

Die Vorgeschichte

- **Maxwell** 1865
sagt elektromagnetische Wellen vorher
 - **Hertz** 1886
beobachtet verstärkten Funkenüberschlag unter Lichteinstrahlung
 - **Hallwachs** 1888
studiert den photoelektrischen Effekt systematisch
-
- **Thomson** 1897 **Nobelpreis 1906**
entdeckt das Elektron
 - **Planck** 1900 **Nobelpreis 1918**
leitet Schwarzkörperstrahlung mit quantisierte Energie her
 - **Lenard** 1902 **Nobelpreis 1905**
beobachtet dass die photoelektrische Spannung nicht von der Intensität der Einstrahlung abhängt
 - **Einstein** 1905 **Nobelpreis 1921**
erklärt den photoelektrischen Effekt mit Hilfe von Lichtquanten
 - **Millikan** 1916 **Nobelpreis 1923**
versucht 10 Jahre lang Einsteins Theorie zu widerlegen,
aber bestätigt am Ende alle Vorhersagen mit höchster Präzision.

Fazit: Wellen haben Teilchencharakter

$$E = \hbar\omega$$

Akt 1: Die Entdeckung der Quanten

- Planck 1900: Das Plancksche Strahlungsgesetz



Hergeleitet unter der Annahme dass Oszillatoren nur ein ganzzahliges Vielfaches einer Energie annehmen und abgeben können

$$E_n = n h f, \quad n = 1, 2, 3, \dots \text{ ("Energiequanten")}$$

Revolutionär wider Willen

- Einstein 1905: Lichtquanten

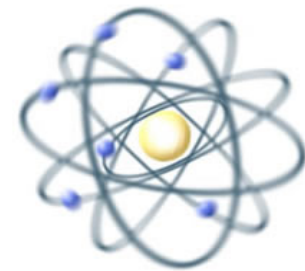


Licht besteht tatsächlich aus "in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten". Deutung des Photoeffekts.

Rücksichtsloser Querdenker

Akt 2: Teilchen oder Welle?

- 1907 Einstein Modell
beschreibt spezifische Wärme in Festkörpern mit Quantentheorie (verbessert von Debye Modell 1911)
- 1909-1920 Einstein
weitere Arbeiten über Quantentheorie (Übergangswahrscheinlichkeiten, etc)
- 1911, 1913 Rutherford, Bohr **Nobelpreis 1908, 1922**
Bohrsches Atommodell
- 1924/25 Bose-Einstein
Bose-Einstein Statistik. Bose-Einstein Kondensat.
- 1923 de Broglie **Nobelpreis 1929**
jedes Teilchen macht Wellen



$$\lambda = h / p$$

Energie $E = \hbar \omega \leftrightarrow$

Zeitlich periodischer Vorgang



Teilchen machen Wellen

Impuls $p = h / \lambda \leftrightarrow$

Räumlich periodischer Vorgang

Akt 3: Mathematische Beschreibung

Schrödinger, Heisenberg, Born, Pauli, Dirac, Bohr

1926 Schrödinger Gleichung

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi}{\partial x^2} + V(x)\Psi(x, t)$$



Born, Bohr:

Kopenhagener Deutung



$|\Psi(x,t)|^2 =$ Wahrscheinlichkeit für das
Antreffen des Teilchens am Ort x zur Zeit t

Die Postulate

- 1.) Zustände \equiv Wellenfunktionen Ψ
- 2.) Physikalische Größen \equiv Operatoren X, P
- 3.) Zeitentwicklung \equiv Schrödingergleichung

$$i\hbar \frac{\partial \Psi}{\partial t} = H\Psi(x, t)$$

4.) Die Resultate von “Messungen” können nur mit Wahrscheinlichkeiten vorgesagt werden. Die Wellenfunktion *kollabiert* in den Eigenzustand des Messwertes.

Quantentheorie

Schrödinger, Heisenberg, Born, Pauli, Dirac, Bohr

- + Quantisierte Lösung der Schrödinger Gleichung
- + Wellen und Interferenz (de Broglie)
- + Überlagerung von Wellen (Doppelspalt)
- + Alle wichtigen Experimente erklärt

ABER auf Kosten der Realität:

- Wahrscheinlichkeitsinterpretation
- Keine Messung ohne Störung
- Kollaps der Wellenfunktion
- Unschärfe $(\Delta P)(\Delta X) \geq \hbar/2$

Heisenberg



Das Nachspiel: Streit Bohr-Einstein 1926-1935



Bohr:

Wahrscheinlichkeitsinterpretation der
Wellenfunktion



Einstein:

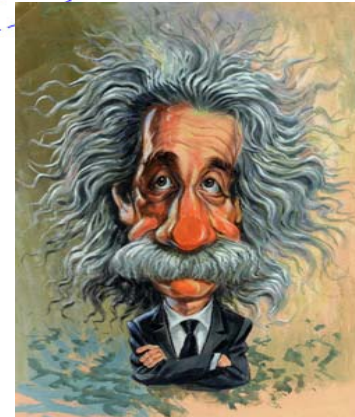
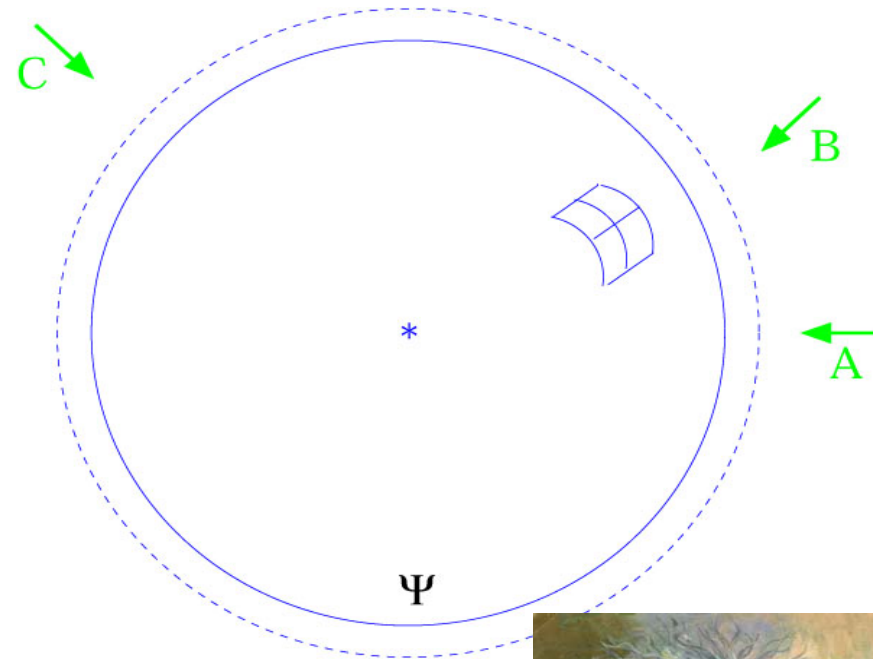
Gott würfelt nicht

3 Quanten Paradoxa

Paradoxon 1

Ein Photon breitet sich in alle Richtungen gleichmässig aus. (Einstein-Blase)

Sobald es von einem Detektor empfangen wird, verschwindet die Wellenfunktion überall sonst.



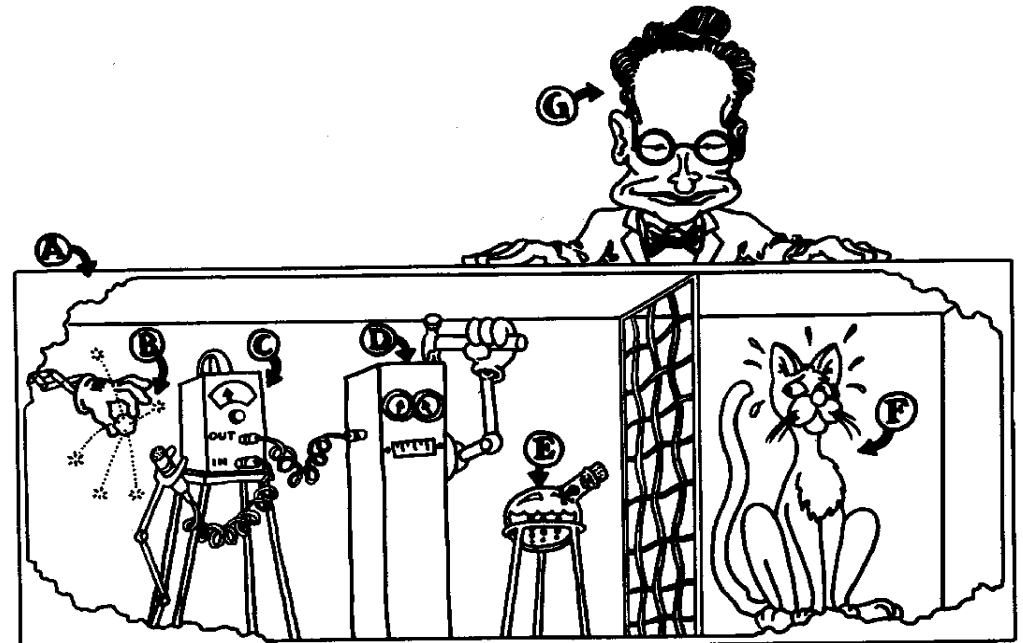
Einstein:
Spukhafte Fernwirkung

3 Quanten Paradoxa

Paradoxon 2

Schrödingers Katze

Falls ein Photon vom Detektor (B) empfangen wird, geht eine Teufelsmaschine (C-E) los, die die Katze (F) tötet.



(William R. Warren, Jr., © 1985, reproduced with permission.)

Da das Photon nur eine Überlagerung von Wahrscheinlichkeiten ist, muss auch die Katze in einem Überlagerungszustand sein bevor Schrödinger (G) den Kasten (A) öffnet.

$$|\Psi_{\text{Katze}}\rangle = |tot\rangle + |lebendig\rangle$$

3 Quanten Paradoxa

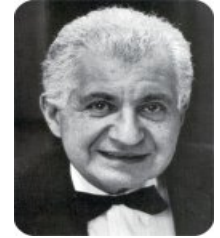
Paradoxon 3

Das EPR Paradoxon (1935)

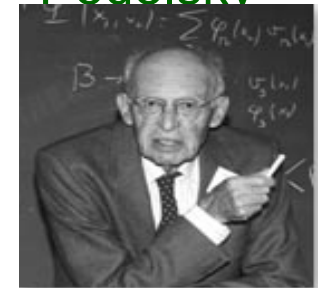
2 polarisierte *verschränkte* Photonen werden in unterschiedliche Richtungen geschickt.



Einstein

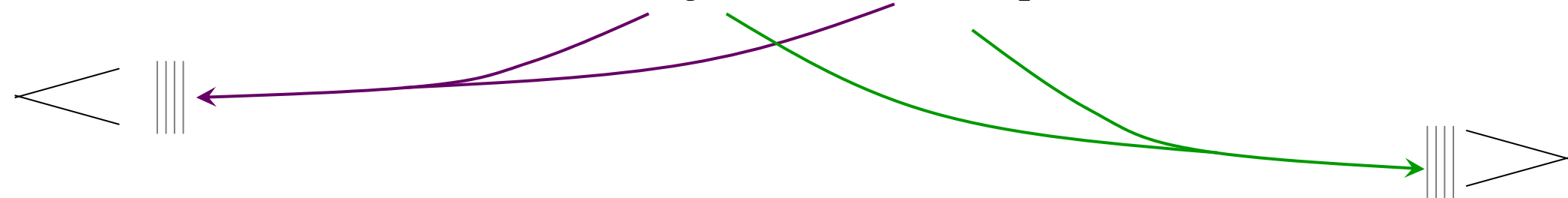


Podolsky



Rosen

$$|\Psi\rangle = |\uparrow\rangle_1 |\leftrightarrow\rangle_2 - |\leftrightarrow\rangle_1 |\uparrow\rangle_2$$



Wenn eine Messung am Photon 1 gemacht wird und die Polarisationsrichtung “ \uparrow ” festgestellt wird, dann muss Photon 2 in der “ \leftrightarrow ” Richtung polarisiert sein und umgekehrt.

Lichtlokale spukhafte Fernwirkung $> c$

Das Nachspiel 2:

- Bell 1964
Messwahrscheinlichkeiten können nicht klassisch erklärt werden
- Aspect 1982
Bestätigt Bellsche Ungleichungen experimentell
- Feynman 1982
prägt die Idee eines Quantencomputers
- Shor 1994
entwickelt Quanten Algorithmus zur Faktorisierung großer Zahlen
- Cornell, Ketterle, Wiemann **Nobelpreis 2001**
1995
entdecken Bose Einstein Kondensation in ultrakalten Quantengasen