Heiko Dumlich 12. Juli 2006

10 Übungsblatt zur Experimentalphysik IV

39. Quanten-Teleportation und Entanglement-Swapping

Skizzen:

Unterschiede:

Der wichtigste Unterschied zwischen Quanten-Teleportation und Entanglement-Swapping ist, dass bei der Quantenteleportation die Eigenschaften von einem Teilchen übertragen werden, womit ein identisches Teilchen erzeugt wird und das Teilchen, dessen Quantenzustand teleportiert wurde nicht mehr "existiert" (es besitzt selbst den Quantenzustand nicht mehr und ist somit nach Definition [s.Zeilinger: Identity cannot mean more than this: being the same in all properties] nicht mehr dieses Teilchen). Beim Entanglement-Swapping wird nur der Zustand zwischen zwei Teilchen korreliert, indem man eine BSM an zwei zuvor mit jeweils einem mit den Teilchen korrelierten Teilchen durchführt. Daher besitzen die beim Entanglement-Swapping entstehenden Teilchen eine Korrelation, jedoch sind sie nicht identisch und haben somit auch nicht gleiche Eigenschaften.

40. Bell-Zustands-Messung und Quanten-Teleportation

Die Bell-Zustands-Messung ist das auslesen des Bellzustandes, der bei korrelierten Teilchen exisitert. Durch das Auslesen, wird durch den Kollaps der Wellenfunktion das korrelierte Teilchen beeinflusst. Das Auslesen geschieht, indem man das Bell-Zustand Teilchen und das zu teleportierende Teilchen in Koinzidenz misst, wobei diese zuvor durch einen beamsplitter geschickt wurden. Durch den beamsplitter ergibt sich eine Superposition zwischen den beiden Möglichkeiten, dass beide Teilchen reflektiert oder transmittiert

sind. Hierzu musste zuvor die Kohärenzlänge erhöht werden, damit die Teilchen auch in Koinzidenz gemessen werden können, da wir den Pumplaser auch zur Erzeugung des zu beamenden Photons nutzen. Durch die erwähnte Superposition kommt es zur Quanteninterferenz, wodurch einige Möglichkeiten verschwinden und andere verstärkt werden, durch diese Interferenz besitzen die Photonen nur noch eine 25% Wahrscheinlichkeit in Koinzidenz (also jeweils eines der Photonen in einem der Detektoren zu finden) zu messen. Im Falle, dass dies eintritt und koinzident gemessen wird, spricht Zeilinger von dem "glücklichen" Fall, wo gerade einer der vier möglichen Bell Zustände der zwei Photonen ausgelesen wurde.

Es gibt vier mögliche Bellzustände.

Für die Durchführung eines vollständigen Quanten-Teleportation-Experimentes müssen die folgenden vier Bedingungen erfüllt werden:

1. beliebiger Eingangsquantenzustand
2. Ausgangszustand (output) muss eine "instantane" (augenblickliche) Kopie des Eingangszustandes sein
3. Die Bell-Zustands-Messung muss einen kompletten Satz von Bellzuständen unterscheiden
4. Für jeden Eingangszustand muss Teleportation auftreten

Die Messung von einem Bellzustand reicht in dem Sinne aus, dass man somit nur eine 25% Wahrscheinlichkeit besitzt, dass es zur Quanten-Teleportation kommt, nämlich in dem Fall, dass gerade der Zustand vorliegt, den man ausliest. Da es 4 Fälle gibt folgt gerade diese 25% Wahrscheinlichkeit, da in 3 Fällen (75%) die Teleportation nicht funktioniert. Es hat sich in den Experimenten gezeigt, dass die korrekte Polarisation am teleportierten Photon mit 80%iger Wahrscheinlichkeit gemessen wurde, während die normale Erwartung hierfür nur 50% beträgt. Hieraus ist zu schließen, dass dies kein Zufall ist, dass es nicht eine 100%ige Wahrscheinlichkeit ist, liegt vermutlich an der Effizienz bzw. an dem Versuchsaufbau und Messfehlern.

Die Teleportations-Effizienz beschreibt die Wahrscheinlichkeit, mit der ein Teilchen teleportiert wird, diese beträgt in dem Versuch für ein Ensemble im Durchschnitt maximal 25%, da nur in der Statistik jedes 4. Teilchen in dem auszulesenden Bell-Zustand ankommt und somit auch nur bei jedem 4. mal überhaupt teleportiert werden könnte, wobei dieses auf Grund des Versuches nicht immer klappen muss, da auch Informationen verloren gehen können in der Messapparatur. Fidelity bzw. Teleportations-Zuverlässigkeit spielt auf die Störeffekte an, also gerade auf diese Möglichkeit, dass Informationen verloren gehen können. Somit gilt für die Effizienz, wobei man zudem mit einberechnen muss, wie viele Teilchen man benötigt um eine PDC zu erzeugen und zudem noch auf dem gespiegelten Weg eine zweite PDC, die dann in der Kohärenzlänge liegen. Somit ergibt sich eine Effizienz von ca. $< 10^{-10}$(s. Vorlesung). Für die Fidelity folgt: $F_{klassisch} \leq F \leq 1$, wobei $F_{klassisch} = \frac{2}{3}$ und es gilt $E_{exp} = \left(\frac{4F-1}{3}\right) E_{QM}$, wobei E die Effizienz bezeichnet. Somit stellt die Zuverlässigkeit noch eine weitere Verminderung der Effizienz dar.

Im Gegensatz zur klassischen FAX-Kopie, wird keine Kopie erstellt (non-cloning theorem), denn das ursprüngliche Teilchen verliert den Quantenzustand und dieser wird vollständig auf ein anderes Teilchen übertragen. Bei der FAX-Kopie, würde das Orginal

behalten werden und eine Kopie beim Empfänger ankommen. Besonders wichtig ist, dass der Quantenzustand nicht wie man es bei einer FAX-Kopie machen würde, ausgelesen wird und dann übertragen wird, sondern dass der Quantenzustand vollständig übertragen wird, das heisst die Superposition von mehreren Zuständen. Somit hat man die volle Quanteninformation beim Empfänger und keine Information mehr beim Sender. Würde man den Quantenzustand bei Alice ausmessen und das Ergebnis an Bob übertragen, so würde Information verloren gegangen sein und man hätte nur eine klassische Information kopiert, daher ist hier ein Unterschied zur Quanteninformationsübertragung.

41. Teleportation von Atomen, Übertragungsprotokoll

Das Übertragungsprotokoll besagt, dass ein Bellzustand erzeugt wird, wobei jeweils Alice und Bob eines der korrelierten Teilchen erhalten, der Quantenzustand $|\Psi\rangle$ wird dann, nachdem er auf kohärente Weise manipuliert wurde (Filter, um die Kohärenzlänge zu erhöhen, da Bandbreite geringer und Heisenbergsche Unschärferelation gilt), zusammen mit dem Teilchen von Alice in einer Bell-Zustands-Messung ausgelesen und das Ergebnis über einen klassischen Kanal an Bob weitergeleitet, der daraufhin unitäre Operationen (rotieren über kohärente Manipulationen) an seinem sich im Bellzustand-befindenden Teilchen durchführt, um den gleichen Quantenzustand $|\Psi\rangle$ zu erhalten, wie ihn Alice für die Bell-Zustands-Messung verwendet hat.

Der Bell-Zustand wird durch eine EPR-Quelle erzeugt, wobei es vier verschiedene Bellzustände gibt (zum Beispiel):

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|H_1\rangle|H_2\rangle + |V_1\rangle|V_2\rangle\right) \tag{1}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|H_1\rangle|H_2\rangle - |V_1\rangle|V_2\rangle\right) \tag{2}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|H_1\rangle|V_2\rangle + |V_1\rangle|H_2\rangle\right) \tag{3}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\left(|H_1\rangle|V_2\rangle - |V_1\rangle|H_2\rangle\right). \tag{4}$$

Die Bellzustands-Messung wurde bereits in **Aufgabe 40** behandelt. Die unitären Operationen die an dem Bellzustands-Teilchen von Bob durchgeführt werden sind Manipulationen, die das Teilchen "rotieren" und so in den selben Quantenzustand versetzt, den Alice zuvor eingelesen hat. Hierbei ist zu beachten, dass eine direkte Manipulation an dem Teilchen nicht möglich ist, da somit der Quantenzustand ausgelesen werden würde, daher vermute ich, ist mit dieser Rotation eine Rotation im "Geiste" gemeint, so dass wenn man den Zustand auslesen wollen würde, die Detektoren rotiert werden würden und man dann das gleiche Ergebnis erhalten würde, als wie wenn man den nicht-teleportierten Zustand ausgelesen hätte ohne rotierte Detektoren. Alternativ ist es auch möglich sich durch weitere Korrelationen mit anderen Teilchen auf Bob's Seite den Zustand so zu manipulieren(zu rotieren), dass man eine wirkliche Teleportation besitzt, jedoch darf dies nicht

durch eine explizite Messung des Zustandes geschehen. Die klassische Kommunikation stellt die Übertragung über z.B. eine Telefonleitung, Zettel, Gespräch etc. da, wobei hier Alice an Bob mitteilt, was ihre Bell-Zustands-Messung ergeben hat, damit dieser dann sein Teilchen so manipulieren kann, dass er tatsächlich den gleichen Quantenzustand wie Alice zuvor besitzt.

Die Quantenteleportation von Atomen wurde bisher nur für Strecken von 10 bzw. einige $100\,\mu m$ realisiert. Dies liegt an technischen Problemen, jedoch nicht an prinzipiellen Problemen, so dass zu erwarten ist, dass in Zukunft auch Teleportationen über weitere Strecken möglich werden. Die technischen Probleme werden vermutlich daraus resultieren den Quantenzustand zu erhalten, da wenn ein Atom mit einem anderen Teilchen interagiert dieser verloren wird. (Dies ist nach Zeilinger auch ein Vorteil von Photonen, da diese keine Interaktion mit Luft betreiben und man somit unter Luft arbeiten kann, im Gegensatz zu anderen Teilchen die dann ein Vakuum benötigen.)

Die Skalierbarkeit der Ionenfallenexperimente bezieht sich darauf, dass man eine beliebige Anzahl von Ionen in die Ionenfallen einbringen kann, somit also beliebig skalieren kann. Jedoch bleibt das Problem, dass diese Ionen durch eine größere Anzahl mehr Masse besitzen und somit mehr Zeit benötigt wird um das gesamte Register anzuregen, was mögliche Rechenoperationen verlangsamt. Zudem ist es auch schwieriger größere Ketten in den Grundzustand des harmonischen Oszillators zu kühlen. Daher wird auf S.42 vorgeschlagen maximal einige zehn Ionen für den Quantencomputer zu verwenden.