

Kurzzusammenfassung der Diplomarbeit: "Propagation of Orbital Angular Momentum Photons through Atmospheric Turbulence"

von Nina Leonhard

durchgeführt in der Gruppe von Prof. Dr. Andreas Buchleitner
in Zusammenarbeit mit Dr. Vyacheslav Shatokhin

Seit seiner ersten theoretischen Beschreibung in den 90er Jahren hat der Bahndrehimpuls des Lichts zahlreiche Anwendungen gefunden: für hochauflösende Mikroskopie, als Antrieb für Mikromotoren und vor allem im Bereich der (Quanten-) Kommunikation. Der Grund hierfür ist die komplexe Phasenstruktur solcher Lichtstrahlen. Im Gegensatz zu ebenen Wellen, bei denen die Phasenfronten aus Ebenen bestehen, bilden die Flächen gleicher Phase bei einem Strahl mit Bahndrehimpuls ineinander verschlungene Schraubenbahnen. Die Anzahl dieser Schrauben und ihre Drehrichtung legen dabei den Wert des Bahndrehimpulses pro Photon fest – ein ganzzahliges Vielfaches von $\hbar$. Dementsprechend ist der zugrundeliegende Hilbertraum unendlich-dimensional. Für Quantenkommunikation ist bereits länger bekannt, dass die Benutzung höher-dimensionaler Zustände (im Vergleich zu zwei-dimensionalen Zuständen) die Abhörsicherheit und die Übertragungsrate eines Kommunikationsprotokolls deutlich steigern kann. Deshalb sind Bahndrehimpuls-Photonen besonders vielversprechend für Anwendungen in der Quantenkommunikation.

Bevor diese Eigenschaft von Licht jedoch für die Übertragung von Information zuverlässig genutzt werden kann, muss ein Weg gefunden werden, wie man diese Photonen am besten übertragen kann. Herkömmliche Glasfasern können für diese Art von Lichtstrahlen nicht genutzt werden. Auch gibt es viele Situationen, in denen die Kommunikation mit Fasern nicht praktikabel ist, beispielsweise bei Satellitenkommunikation. Bei einer Übertragung durch Luft führen jedoch die intrinsischen Turbulenzen der Atmosphäre zu Störungen des Phasenprofils, das die Quanteninformation enthält. Somit wird das Kommunikationsprotokoll durch die Atmosphäre gestört. In dieser Diplomarbeit wurde der Einfluss der atmosphärischen Turbulenzen auf Bahndrehimpuls-Photonen untersucht. Insbesondere stand dabei der Verlust der Verschränkung von zwei Photonen im Fokus.

Der Einfluss der Atmosphäre wird durch ein einfaches Phasenschirmmodell beschrieben, wel-

ches beispielsweise in der Astronomie seit langer Zeit erfolgreich angewandt wird. In diesem Modell induziert ein senkrecht zur Ausbreitungsrichtung positionierter Schirm transversale Phasenstörungen, deren Korrelationen im Ensemble-Mittel aus dem Kolmogorovspektrum für Turbulenz folgen.

In diesem Modell wurden zunächst die Eigenschaften der Einzelphotonendichtematrix untersucht. Als Folge der Phasenstörungen wird ein Zustand, der beispielsweise nur eine der Bahndrehimpulsmoden enthält, in unendlich viele andere Bahndrehimpulsmoden gestreut. In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass die Breite der Bahndrehimpulsverteilung in Abhängigkeit von der Turbulenzstärke bzw. der Ausbreitungsdistanz bei schwachen Turbulenzen ein diffusives Verhalten zeigt. Dieses Resultat kann genutzt werden, um die Anzahl der benötigten Bahndrehimpulsmoden vor einer Berechnung vorherzusagen und somit Berechnungszeiten sinnvoll abzuschätzen.

In einem nächsten Schritt wurde eine analytische Formel für den Verlust der Verschränkung von zwei maximal verschränkten Bahndrehimpuls-Qubits hergeleitet. Das bereits aus der Literatur bekannte Resultat, dass höhere Bahndrehimpulse zu einer stabileren Verschränkung führen, wurde in dieser Diplomarbeit bestätigt und durch die Einführung der Phasenkorrelationslänge für Bahndrehimpulsphotonen erstmals anschaulich erklärt.

Weiterhin wurden mit Hilfe einer numerischen Optimierung für zwei verschränkte Qudits (für $d = 3$ und $d = 4$) robuste Zustände identifiziert, deren Verschränkung auch bei Turbulenzstärken teilweise bewahrt wird, bei denen die Verschränkung vergleichbarer anfangs maximal verschränkter Zustände bereits vollständig durch die Turbulenz zerstört wurde. Wie bereits in der Literatur mit Hilfe anderer Modelle für Turbulenz beobachtet wurde, gibt es auch in meinem Modell keinen universell robusten Zustand. Vielmehr hängt die Robustheit auch von der Turbulenz und der Ausbreitungsdistanz ab.