

Das kleine

Quanten-Erklärheft



Ein **klassisches Bit** ist die kleinste Speichereinheit eines Computers. Es kann nur die Zustände **0** oder **1** haben.

Das Bit kann man sich als Karte mit roter (0) und grüner Seite (1) vorstellen.



Ein Bit, das in Quantencomputern verwendet wird, bezeichnet man als **Qubit**. Es kann **viele verschiedene Zustände** annehmen und wir stellen uns das Qubit als Rot und Grün schattierte Kugel vor.

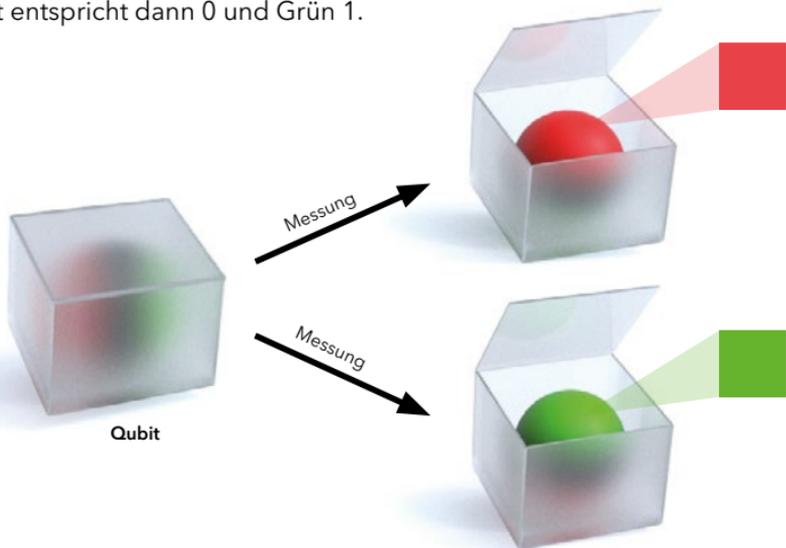
Die Ausrichtung der Kugel zeigt den Zustand des Qubits an.



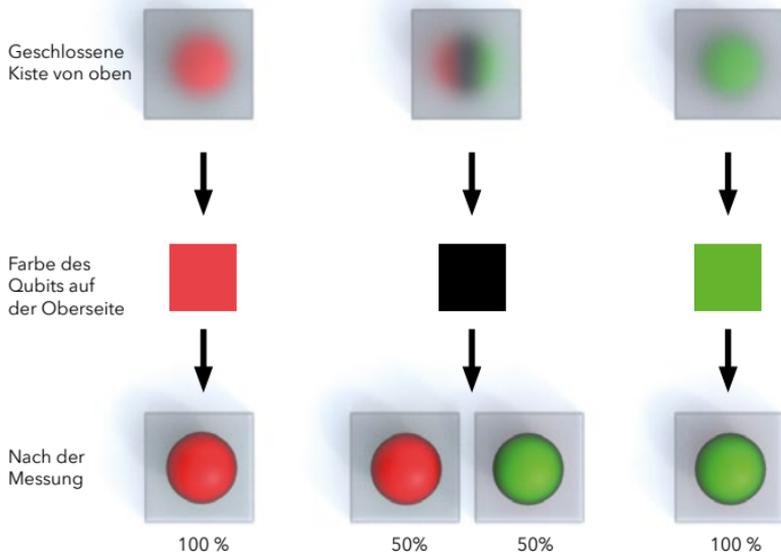
Wir packen das Qubit in eine Kiste. **Erst durch das Öffnen** des Deckels können wir die **Kugel sehen (messen)**.

Auch wenn die Qubitkugel vorher in einer gekippten Position war, **dreht sie sich beim Öffnen** entweder mit der roten oder der grünen Seite nach oben.

Rot entspricht dann 0 und Grün 1.

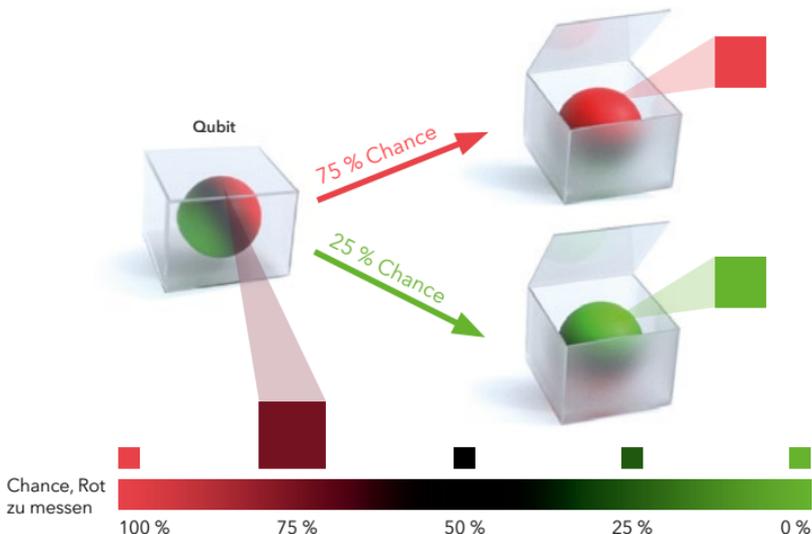


Solange die Kiste geschlossen ist, bestimmt die **Farbe des Qubits auf der oberen Seite**, mit welcher Chance wir Rot oder Grün messen können, sobald wir den Deckel öffnen.



Ist ein **Qubit gekippt** ausgerichtet, nennen wir das einen **Überlagerungszustand** bzw. Superposition.

Hier ist das Qubit in der ungeöffneten Kiste **Dunkelrot auf der oberen Seite**. Damit ist es **wahrscheinlicher**, dass man beim Öffnen der Kiste **Rot messen** wird. Dennoch besteht auch eine Chance, dass Grün heraus kommt.

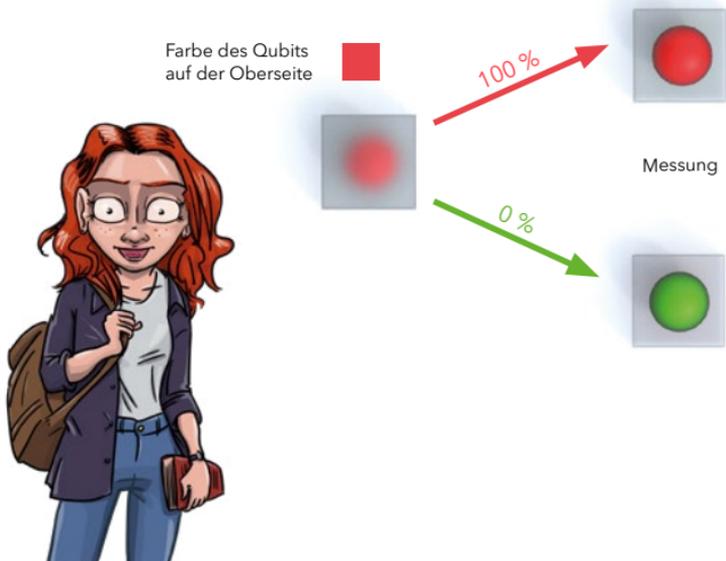


Das sind Alice und Bob. Sie sollen jetzt herausfinden, wie verschiedene Qubits **vor der Messung orientiert waren**, indem sie in die Schachteln blicken, also die Qubits messen.



Alice misst mehrere Qubits, die alle **gleich orientiert sind** und erhält beim Öffnen der Kiste **jedes Mal Rot**.

Sie vermutet daher, dass die Qubits bereits komplett mit der **roten Seite nach oben ausgerichtet waren**, bevor sie sie gemessen hat, weswegen sie immer das gleiche Ergebnis erhält.



Bob misst andere Qubits, die ebenfalls **gleich orientiert** sind. Bob stellt fest, dass er **genauso oft „0“ (Rot), wie auch „1“ (Grün)** als Messergebnis erhält.

Seine Qubits müssen sich vor der Messung also in einem **Überlagerungszustand** befinden haben.

Farbe des Qubits
auf der Oberseite

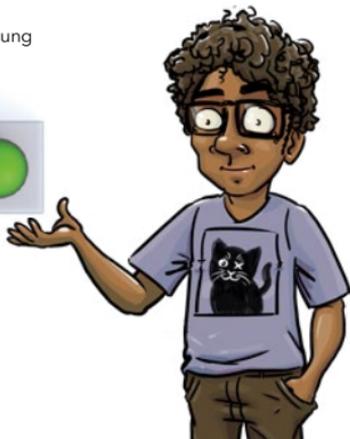


50%



Messung

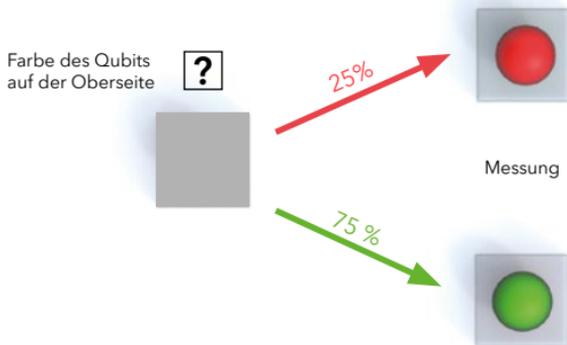
50%



Wir wollen nun **selbst ein kleines Rätsel lösen**:

Welche Farbe könnte unser Qubit in der geschlossenen Kiste auf der Oberseite gehabt haben, wenn wir folgende Messergebnisse erhalten?

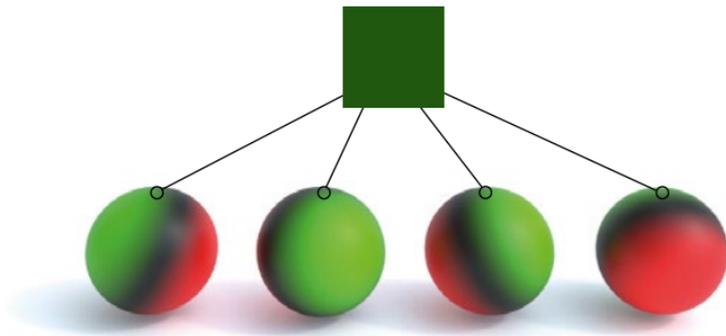
Passende Lösungen finden sich auf der Folgeseite.



Lösung Seite 9:

Unsere Messung zeigt sowohl rote als auch grüne Kugeln. Das Qubit muss sich also in einem **Überlagerungszustand** befunden haben, bevor wir es gemessen haben. Allerdings messen wir **öfter Grün als Rot**. Unser Qubit muss daher vor der Messung **Dunkelgrün auf der oberen Seite** gewesen sein (siehe Seite 5).

Denkbar sind zum Beispiel diese folgende Ausrichtungen in der geschlossenen Kiste:



Nun erhalten Alice und Bob eine Reihe von jeweils identisch erzeugten Qubit-Paaren. Eine Kugel wird von Alice und die andere von Bob ausgepackt. Sowohl Alice als auch Bob messen manchmal Rot und manchmal Grün, **aber ihre Messergebnisse sind immer gleich.**

Ihre Qubits müssen auf besondere Weise **miteinander verbunden** sein.



50%



beide Rot

oder

50%

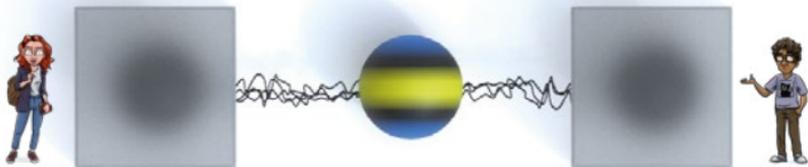


beide Grün



Diese Art der Verbindung nennen wir **Verschränkung***. Wenn Qubits verschränkt sind, **bestimmt das Messergebnis eines Qubits das Ergebnis des anderen**.

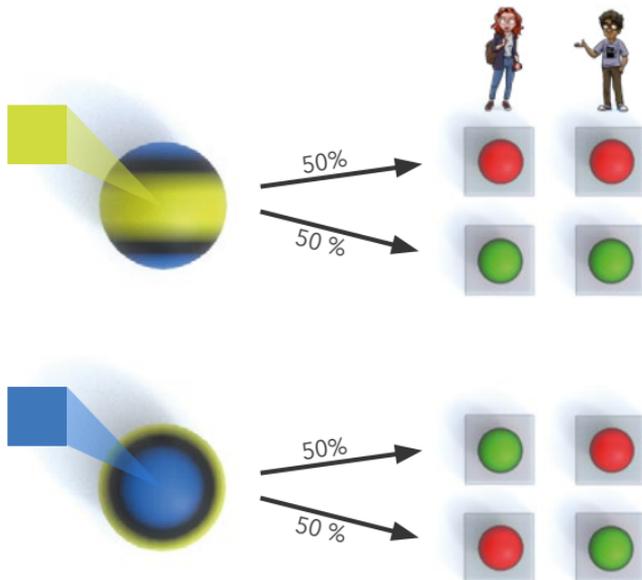
Wir stellen diese Verbindung mit einer **Verschränkungskugel** dar. Wenn Qubits vollständig verschränkt sind, sind die Qubit-Kugeln vor der Messung schwarz (→ 50:50 Chance Rot oder Grün zu messen).



*auf Englisch: Entanglement

Ist die Verschränkungskugel mit **Gelb nach oben** ausgerichtet, werden die Qubits bei einer Messung **stets das gleiche Ergebnis** haben (z.B. beide Rot).

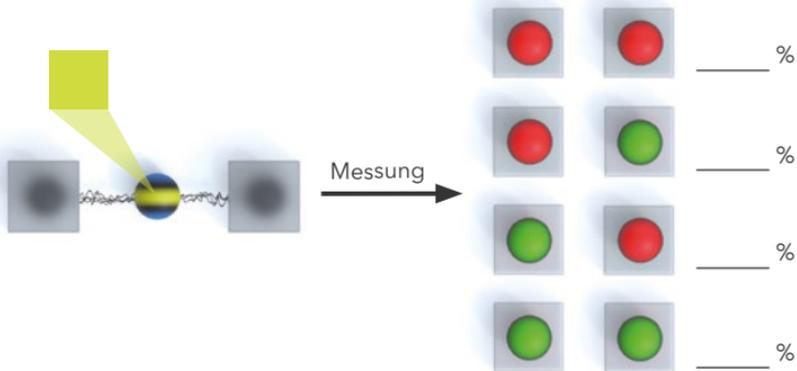
Blau zeigt uns hingegen an, dass die Qubits **immer ein gegensätzliches Ergebnis** haben werden (z.B. eines Rot, das andere Grün).



Versuchen wir nun wieder selbst ein paar Rätsel zu lösen!

Mit welchen **Wahrscheinlichkeiten** erwarten wir die dargestellten Ergebnispaaire, wenn wir folgende Qubits messen?

Die Lösung findet ihr, wenn ihr umblättert.

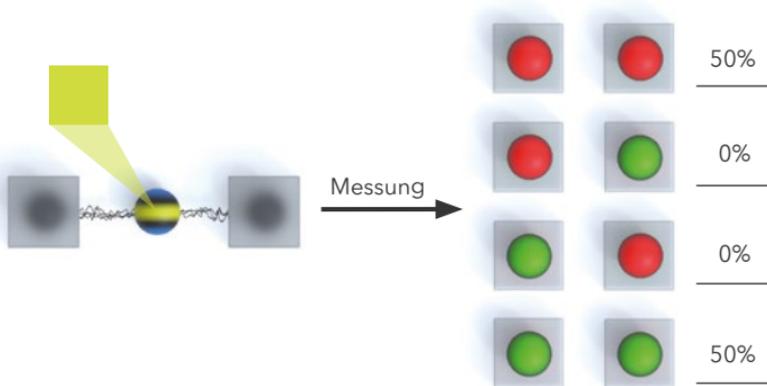


Lösung von Seite 14:

Hier sehen wir einen Verschränkungszustand.

Die Verschränkungskugel ist gelb auf der oberen Seite. Bei der Messung orientieren sich demnach **beide Qubits gleich**. Die Qubit-Kugeln sind schwarz.

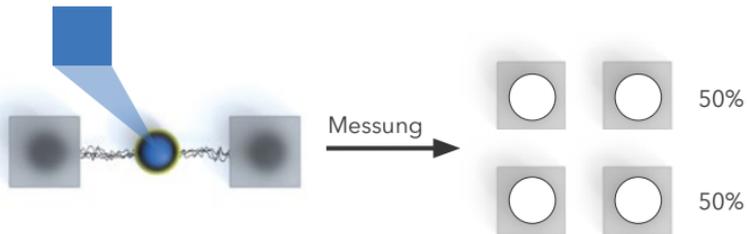
Wir erhalten Rot bzw. Grün mit einer **50:50 Chance**. Entgegengesetzte Paare können hier nicht entstehen.



Und gleich noch ein Rätsel:

Welche **Ergebnisse** erwarten wir hier, wenn wir folgende Qubits messen?
Die leeren Kreise können zum Skizzieren verwendet werden.

Die Lösung findet ihr, wenn ihr umblättert.

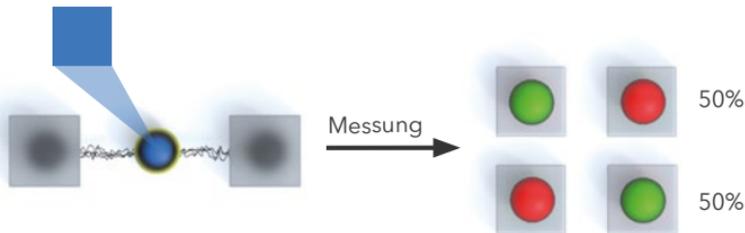


Lösung von Seite 16:

Dies ist ebenfalls ein Verschränkungszustand.

Die Verschränkungskugel ist hier vollständig mit **Blau nach oben ausgerichtet**. Bei der Messung orientieren sich daher beide Qubits **entgegengesetzt**.

Da die **Qubit-Kugeln schwarz** sind, erhalten wir **Rot/Grün** bzw. **Grün/Rot** mit einer 50:50 Chance.



Was haben wir gelernt?

Gemeinsam mit Alice und Bob haben wir einen ersten Einblick in die Welt der Quantenbits erhalten. Anders als beim klassischen Bit, gibt es nicht nur ein „entweder-oder“ sondern ein „sowohl-als-auch“: Qubits können in einen **Superpositionszustand** gebracht werden, bei dem **0 und 1 gleichzeitig vorhanden** sind. Damit sind ganz neue Arten von Rechenoperationen möglich.

Darüber hinaus haben wir gesehen, dass zwei Quantenbits auch miteinander **verschränkt** sein können, so dass jedes für sich zwar vollkommen zufällige Messergebnisse liefert, diese aber **immer identisch** (oder immer entgegengesetzt) sind. Die Information über die Verschränkung kann durch speziell gefärbte Verschränkungskugeln dargestellt werden.



Was kann man damit machen?

Diese Kenntnisse bilden eine solide Grundlage für die Diskussion weitergehender Fragen:

- Wie können Quantenbits im Labor hergestellt und verschränkt werden?
- Wie können aus einfachen Quantenoperationen ganze Quantenalgorithmien aufgebaut werden?
- Wie kann die Sensibilität eines Quantenbits für neuartige Sensoren genutzt werden?
- Wie kann man Quanteninformation über lange Distanzen senden und empfangen?

An diesen und anderen Fragen arbeiten Wissenschaftler:innen aus unterschiedlichen Disziplinen und von verschiedenen Münchner Forschungsinstituten gemeinsam. Das Exzellenzcluster **Munich Center for Quantum Science and Technology (MCQST)** bringt sie zusammen und fördert den wissenschaftlichen Austausch.

Website: www.mcqst.de

Über die Entstehung des kleinen Quanten-Erklärhefts

„Das kleine Quanten-Erklärheft“ ist das Resultat einer engen Kooperation zwischen dem MCQST-Office und der Arbeitsgruppe von Prof. Steffen Glaser (TU München).

Die bildliche Darstellung beruht auf der Abbildung beliebiger Quantenzustände auf farbige Kugeln („Quantenperlen“). Durch entsprechende Modelle zum Anfassen eröffnet dies einen überraschend einfachen, spielerischen Zugang zur Quantenmechanik, der wegen der zugrunde liegenden mathematischen Abbildung in natürlicher Weise Anschaulichkeit mit Exaktheit vereint.

Dennis Huber hat in der Forschungsgruppe von Prof. Glaser die ursprünglich für Kernspin-Simulationen entwickelte SpinDrops-App (Michael Tesch, Niklas Glaser, Steffen Glaser: www.spindrop.org) wesentlich erweitert und als äußerst leistungsfähiges Werkzeug für Lehre und Forschung im Bereich der Quanteninformationsverarbeitung etabliert.

Website Lehrstuhl Glaser: www.ch.nat.tum.de/ocnmr

Get entangled with us!

Munich Center for Quantum Science and Technology
Schellingstrasse 4, 80799 Munich

 info@mcqst.de

 www.mcqst.de

 x.com/MCQST_cluster

 linkedin.com/company/mcqst

 youtube.com/@MCQST

 [@MCQST@wisskomm.social](https://social.com/@MCQST@wisskomm)



LUDWIG-
MAXIMILIANS-
UNIVERSITÄT
MÜNCHEN



Technische
Universität
München



MAX-PLANCK-INSTITUT
FÜR QUANTENOPTIK



W
M
I



Deutsches Museum



MCQST is funded by the German Research Foundation (Deutsche Forschungsgemeinschaft, DFG) under Germany's Excellence Strategy (EXC 2111 - 390814868).