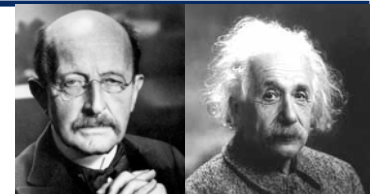




Die Macht und Ohnmacht der Quantenwelt

Prof. Dr. Sebastian Eggert

Tag der Physik, TU Kaiserslautern, 5. Dezember 2015



Quantenmechanik heute

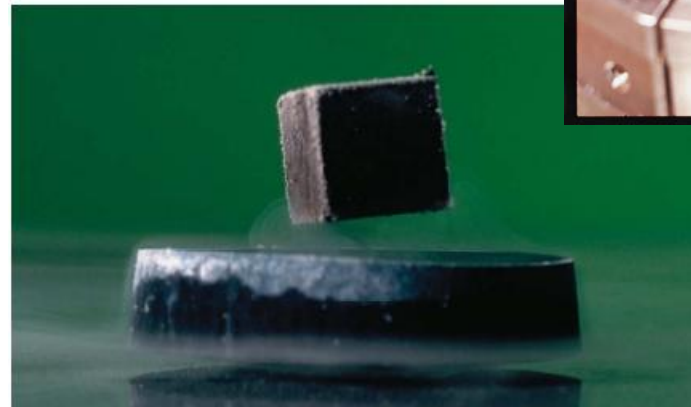
- Quanteninformatik



- Ultrakalte Quantengase



- Supraleitung und Vielteilchenphysik



Quantenmechanik gestern:

Eine Geschichte in drei Akten

Planck-Einstein-De-Broglie-Schrödinger-Heisenberg-Bohr-Einstein



Probleme: Quantenparadoxa

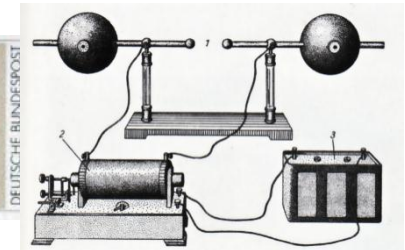
Einsteins verrückte Ideen. Freier Wille in der Quantenmechanik?

Ausblick: Quanteninformatik und Quantenmaterie

Die Vorgeschichte

And God said:
 $\nabla \cdot D = \rho$
 $\nabla \cdot B = 0$
 $\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}$
 $\nabla \times H = i + \frac{\partial D}{\partial t}$
And there was light.

- 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**
benutzt zum ersten Mal theoretisch eine quantisierte Energie
- 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.



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

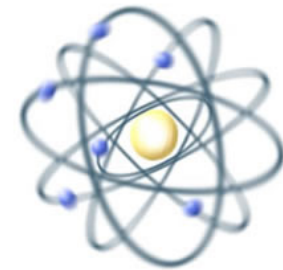


Licht besteht tatsächlich aus "in Raumpunkten lokalisierten Energiequanten". Deutung des Photoeffekts.

Rücksichtsloser Querdenker

Akt 2: Teilchen oder Welle?

- 1907 Einstein
beschreibt spezifische Wärme in Festkörpern mit Quantisierten Energien
- 1909-1925 Einstein
weitere Arbeiten über Quantentheorie (Übergangswahrscheinlichkeiten, Bose-Einstein Kondensat)
- 1911, 1913 Rutherford, Bohr **Nobelpreis 1908, 1922**
Bohrsches Atommodell
- 1923 de Broglie **Nobelpreis 1929**
jedes Teilchen macht Wellen



$$\lambda = h / p$$

Energie ↔ Zeitlich periodischer Vorgang

Relativität

Impuls ↔ Räumlich periodischer Vorgang

Teilchen machen Wellen

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 quantenmechanischen “Postulate”

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

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

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

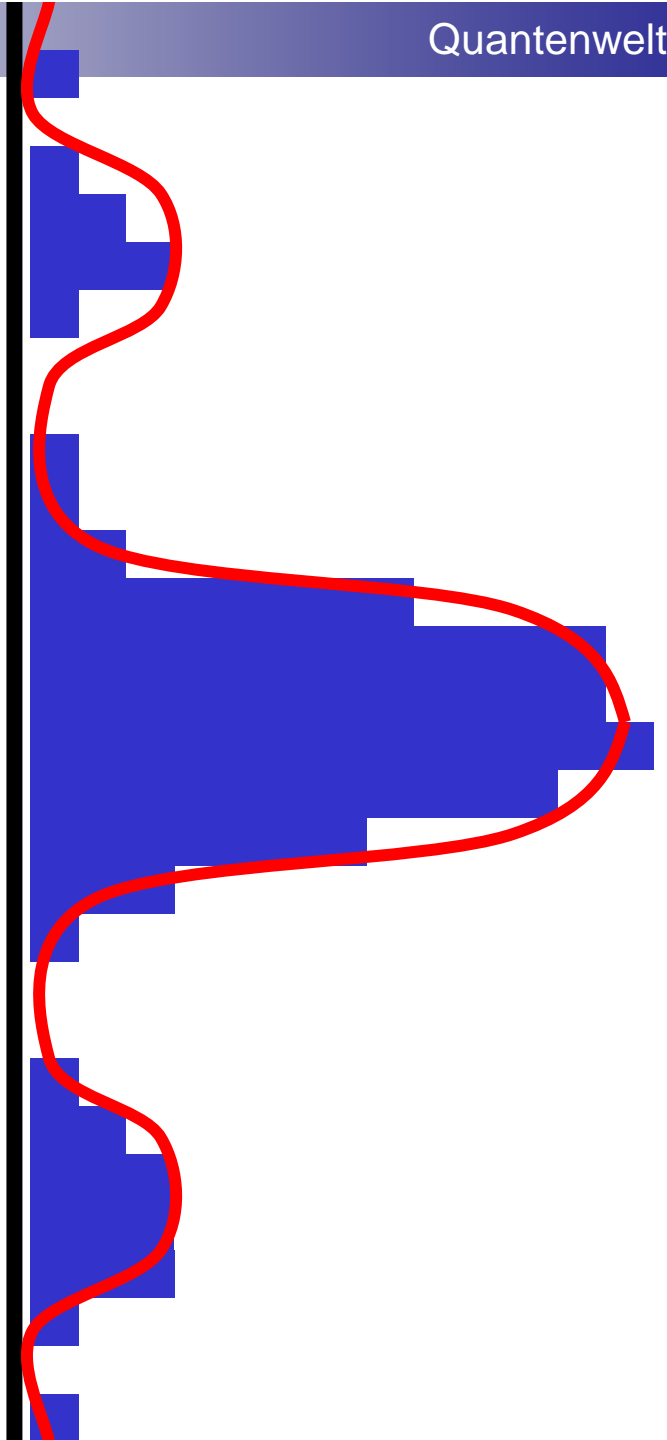
Ein Experiment
mit **Licht**

Intensität



The diagram illustrates a double-slit experiment. On the left, a vertical black bar represents a barrier with two slits. Red lines represent light waves passing through the slits, creating an interference pattern of overlapping waves. On the right, a thick red line shows the resulting intensity distribution, which has a central peak and smaller side peaks, characteristic of wave interference. The word 'Intensität' is written in red next to this curve.

Ein Experiment
mit Licht-Teilchen



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 Wellenfuntion
- Unschärfe $(\Delta P)(\Delta X) \geq \hbar/2$

Heisenberg



Das Nachspiel: Streit Bohr-Einstein 1926-1935



Bohr:

Wahrscheinlichkeitsinterpretation der
Wellenfunktion



Einstein:

Gott würfelt nicht

Probleme (?): 3 Quanten Paradoxa

Paradoxon 1

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

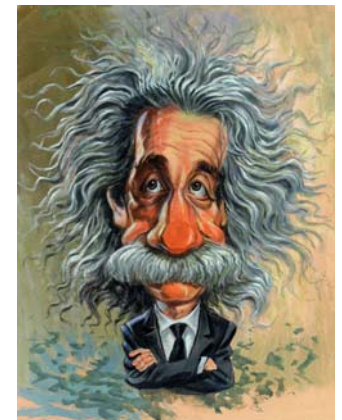
Sobald es von einem Detektor empfangen wird, verschwindet die Wellenfunktion überall sonst.

\vec{c}

\vec{B}

*

Ψ
A



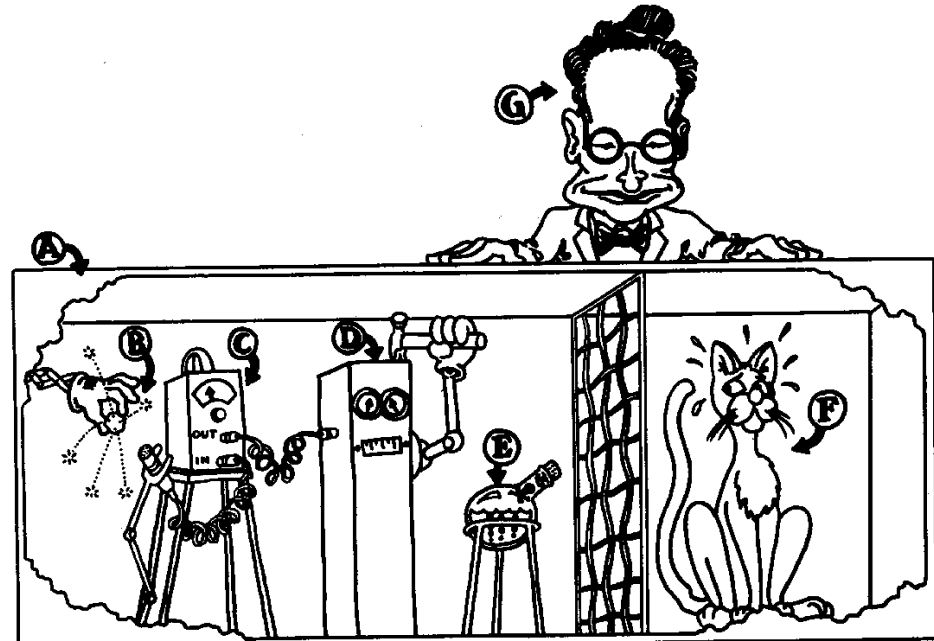
Einstein:
Spukhafte Fernwirkung

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.

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

3 Quanten Paradoxa

Paradoxon 3

Das EPR Paradoxon (1935)

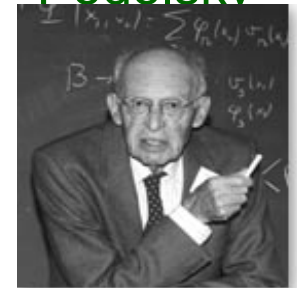
2 polarisierte “verschränkte” Photonen werden in unterschiedliche Richtungen geschickt.



Einstein

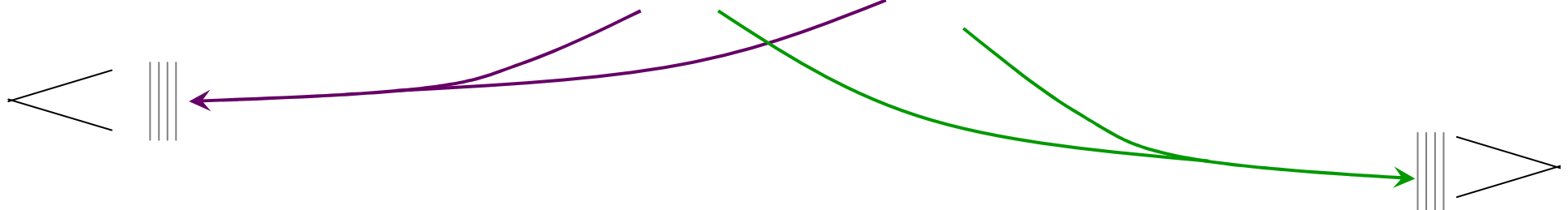


Podolsky



Rosen

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



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 $> c$

Quantenmechanik heute

- Quanteninformatik

Workshop "Internet Q" 13:15 in 260

Vortrag Quantentechnologie um 13:15 in 215



- Ultrakalte Quantengase

Experimente in Räumen 407, 409, Foyer

Vortrag um 12:15 in 220

- Supraleitung und Vielteilchenphysik

