

Quantenteleportation

Tim Robert Würfel

Fakultät für Physik
Universität Bielefeld

Physikalisches Proseminar 2013

Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Theoretische Vorüberlegungen
 - Physikalische Grundlagen
 - Idee der Quantenteleportation
- 3 Theorie der Quantenteleportation
 - Verschränkte Zustände
 - Durchführung einer Quantenteleportation
 - Folgen für die Physik
- 4 Experimente
 - Das Zeilinger-Experiment
 - Ausblick und wichtige Fakten

Raumschiff Enterprise

Wie sich Soziologen Teleportation vorstellen:



Raumschiff Enterprise

Wie sich Soziologen Teleportation vorstellen:



- Scan des Objektes
- Auflösung in seine Bestandteile
- Transport der Teilchen
- Zusammensetzen des Objektes

Raumschiff Enterprise

Wie sich Soziologen Teleportation vorstellen:



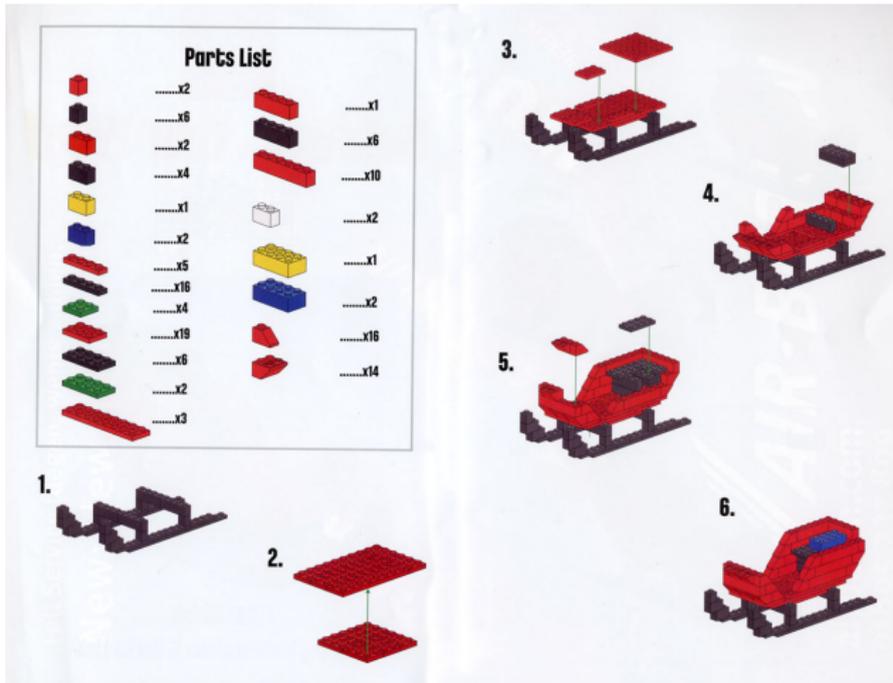
- Scan des Objektes
- Auflösung in seine Bestandteile
- Transport der Teilchen
- Zusammensetzen des Objektes
- Physikalisch sinnvoll?

Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Theoretische Vorüberlegungen
 - Physikalische Grundlagen
 - Idee der Quantenteleportation
- 3 Theorie der Quantenteleportation
 - Verschränkte Zustände
 - Durchführung einer Quantenteleportation
 - Folgen für die Physik
- 4 Experimente
 - Das Zeilinger-Experiment
 - Ausblick und wichtige Fakten

Das Lego-Modell

Wie man sich einen Schlitten baut.



Heisenbergsche Unschärferelation

Satz

Heisenbergs Unschärfe für Ort und Impuls

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Folgerung

Messung zerstört Informationen zu allen Nicht-Messgrößen des Zustandes.

Quantenmechanischer Effekt!

Heisenbergsche Unschärferelation

Satz

Heisenbergs Unschärfe für Ort und Impuls

$$\Delta x \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

Folgerung

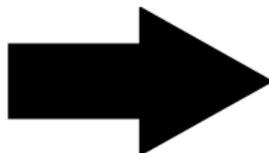
Messung zerstört Informationen zu allen Nicht-Messgrößen des Zustandes.

Quantenmechanischer Effekt!

Folgerung

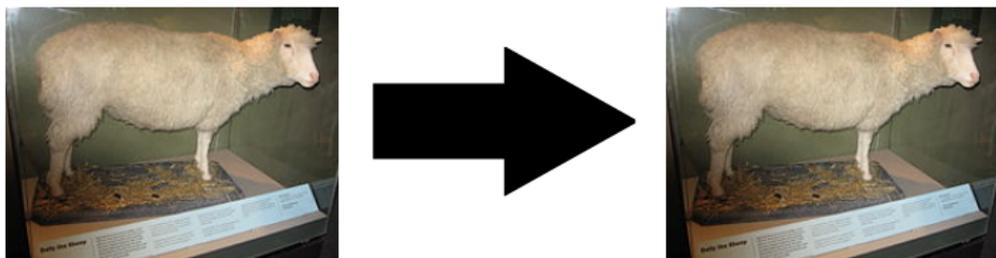
Keine Übertragung durch reines Messen möglich.

Klonen - Eine Alternative?



Man finde den Unterschied!

Klonen - Eine Alternative?



Man finde den Unterschied!

Es gibt keinen!

Das No-Cloning Theorem

Satz

"Does quantum mechanics allow the cloning for an arbitrary input state?– No."

Das No-Cloning Theorem

Satz

"Does quantum mechanics allow the cloning for an arbitrary input state?– No."

Folgerung

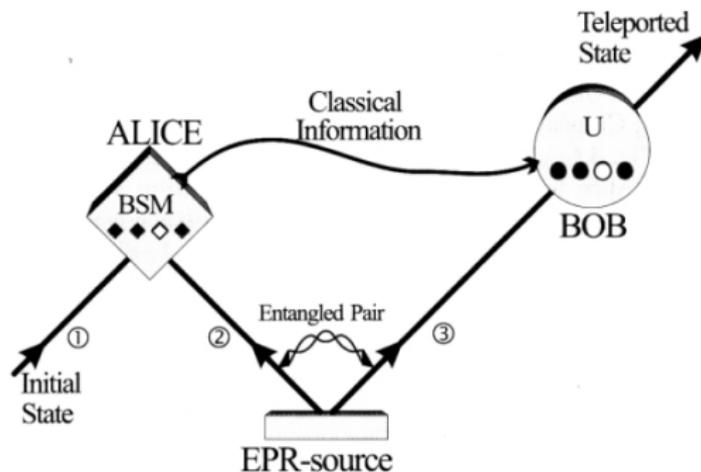
Es ist nicht möglich eine Information zu einem Teilchen durch Klonen auf ein anderes Teilchen zu kopieren.

Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Theoretische Vorüberlegungen
 - Physikalische Grundlagen
 - Idee der Quantenteleportation
- 3 Theorie der Quantenteleportation
 - Verschränkte Zustände
 - Durchführung einer Quantenteleportation
 - Folgen für die Physik
- 4 Experimente
 - Das Zeilinger-Experiment
 - Ausblick und wichtige Fakten

Protokoll nach Bennett et al.

Lösung der Probleme!?

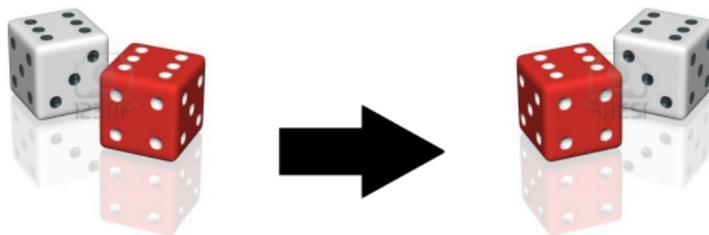


- Grundlage ist das so genannte *EPR-Paradoxon*!

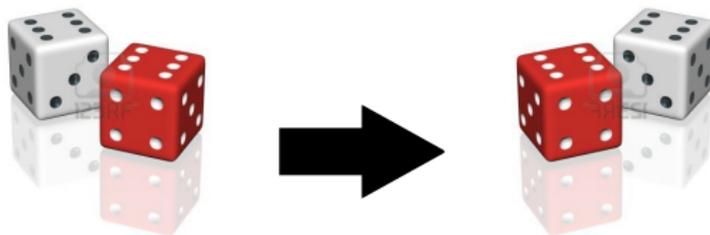
Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Theoretische Vorüberlegungen
 - Physikalische Grundlagen
 - Idee der Quantenteleportation
- 3 Theorie der Quantenteleportation
 - **Verschränkte Zustände**
 - Durchführung einer Quantenteleportation
 - Folgen für die Physik
- 4 Experimente
 - Das Zeilinger-Experiment
 - Ausblick und wichtige Fakten

Beispiel für EPR-Teilchen



Beispiel für EPR-Teilchen



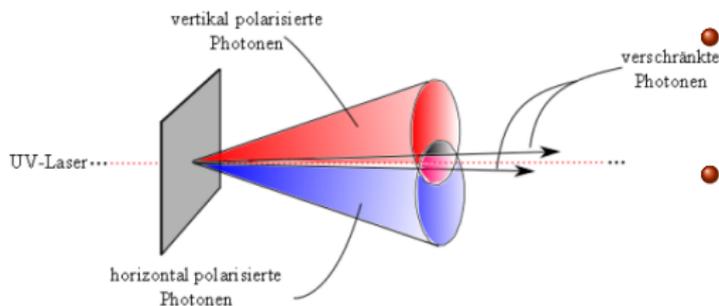
Beispiel

Zwei ungezinkte Würfel.

Verschränkung: Gleiches Ergebnis bei gleichzeitigem Wurf.

Herstellung von EPR-Teilchen

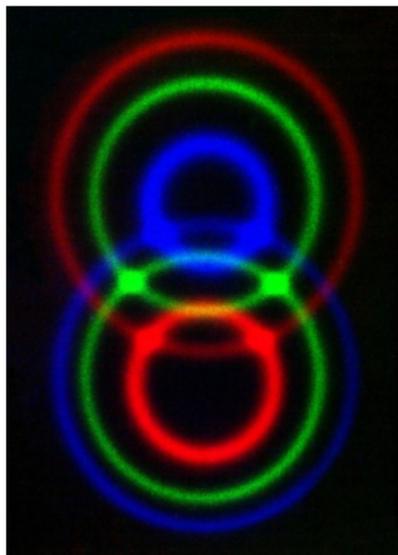
Was dann passiert:



- Photonenpaar breitet sich in zwei Kegeln aus.
- Überschneidung der Kegel ist variabel.
- Photonen sind verschränkt, wenn sie sich auf den Schnitten der Kegel bewegen.

Herstellung von EPR Teilchen

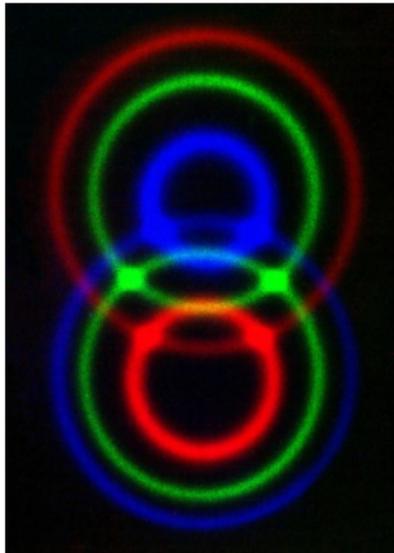
Wie kann man sich das Vorstellen?



- Es gilt Energie- und Impulserhaltung!
- Verschränkung in den Schnittpunkten
- Die Kreise zeigen verschiedene mögliche Lösungen!

Herstellung von EPR Teilchen

Wie kann man sich das Vorstellen?



- Es gilt Energie- und Impulserhaltung!
- Verschränkung in den Schnittpunkten
- Die Kreise zeigen verschiedene mögliche Lösungen!
- Offene Frage: Wie sieht die Verschränkung mathematisch aus?

Mathematische Beschreibung

Zwei-Zustand-Systeme

Definition

Der Zustand eines Zweiteilchensystems heißt

- separabel, wenn es a_i und b_j gibt, so dass gilt:
$$|\phi\rangle = \sum_{i,j} c_{ij} |ij\rangle = (\sum_i a_i |i\rangle) \otimes (\sum_j b_j |j\rangle)$$
- verschränkt, wenn
keine Darstellung, wie oben existiert!

Mathematische Beschreibung

Zwei-Zustand-Systeme

Definition

Der Zustand eines Zweiteilchensystems heißt

- separabel, wenn es a_i und b_j gibt, so dass gilt:

$$|\phi\rangle = \sum_{i,j} c_{ij} |ij\rangle = (\sum_i a_i |i\rangle) \otimes (\sum_j b_j |j\rangle)$$

- verschränkt, wenn
keine Darstellung, wie oben existiert!

- Verschränkung bedeutet also direkte Korrelation!
- Sind wir also fertig?

Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Theoretische Vorüberlegungen
 - Physikalische Grundlagen
 - Idee der Quantenteleportation
- 3 Theorie der Quantenteleportation
 - Verschränkte Zustände
 - Durchführung einer Quantenteleportation
 - Folgen für die Physik
- 4 Experimente
 - Das Zeilinger-Experiment
 - Ausblick und wichtige Fakten

Das Bennett-Protokoll

Die Teilchen - Vorbereitung

Fakt

*Es liegt ein verschränktes Photonenpaar vor. (Teilchen A und B)
Verschränkung bezüglich der Polarisationsrichtung der Photonen.
Teilchen O: $|\phi\rangle = a|0\rangle_O + b|1\rangle_O$*

Was ist zu tun:

Finde geeignete Basis zur Darstellung der Zustände A und B im gemeinsamen Hilbertraum!

Das Bennett-Protokoll

Die Teilchen - Vorbereitung

Fakt

*Es liegt ein verschränktes Photonenpaar vor. (Teilchen A und B)
Verschränkung bezüglich der Polarisationsrichtung der Photonen.
Teilchen O: $|\phi\rangle = a|0\rangle_O + b|1\rangle_O$*

Was ist zu tun:

Finde geeignete Basis zur Darstellung der Zustände A und B im gemeinsamen Hilbertraum!

Folgerung

Bell-Zustände bilden eine geeignete Basis!

Die Bell-Zustände

- Die so genannten *Bell-Zustände* sind gegeben durch:

$$|\Phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B \pm |1\rangle_A \otimes |1\rangle_B)$$
$$|\Psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |1\rangle_B \pm |1\rangle_A \otimes |0\rangle_B)$$

- Sie beschreiben die Überlagerung der Teilchen A und B!
- Bell-Zustände sind orthonormiert!

Die Bell-Zustände

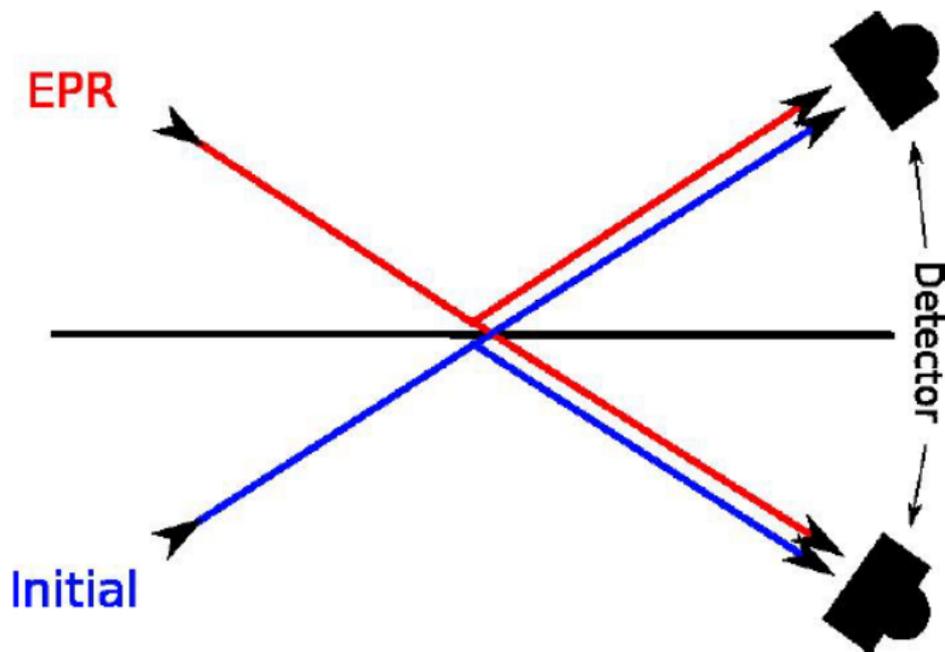
- Die so genannten *Bell-Zustände* sind gegeben durch:

$$|\Phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B \pm |1\rangle_A \otimes |1\rangle_B)$$
$$|\Psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |1\rangle_B \pm |1\rangle_A \otimes |0\rangle_B)$$

- Sie beschreiben die Überlagerung der Teilchen A und B!
- Bell-Zustände sind orthonormiert!
- Sie bilden eine Basis für den Raum der Quantenteleportation!

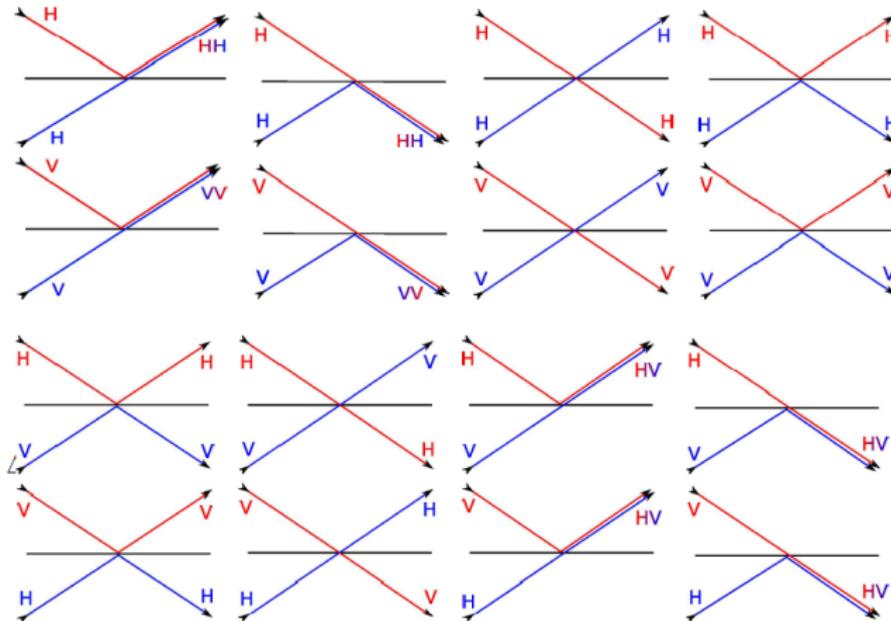
Bell Zustandsmessung

Wie geht das technisch?



Bell Zustandsmessung

Aus 16 mach 4:



Das Bennett-Protokoll

Was ist noch zu tun?

- Telefonanruf bei Bob \Rightarrow Mitteilung des Messergebnisses!
- Bob transformiert nun durch Transformation U (unitär) sein Teilchen in den Zustand von O .
- Was ist noch zu tun?

Das Bennett-Protokoll

Was ist noch zu tun?

- Telefonanruf bei Bob \Rightarrow Mitteilung des Messergebnisses!
- Bob transformiert nun durch Transformation U (unitär) sein Teilchen in den Zustand von O .
- Was ist noch zu tun?
- Nichts, wir sind fertig!
Teleportation vollendet!

Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Theoretische Vorüberlegungen
 - Physikalische Grundlagen
 - Idee der Quantenteleportation
- 3 Theorie der Quantenteleportation
 - Verschränkte Zustände
 - Durchführung einer Quantenteleportation
 - Folgen für die Physik
- 4 Experimente
 - Das Zeilinger-Experiment
 - Ausblick und wichtige Fakten

Offene Fragen

Überlichtgeschwindigkeit erreicht?

Einstein: *Spukhafte Fernwirkung*

Wir wissen aber:

- Kein Massetransport während der Teleportation!
- Teilchen B gelangt auf normalem Weg zu Bob. (Also maximal Lichtgeschwindigkeit)
- Alice muss Bob ihr Ergebnis klassisch mitteilen (Telefon-Anruf)!

Offene Fragen

Überlichtgeschwindigkeit erreicht?

Einstein: *Spukhafte Fernwirkung*

Wir wissen aber:

- Kein Massetransport während der Teleportation!
- Teilchen B gelangt auf normalem Weg zu Bob. (Also maximal Lichtgeschwindigkeit)
- Alice muss Bob ihr Ergebnis klassisch mitteilen (Telefon-Anruf)!
- Keine Verletzung der Relativitätstheorie!

Offene Fragen

Wurde das No-Cloning-Theorem verletzt?

Wir wissen:

- Die Bell-Messung *zerstört* die Information über das Teilchen O.
- Es können nach der Messung nur Aussagen über den Gesamtzustand von O und A gemacht werden.
- Teilchen B ist erst *nach* der Messung durch Transformation in den richtigen Zustand überführbar.

Offene Fragen

Wurde das No-Cloning-Theorem verletzt?

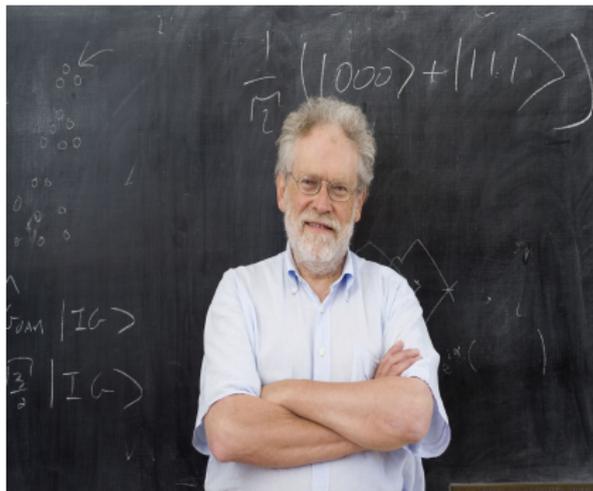
Wir wissen:

- Die Bell-Messung *zerstört* die Information über das Teilchen O.
- Es können nach der Messung nur Aussagen über den Gesamtzustand von O und A gemacht werden.
- Teilchen B ist erst *nach* der Messung durch Transformation in den richtigen Zustand überführbar.
- Es wurde zu keinem Zeitpunkt eine Kopie des Zustandes O erstellt.
=> Keine Verletzung des Theorems!

Gliederung

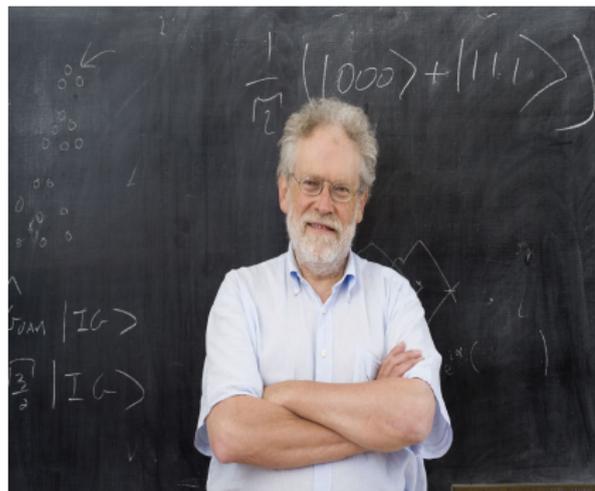
- 1 Motivation
- 2 Theoretische Vorüberlegungen
 - Physikalische Grundlagen
 - Idee der Quantenteleportation
- 3 Theorie der Quantenteleportation
 - Verschränkte Zustände
 - Durchführung einer Quantenteleportation
 - Folgen für die Physik
- 4 Experimente
 - Das Zeilinger-Experiment
 - Ausblick und wichtige Fakten

Anton Zeilinger



- Geburt: 20.05.1945 in Ried (Österreich)
- wissenschaftliche Arbeit auf dem Gebiet der Quantenoptik und Quanteninformation
=> *Mr. Beam*

Anton Zeilinger

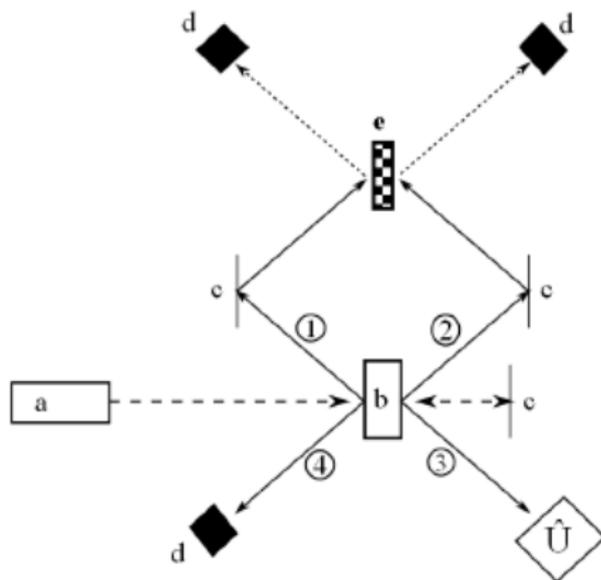


- Geburt: 20.05.1945 in Ried (Österreich)
- wissenschaftliche Arbeit auf dem Gebiet der Quantenoptik und Quanteninformation
=> *Mr. Beam*

- 1997 erstmalige Demonstration der Quantenteleportation

Versuchsanordnung

Schematische Darstellung des Zeilinger Experiments



Gliederung

- 1 Motivation
- 2 Theoretische Vorüberlegungen
 - Physikalische Grundlagen
 - Idee der Quantenteleportation
- 3 Theorie der Quantenteleportation
 - Verschränkte Zustände
 - Durchführung einer Quantenteleportation
 - Folgen für die Physik
- 4 Experimente
 - Das Zeilinger-Experiment
 - **Ausblick und wichtige Fakten**

Vorhandene Probleme

Was könnte noch schief gehen?

- Wie realisieren wir eine effiziente Bell-Messung?
 - Aufbaumodifikation (Ersetze zum Beispiel den Strahlteiler)
 - aktuelles Forschungsgebiet
- Wie verhindern wir Wechselwirkungen der verschränkten Photonen mit der Umgebung?
 - Der Verschränkungsgrad - Was sagt er aus?
 - Das Destillationsverfahren - Verbesserung der Verschränkung
- Wie speichern wir verschränkte Teilchen?
 - Verwende Photonen und Ionen/Atome
 - Photonen regen Speichereinheit (Atom) an

Teleportation von Bewegungen

Mögliche Teleportation von externen Größen?

- Theoretisches Konzept zur Teleportation der Bewegung eines Quantenfeldes. (2009)
- Drei Atome (A, B, O)
- Protokoll ähnlich wie bei Bennett
- Atom O bewegt sich und kollidiert mit Atom von A.
- Theoretisch dann Übertragung des Impulses auf das Atom von B.

Weitere Informationen

- Aktueller Rekord liegt bei 143 km (2012)
- Von La Palma nach Teneriffa

Warum macht man das überhaupt?

- Einsatzmöglichkeiten in der Quantenkryptographie
- Sehr schnelle Informationsübertragung
- Quantencomputer?

Zusammenfassung

- Quantenteleportation ist grundsätzlich möglich.
- Bisher nur einzelne Informationen wie Spin oder Polarisation übertragbar.
- Soziologen werden Physik niemals verstehen!

- Ausblick
 - Teleportation von mehreren Teilchen gleichzeitig.
 - Einsatz der Quantenteleportation in Technik und Alltag.

Weiterführende Literatur I



Huthmacher, Klaus.

Quantenteleportation mit einzelnen Photonen.

*Seminar: Physikalische Systeme in der
Quanteninformationsverarbeitung, 2007.*



Geyer, Christian.

*Quantenteleportation - Theoretische Grundlagen Für Die
Schule.*

Masterarbeit TU Kaiserslautern, 2012.



Heisenberg, Werner.

*"Über den anschaulichen Inhalt der quantentheoretischen
Kinematik und Mechanik."*

Zeitschrift für Physik 43, Nr. 3, 1927, S. 172–198.

Weiterführende Literatur II



Pfaff, Wolfgang.

Quantenteleportation

Vortrag im Rahmen des Seminars Quantenoptik, Universität Regensburg, 2006



Link zum No-Cloning Theorem:

<http://de.wikipedia.org/wiki/No-Cloning-Theorem>



Bildersammlung:

Zusammengefasst in einer *txt*-Datei