

**Unschärferelation von Werner Heisenberg**  
Das Phänomen der Beugung von Elektronen zwingt uns dazu, das Konzept von zwei gleichzeitig beliebig genau messbaren Größen (etwa Ort und Impuls) aufzugeben.

Quantenobjekte besitzen also Eigenschaften (z. B. Ort und Impuls), die unter keinen Umständen gleichzeitig beliebig genau gemessen werden können!

**Verschränkung** Verschränkte „Teilchen“ sind Quantenobjekte, die unter allen Umständen identische (oder genau entgegengesetzte) Eigenschaften besitzen. Anschaulich kann man sich ein solches Quantenobjekt wie eineiige Zwillinge (→ B2) vorstellen. Kennt man die Eigenschaften eines Zwillings, kennt man damit auch die Eigenschaften des zweiten Zwillings. Nach Einsteins Vorstellung ließe sich über verschränkte Teilchen die Unschärferelation überlisten: Man misst an Teilchen 1 die eine, an Teilchen 2 die andere Größe. Weil jeweils nur eine Größe gemessen wird, kann man das mit beliebiger Genauigkeit durchführen. Man hätte dann aber für beide Teilchen die volle Information.

Entsprechende reale Experimente zeigen jedoch: die Unschärferelation lässt sich nicht überlisten. Im Moment der Ortsmessung an Teilchen 1 wird auch das verschränkte zweite Teilchen beeinflusst. Eine anschließende Impulsmessung an Teilchen 2 ist stets ungenau! Einstein sprach von „**spukhafter Fernwirkung**“, denn eine Informationsübermittlung zwischen beiden Teilchen hätte mit Überlichtgeschwindigkeit erfolgen müssen. Dies steht vereinfacht betrachtet im Widerspruch zu zentralen Erkenntnissen der Relativitätstheorie. Verschränkte Quantenobjekte bilden jedoch als Paar ein neues Quantenobjekt. Manipulationen an einem Teilchen wirken sich daher ohne Verzögerung auf das andere Teilchen aus.

**Quantenteleportation** Das „Beamen“ wurde durch die Fernsehserie „Star Trek“ berühmt: Captain Kirk und seine Mannschaft lösen sich auf der Enterprise auf und erscheinen in diesem Moment wieder an ihrem Zielort. Auf diese Weise können Objekte oder Personen ohne Zeitverlust von einem Ort zum anderen „teleportiert“ werden (→ B1).

Wie könnte das Beamen ablaufen? Da der Transport ohne Zeitverlust erfolgt, müsste sich der gebeamte Gegenstand mit unendlich großer Geschwindigkeit bewegen. Dies verbietet die Relativitätstheorie. Stattdessen muss die vollständige Information über seine gesamten Bestandteile übertragen werden.

Dies wäre die Angabe von Ort und Impuls aller Teilchen, aus denen der Gegenstand besteht. In der Praxis ist es schwierig, diese Information für einen realen Gegenstand zu ermitteln,



B2 Eineiige Zwillinge

der typischerweise aus mehr als  $10^{27}$  Teilchen besteht. Es gibt aber noch ein viel grundlegendes Problem. Aufgrund der Unschärferelation ist es absolut unmöglich, alle nötigen Informationen exakt zu erhalten.

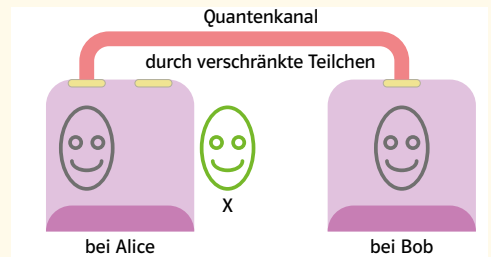
Die Star-Trek-Autoren lösten dieses Problem auf kreative Art und Weise: Die Enterprise erhielt „Heisenberg-Kompensatoren“, die die Unschärferelation außer Kraft setzten. Als man den technischen Berater von Star Trek danach fragte, wie Heisenberg-Kompensatoren funktionieren, antwortete er nur: „Sehr gut, danke“.

Wissenschaftler können sich leider nicht dieses Tricks bedienen. Die Quantenmechanik lässt jedoch für das „Beamen“ eine Hintertüre offen, die **Quantenteleportation**. Bei der Quantenteleportation, die von Anton Zeilinger 1997 erstmals mit Photonen durchgeführt wurde, werden Informationen ohne Zeitverzögerung durch miteinander verschränkte Quantenobjekte übertragen.

Ein Teilchen X soll zum beliebig weit entfernten Ort B teleportiert werden, d. h., ein Teilchen mit bestimmten Eigenschaften soll bei A verschwinden und ein Teilchen mit identischen Eigenschaften soll bei B wieder auftauchen. Man sagt, das Teilchen wird „von Alice zu Bob“ teleportiert. Dazu benötigt man drei Teilchen, zwei verschränkte Teilchen A und B (der **Quantenkanal**) und das Originalteilchen X, das teleportiert werden soll. Alice erhält das Teilchen A, Bob das Teilchen B (→ B3).



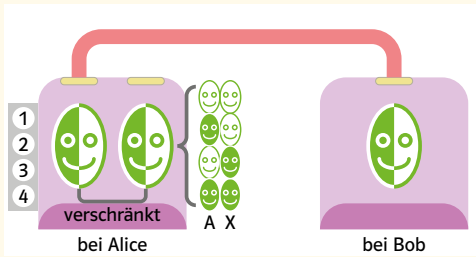
B1 Beamen in „Raumschiff Enterprise“



B3 Erzeugung des Quantenkanals

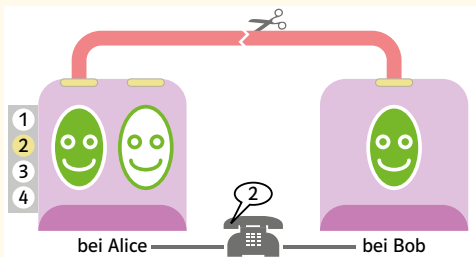
## Spukhafte Fernwirkung (2)

Alice verschränkt nun in einem zweiten Schritt Teilchen A und X. Die Eigenschaften von X werden dabei auf Teilchen A und durch den Quantenkanal damit auch auf Bobs Teilchen B übertragen. Allerdings können bei der Verschränkung vier verschiedene Resultate auftreten, da verschränkte Teilchen identische oder entgegengesetzte Eigenschaften haben können ( $\rightarrow$ B1). Bobs Teilchen wird demnach verschiedene Zustände annehmen können.



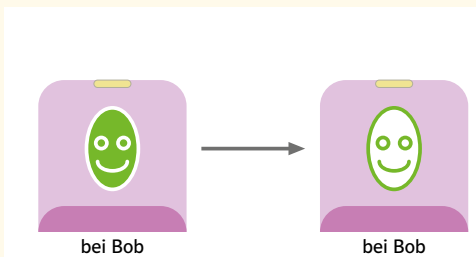
B1 Verschränkung von X und A

Alice sendet nun Bob über einen klassischen Informationskanal (z. B. Telefon), welcher der vier möglichen Zustände sich tatsächlich bei A und X ergeben hat ( $\rightarrow$ B2).



B2 Teleportation

Damit kann Bob sein Teilchen B so manipulieren, dass es den Zustand hat, den das Original X ursprünglich hatte ( $\rightarrow$ B3). Mit Quantenkanal und klassischem Informationskanal kann man somit die Eigenschaften des Originals übermitteln, ohne sie einzeln bestimmen zu müssen.



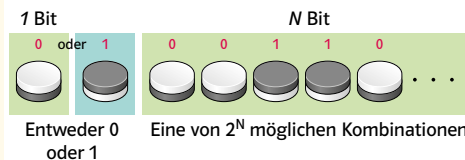
B3 Abgeschlossene Teleportation

**Quantenbits und Quantencomputer** Basierend auf dem Konzept der Quantenteleportation lassen sich unter anderem auch komplett neuartige Computer, sogenannte **Quantencomputer**, konstruieren. Diese Computer arbeiten mit **Quantenbits** (Qubits). Das Qubit spielt dabei die analoge Rolle zum klassischen Bit bei herkömmlichen Computern: Es dient als kleinstmögliche Speichereinheit.

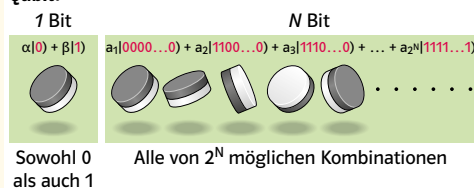
Ein Qubit ist ein beliebig manipulierbares Quantenobjekt, das bei einer Messung nur zwei unterscheidbare Ergebnisse liefert, beispielsweise bei Photonen vertikale und horizontale Polarisation ( $\rightarrow$ B5 bis B7). Da es sich um ein Quantenobjekt handelt, kann es auch in einer beliebigen Überlagerung dieser Polarisationen vorkommen, etwa als diagonal polarisiertes Licht. Qubits können dadurch mehr Information tragen als klassische Bits ( $\rightarrow$ B4). Über mehrfache Verschränkung von Quantenobjekten kann mit diesen Qubits gerechnet werden. Die Verarbeitung der in den Qubits enthaltenen Information im Computer kann parallel erfolgen und ist daher sehr schnell.

Nicht unterschlagen werden sollte jedoch, dass es noch einige Probleme bei der praktischen Verwirklichung von Computern auf Qubit-Basis gibt. So ist das Auslesen der Information problembehaftet. Auch die Wechselwirkung der Qubits mit ihrer Umgebung stellt ein großes Problem dar. Qubits können unbeabsichtigt durch das Auslesen anderer Qubits verändert werden. Temperatureinflüsse können Qubits ebenfalls verfälschen. Daher werden zukünftige Quantencomputer vermutlich nur bei sehr niedrigen Temperaturen arbeiten können.

### Klassisches Bit:



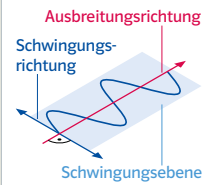
### Qubit:



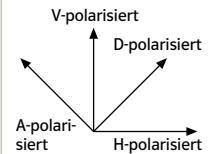
B4 Klassische Bits und Qubits

## Physik überall

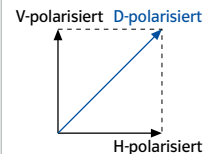
### Polarisation



**B5** Polarisation ist eine Eigenschaft von Photonen. Jedes dieser Photonen ist im Wellenmodell durch eine bestimmte Schwingungsebene charakterisiert.



**B6** Diese Schwingungsebenen (Polarisationsrichtungen) können vertikal, horizontal, diagonal und anti-diagonal ausgerichtet sein.



**B7** Diagonal polarisiertes Licht lässt sich als Überlagerung von vertikal polarisiertem Licht und horizontal polarisiertem Licht beschreiben.