

# QUANTENTELEPORTATION

---

von Matthias Wiecha und Marc Hanefeld

# Gliederung

- Relevante Grundlagen aus der Quantenmechanik
- Teleportations-Protokoll
- Experimentelle Umsetzung
- Ausblick

# Relevante Grundlagen der QM

- Verschränkung
- Die Bell-Zustände:

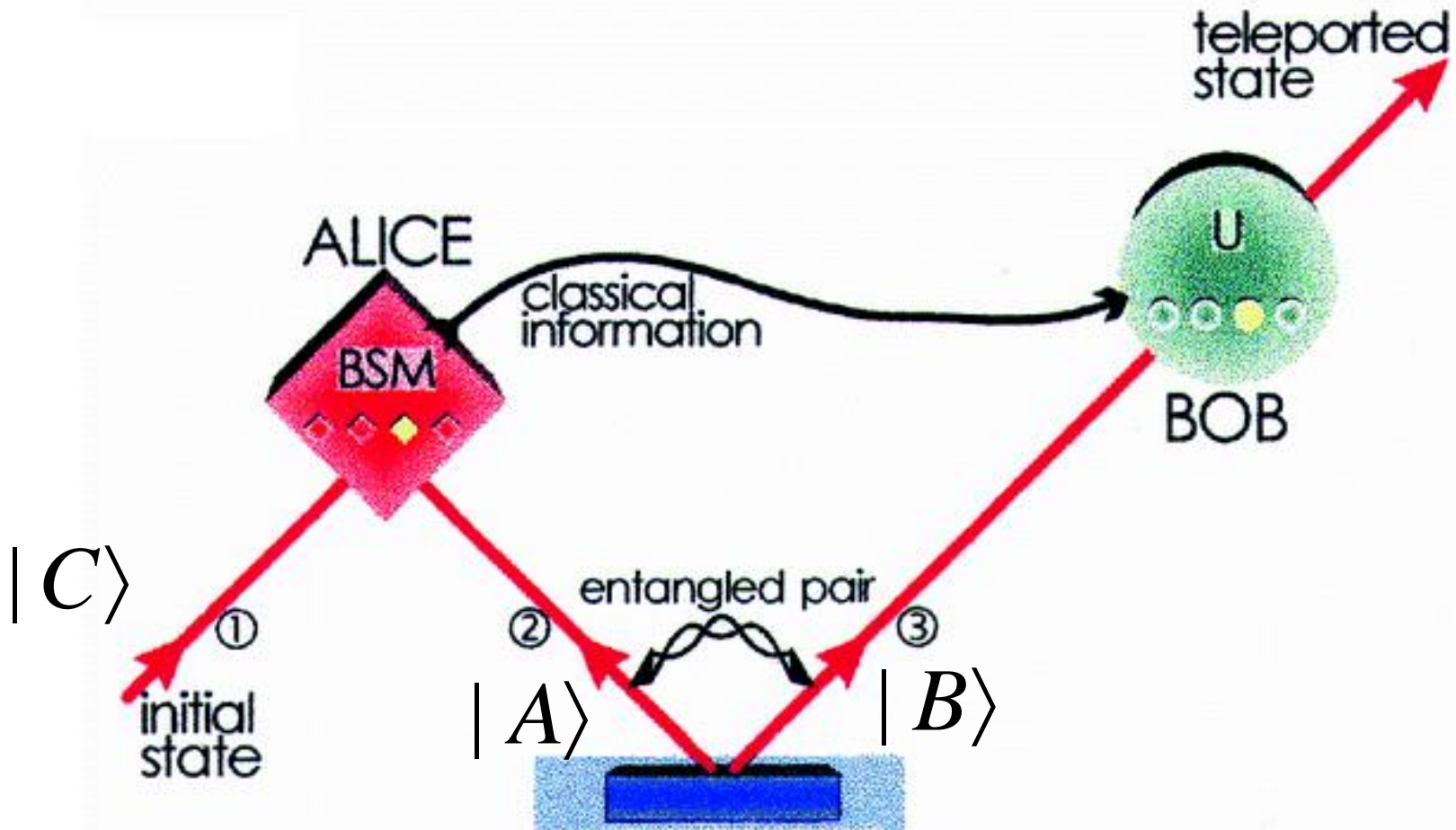
$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B + |1\rangle_A \otimes |1\rangle_B)$$

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

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

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

# Teleportations-Protokoll



„Experimental quantum teleportation“, Dik Bouwmeester et al, Nature vol. 390, 11 December 1997

# Teleportations-Protokoll

- Was brauchen Alice und Bob vor der Teleportation?

$$|\Phi^+\rangle_{AB} = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B + |1\rangle_A \otimes |1\rangle_B)$$

$$|\Psi\rangle_C = \alpha|0\rangle_C + \beta|1\rangle_C \quad \alpha, \beta \in \mathbb{C}$$

- Gesamtzustand A, B, C:

$$|\Phi^+\rangle_{AB} \otimes |\Psi\rangle_C = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B + |1\rangle_A \otimes |1\rangle_B) \otimes (\alpha|0\rangle_C + \beta|1\rangle_C)$$

# Teleportations-Protokoll

- Hilfreiche Identitäten:

$$|0\rangle \otimes |0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\Phi^+\rangle + |\Phi^-\rangle)$$

$$|1\rangle \otimes |1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\Phi^+\rangle - |\Phi^-\rangle)$$

$$|0\rangle \otimes |1\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\Psi^+\rangle + |\Psi^-\rangle)$$

$$|1\rangle \otimes |0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\Psi^+\rangle - |\Psi^-\rangle)$$

# Teleportations-Protokoll

- Gesamtzustand A, B, C:

$$\begin{aligned}
 |\Phi^+\rangle_{AB} \otimes |\Psi\rangle_C &= \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle_A \otimes |0\rangle_B + |1\rangle_A \otimes |1\rangle_B) \otimes (\alpha|0\rangle_C + \beta|1\rangle_C) \\
 &= \frac{1}{2} [|\Phi^+\rangle_{AC} \otimes (\alpha|0\rangle_B + \beta|1\rangle_B) \\
 &\quad + |\Phi^-\rangle_{AC} \otimes (\alpha|0\rangle_B - \beta|1\rangle_B) \\
 &\quad + |\Psi^+\rangle_{AC} \otimes (\beta|0\rangle_B + \alpha|1\rangle_B) \\
 &\quad + |\Psi^-\rangle_{AC} \otimes (\beta|0\rangle_B - \alpha|1\rangle_B)]
 \end{aligned}$$

# Teleportations-Protokoll

- Bell-Messung an A und C durch Alice:

$$|\Phi^+\rangle_{AC} \otimes (\alpha|0\rangle_B + \beta|1\rangle_B)$$

Zustand B:

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

$$|\Phi^-\rangle_{AC} \otimes (\alpha|0\rangle_B - \beta|1\rangle_B)$$

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ -\beta \end{pmatrix}$$

$$|\Psi^+\rangle_{AC} \otimes (\beta|0\rangle_B + \alpha|1\rangle_B)$$

$$\begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \end{pmatrix}$$

$$|\Psi^-\rangle_{AC} \otimes (\beta|0\rangle_B - \alpha|1\rangle_B)$$

$$\begin{pmatrix} \beta \\ -\alpha \end{pmatrix}$$



# Teleportations-Protokoll

- Rekonstruktion des ursprünglichen Zustandes durch Bob:
- Zur Erinnerung:  $|\Psi\rangle_C = \alpha|0\rangle_C + \beta|1\rangle_C$   $\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$

Zustand AC von Alice:

$$|\Phi^+\rangle_{AC}$$

$$|\Phi^-\rangle_{AC}$$

$$|\Psi^+\rangle_{AC}$$

$$|\Psi^-\rangle_{AC}$$

Zustand B von Bob:

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ -\beta \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \beta \\ -\alpha \end{pmatrix}$$

# Teleportations-Protokoll

- Rekonstruktion des ursprünglichen Zustandes durch Bob:
- Zur Erinnerung:  $|\Psi\rangle_C = \alpha|0\rangle_C + \beta|1\rangle_C$

Zustand AC von Alice:

$$|\Phi^+\rangle_{AC}$$

$$|\Phi^-\rangle_{AC}$$

$$|\Psi^+\rangle_{AC}$$

$$|\Psi^-\rangle_{AC}$$

Zustand B von Bob:

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \alpha \\ -\beta \end{pmatrix}$$

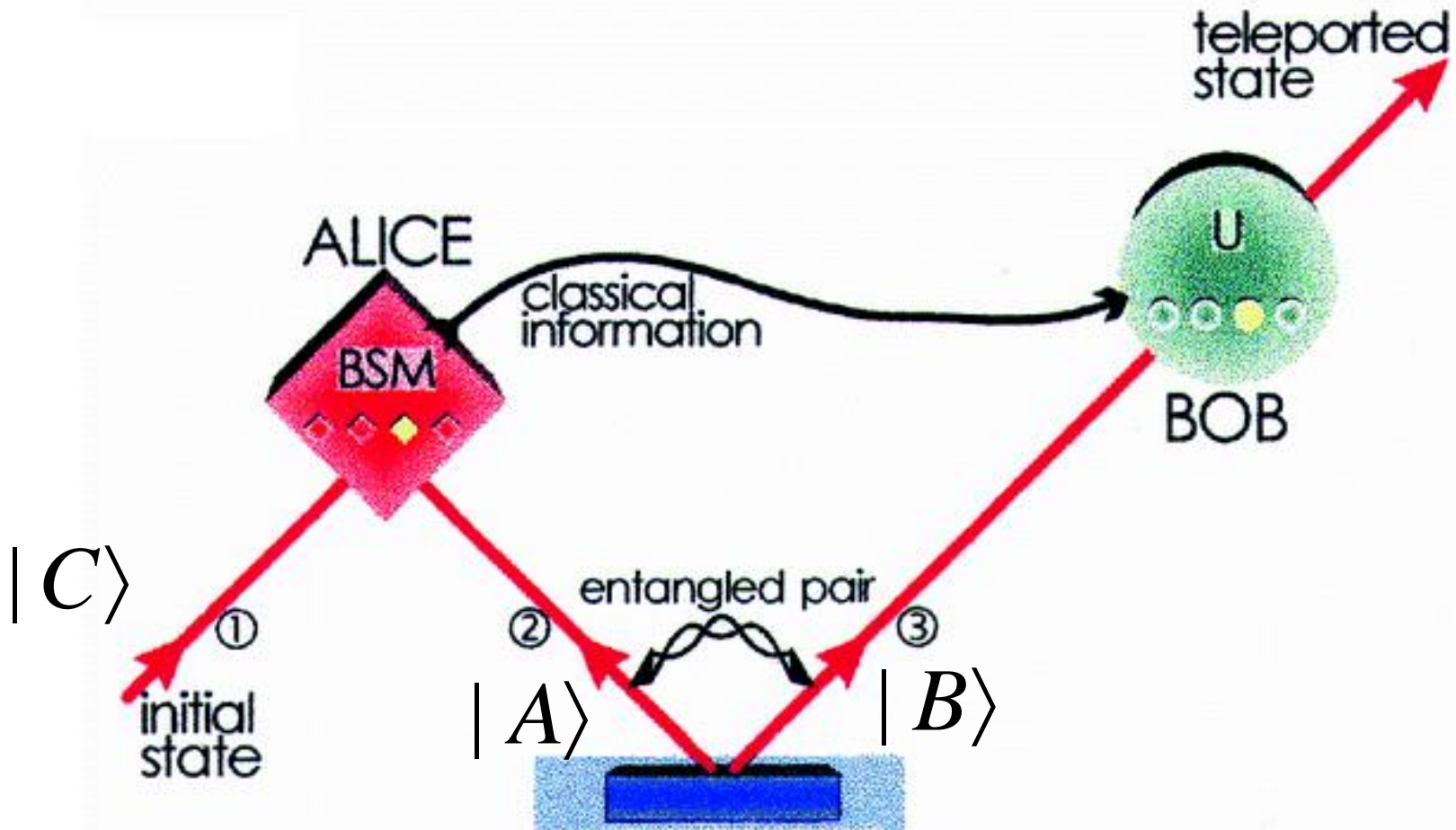
$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ \alpha \end{pmatrix}$$

$$\begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \beta \\ -\alpha \end{pmatrix}$$

# Teleportations-Protokoll

- Zustand C kann völlig unbekannt sein
- Nur Zustand „teleportiert“
  - kein Materie/Energie-Transfer
- No-Clone-Theorem nicht verletzt
- Klassischer und quantenmechanischer Kanal
  - Kompatibel mit spezieller Relativitätstheorie

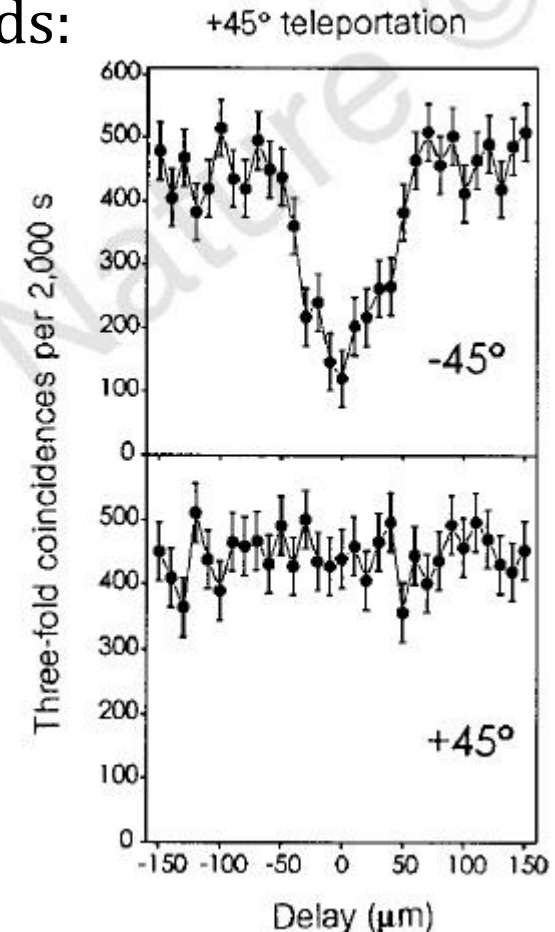
# Teleportations-Protokoll



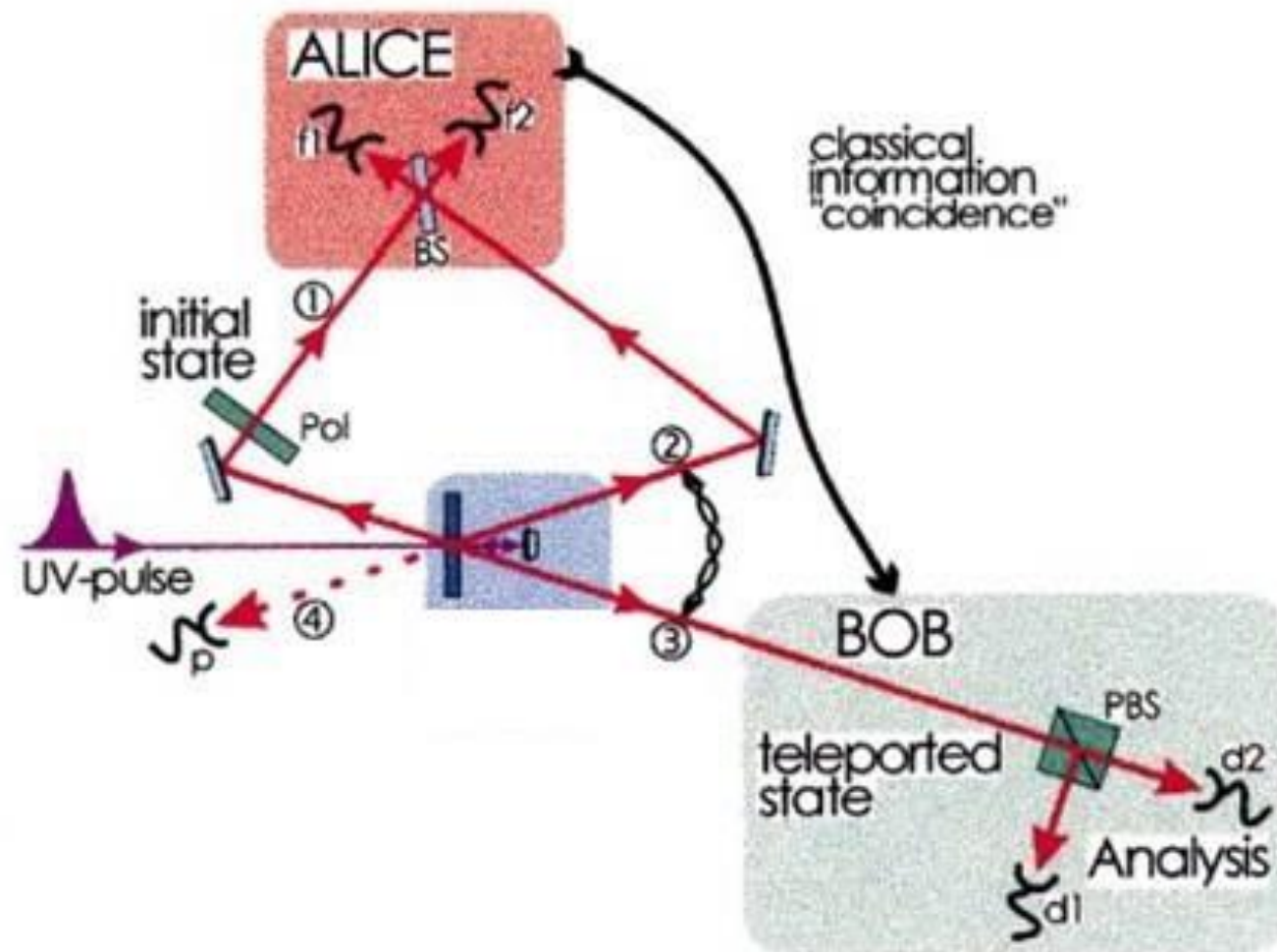
„Experimental quantum teleportation“, Dik Bouwmeester et al, Nature vol. 390, 11 December 1997

# Experimentelle Umsetzung mit Photonen

- Produktion eines verschränkten Zustands:
  - Parametrische Fluoreszenz
- Verschränkung durch Strahlteiler
  - Photonen müssen ununterscheidbar sein
- Nachweis der Teleportation
  
- Aber: Durch diese Methode nur ein Bell-Zustand nachweisbar zu teleportieren



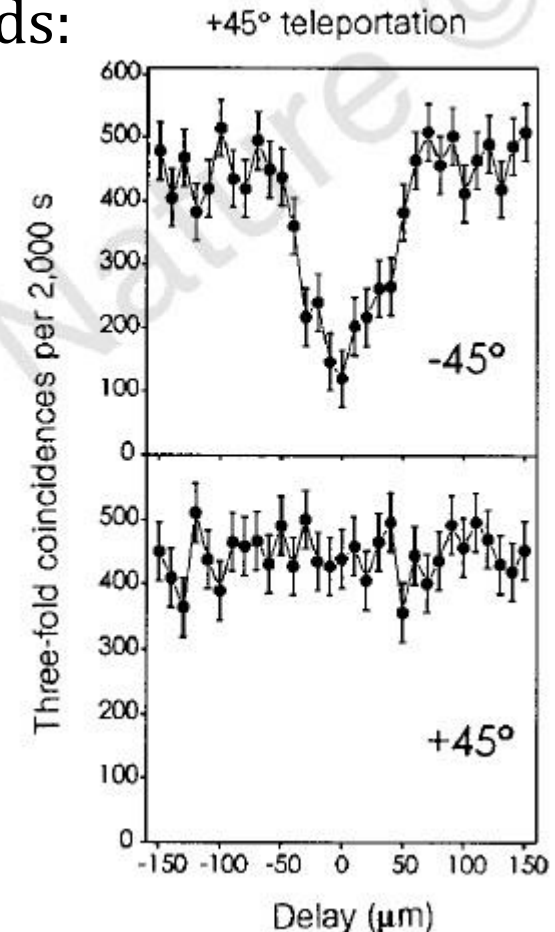
# Experimenteller Aufbau für Photonen



„Experimental quantum teleportation“, Dik Bouwmeester et al, Nature vol. 390, 11 December 1997

# Experimentelle Umsetzung mit Photonen

- Produktion eines verschränkten Zustands:
  - Parametrische Fluoreszenz
- Verschränkung durch Strahlteiler
  - Photonen müssen ununterscheidbar sein
- Nachweis der Teleportation
  
- Aber: Durch diese Methode nur ein Bell-Zustand nachweisbar zu teleportieren



# Weitere Experimente

- Teleportation von Atomen bei allen Zustände
- Teleportation von Photonen über lange Distanzen
  - Tauschen der Verschränkung zwischen Paaren



Herbst, Zeilinger et al., Teleportation of entanglement over 143 km, <http://arxiv.org/abs/1403.0009>



# Ausblick

- Übertragung von fragilen Zuständen über große Distanzen
- Informationen über kurzlebige Zustände auf langlebige übertragen
- Idee des weltweiten Quantum Computing durch ein Quantum Internet

Vielen Dank für Eure Aufmerksamkeit

# Quellen

- Bennett, C.H. et al. Teleporting an unknown quantum state via dual classic and Einstein-Podolsky-Rosen channels. Phys. Rev. Lett. 70, 1895-1899(1993)
- Bouwmeester, D. et al. Experimental quantum teleportation. Nature 390, 575- 579(1997)
- Laloë, F. Do we really understand quantum mechanics? Strange correlations, para- doxes, and theorems. Am. J. Phys. Vol. 69, No. 6 655-701 (2001)
- Riebe, M. et al. Teleportation with atoms. Nature Vol. 429 (2004)
- Herbst, Zeilinger et al., Teleportation of entanglement over 143 km, <http://arxiv.org/abs/1403.0009>
- [http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum\\_teleportation](http://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_teleportation) (Stand: 30.06.14)