Vortrag zur Quantenteleportation

Sebastian Knauer

Institut für Physik
Humboldt-Universität zu Berlin

07.01.2008

Inhaltsverzeichnis

Einleitung

- **keine** Realisierung der allg. Vorstellung von Teleportation aus science fiction (**Masse** (Person!) über große Strecken ohne Verzögerung bewegt)

Einleitung

- **keine** Realisierung der allg. Vorstellung von Teleportation aus science fiction (**Masse** (Person!) über große Strecken ohne Verzögerung bewegt)
- Übertragung des **Zustandes** eines Quantensystems auf anderes mittels klass. Kanal (z.B. Funk)

Einleitung

- **keine** Realisierung der allg. Vorstellung von Teleportation aus science fiction (**Masse** (Person!) über große Strecken ohne Verzögerung bewegt)
- Übertragung des **Zustandes** eines Quantensystems auf anderes mittels klass. Kanal (z.B. Funk)
- $\Rightarrow$ Einhaltung aller physikal. Gesetze, insbesondere Einsteins Postulat der Lichtgeschwindigkeit als absolute Grenze bei Signalübertragung

Qubit, Verschränkung, Bellzustände

- QM. Entsprechung zum Bit
- 2 Basiszustände benötigt (wie bei Bit)

Qubit, Verschränkung, Bellzustände

- QM. Entsprechung zum Bit
- 2 Basiszustände benötigt (wie bei Bit)
- Allg.: $|Q\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \qquad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$

Qubit, Verschränkung, Bellzustände

- QM. Entsprechung zum Bit
- 2 Basiszustände benötigt (wie bei Bit)
- Allg.: $|Q\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \qquad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$
- $|Q\rangle$ Superposition, nicht bel. Gemisch

Qubit, Verschränkung, Bellzustände

- QM. Entsprechung zum Bit
- 2 Basiszustände benötigt (wie bei Bit)
- Allg.: $|Q\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \qquad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$
- $|Q\rangle$ Superposition, nicht bel. Gemisch

Zustand zweier verschränkter Qubits:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|1\rangle_2 - |1\rangle_1|0\rangle_2) \tag{1}$$

$\rightarrow$ beteiligten Zustände zunächst völlig undefiniert

Qubit, Verschränkung, Bellzustände

- QM. Entsprechung zum Bit
- 2 Basiszustände benötigt (wie bei Bit)
- Allg.: $|Q\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \qquad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$
- $|Q\rangle$ Superposition, nicht bel. Gemisch

Zustand zweier verschränkter Qubits:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|1\rangle_2 - |1\rangle_1|0\rangle_2) \tag{1}$$

$\rightarrow$ beteiligten Zustände zunächst völlig undefiniert
$\rightarrow$ Messung

Qubit, Verschränkung, Bellzustände

- QM. Entsprechung zum Bit
- 2 Basiszustände benötigt (wie bei Bit)
- Allg.: $|Q\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle \qquad |\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$
- $|Q\rangle$ Superposition, nicht bel. Gemisch

Zustand zweier verschränkter Qubits:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|1\rangle_2 - |1\rangle_1|0\rangle_2) \tag{1}$$

$\rightarrow$ beteiligten Zustände zunächst völlig undefiniert
$\rightarrow$ Messung $\Rightarrow$ beide in wohldef. Zustand

Bellzustände $\rightarrow$ vollständige orthogonale Basis für zwei verschränkte Qubits:

$$\begin{aligned}
|\psi^+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|1\rangle_2 + |1\rangle_1|0\rangle_2)\\
|\psi^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|1\rangle_2 - |1\rangle_1|0\rangle_2)\\
|\phi^+\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|0\rangle_2 + |1\rangle_1|1\rangle_2)\\
|\phi^-\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|0\rangle_2 - |1\rangle_1|1\rangle_2) \qquad (2)
\end{aligned}$$

Protokoll nach Bennett

Bennett et al. 1993

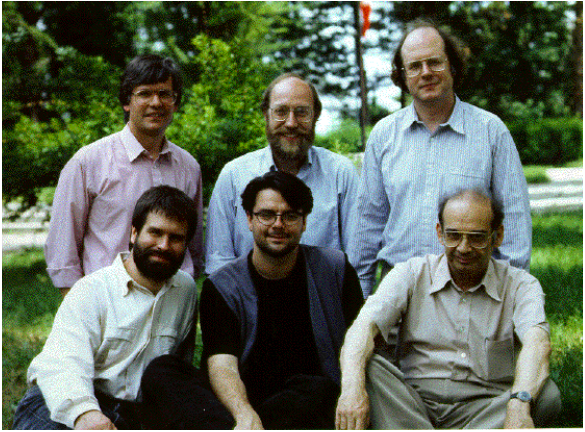


Abbildung: (top,left) R. Jozsa, W. K. Wotters, Charles H. Bennett. (bottom, left) G. Brassard, C. Crepeau, A. Peres. Photo: A. Berthiaume

Protokoll nach Bennett

Bennett et al. 1993

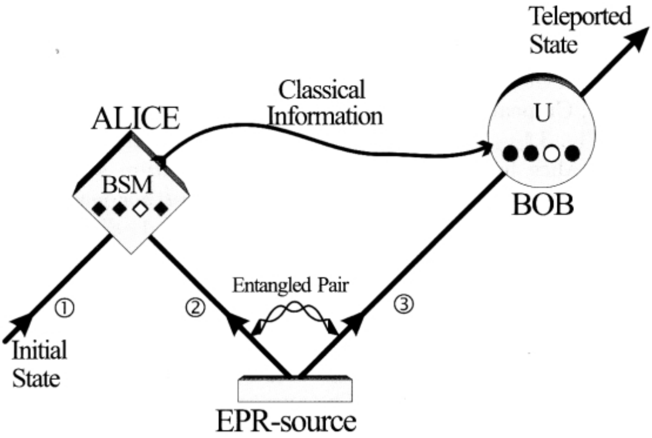
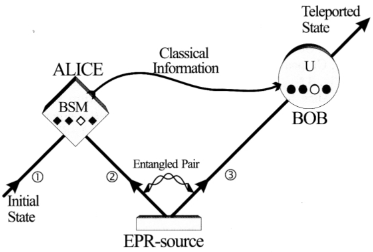
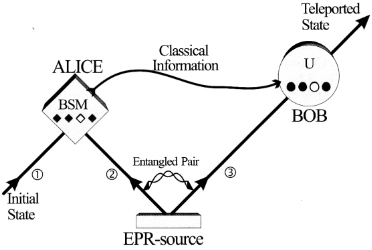


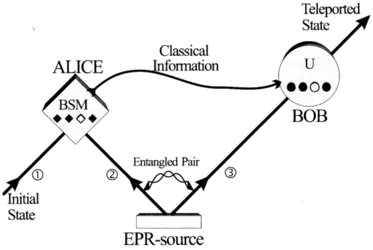
Abbildung: Schema nach Bennett [Phys.Rev. Lett. 70, 1895 (1993)]



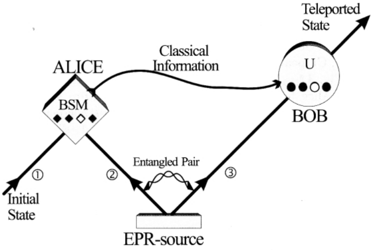
- Alice: Qubit im Zustand $|\psi\rangle_1$
  $\rightarrow |\psi\rangle_1 = \alpha|0\rangle_1 + \beta|1\rangle_1$



- Alice: Qubit im Zustand $|\psi\rangle_1$
  $\rightarrow |\psi\rangle_1 = \alpha|0\rangle_1 + \beta|1\rangle_1$
- Alice Absicht zum Empfänger (Bob) Zustand zu transferieren
  $\rightarrow$ A. kann nicht direkt senden (Wellenfunktionenkollaps)



- Alice: Qubit im Zustand $|\psi\rangle_1$
  $\rightarrow |\psi\rangle_1 = \alpha|0\rangle_1 + \beta|1\rangle_1$
- Alice Absicht zum Empfänger (Bob) Zustand zu transferieren
  $\rightarrow$ A. kann nicht direkt senden (Wellenfunktionenkollaps)
- Protokoll: 2 Hilfsteilchen (verschränkt)
  $\rightarrow |\psi\rangle_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_2|1\rangle_3 - |0\rangle_3|1\rangle_2)$

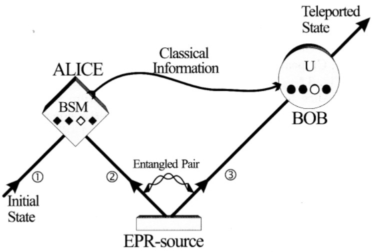


- Alice: Qubit im Zustand $|\psi\rangle_1$
  $\rightarrow |\psi\rangle_1 = \alpha|0\rangle_1 + \beta|1\rangle_1$
- Alice Absicht zum Empfänger (Bob) Zustand zu transferieren
  $\rightarrow$ A. kann nicht direkt senden (Wellenfunktionenkollaps)
- Protokoll: 2 Hilfsteilchen (verschränkt)
  $\rightarrow |\psi\rangle_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_2|1\rangle_3 - |0\rangle_3|1\rangle_2)$

Erinnerung: Zustand zweier verschränkter Qubits:

$$|\psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|1\rangle_2 - |1\rangle_1|0\rangle_2)$$

$\rightarrow$ beteiligten Zustände zunächst völlig undefiniert
$\rightarrow$ Messung $\Rightarrow$ beide in wohldef. Zustand



- Alice: Qubit im Zustand $|\psi\rangle_1$
  $\rightarrow |\psi\rangle_1 = \alpha|0\rangle_1 + \beta|1\rangle_1$
- Alice Absicht zum Empfänger (Bob) Zustand zu transferieren
  $\rightarrow$ A. kann nicht direkt senden (Wellenfunktionenkollaps)
- Protokoll: 2 Hilfsteilchen (verschränkt)
  $\rightarrow |\psi\rangle_{23} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_2|1\rangle_3 - |0\rangle_3|1\rangle_2)$

Haben: 3 Teilchen (2 & 3 verschränkt, Teilchen 1 in keiner Weise mit 2 und 3 verknüpft)

- gemeinsamer Zustand $|\psi\rangle_{123}$ lässt sich schreiben als Produktzustand:

$$|\psi\rangle_{123} = |\psi\rangle_1 \otimes |\psi\rangle_{23} \tag{3}$$

Einsetzten und Ausmultiplizieren:

$$
\begin{aligned}
|\psi\rangle_{123} &= \frac{\alpha}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|0\rangle_2|1\rangle_3 - |0\rangle_1|1\rangle_2|0\rangle_3) \\
&+ \frac{\beta}{\sqrt{2}}(|1\rangle_1|0\rangle_2|1\rangle_3 - |1\rangle_1|1\rangle_2|0\rangle_3) \quad (4)
\end{aligned}
$$

Einsetzten und Ausmultiplizieren:

$$
\begin{aligned}
|\psi\rangle_{123} &= \frac{\alpha}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|0\rangle_2|1\rangle_3 - |0\rangle_1|1\rangle_2|0\rangle_3) \\
&+ \frac{\beta}{\sqrt{2}}(|1\rangle_1|0\rangle_2|1\rangle_3 - |1\rangle_1|1\rangle_2|0\rangle_3)
\end{aligned} \tag{4}
$$

$\rightarrow$ gemeinsames Messen von Quant 1 & Quant 2 als Projektion der Quanten auf neue Basis von Bell-Zuständen:

Einsetzten und Ausmultiplizieren:

$$\begin{aligned} |\psi\rangle_{123} &= \frac{\alpha}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|0\rangle_2|1\rangle_3 - |0\rangle_1|1\rangle_2|0\rangle_3) \\ &+ \frac{\beta}{\sqrt{2}}(|1\rangle_1|0\rangle_2|1\rangle_3 - |1\rangle_1|1\rangle_2|0\rangle_3) \end{aligned} \quad (4)$$

$\rightarrow$ gemeinsames Messen von Quant 1 & Quant 2 als Projektion der Quanten auf neue Basis von Bell-Zuständen:

Erinnerung: Bell-Zustände

$$|\psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|1\rangle_2 \pm |1\rangle_1|0\rangle_2) \quad (5)$$

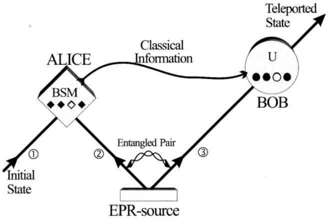
$$|\phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|0\rangle_2 \pm |1\rangle_1|1\rangle_2) \quad (6)$$

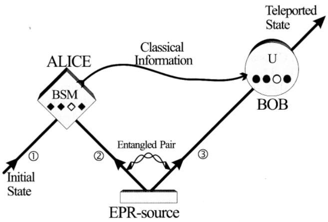
Diese Darstellung in den Zustand aller drei Quanten einsetzten:

Diese Darstellung in den Zustand aller drei Quanten einsetzten:

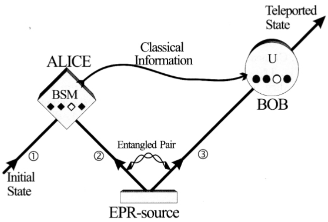
$$
\begin{aligned}
\Rightarrow |\psi\rangle_{123} &= |\psi\rangle_1 \otimes |\psi\rangle_{23} \\
&= \frac{1}{2}[|\psi^-\rangle_{12}(-\alpha|0\rangle_3 - \beta|1\rangle_3) \\
&\quad +|\psi^+\rangle_{12}(-\alpha|0\rangle_3 + \beta|1\rangle_3) \\
&\quad +|\phi^-\rangle_{12}(\alpha|1\rangle_3 + \beta|0\rangle_3) \\
&\quad +|\phi^+\rangle_{12}(\alpha|1\rangle_3 - \beta|0\rangle_3)]
\end{aligned} \tag{7}
$$

- alle Bell-Zustandsmessungen mit Wahrscheinlichkeit $\frac{1}{4}$

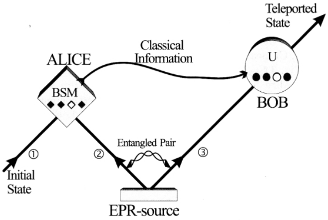

Teleported
State
Classical
Information
ALICE
BSM
U
BOB
Entangled Pair
①
②
③
Initial
State
EPR-source



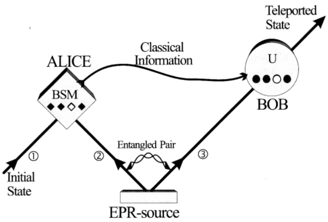
- Alice führt Bell-State Messung (BSM) durch ($\rightarrow$ evt. Diskussion)



- Alice führt Bell-State Messung (BSM) durch ($\rightarrow$ evt. Diskussion)
  - Teilchen 1 & 2 auf einen der 4 Bellzust. projezieren



- Alice führt Bell-State Messung (BSM) durch ($\rightarrow$ evt. Diskussion)
  - Teilchen 1 & 2 auf einen der 4 Bellzust. projezieren
  - Zustand 3 dann zum entpr. Bellzustand korrespondiert



- Alice führt Bell-State Messung (BSM) durch ($\rightarrow$ evt. Diskussion)
  - Teilchen 1 & 2 auf einen der 4 Bellzust. projezieren
  - Zustand 3 dann zum entpr. Bellzustand korrespondiert

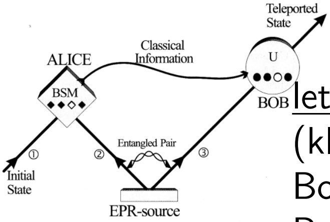
Beispiel:

$$
\begin{aligned}
|\psi\rangle_{123} \quad = \quad & \frac{1}{2}[|\psi^-\rangle_{12}(-\alpha|0\rangle_3 - \beta|1\rangle_3) \\
& +|\psi^+\rangle_{12}(-\alpha|0\rangle_3 + \beta|1\rangle_3) \\
& +|\phi^-\rangle_{12}(\alpha|1\rangle_3 + \beta|0\rangle_3) \\
& +|\phi^+\rangle_{12}(\alpha|1\rangle_3 - \beta|0\rangle_3)]
\end{aligned}
$$

Quanten-teleportation

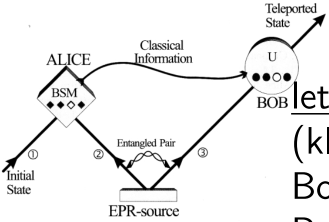
S.Knauer

- Einleitung
- Bennett
- Zeilinger
- Ausblick
- Zusammenfassung
- Literatur



- **Bsp.:** Alice: $|\psi^-\rangle_{12} \Rightarrow$ Bob: $-\alpha|0\rangle_3 - \beta|1\rangle_3$

letzer Schritt: Information (klassischer Kanal) von Alice zu Bob, welcher der 4 Bell-Zustände Alice gemessen



- **Bsp.:** Alice: $|\psi^{-}\rangle_{12} \Rightarrow$ Bob: $-\alpha|0\rangle_3 - \beta|1\rangle_3$

<u>letzer Schritt:</u> Information (klassischer Kanal) von Alice zu Bob, welcher der 4 Bell-Zustände Alice gemessen

- $\Rightarrow$ Bob eine von vier unitären Transformationen (durch $|\psi^{\pm}\rangle_{12}$ und $|\phi^{\pm}\rangle_{12}$ eindeutig bestimmt) auswählen, die auf seinen Zustand anwenden und damit ursprünglichen Zustand von Teilchen 1 in 3 wiederherstellen

$\Longrightarrow$ Protokoll abgeschlossen

Anmerkungen

- α und β für Alice immer unbekannt
  - Alice durch BSM keine Information über Zustand von Teilchen 1 („nur“ Verschränkung mit 2)
  - $\Rightarrow$ Teilchen 1 verliert hierbei seinen Ausgangszustand (*No-Cloning* Theorem)

Experiment nach Zeilinger

Experiment nach Zeilinger

Donau-Experiment (Zeilinger et al. 2004)
Realisierung des experimentellen Aufbaus unter realistischen Bedingungen:

- Alice und Bob sind 600m voneinander entfernt
- Quantenkanal ist 800m lange optische Faser unter der Donau

Experiment nach Zeilinger

Donau-Experiment (Zeilinger et al. 2004)
Realisierung des experimentellen Aufbaus unter realistischen Bedingungen:

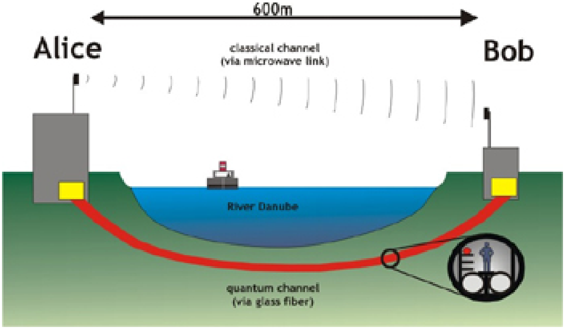


Abbildung: Donau-Experiment (Bild: Institute for Experimental Physics - University of Vienna)

Ausblick

- Teleportation zw. Licht und Materie (z.B. Forschergruppe um Eugene Polzik vom Niels-Bohr-Institut der Universität Kopenhagen (Okt. 06))

Ausblick

- Teleportation zw. Licht und Materie (z.B. Forschergruppe um Eugene Polzik vom Niels-Bohr-Institut der Universität Kopenhagen (Okt. 06))
- dense coding (= dichtes Kodieren; 1 Qubit überträgt 2 Bit)

Ausblick

- Teleportation zw. Licht und Materie (z.B. Forschergruppe um Eugene Polzik vom Niels-Bohr-Institut der Universität Kopenhagen (Okt. 06))
- dense coding (= dichtes Kodieren; 1 Qubit überträgt 2 Bit)
- Teleportation komplexer Systeme: Moleküle,... (Quanteninterferenz!)

- Weitere Teleportation zwischen Erde und Satellit durch Atmosphäre (ARTEMIS...)

- Weitere Teleportation zwischen Erde und Satellit durch Atmosphäre (ARTEMIS...)
- Teleportation in Quantenkryptographie $\longrightarrow$ abhörsichere Datenübertragung

- Weitere Teleportation zwischen Erde und Satellit durch Atmosphäre (ARTEMIS...)
- Teleportation in Quantenkryptographie $\longrightarrow$ abhörsichere Datenübertragung
- entanglement swapping (Verschränkungsaustausch) & Quantenspeicher $\longrightarrow$ vernetzte Quantencomputer

Zusammenfassend:

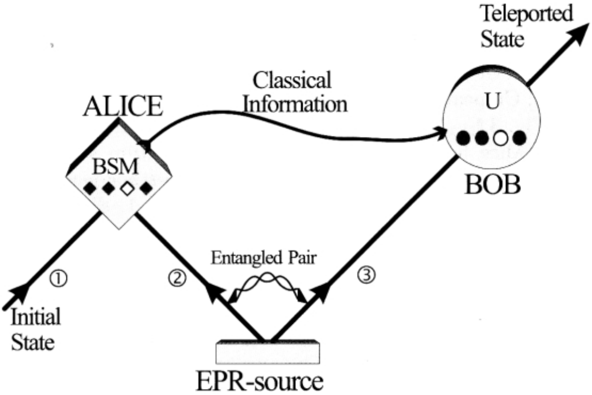
- keine science fiction $\longrightarrow$ Einhaltung physik. Gesetzte (Lichtgeschw., No-Cloning)

Zusammenfassend:

- keine science fiction $\longrightarrow$ Einhaltung physik. Gesetzte (Lichtgeschw., No-Cloning)
- Protokoll nach Bennett (Ausgangspunkt: verschränktes Paar Qubits)

Zusammenfassend:

- keine science fiction $\longrightarrow$ Einhaltung physik. Gesetzte (Lichtgeschw., No-Cloning)



Zusammenfassend:

- keine science fiction $\longrightarrow$ Einhaltung physik. Gesetzte (Lichtgeschw., No-Cloning)
- Protokoll nach Bennett (Ausgangspunkt: verschränktes Paar Qubits)
- Anton Zeilinger - Donauexperiment

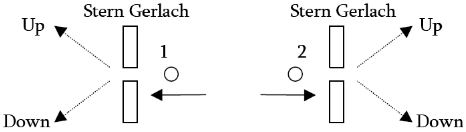
Literaturangaben

- D. Bouwmeester et al., Nature 390, 575 (1997)
- C. Bennett et al. [Phys.Rev. Lett. 70, 1895 (1993)]
- D. Bouwmeester, A. Ekert und A. Zeilinger (Hrsg.), *The Physics of Quantum Information*, Springer, Berlin 2000
- Paul, Harry, *Photonen-Introduction to quantum optics,* Cambridge University Press (Teubner), 2004
- Nature, Bd. 443, S. 557, 2006
- Audretsch, Jürgen; *Verschränkte Systeme - Die Quantenphysik auf neuen Wegen; WILEY-VCH, Weinheim 2005*

Ich bedanke mich für Eure Aufmerksamkeit.

BSM

- Teilchen 1 und 2 auf einen von vier möglichen maximal verschränkten Zuständen projizieren
- Diesen Prozess kann man mit der Messung von einem Zweiteilchensystem mit zwei Stern-Gerlach Magneten vergleichen.



1 und 2 hier nicht verschränkt $\rightarrow$ jedes Teilchen Messung von Spin-up oder down möglich $\Rightarrow$ vier möglichen Zustände des Zweiteilchensystems nach Messung:
$|0\rangle_1|0\rangle_2 \quad |0\rangle_1|1\rangle_2 \quad |1\rangle_1|0\rangle_2 \quad |1\rangle_1|1\rangle_2$

BSM

Bell State Messung ähnlich, nur als vier mögl. Zustände des Systems 4 maximal verschr. Zustände zw. den Teilchen 1 und 2, die sogenannte Bell-Basis:

$$\begin{aligned}
|e^{(0)}\rangle_{12} &= |\psi^+\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|1\rangle_2 + |1\rangle_1|0\rangle_2) \quad \lambda = 0 \\
|e^{(1)}\rangle_{12} &= |\psi^-\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|1\rangle_2 - |1\rangle_1|0\rangle_2) \quad \lambda = 1 \\
|e^{(2)}\rangle_{12} &= |\phi^+\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|1\rangle_2 + |1\rangle_1|0\rangle_2) \quad \lambda = 2 \\
|e^{(3)}\rangle_{12} &= |\phi^-\rangle_{12} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|0\rangle_1|1\rangle_2 - |1\rangle_1|0\rangle_2) \quad \lambda = 3
\end{aligned}$$

- ordnen Bell-Basis eine Observable zu, die zw. 4 Mögl. unterscheidet
- BSM ist ein Messung der Observablen:

$$S_{12} = \sum_{\lambda=0}^{3} \lambda |e^{(\lambda)}\rangle_{1212}\langle e^{(\lambda)}|$$

Unitäre Transformation

Weiter: ordnen jeder Bell-Basis eine unitäre Transf. zu:

$$\begin{aligned} U^{(0)} &= -|0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1| \\ U^{(1)} &= -|0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1| \\ U^{(2)} &= |0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1| \\ U^{(3)} &= |0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1| \end{aligned}$$

Unitäre Transformation

Weiter: ordnen jeder Bell-Basis eine unitäre Transf. zu:

$$
\begin{aligned}
U^{(0)} &= -|0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1| \\
U^{(1)} &= -|0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1| \\
U^{(2)} &= |0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1| \\
U^{(3)} &= |0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1|
\end{aligned}
$$

System vor der Messung (ohne konkreten Beweis):

$$
|\psi\rangle_{123} = |\psi\rangle_1 |\psi^-\rangle_{23} = \frac{1}{2} \sum_{\lambda=0}^{3} |e^{(\lambda)}\rangle_{12} U_3^{(\lambda)+} |\psi\rangle_3
$$

Unitäre Transformation

Weiter: ordnen jeder Bell-Basis eine unitäre Transf. zu:

$$\begin{aligned} U^{(0)} &= -|0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1| \\ U^{(1)} &= -|0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1| \\ U^{(2)} &= |0\rangle\langle 0| + |1\rangle\langle 1| \\ U^{(3)} &= |0\rangle\langle 0| - |1\rangle\langle 1| \end{aligned}$$

System vor der Messung (ohne konkreten Beweis):

$$|\psi\rangle_{123} = |\psi\rangle_1 |\psi^-\rangle_{23} = \frac{1}{2} \sum_{\lambda=0}^{3} |e^{(\lambda)}\rangle_{12} U_3^{(\lambda)+} |\psi\rangle_3$$

Wenn die Bell State Messung durchgeführt wird befindet sich das System in einem der Eigenzustände $|e^{(\lambda)}\rangle_{12} U_3^{(\lambda)+} |\psi\rangle_3$.

Der Gesamtzustand des Systems beträgt: $|e^{(\lambda)}\rangle_{12}U_3^{(\lambda)+}|\psi\rangle_3$
$\rightarrow$ Alice hat nur maximal verschränkten Zustand der Bellbasis & damit keine Information mehr über ursprünglichen Zustand ψ_1

„No-cloning"-Theorem

„Ein unbekannter Quantenzustand kann nicht perfekt kopiert werden"

„No-cloning"-Theorem

„Ein unbekannter Quantenzustand kann nicht perfekt kopiert werden"

Ann.: es ex. unit. Zeientwicklung, die mit einem Hilfszustand einen Zustand genau kopiert, also:
$\Omega|\psi\rangle|h\rangle = |\psi\rangle|\psi\rangle$

„No-cloning"-Theorem

„Ein unbekannter Quantenzustand kann nicht perfekt kopiert werden"

<u>Ann.:</u> es ex. unit. Zeientwicklung, die mit einem Hilfszustand einen Zustand genau kopiert, also: $\Omega|\psi\rangle|h\rangle = |\psi\rangle|\psi\rangle$

Anwendung dieser Entwickl. auf Basiszustände einer dualen Basis:

$$\begin{aligned}\Omega|0\rangle|h\rangle &= |0\rangle|0\rangle \\ \Omega|1\rangle|h\rangle &= |1\rangle|1\rangle\end{aligned}$$

„No-cloning"-Theorem

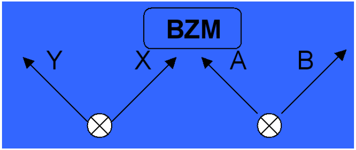
„Ein unbekannter Quantenzustand kann nicht perfekt kopiert werden"

Ann.: es ex. unit. Zeientwicklung, die mit einem Hilfszustand einen Zustand genau kopiert, also:
$\Omega|\psi\rangle|h\rangle = |\psi\rangle|\psi\rangle$
Anwendung dieser Entwickl. auf Basiszustände einer dualen Basis:

$$\begin{aligned} \Omega|0\rangle|h\rangle &= |0\rangle|0\rangle \\ \Omega|1\rangle|h\rangle &= |1\rangle|1\rangle \end{aligned}$$

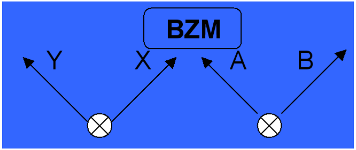
Wirkung auf Superpositionszustand
$|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$:
$\Omega(\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle)|h\rangle = \alpha|0\rangle|0\rangle + \beta|1\rangle|1\rangle \neq |\psi\rangle|\psi\rangle$

Entanglement swapping



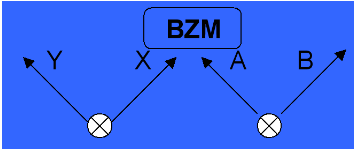
- es wird Zustand X über verschränktes Paar A und B auf B teleportiert, der selbst verschränkt ist mit Y

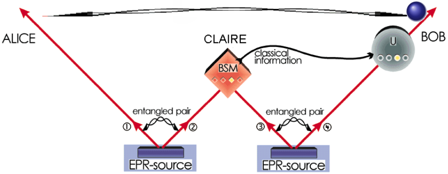
Entanglement swapping



- es wird Zustand X über verschränktes Paar A und B auf B teleportiert, der selbst verschränkt ist mit Y
- $\Rightarrow$ Verschränkungen wechseln von (A$\leftrightarrow$B) und (Y$\leftrightarrow$X) nach (Y$\leftrightarrow$B) und (X$\leftrightarrow$A)!

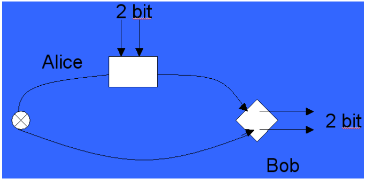
Entanglement swapping





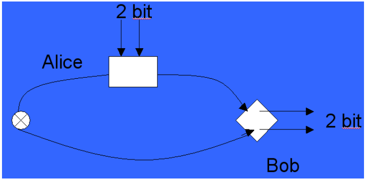
- es wird Zustand X über verschränktes Paar A und B auf B teleportiert, der selbst verschränkt ist mit Y
- $\Rightarrow$ Verschränkungen wechseln von (A$\leftrightarrow$B) und (Y$\leftrightarrow$X) nach (Y$\leftrightarrow$B) und (X$\leftrightarrow$A)!
- D.h., dass 2 Photonen, die keinerlei gemeinsame Vergangenheit haben, sich also nie „getroffen“ haben, miteinander verschränkt werden!!

Dense coding



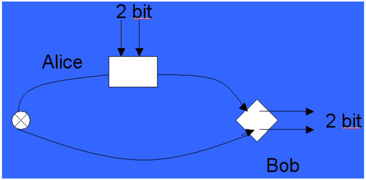
- Alice und Bob erhalten je ein Photon eines verschränkten Paares

Dense coding



- Alice und Bob erhalten je ein Photon eines verschränkten Paares
- nun kann Alice ihr Photon manipulieren und an Bob schicken.
  Obwohl sie also nur ein Teilchen übermittelt, kann sie 2 Bit an Information übermitteln:

Dense coding



- Alice und Bob erhalten je ein Photon eines verschränkten Paares
- nun kann Alice ihr Photon manipulieren und an Bob schicken.
  Obwohl sie also nur ein Teilchen übermittelt, kann sie 2 Bit an Information übermitteln:
- durch die Manipulationen (Rotationen) an Alice's Photon werden beide Photonen in einen von den 4 Bellzuständen projeziert, den Bob nach Erhalten beider Photonen bestimmen kann.
  Diese Information entspricht 2 bit : 00,01,10,11