

## Das Phänomen der Verschränkung

Ein in der Physik einzigartiges Phänomen, welches in unserer Alltagswelt unbekannt ist, ist das der Verschränkung - in Regel von zwei Objekten. Darunter versteht man die Eigenschaft von Objekten, sich unabhängig von ihrem Abstand immer in einem gemeinsamen Zustand zu befinden. Das bedeutet: Die beiden Objekte sind nicht unabhängig voneinander, sondern ihr gemeinsamer Zustand zwingt sie dazu, sich immer entsprechend dem Verhalten des anderen anzupassen und zwar so, dass der gemeinsame Zustand aufrechterhalten bleibt. Man nennt dieses Verhalten auch „stark korreliert“. Wird nun eins dieser beiden Objekte durch Umweltbedingungen dazu gebracht, den gemeinsamen, verschränkten Zustand aufzugeben (man nennt das auch Messprozess), dann stellt sich dieser Abbruch des gemeinsamen Zustands „instantan“, d.h. im selben Augenblick, ohne Zeitverzögerung und unabhängig vom Abstand ein.

Das Phänomen der Verschränkung wurde mittlerweile für alle Quantenobjekte bestätigt, ist jedoch bei Alltagsobjekten nicht zu beobachten. Es ist so aberwitzig, dass Einstein seine Existenz bezweifelte und es als „spukhafte Fernwirkung“ bezeichnete.

Zur Verdeutlichung dieses Phänomens am Beispiel von Quantenobjekten wählen wir zwei Elektronen aus (zur besseren Kennzeichnung ein blaues und ein rotes). Als Eigenschaft der Elektronen, die der Verschränkung unterliegen soll, betrachten wir die Eigenschaft „Spin“. Darunter versteht man die Drehrichtung des Elektrons. Man stellt sich der Anschaulichkeit halber die Elektronen als kleine Kreisel vor, die sich entweder links oder rechts um ihre Drehachse drehen können. Diese beiden Drehrichtungen bezeichnet man als „spin up“ und „spin down“.

Kommen nun zwei Elektronen in enge Nachbarschaft, so führt das immer dazu, dass sich die Elektronen mit ihren Spins in entgegengesetzter Richtung anordnen: eins in Spin-up-Richtung und eins in Spin-down-Richtung. Dadurch ergeben sich für die Anordnung der beiden Elektronen prinzipiell nur zwei Möglichkeiten (siehe Abb. 1):

Möglichkeit 1: blau hat Spinrichtung up und rot hat Spinrichtung down ( $\Psi^1$ ) oder

Möglichkeit 2: blau hat Spinrichtung down und rot hat Spinrichtung up ( $\Psi^2$ ).

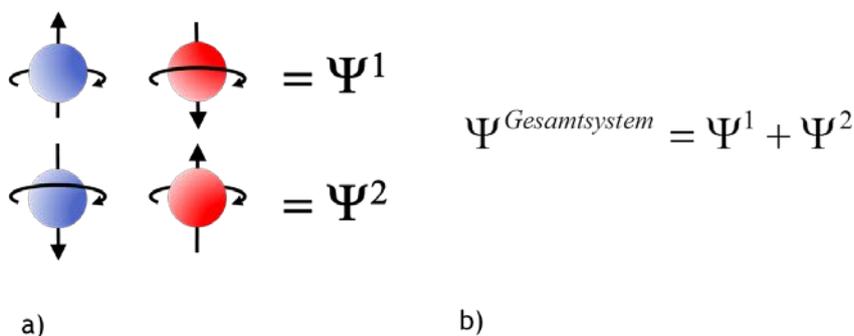


Abb. 1 a) Die zwei Möglichkeiten der Anordnung von zwei Elektronen mit jeweils entgegengesetzter Drehrichtung (Spin) b) Das Gesamtsystem aus zwei Elektronen beinhaltet das gleichzeitige Vorhandensein beider Möglichkeiten  $\Psi^1 + \Psi^2$ .

Nun zeigt sich eine in der klassischen Physik nicht bekannte Besonderheit der Quantenphysik: Hat ein System prinzipiell die Möglichkeit, sich in mehreren gleichwertigen Konfigurationen darzustellen, so besitzt es alle diese Möglichkeiten gleichzeitig (Eigenschaft der Superposition). In der klassischen Physik gibt es nur ein „Entweder / Oder“, in der Quantenphysik dagegen ein: „Sowohl / Als-auch“.

Das „Sowohl / Als-auch“ wird durch die den Gesamtzustand  $\Psi^{\text{Gesamtsystem}}$  als Summe der beiden Möglichkeiten ( $\Psi^1 + \Psi^2$ ) dargestellt. Die Tatsache, dass zwei verschränkte Teilchen nur noch einen gemeinsamen Gesamtzustand besitzen, bedeutet: *Die verschränkten Teilchen können nicht mehr als einzelne Teilchen mit definierten Zuständen beschrieben werden, sondern nur noch das Gesamtsystem als solches.* Man kann dieses Ergebnis auch so ausdrücken: Im verschränkten Zustand existieren die beiden Teilchen nicht mehr unabhängig mit all ihren Möglichkeiten als Einzelidentitäten, sondern durch Reduzierung der Anzahl ihrer unabhängigen Möglichkeiten *gehen die beiden Einzelidentitäten in eine gemeinsame Identität über.*

Die gegenseitige Abhängigkeit bei Verschränkung wird folgendermaßen deutlich: Wird nach einer Trennung der beiden Objekte (Abb. 2a) eine Messung an einem Objekt (z.B. am roten Elektron) durchgeführt, muss sich das System zunächst für einen der beiden Systemzustände ( $\Psi^1$  oder  $\Psi^2$ ) entscheiden (z.B. für  $\Psi^1$ ). Dann wird das rote Elektron mit Spin down (Pfeil nach unten) gemessen. Durch diese Messung ist „instantan“ (im selben Augenblick) der Zustand des blauen Elektron mit Spin up (Pfeil nach oben) vorprogrammiert – und zwar unabhängig von der Entfernung von rot und blau. Die Konsequenzen werden in Abb. 2 näher demonstriert.

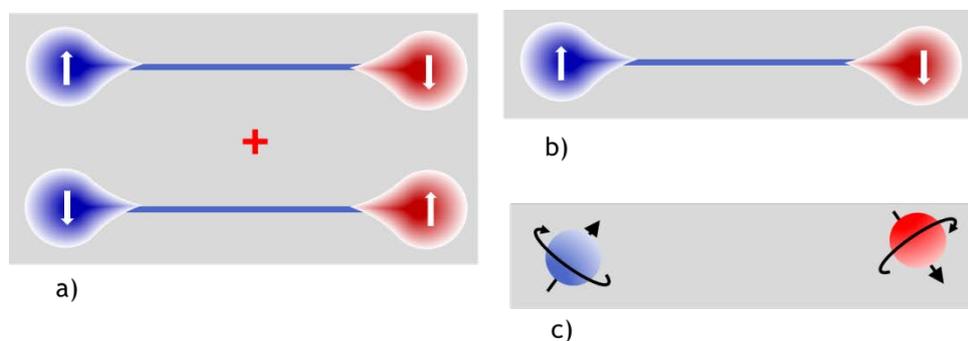


Abb. 2 a) Die beiden Elektronen (rot und blau) werden vorsichtig getrennt, wobei jedes seine zwei Möglichkeiten (Spin up und down) behält. b) Durch eine Messung z.B. am roten Elektron wird sein Zustand festgelegt (hier z.B. Spin down). Damit verschwindet seine zweite Möglichkeit (Spin up). Gleichzeitig verschwindet damit aber auch die Möglichkeit „Spin down“ beim entfernten blauen Elektron. Unabhängig vom Abstand wird also durch die Messung das blaue Elektron instantan (d.h. ohne Zeitverzögerung) in den definierten Zustand „Spin up“ versetzt. c) Nach der Messung ist die Verschränkung zerstört und beide Elektronen sind nicht mehr korreliert und damit unabhängig.

Zunächst ist es beim Phänomen der verschränkten Zustände sehr erstaunlich, dass die beiden beteiligten Objekte lokal getrennt werden können (Abb. 6a), ohne dass der Zustand der Verschränkung verschwindet (wobei jedoch darauf geachtet werden muss, dass die Trennung keine allzu starke Störung darstellt).

Das bedeutet: Unabhängig vom Abstand „kennt“ jedes der beiden Objekte zu jedem Zeitpunkt den Zustand (Spin up oder down) des anderen Objektes und entspricht ihm (durch eigene entgegengesetzte Drehrichtung), d.h. beide sind miteinander stark korreliert. Erst im Augenblick einer Messung /starken Störung eines der beiden Objekte (in Abb. 2b z.B. des roten Elektrons) muss sich dieses für einen seiner bisher optionalen beiden Zustände entscheiden. In diesem Beispiel wird eine Entscheidung für Spin down angenommen. Mit dieser Entscheidung des roten Elektrons wird aber wegen der Korrelation mit dem blauen Elektron auch gleichzeitig dessen Zustand festgelegt, nämlich in „Spin up“.

Das frappierende an diesem Phänomen ist, dass die Festlegung des Zustandes eines verschränkten Teilchens durch die Messung seines Partners unabhängig vom Abstand der beiden ist und „instantan“, d.h. ohne jede Zeitverzögerung erfolgt.

Durch die Messung und die dadurch bedingte Festlegung der Zustände beider Elektronen ist der Zustand der Verschränkung beendet und beide verhalten sich anschließend unabhängig voneinander (Dekohärenz) wie isolierte Objekte (Abb. 2c).

Der Abstand verschränkter Objekte könnte das gesamte Universum umfassen und dennoch würde die Verschränkung aufrechterhalten. Ebenso wäre der Zusammenbruch der Verschränkung instantan und unabhängig vom Abstand für beide „spürbar“.

Verschränkung von Quantenobjekten (meistens Photonen) wurde experimentell vielfach nachgewiesen und wird technisch in der Quantenkryptographie zur abhörsicheren Verschlüsselung genutzt.

Fazit:

In verschränkten Systemen existieren zwischen entfernten Objekten stark korrelierte Beziehungen (ein „Wissen“ um den anderen) unabhängig vom Abstand und immer exakt gleichzeitig (außerhalb von Raum und Zeit).

Verschränkungen stellen eine völlig neuartige raum- und zeitlose (unphysikalische) Beziehungsebene zwischen zwei Quantenobjekten dar, die auf der Ebene der Einzelobjekte nicht existiert.

Was lernen wir daraus?

- Verschränkung von zwei Quantenobjekten bedeutet zunächst Einschränkung von Freiheitsgraden der Einzelobjekte zugunsten einer „inneren Verbundenheit“ bzw. Korrelation.
- Aus zwei Einzelidentitäten wird eine **neue** gemeinsame Identität. Hier wird die Lösung eines Problems sichtbar, wie aus vielen Einzelobjekten mit rudimentären „Einzelbewusstseinen“ ein neues gemeinsames „Bewusstsein“ entstehen kann.
- Das Phänomen der Verschränkung findet auf der Möglichkeitsebene bzw. auf der Ebene der Wellenfunktionen statt und damit ohne den physikalischen Austausch von Kräften und Energie und unabhängig von Raum und Zeit.
- Messungen bzw. ein objektives Festmachen des Zustandes eines Einzelobjektes zerstören den Zustand der Verschränkung bzw. der inneren Verbindung.