Teleportation

- Ziel: Reproduktion eines Qubit bei Bob durch bloße Informationsübertragung von Alice to Bob

- Klassisch: Alice analysiert (misst) Objekt und überträgt nur Information an Bob; Bob prepariert ein (Roh-)Objekt und hat damit eine Kopie

- Quantenmechanisch: **Problem!** Ort und Impuls oder Energie und Zeit eines Teilchens lassen sich nicht gleichzeitig genau messen. Ein Qubit (QM-Zustand) läßt sich nicht vollständig bestimmen.

mögliche Anwendungen:

- Datentransport in Quantencomputern

- Star-Trek Technologie

“Kochrezept”

Ausgangspunkt (Zutaten):

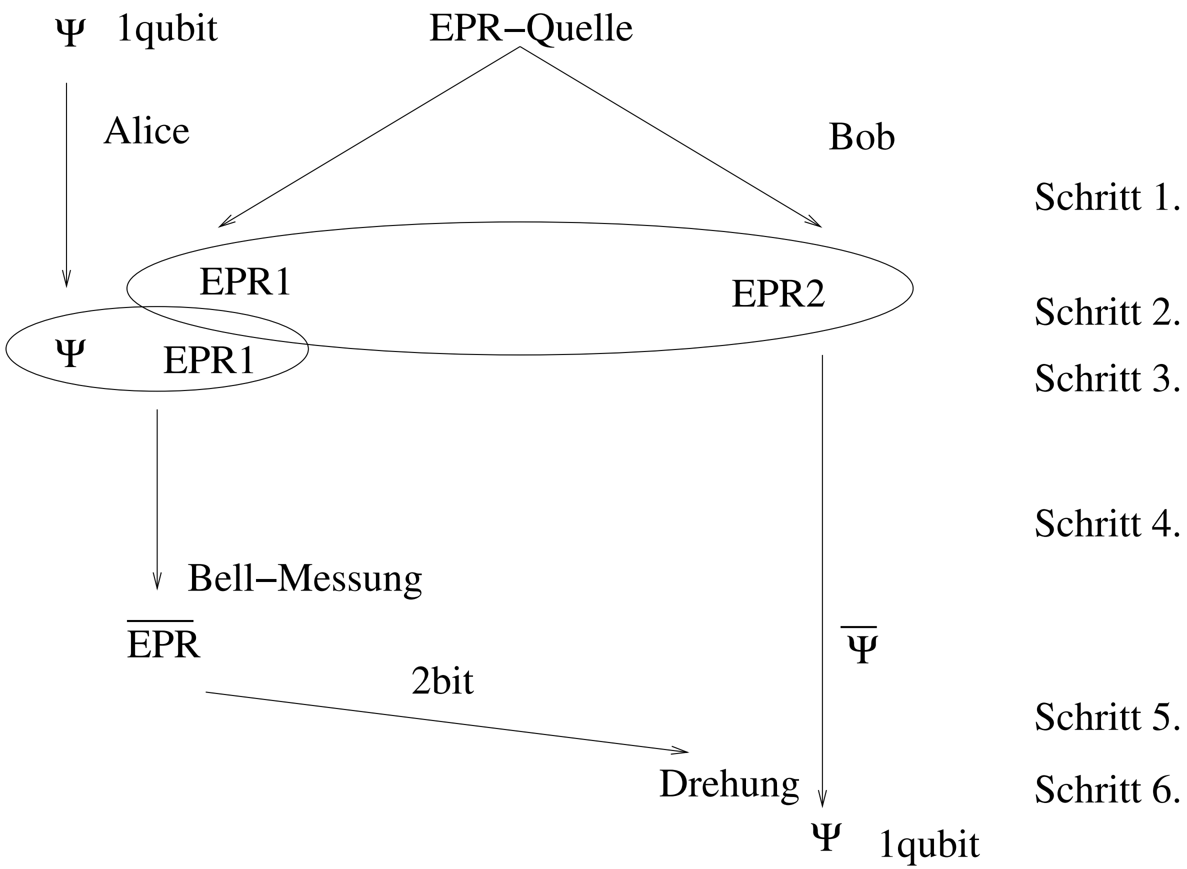
- Alice hat ein (unbekanntes) Qubit

$$\Psi = a|0\rangle + b|1\rangle, \quad a^*a + b^*b = 1 \tag{1}$$

- ein verschränktes Teilchenpaar

$$\mathrm{EPR} = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle) \tag{2}$$

- ein klassischer Nachrichtenkanal zwischen Alice und Bob



Ψ 1qubit
EPR−Quelle
Alice
Bob
Schritt 1.
EPR1
EPR2
Schritt 2.
Ψ
EPR1
Schritt 3.
Schritt 4.
Bell−Messung
$\overline{\mathrm{EPR}}$
$\overline{\Psi}$
2bit
Schritt 5.
Drehung
Schritt 6.
Ψ 1qubit

Schritt 1:

- verteilen des EPR-Paares, Teilchen EPR1 zu Alice und Teilchen EPR2 zu Bob

- beide speichern ihr Teilchen ohne die Kohärenz zu zerstören

Schritt 2:

- Alice verschränkt Ψ mit EPR1

$$\begin{aligned}\Phi &= \Psi \otimes \mathrm{EPR} \\ &= (a|0\rangle + b|1\rangle) \otimes \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle) \qquad (3) \\ &= \frac{1}{\sqrt{2}}(a|001\rangle + a|010\rangle + b|101\rangle + b|110\rangle)\end{aligned}$$

- die Information verteilt sich nun über das Gesamtsystem des EPR-Paares (Nichtlokalität), sie ist überall verfügbar

Schritt 3:

- Alice stellt ihre 2 Teilchen in Bell-Basis dar

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle + |11\rangle)$$

$$|\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle - |11\rangle)$$

$$|\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle + |10\rangle)$$

$$|\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle - |10\rangle)$$

$$\begin{aligned} \Phi &= \frac{1}{2\sqrt{2}}[\\ & (|00\rangle + |11\rangle)(a|1\rangle + b|0\rangle) \\ &+ (|00\rangle - |11\rangle)(a|1\rangle - b|0\rangle) \\ &+ (|01\rangle + |10\rangle)(a|0\rangle + b|1\rangle) \\ &+ (|01\rangle - |10\rangle)(a|0\rangle - b|1\rangle)] \qquad (4) \end{aligned}$$

Schritt 4:

- Alice misst in Bell-Basis $\Rightarrow$ $\overline{\text{EPR}}$
- Bob hat nun einen der vier Zustände $\bar{\Psi}$: $a|1\rangle + b|0\rangle$, $a|1\rangle - b|0\rangle$, $a|0\rangle + b|1\rangle$ oder $a|0\rangle - b|1\rangle$.

Schritt 5:

- Alice schickt das Ergebniss Ihrer Messung an Bob (2 klassische Bit)

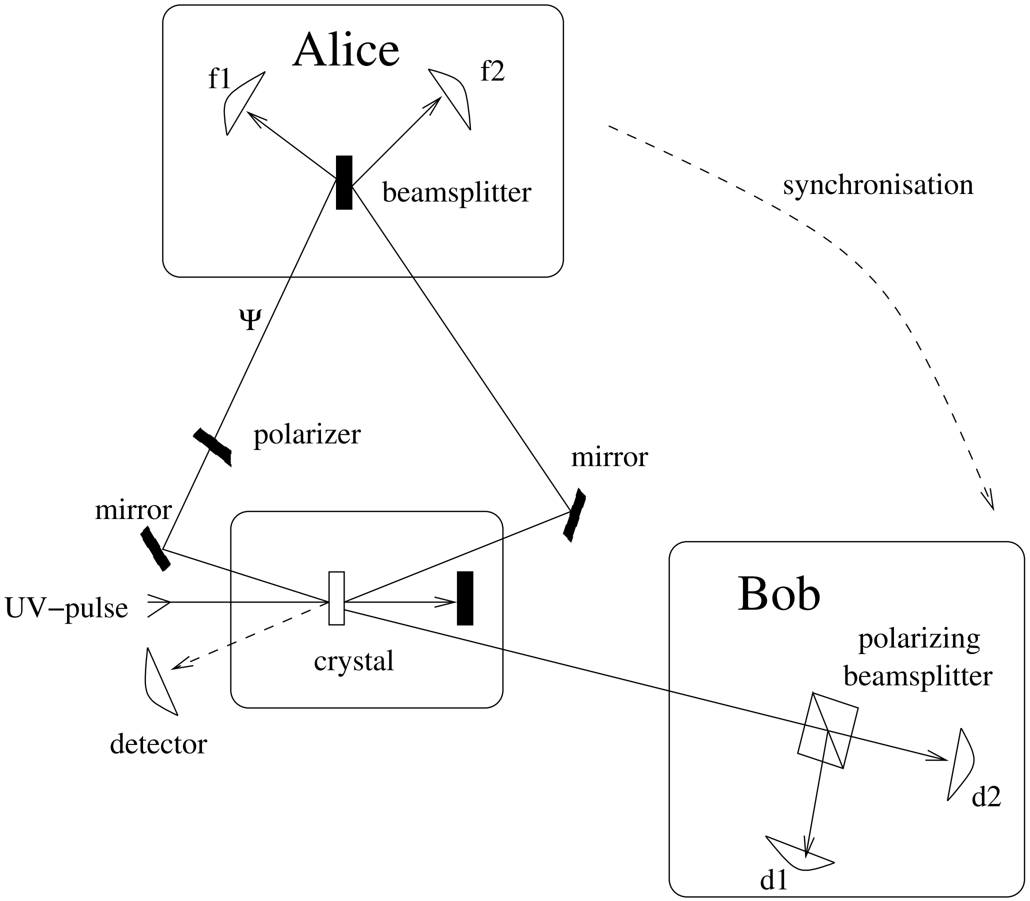
Schritt 6:

- Bob wendet eine von vier Transformationen an und transformiert seinen Zustand $\bar{\Psi}$ zurück zu Ψ (Drehung)

Bemerkungen:

• Schritt 5 setzt der Geschwindigkeit der Informationsübertragung die Obergrenze
• weder Alice noch Bob kennen Ψ
• Die Verschränkung von EPR1 und EPR2 wird in Schritt 3 bzw. 4 auf Ψ_a und EPR1 "übertragen" (verschoben)
• bei geschickterer Verschränkung der drei Teilchen kann Schritt 4 entfallen (?)

Experimentelle Realisierungen:
- A. Zeilinger, single photon experiments


Alice
f1
f2
beamsplitter
synchronisation
Ψ
polarizer
mirror
mirror
UV−pulse
crystal
detector
Bob
polarizing
beamsplitter
d2
d1

• Qubit mit Polarisation $|0\rangle = |V\rangle$, $|1\rangle = |H\rangle$
• Erzeugung des EPR-Paares mit UV-Laser und nichtlinearem Kristall (BBO=beta barium borate), die emitierten Photonen haben halbe Laserenergie und sind jeweils H- oder V-polarisiert (je Strahlenkegel). Überschneiden sich die Strahlenkegel so haben Photonen der beiden Schnittpunkte keine spezielle Polarisation, sind aber verschränkt.
• Verschränkung der Teilchen durch Strahlteiler (beamsplitter) nur für Ψ^-, nur dann ragieren beide Detektoren
• ohne Schritt 6

- NMR-Spektroskopie
• Einstellung von Kernspins
• Manipulation durch eingestrahlte Radioimpulse

Literatur:
[1] A. Zeilinger: Quantum Information, Physics World March 1998, p35
`physicsweb.org/article/world/11/3/9`

[2] D. Bouwmeester, A. Ekert, A. Zeilinger: The Physics of Quantum Information, Springer 2000; Kap. 3 (Kap.3.5 + `www.quantum.univie.ac.at/research/teleport/tpbsa.html`), z.T. mit Vorzeichenfehlern