

panz zwischen Theorie und Experiment bezüglich des Verlaufs der Phasengrenze $T_c(H)$; diese könnte darin begründet liegen, dass das Experiment das asymptotische Regime in der Nähe des quantenkritischen Punktes bei H_c nicht erreicht hat. Ein detaillierter Vergleich des kritischen Verhaltens mit den Vorhersagen für ein verdünntes Gas schwach wechselwirkender Bosonen steht also noch aus.

Die Arbeiten in [1] und [3] zeigen, dass die Kondensation magnetischer Anregungen beobachtet und im Detail untersucht werden kann. Anders als in bisherigen Realisierungen von Bose-Einstein-Kondensaten lässt sich der Ordnungsparameter als transversale Magnetisierung direkt messen – eine interessante Perspektive für zukünftige Experimente und Theorien.

MATTHIAS VOJTA UND
ACHIM ROSCH

- [1] C. Rüegg et al., Nature **423**, 62 (2003)
- [2] S. Sachdev, Quantum Phase Transitions, Cambridge University Press (1999)
- [3] T. Nikuni et al., Phys. Rev. Lett. **84**, 5868 (2000)
- [4] M. Matsumoto et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 077203 (2002)

Eine geometrische Phase im Raum der Lichtmoden

Michael Berry, der „Erfinder“ der quantenmechanischen geometrischen Phase [1], beschrieb seinen Forschungsbereich 1988 als „stau-bige Ecke der Quantentheorie, die durch die Besen unseres Verstehens allmählich aufgerührt wird.“ Eine Gruppe um Enrique Galvez an der Colgate-Universität in Hamilton (USA) wirbelt jetzt neuen Staub auf. In einem eleganten Experiment wurde die Phase vermessen, die durch Transformationen im Raum der Lichtmoden zustande kommt [2].

Wenn ein periodisches System sich entlang eines geschlossenen Pfades im Parameter- oder Zustandsraum entwickelt, kann es eine Phase gewinnen, die von der Geometrie des Pfades abhängt (Abb. 1). Mittels geometrischer Phasen lassen sich so verschiedenartige Probleme wie etwa das Foucault-Pendel, der Aharonov-Bohm-Effekt oder die lokale Krümmung der Raumzeit beschreiben. So schwingt das Foucault-Pendel ent-

lang eines geschlossenen Pfades im Gravitationsfeld der Erde. Kehrt das Pendel in seine Anfangsposition zurück, hat sich seine Schwingungsebene um einen gewissen Winkel gedreht oder, in anderen Worten, die Phase der Schwingungsebene geändert.

Während sich dieses mechanische System durch den Koordinatenraum bewegt, kann ein optisches System auch einen Pfad im Polarisationsraum durchlaufen. Dieser Raum wird anschaulich als Oberfläche der sog. Poincaré-Kugel dargestellt, mit links und rechts zirkular polarisiertem Licht am Nord- und Südpol und linearer Polarisation entlang dem Äquator (Abb. 2). Eine Bewegung in dem Polarisationsraum lässt sich durch Transformationen zwischen zirkularer und linearer Polarisation realisieren. Damit einher geht, wie bereits 1956 von dem indischen Forscher Pancharatnam entdeckt, eine geometrische Phase, die proportional zu dem Raumwinkel des geschlossenen Pfades auf der Poincaré-Kugel ist.

Nun kann Licht nicht nur zirkulare Polarisation (Spin) besitzen, sondern auch Bahndrehimpuls, der die Verdrehung der Phasenfronten der Lichtmoden beschreibt, wie in Galvez' Experiment. Dort entsteht eine geometrische Phase durch Transformation zwischen Laguerre-Gauß- (LG) und Hermite-Gauß-Moden (HG)¹⁾ eines Lichtstrahls.

Während der Spin nur zwei Eigenzustände annehmen kann, ($s = \pm \hbar$ für rechts- und linkszirkular polarisiertes Licht), wird der Bahndrehimpuls in einem unendlich-dimensionalen Hilbert-Raum beschrieben, sodass sich im Prinzip ein Informationsgehalt von N bit auf einem einzelnen Photon kodieren lässt. Licht mit einer azimuthalen Winkelabhängigkeit von $e^{il\varphi}$ – also etwa die Laguerre-Gauss-Mode LG_p^l – trägt einen Drehimpuls von $l\hbar$ und lässt sich mittels eines geeigneten Hologramms aus einer Gaußschen Lasermode erzeugen.

Die Quanteninformationsverarbeitung mittels Licht mit Bahndrehimpuls setzt die Erzeugung von verschränkten Drehimpulszuständen [3, 4] sowie die Detektion des Bahndrehimpulses einzelner Photo-

nen [5] voraus. Die Funktionsweise eines Quantencomputers beruht darauf, dass die Entwicklung eines Untersystems von dem Zustand eines anderen abhängt, etwa indem die Phase eines Untersystems durch ein anderes kontrolliert wird. Bislang hat man hierbei meist an die dynamische Phase gedacht, die durch die Entwicklung in der Zeit zustande kommt.

J. Jones et al. [6] wiesen jedoch darauf hin, dass sich die geometrische Phase genauso gut eignet und entwickelten ein erstes kontrolliertes Phasenverschiebungsgatter für Quantencomputer, die auf magnetischer Kernresonanz beruhen. Das Konzept lässt sich auch auf andere Quantensysteme, wie etwa verschränkte Lichtmoden, ausweiten. Die Vermessung der geometrischen Phase von Licht mit Bahndrehimpuls ist daher ein weiterer Schritt in Richtung N -bit-Quantenrechner.

In ihrem Experiment beschränkt sich die Arbeitsgruppe um Enrique Galvez jedoch zunächst auf Lichtmoden erster Ordnung und damit auf einzelne bits. In diesem Fall besteht nämlich zwischen Bahndrehimpuls und Spin eine starke Analogie, weil die Lichtmoden erster Ordnung ebenfalls nur zwei „Einstellmöglichkeiten“ (LG_0^{+1} und LG_0^{-1}) besitzen, die sich auf der

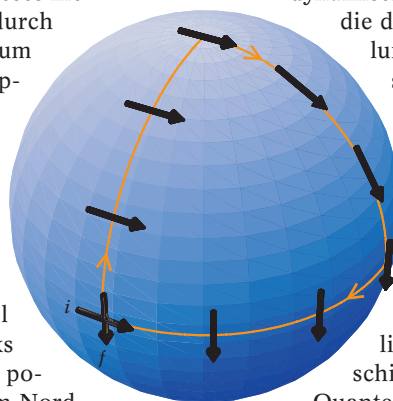
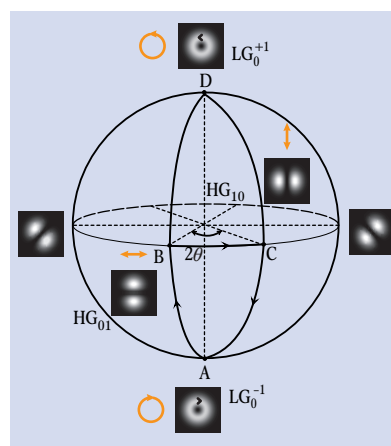


Abb. 1: Geometrische Phasen kann man auch durch Spaziergänge auf dem Globus erleben: Verschiebt man einen Pfeil vom Äquator zum Nordpol, dann im rechten Winkel wieder zum Äquator und zurück zur Anfangsposition, ohne ihn dabei zu verdrehen, so hat sich die „Phase“ der Pfeilrichtung um 90 Grad geändert.



1) HG- (oft auch TEM-Moden genannt) und LG-Moden sind Lösungen der paraxialen Wellengleichung in kartesischen bzw. zylindrischen Koordinaten.

Abb. 2: Der Modenraum des Lichts kann, genau wie der Polarisationsraum (in orange), auf der Poincaré-Kugel veranschaulicht werden. Ein Lichtstrahl, der sich entlang eines geschlossenen Pfades auf der Kugeloberfläche bewegt, gewinnt eine geometrische Phase, die proportional zum eingeschlossenen Raumwinkel ist.

Oberfläche einer Poincaré-Kugel am Nord- und Südpol befinden, während die Hermite-Gauß-Moden (HG) auf dem Äquator zu finden sind (Abb. 2).

Die Bewegung entlang eines Längengrads lässt sich im Experiment mit zwei Zylinderlinsen realisieren. Ähnlich, wie ein $\lambda/4$ -Plättchen die Phase zwischen vertikal und horizontal polarisiertem Licht verschiebt und dadurch lineare in zirkulare Polarisation verwandeln kann, wandelt das Linsensystem die LG- in HG-Moden um. Zwei gegeneinander verdrehte „Dove-Prismen“ ermöglichen andererseits die Bewegung entlang eines Breitengrads, in-

trischen Phase von Lichtmoden beruhen, sei dahingestellt. Das Rennen für ein realistisches System ist immer noch offen.

SONJA FRANKE-ARNOLD

- [1] M. V. Berry, Proc. R. Soc. London A **392**, 45 (1984)
- [2] E. J. Galvez et al., Phys. Rev. Lett. **90**, 203901 (2003)
- [3] A. Mair et al., Nature **412**, 313 (2001)
- [4] G. Molina-Terriza et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 013601 (2002)
- [5] J. Leach et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 257901 (2002)
- [6] J. A. Jones et al., Nature **403**, 869 (2000)

Sauber verschränkt

Das experimentell erstmals realisierte Verfahren der Verschränkungsreinigung ist grundlegend für die Quantenkommunikation.

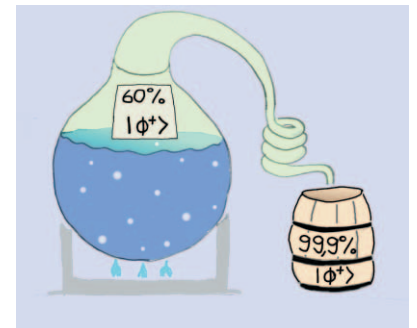
Unter Quantenkommunikation versteht man Kommunikationsszenarien, bei denen als Informationsträger Quantensysteme verwendet werden. In den letzten Jahren hat sich herausgestellt, dass man mit Hilfe der Quantenkommunikation eine Reihe von Aufgaben effizienter oder sicherer lösen kann, als dies in klassischen Kommunikationsprotokollen möglich wäre.

Für praktische Anwendungen der Quantenkommunikation müssen die Informationsträger (Qubits) über hinreichend große Distanzen übertragen werden. Auf ihrem Weg vom Sender (Alice) zum Empfänger (Bob) sind sie dabei störenden Einflüssen ausgesetzt, die zur Dekohärenz oder zum vollständigen Verlust der Quanteninformation führen können. Dies ist um so schlimmer, als sowohl die Dekohärenz als auch die Wahrscheinlichkeit für die Absorption der Information exponentiell mit der Entfernung zwischen Sender (Alice) und Empfänger (Bob) zunimmt. Aus diesem Grund ist Quantenkommunikation – ohne zusätzliche Maßnahmen – nicht über größere Entfernungen möglich. Die Lösung dieses Problems ist durch ein kürzlich ein von J.-W. Pan et al. an der Universität Wien durchgeführtes Experiment näher gerückt [1].

Ein wichtiges Element dieser Lösung ist die Quantenteleportation, die es erlaubt, die Übertragung der abstrakten Quanteninformation von der Übertragung der physikalischen

Quanteninformationsträger zu entkoppeln. Dazu erzeugt Alice in ihrem Labor einen maximal verschränkten Zustand, ein sog. EPR-Paar, und schickt eine Hälfte davon – durch den Quantenkanal – an Bob. Anschließend kann Alice den Zustand eines beliebigen Qubits, also die abstrakte Quanteninformation, durch ausschließlich lokale Operationen und klassische Kommunikation an Bob übermitteln. Die EPR-Paare haben, aufgrund der Dekohärenz im Kanal, eine mitunter recht geringe Güte (engl. *Fidelity*). Diese Güte ist aber ausschlaggebend für die Güte der Teleportation. Den Kommunikationspartnern muss es also gelingen, EPR-Paare mit hoher Güte zu erzeugen, obwohl sie nur mit einem Kanal schlechter Güte verbunden sind. Dabei gehen sie zunächst nach dem Motto „Quantität statt Qualität“ vor: Alice verschickt zuerst eine große Zahl von „halben“ EPR-Paaren an Bob, ohne sie gleich zur Teleportation zu verwenden. Aus diesen können Alice und Bob nun wenige hochverschränkte EPR-Paare „herausdestillieren“ – ein Verfahren, das Verschränkungsreinigung (engl. *entanglement purification*) genannt wird [2].

Die Verschränkungsreinigung ist



Verschränkungsreinigung kann man sich wie eine „Destillation“ vorstellen: Ausgehend von einem großen Reservoir von EPR-Paaren niedriger Güte (Konzentration) werden wenige EPR-Paare hoher Güte erzeugt.

eines der grundlegenden Verfahren der Quanteninformationsverarbeitung. Man kann sie nicht nur für sich genommen zur Verbesserung der Qualität von EPR-Paaren verwenden, sie ist auch ein Baustein in komplexeren Verfahren, wie z.B. dem Quantenrepeater [3], der Quantenkommunikation über beliebige Distanzen ermöglicht, in der Quantenkryptographie oder auch in bestimmten Verfahren des fehler-toleranten Quantenrechnens. Darü-

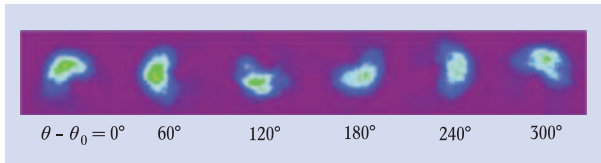


Abb. 3: Die geometrische Phase θ ist im Interferenzmuster zwischen LG_0^{-1} -Signal und LG_0^0 -Referenzstrahl direkt zu sehen.

dem sie die Wellenfront des Lichts rotieren und damit die Ausrichtung der HG-Moden verändern. Mittels dieser Zutaten kann Licht entlang beliebiger Pfade über die Poincaré-Kugel geschickt werden und dabei eine geometrische Phase gewinnen. Konkret wurde eine LG_0^{-1} -Mode in eine horizontale HG-Mode verwandelt, dann um einen variablen Winkel gedreht und zurück in die ursprüngliche LG_0^{-1} -Mode transformiert (Pfad ABCA in Abb. 2). Die resultierende geometrische Phase wurde anhand der Interferenz der LG_0^{-1} -Mode mit einem Referenzstrahl vermessen (Abb. 3). Dazu ist es nötig, dass sich die optische Weglänge des Signal- und Referenzstrahls nicht gegeneinander verändern, da die resultierende dynamische Phase den geometrischen Effekt völlig verdecken würde. Die Experimentatoren lösten dieses Problem sehr elegant, indem sie eine LG_0^0 -Mode als Referenzstrahl verwenden und dem Signalstrahl überlagern. Da LG_0^0 die einzige Mode ihrer Modenordnung ist, wird sie durch die Modentransformationen nicht beeinflusst und gewinnt keine geometrische Phase. Die geometrische Phase des Signalstrahls lässt sich daher direkt an der Ausrichtung des Interferenzmusters ablesen, das mit einer CCD-Kamera aufgenommen wird. Messergebnisse und theoretische Vorhersagen stimmen ausgezeichnet überein.

Ob wir tatsächlich einmal Quantencomputer verwenden werden, die auf Manipulationen der geome-

Dr. Sonja Franke-Arnold, Department of Physics, University of Strathclyde, Glasgow, Schottland

Dipl.-Phys. Hans Aschauer und Priv.-Doz. Dr. Hans J. Briegel, Theoretische Physik, Ludwig-Maximilians-Universität München