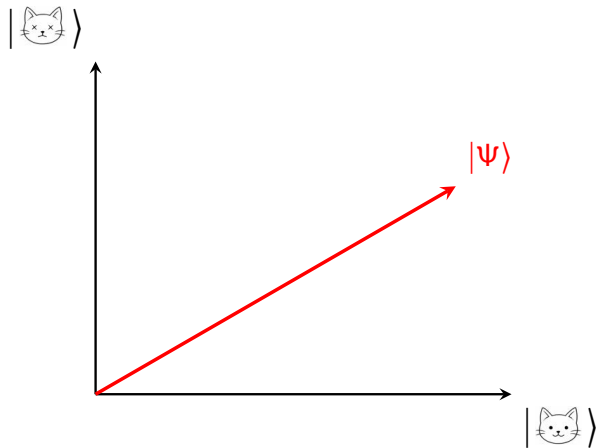




Überlagerungszustand.

$$|\psi\rangle \sim \left| \begin{array}{c} \text{cat} \\ \text{alive} \end{array} \right\rangle + \left| \begin{array}{c} \text{cat} \\ \text{dead} \end{array} \right\rangle$$

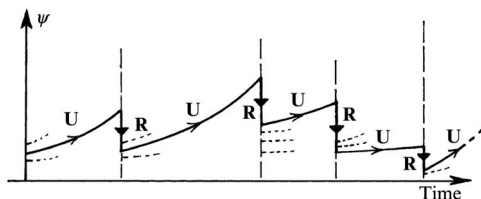
Schrödingers Katze



Schrödingers Katze

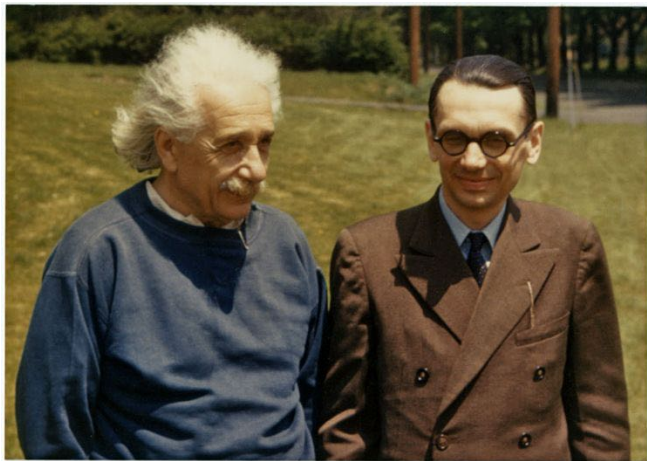


"About your cat, Mr. Schrödinger—I have good news and bad news."



U: stetig und determiniert (Schrödinger-Gleichung)

R: sprunghaft und indeterministisch (Reduktion)



Ax. 1. $(P(\varphi) \wedge \Box \forall x(\varphi(x) \Rightarrow \psi(x))) \Rightarrow P(\psi)$

Ax. 2. $P(\neg\varphi) \Leftrightarrow \neg P(\varphi)$

Th. 1. $P(\varphi) \Rightarrow \Diamond \exists x \varphi(x)$

Df. 1. $G(x) \Leftrightarrow \forall \varphi(P(\varphi) \Rightarrow \varphi(x))$

Ax. 3. $P(G)$

Th. 2. $\Diamond \exists x G(x)$

Df. 2. $\varphi \text{ ess } x \Leftrightarrow \varphi(x) \wedge \forall \psi(\psi(x) \Rightarrow \Box \forall y(\varphi(y) \Rightarrow \psi(y)))$

Ax. 4. $P(\varphi) \Rightarrow \Box P(\varphi)$

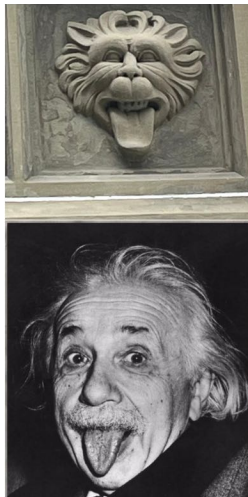
Th. 3. $G(x) \Rightarrow G \text{ ess } x$

Df. 3. $E(x) \Leftrightarrow \forall \varphi(\varphi \text{ ess } x \Rightarrow \Box \exists y \varphi(y))$

Ax. 5. $P(E)$

Th. 4. $\Box \exists x G(x)$

Gödels ontologischer Beweis der Existenz Gottes (posthum publiziert)

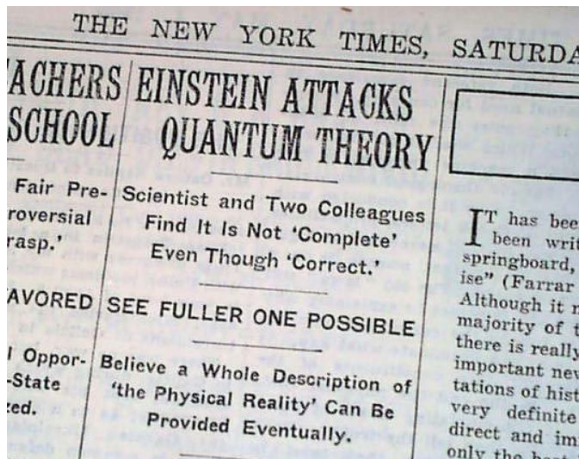


Quelle: Burchard Kaup

Einstein, Podolsky und Rosen 1935

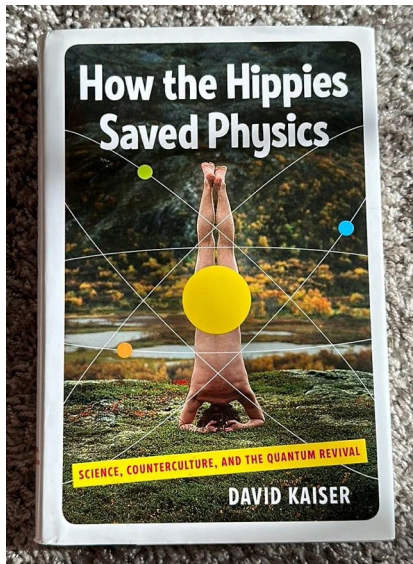


Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon (EPR)

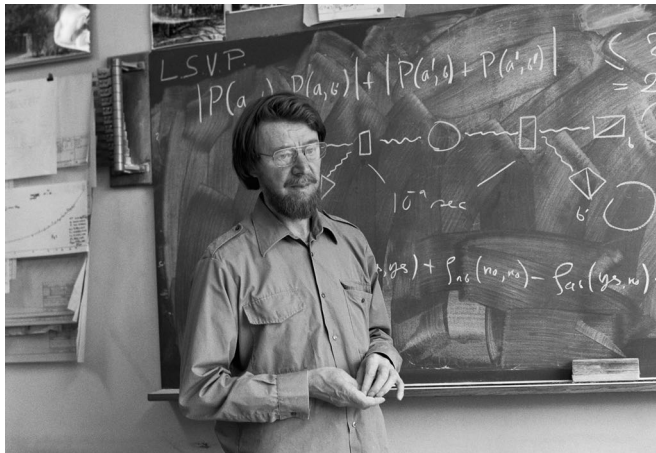


NY Times, Mai 1935

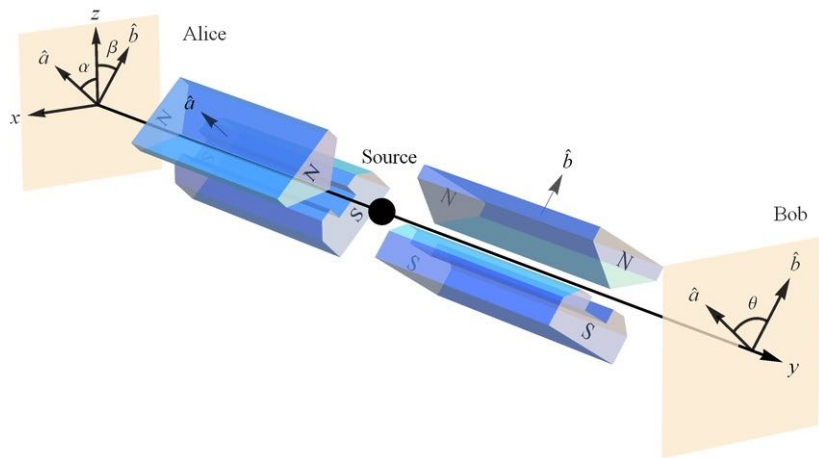
“Shut up and calculate!”



John Stewart Bell 1928 – 1990



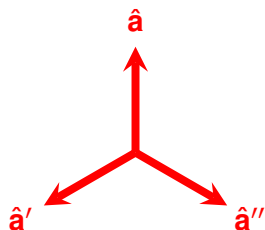
Das EPR-Experiment (nach Bohm)



Ein verschränkter Zustand:

$$|\Psi\rangle \sim |\uparrow\rangle|\downarrow\rangle + |\downarrow\rangle|\uparrow\rangle$$

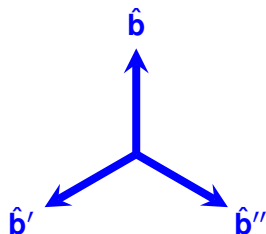
Richtungen der Messapparate für **Alice** und **Bob**:



A = Ja oder Nein

A' = Ja oder Nein

A'' = Ja oder Nein



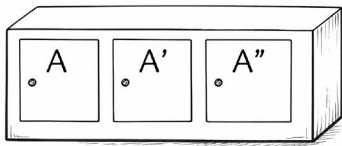
B = Ja oder Nein

B' = Ja oder Nein

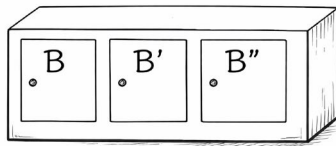
B'' = Ja oder Nein

Zwei Boxen für Alice und Bob

Alice's Box



Bob's Box

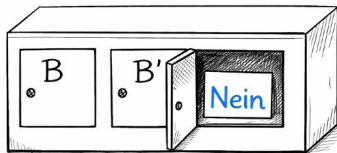


Zwei Boxen für Alice und Bob

Alice's Box

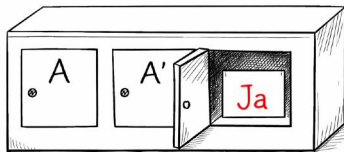


Bob's Box

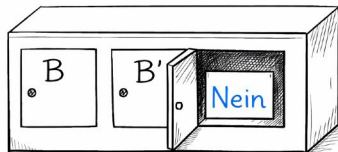


Zwei Boxen für Alice und Bob

Alice's Box



Bob's Box



Verborgene Variablen:

A	A'	A''	B	B'	B''
Ja	Ja	Ja	Nein	Nein	Nein
Ja	Ja	Nein	Nein	Nein	Ja
Ja	Nein	Ja	Nein	Ja	Nein
Ja	Nein	Nein	Nein	Ja	Ja
Nein	Ja	Ja	Ja	Nein	Nein
Nein	Ja	Nein	Ja	Nein	Ja
Nein	Nein	Ja	Ja	Ja	Nein
Nein	Nein	Nein	Ja	Ja	Ja

Die Ungleichung von J. S. Bell (1964):

$$\text{Wkeit (Ja Nein oder Nein Ja)} \geq \frac{2}{3} \cdot \frac{2}{3} + \frac{1}{3} \cdot \frac{1}{3} = \frac{5}{9} = 55.6\%$$

Die Quantentheorie sagt voraus:

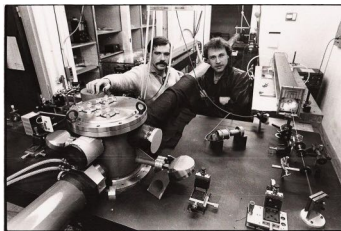
$$\text{Wkeit (Ja Nein oder Nein Ja)} = \frac{1}{2} < \frac{5}{9}$$

im Widerspruch zur Bellschen Ungleichung!

Experimentelle Bestätigung



John Clauser 1969

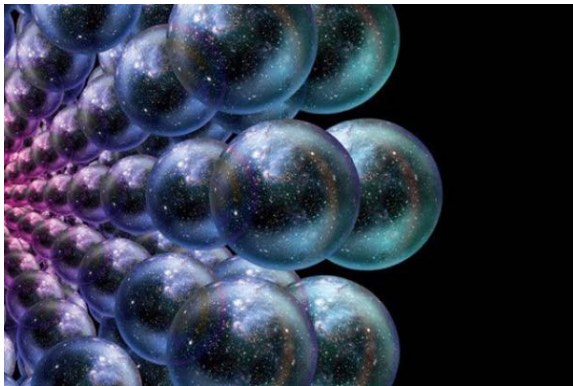


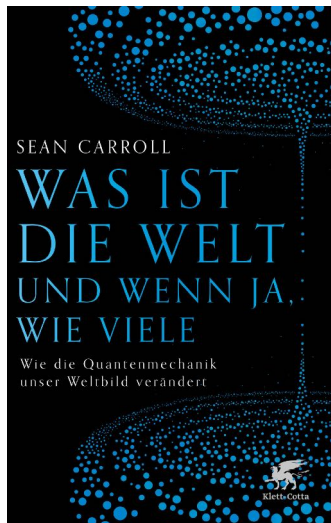
Alain Aspect 1982

- 1 Der Zustand $|\Psi\rangle$ ist eine vollständige Beschreibung eines physikalischen Systems.
- 2 Die zeitliche Veränderung \mathbf{U} wird allein durch die Schrödingergleichung beschrieben.
- 3 Jede Messung ergibt ein eindeutiges Resultat.

Verneinung von ...

- 1 deBroglie, Bohm: Pilotwelle
- 2 Ghirardi-Rimini-Weber, Penrose: objektive Reduktion
- 3 Everett: Viele-Welten-Theorie





Universe Splitter



Wheeler-DeWitt-Gleichung (1967).

$$\left(-16\pi G G_{ijkl} \frac{\delta^2}{\delta h_{ij} \delta h_{kl}} + \frac{\sqrt{h}}{16\pi G} (R - 2\Lambda) \right) \Psi[h_{ij}] = 0$$

Der Vorhang zu und alle Fragen offen ...

