

# Verschränkung

Kay-Sebastian Nikolaus

24.10.2014

# Überblick

1. Definition und Allgemeines
2. Historische Hintergründe, Probleme
  - 2.1 Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon
  - 2.2 Erklärung, Bell'sche Ungleichungen
  - 2.3 Informationsübertragung
3. Verschränkte Systeme
  - 3.1 Erzeugung
  - 3.2 Qubit
  - 3.3 No-Cloning-Theorem
  - 3.4 Anwendungen
4. Zusammenfassung
5. Quellen

# 1. Definition und Allgemeines

Es gilt:

$$|\Psi\rangle \neq |\varphi\rangle|\chi\rangle$$

Ein verschränkter Zustand:

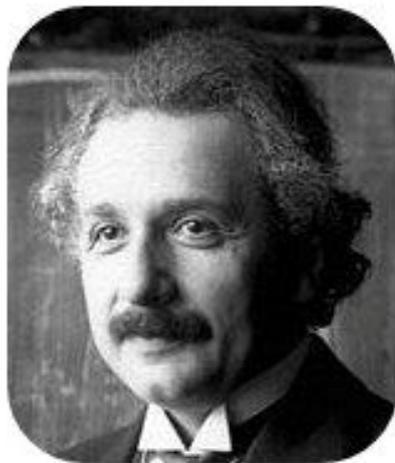
$$|\Psi\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|0\rangle|0\rangle + |1\rangle|1\rangle)$$

# 1. Definition und Allgemeines

- Korrelation der Messung bestimmter Observablen verschränkter Teilchen
- Nichtlokale Verbindung

# 2. Historische Hintergründe, Probleme

## 2.1 Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon



**A. Einstein**



**B. Podolsky**



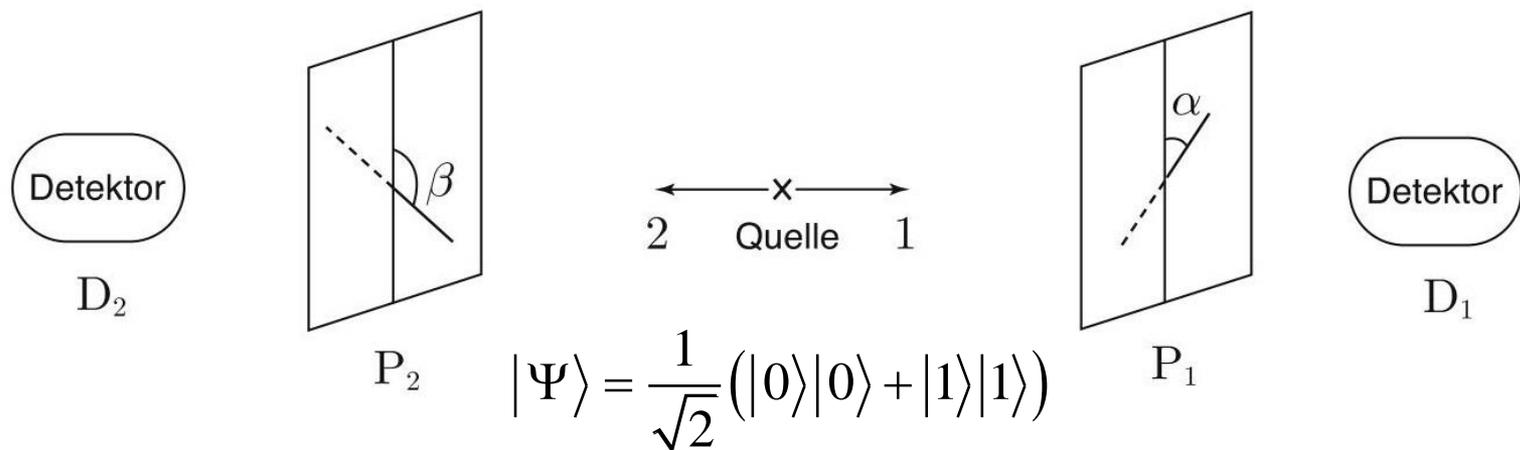
**N. Rosen**

[http://deskarati.com/wp-content/uploads/2012/02/einstein\\_podolsky\\_rosen.jpg](http://deskarati.com/wp-content/uploads/2012/02/einstein_podolsky_rosen.jpg)

# 2. Historische Hintergründe, Probleme

## 2.1 Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon

- Gedankenexperiment:



## 2. Historische Hintergründe, Probleme

### 2.1 Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon

- Verschränkung folgt aus Quantentheorie
- Heftige Debatten und Ablehnung der gesamten Quantentheorie
- Einstein: „spukhafte Fernwirkung“
  - Widersprüche zur Relativitätstheorie?
  - Vervollständigung der Quantentheorie?
  - verborgene Parameter als Erklärung?
- Gute experimentelle Belegung

# 2. Historische Hintergründe, Probleme

## 2.2 Erklärung, Bell'sche Ungleichungen



[http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/14/John\\_Stewart\\_Bell\\_\(physicist\)\\_portrait.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/1/14/John_Stewart_Bell_(physicist)_portrait.png)

## 2. Historische Hintergründe, Probleme

### 2.2 Erklärung, Bell'sche Ungleichungen

- Verborgene Parameter:

$$N(\alpha; \beta) = N(\alpha\gamma; \beta) + N(\alpha; \gamma\beta)$$

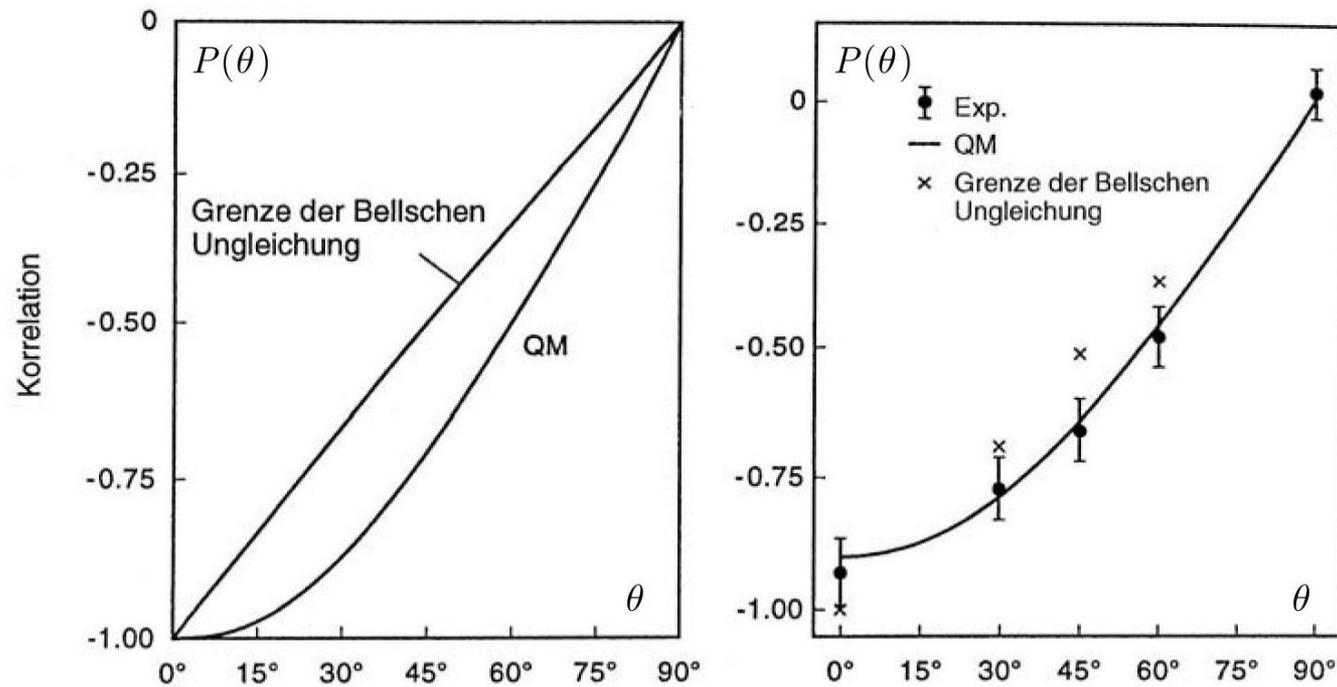
- Führt zu:

$$N(\alpha; \beta) \leq N(\alpha; \gamma) + N(\gamma; \beta)$$

- Quantentheorie verletzt Bell'sche Ungleichungen

# 2. Historische Hintergründe, Probleme

## 2.2 Erklärung, Bell'sche Ungleichungen



## 2. Historische Hintergründe, Probleme

### 2.2 Erklärung, Bell'sche Ungleichungen

- Quantentheorie bereits vollständig
- Keine versteckten Parameter
- Quantentheorie „nicht real“ und „nicht klassisch“
- Messung misst nicht vorhandene Werte sondern legt Werte erst fest

## 2. Historische Hintergründe, Probleme

### 2.3 Informationsübertragung

- „Information“ über Zustand des anderen Teilchens mit Überlichtgeschwindigkeit übertragen?

## 2. Historische Hintergründe, Probleme

### 2.3 Informationsübertragung

- „Information“ über Zustand des anderen Teilchens mit Überlichtgeschwindigkeit übertragen?
- Verschränkung transportiert keine Informationen
  - Kein Widerspruch zur Relativitätstheorie

# 3. Verschränkte Systeme

## 3.1 Erzeugung

- Nichtlinear optische Kristalle:
  - Photon hoher Energie erzeugt im Kristall zwei verschränkte Photonen halber Energie

# 3. Verschränkte Systeme

## 3.1 Erzeugung

- Nichtlinear optische Kristalle:
  - Photon hoher Energie erzeugt im Kristall zwei verschränkte Photonen halber Energie
- Anregung bestimmter Atome mit Laser
  - Emission zweier verschränkter Photonen bei Rückkehr in Grundzustand

# 3. Verschränkte Systeme

## 3.1 Erzeugung

- Nichtlinear optische Kristalle:
  - Photon hoher Energie erzeugt im Kristall zwei verschränkte Photonen halber Energie
- Anregung bestimmter Atome mit Laser
  - Emission zweier verschränkter Photonen bei Rückkehr in Grundzustand
- Jeweils bezüglich der Polarisation verschränkte Photonen

# 3. Verschränkte Systeme

## 3.1 Erzeugung

- Hochangeregtes zweiatomiges Molekül mit Spin null
  - Zerfall in zwei Atome mit entgegengesetztem Spin
- Atome bezüglich Spin verschränkt

# 3. Verschränkte Systeme

## 3.2 Qubit

- Vektor in einem zweidimensionalen Hilbertraum, Basisvektoren  $|0\rangle, |1\rangle$
- $|\psi\rangle = \alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$

## 3. Verschränkte Systeme

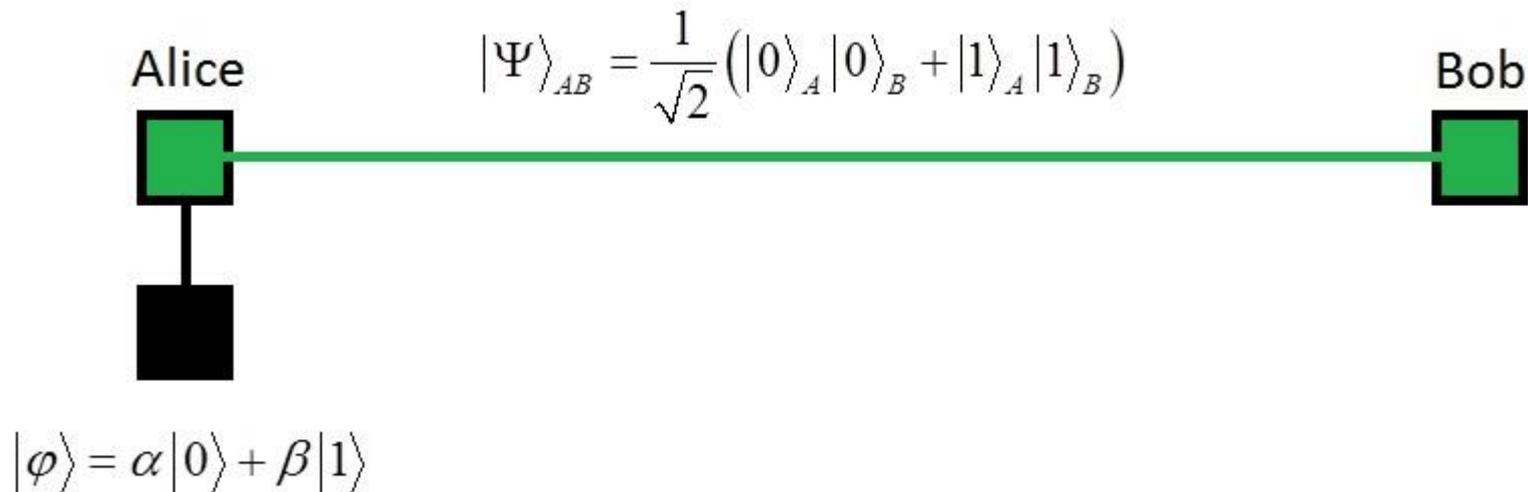
### 3.3 No-Cloning-Theorem

- Unmöglichkeit, einen Qubit perfekt auf einen anderen zu kopieren
- Originaler Qubit wird verändert

# 3. Verschränkte Systeme

## 3.4 Anwendungen

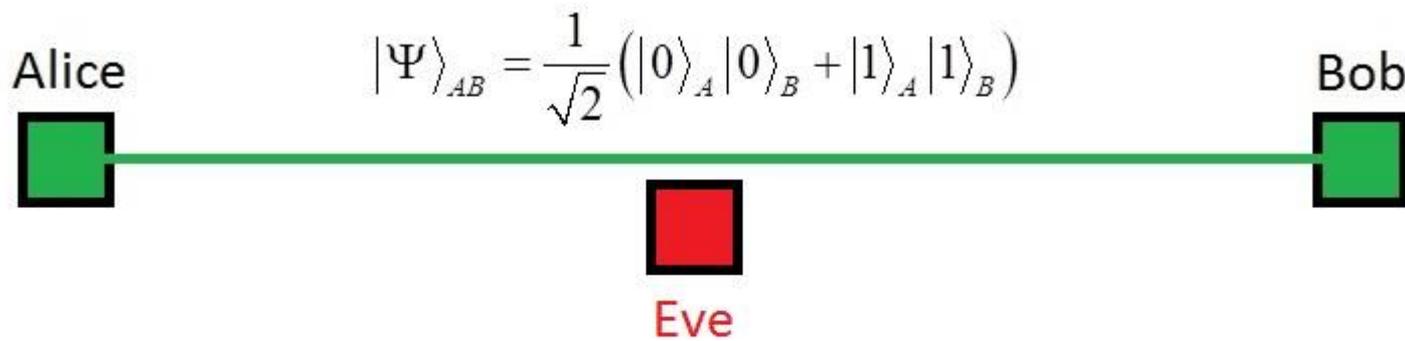
- Quantenteleportation



# 3. Verschränkte Systeme

## 3.4 Anwendungen

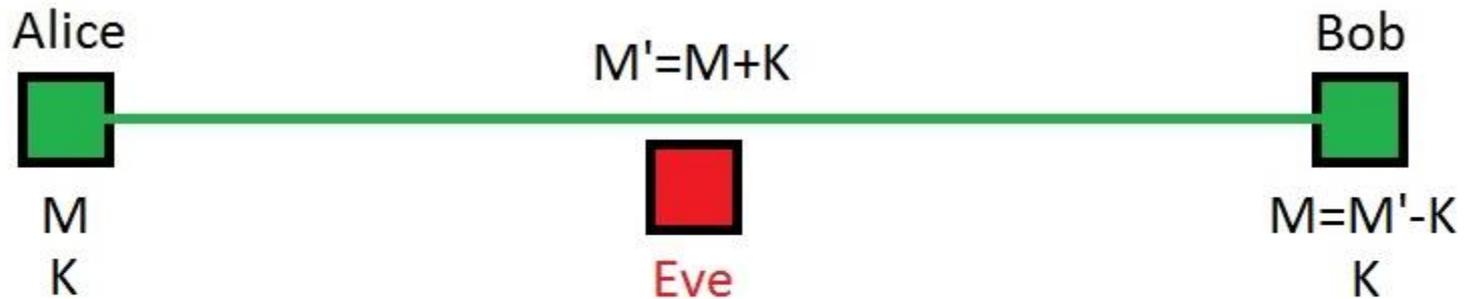
- Quantenkryptographie



# 3. Verschränkte Systeme

## 3.4 Anwendungen

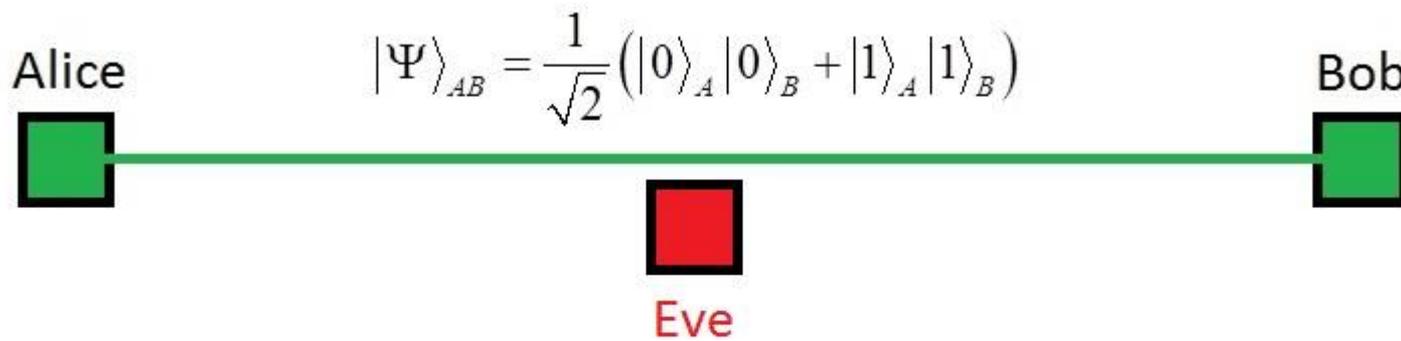
- Quantenkryptographie



# 3. Verschränkte Systeme

## 3.4 Anwendungen

- Quantenkryptographie



→ maximal verschränkter Zustand

→ „Eve“ kann nicht ebenfalls korreliert sein

# 3. Verschränkte Systeme

## 3.4 Anwendungen

- Quantencomputer
  - Ensemble an verschränkten Qubits statt klassischer Bits
  - neue Algorithmen basierend auf Quantenmechanik

# 3. Verschränkte Systeme

## 3.4 Anwendungen

- Quantencomputer
  - Ensemble an verschränkten Qubits statt klassischer Bits
  - neue Algorithmen basierend auf Quantenmechanik
  - problematische Realisierbarkeit, Erhöhung der Anzahl verschränkter Qubits sehr schwer
  - theoretisch enorme Rechenleistung, Hilbertraum  $N$  verschränkter Qubits hätte die Dimension  $2^N$

# 4. Zusammenfassung

- $|\Psi\rangle \neq |\varphi\rangle|\chi\rangle$
- „Verknüpfung“ zweier räumlich getrennter Teilchen
  - gegenseitige Beeinflussung
  - nichtlokaler Effekt
- Quantenmechanik vollständig
  - keine versteckten Parameter
  - keine überlichtschnelle Übertragung
  - experimentelle Bestätigung

# 5. Quellen

- Eleni Diamanti: Quantum entanglement: a unique resource for communication and computation tasks
- Alain Aspect: From Einstein's questions to Quantum bits: a new quantum era?
- Schwabl: Quantenmechanik
- Scheck: Quantum Physics
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Quantenverschränkung>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Quantenteleportation>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/No-Cloning-Theorem>
- <http://de.wikipedia.org/wiki/Einstein-Podolsky-Rosen-Paradoxon>