

dar, ließ aber viele weitere Phänomene unbeantwortet. Bei Molekülen ist diese attraktive Wechselwirkung die dispersive (van der Waals) Kraft. Erst 1954 entdeckten jedoch Asaku-

das Verschwinden der Grenzfläche in der Nähe eines kritischen Phasenüberganges sind fundamentale Fragen der statistischen Physik von Flüssigkeiten. Die direkte Beobach-

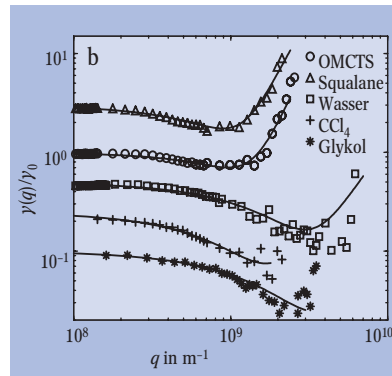
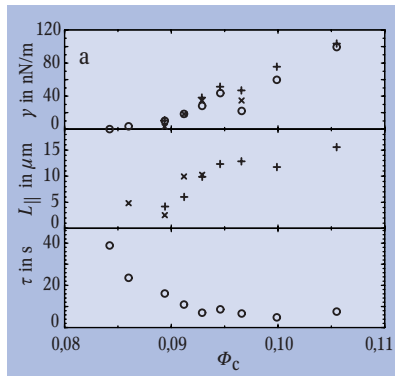
lässt sich der Überlagerungszustand als Linearkombination  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  ausdrücken. Eine einzelne Messung projiziert das System irreversibel auf einen der Basiszustände, wobei der Überlagerungszustand zerstört wird und sich keine weitere Information mehr über ihn gewinnen lässt. Die Kunst der Quanten-Teleportation besteht also darin, die Übertragung ohne eine direkte Messung des Ausgangszustands zu erreichen.

In den kürzlich veröffentlichten Experimenten [1, 2] werden als Basis zwei langlebige atomare Zustände verwendet (metastabile Zustände von Kalzium-Ionen in Innsbruck, Grundzustände der Hyperfein-Struktur von Beryllium-Ionen in Boulder). Die Ionen werden in einer Radiofrequenzfalle festgehalten und mittels Laserkühlung auf Temperaturen von wenigen  $\mu\text{K}$  abgekühlt. Zur Übertragung beliebiger Quantenzustände benutzen beide Gruppen ein Verfahren, das im Jahr 1993 vorgeschlagen wurde [3]. Es beruht auf der „Verschränkung“ von Quantenbits. In einem verschränkten Zustand zweier Teilchen A und B ist das Ergebnis einer separaten Messung an A und B zwar völlig unbestimmt, der Messwert für A ist jedoch stets mit dem für B korreliert. Wird für A etwa der Zustand  $|0\rangle$  gemessen, findet man B in  $|1\rangle$  und umgekehrt. Die Quanten-Teleportation nutzt diese Korrelation zwischen den Teilchen, die instantan und unabhängig von der Entfernung auftritt.

Im ersten Schritt der Teleportation (siehe Skizze auf S. 22) müssen zunächst die Zustände zweier Ionen A und B miteinander verschränkt werden. Dies erreichen beide Gruppen mittels Manipulation der internen Ionenzustände durch Laserpulse, verbunden mit der Anregung ihrer Eigenschwingung in der Falle. Als Ergebnis liegen die beiden Ionen in dem gewünschten verschränkten Zustand vor. Der zu übertragende Zustand wird im zweiten Schritt in einem weiteren Ion C präpariert, das mit den Ionen A und B eine lineare Kette bildet. Mit Hilfe von Laseranregung wird eine beliebige Überlagerung der Basiszustände  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$  erzeugt, wobei die beiden Gruppen unterschiedliche Techniken zur selektiven Anregung des Start-Ions C verwenden.

Im entscheidenden dritten Schritt führt man eine gemeinsame Messung an den Ionen A und C so durch, dass sich anhand des Messergebnisses der ursprüngliche

**Abb. 2:**  
 ► a) Durch statistische Analyse der Position der Oberfläche lassen sich Oberflächenspannung  $\gamma$ , Kapillarlänge  $L_{\parallel}$  und Relaxationszeit  $\tau = L_{\parallel}\eta/\gamma$  von Kapillarwellen kolloidalen Flüssigkeiten in Abhängigkeit von der Kolloiddichte  $\Phi_c$  bestimmen [1].  
 ► b) Bei molekularen Flüssigkeiten hängt die Oberflächenspannung  $\gamma(q)$  vom Wellenvektor  $q$  ab, ein molekularer Effekt, der nun vielleicht bei Kolloiden näher untersucht werden kann [4, 5].



ra und Osawa die attraktiven Depletion-Kräfte zwischen Kolloiden [3], ohne die es die in [1] nun sichtbar gemachten fluiden Grenzflächen gar nicht geben würde.

Vor allem der Einfluss dieser attraktiven Kräfte auf die mikroskopische Struktur von fluiden Grenzflächen wird bis heute studiert, da Oberflächen besonders sensitiv auf molekulare Wechselwirkungen reagieren und die involvierten Längenskalen ( $L_{\parallel} \gg L_{\perp} \gg L$ ) bei molekularen Flüssigkeiten um Größenordnungen auseinander liegen. Dies macht eine theoretische Beschreibung von fluktuierenden Grenzflächen, die alle Längenskalen umfaßt, sehr schwierig. So ist z. B. erst kürzlich theoretisch vorhergesagt [4] und durch Röntgenstreuung gemessen [5] worden, dass die Oberflächenspannung keine Konstante ist, sondern aufgrund der attraktiven van der Waals-Kraft vom Wellenvektor der Kapillarwelle abhängt und bei molekularen Abständen deutlich kleiner wird (Abb. 2b). Es wäre außerordentlich interessant, ob ein ähnlicher Effekt auch bei Grenzflächen kolloidalen Flüssigkeiten aufgrund der attraktiven Depletion-Kraft auftritt, obwohl die Längen  $L_{\parallel} \approx L_{\perp} \approx L$  bei Kolloiden ähnlich groß sind. Die Abhängigkeit der Oberflächenspannung von mikroskopischen Wechselwirkungen zwischen den Teilchen könnte dann im Detail untersucht werden, da im Unterschied zu Molekülen die Wechselwirkung zwischen Kolloiden in einem weiten Bereich gezielt verändert werden kann. Vor allem die Gültigkeit hydrodynamischer Gleichungen und die Tragfähigkeit des Kapillarwellenkonzeptes bei mikroskopischen Abständen sowie

Die Ionen werden in einer Radiofrequenzfalle festgehalten und mittels Laserkühlung auf Temperaturen von wenigen  $\mu\text{K}$  abgekühlt. Zur Übertragung beliebiger Quantenzustände benutzen beide Gruppen ein Verfahren, das im Jahr 1993 vorgeschlagen wurde [3]. Es beruht auf der „Verschränkung“ von Quantenbits. In einem verschränkten Zustand zweier Teilchen A und B ist das Ergebnis einer separaten Messung an A und B zwar völlig unbestimmt, der Messwert für A ist jedoch stets mit dem für B korreliert. Wird für A etwa der Zustand  $|0\rangle$  gemessen, findet man B in  $|1\rangle$  und umgekehrt. Die Quanten-Teleportation nutzt diese Korrelation zwischen den Teilchen, die instantan und unabhängig von der Entfernung auftritt.

KLAUS MECKE

- [1] D. G. A. L. Aarts, M. Schmidt und H. N. W. Lekkerkerker, *Science* **304**, 847(2004)
- [2] C. Bechinger, *Phys. Blätt.*, Juli 2000, S. 75; W. C. K. Poon, *J. Phys. Condens. Matter* **14**, R859 (2002)
- [3] C. Bechinger et al., *Phys. Blätt.*, Dez. 1999, S. 53; R. Roth et al., *Phys. Rev. E* **62**, 5360 (2000)
- [4] K. Mecke und S. Dietrich, *Phys. Rev. E* **59**, 6766 (1999)
- [5] C. Fradin et al., *Nature* **403**, 871 (2000); S. Mora et al., *Phys. Rev. Lett.* **90**, 216101 (2003)

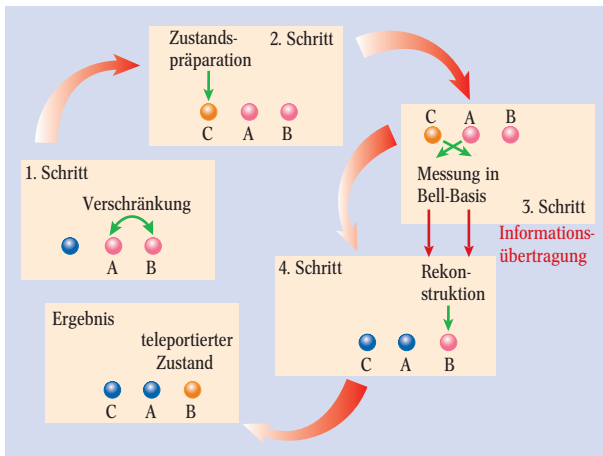
## „Beamten“ mit Atomen

Die Teleportation (auch bekannt als Beamen) ist ein aus der Science-Fiction-Welt des Raumschiffs Enterprise entlehener Begriff, der die instantane Übertragung einer Person an einen entfernten Ort bezeichnet. Dieser Transportweg bleibt zwar weiterhin Fiktion, aber den Arbeitsgruppen von Rainer Blatt an der Universität Innsbruck [1] und von Dave Wineland am National Institute of Standards and Technology in Boulder [2] ist jetzt unabhängig voneinander ein ähnlich erstaunliches Experiment gelungen: die kontrollierte Übertragung eines Quantenzustands von einem Atom zu einem anderen.

Die Schwierigkeit besteht darin, dass sich das Atom in einer unbekanntem Überlagerung von Basiszuständen befinden kann. Im einfachsten Fall eines zweidimensionalen Systems (Quantenbit) mit den Basiszuständen  $|0\rangle$  und  $|1\rangle$

Dr. Klaus Mecke,  
 Max-Planck-Institut  
 für Metallforschung,  
 Heisenbergstr. 3,  
 70569 Stuttgart  
 und Institut für  
 Theoretische und  
 Angewandte Physik,  
 Fakultät für  
 Physik Universität  
 Stuttgart, Pfaffen-  
 waldring 57, 70569  
 Stuttgart

Zustand von Ion C im Ion B rekonstruieren lässt. Dabei kommt wieder das Phänomen der Verschränkung zum Tragen. Um den zu teleportierenden Zustand von C nicht unwiederbringlich zu zerstören, darf man bei der nachfolgenden Messung keine Information über ihn gewinnen.



**Schematische Darstellung der Teleportation in einer 3-Ionen-Kette:** Übertragen wird der Zustand von Ion C (orange) auf Ion B. Die grünen Pfeile bezeichnen die Laser-Manipulation der Ionen-Zustände. Die beiden roten Pfeile symbolisieren die Übertragung von 2 Bit klassischer Information. Beide Experimente verwenden dieses Protokoll; Anordnung der Ionen und technische Details sind jedoch unterschiedlich.

Deshalb wird er zusammen mit dem Zustand von A in der sogenannten Bell-Basis gemessen, die aus vier orthogonalen verschränkten Zuständen besteht. Diese Bell-Messung war der Schwachpunkt der bisherigen Experimente zur Teleportation von Quantenbits mit Photonen [4], in denen nicht alle vier Basiszustände unterschieden werden konnten.

Der wesentliche Durchbruch in den Experimenten mit Atomen besteht darin, dass eine vollständige Bell-Messung realisiert werden konnte, indem auf die Zustände A und C ein Phasengatter angewendet wird. Solch ein Phasengatter ist ein logisches Quantengatter, das abhängig vom Zustand zweier Quantenbits die Phase der Wellenfunktion verändert. Dadurch wird die verschränkte Bell-Basis in eine Basis aus Produktzuständen umgewandelt, die sich ohne Einschränkung mit hoher Effizienz messen lässt. Beide Gruppen verwenden unterschiedliche Techniken, um das Phasengatter zu realisieren: Die Innsbrucker Gruppe [5] verwendet eine von Cirac und Zoller vorgeschlagene Methode, während man in Boulder ein kürzlich realisiertes geometrisches Gatter benutzt [6]. In beiden Fällen wird die Wechselwirkung zwischen den Ionen durch eine Eigenschwingung der Ionenkette vermittelt.

Dr. Wolfgang Lange,  
Max-Planck-Institut  
für Quantenoptik,  
Hans-Kopfermann-  
Str. 1, 85748 Gar-  
ching

Somit liegen zwei Messergebnisse (für die Ionen A und C) und ein durch die Messung an Ion A veränderter Quantenzustand in Ion B vor, das ja mit A verschränkt war. Überraschenderweise enthalten weder die beiden Messergebnisse, noch der Zustand von Ion B für sich genommen Information über den ursprünglichen Quantenzustand, was auch experimentell bestätigt wurde. Der Quantenzustand lässt sich erst durch die Zusammenfügung der Messergebnisse mit dem in Ion B vorliegenden Zustand rekonstruieren. Dazu muss im vierten Schritt des Protokolls das Messergebnis, bestehend aus zwei klassischen Bits (00, 01, 10, 11 für die gemessenen Zustände von Ion A und C), an den Empfänger gesendet werden. Dieser wendet dann entsprechend eine von vier vorgegebenen unitären Operationen (Drehungen) auf den Zustand von Ion B an. Erst danach befindet sich Ion B im Zustand  $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ , während der entsprechende Zustand von Ion C bereits bei der Bell-Messung zerstört wurde. Die Wahrscheinlichkeit, mit der der korrekte Endzustand im Experiment tatsächlich beobachtet wird, liegt in Boulder bei 78 %, in Innsbruck bei 75 %, jeweils deutlich oberhalb des mit klassischen Mitteln erreichbaren Wertes von 66,7 %. Damit ist die deterministische Teleportation von Quantenbits klar nachgewiesen.

Die Distanz, über die der Zustand im Experiment übertragen wurde, beträgt 3-10  $\mu\text{m}$ , bedingt

durch die Schwingungskopplung der Ionen, die einen kleinen Abstand erfordert. Im Prinzip ist jedoch auch eine Übertragung über größere Strecken möglich, falls es gelingt Ionen in unterschiedlichen Fallen miteinander zu verschränken. Ein Weg dazu besteht in der Verschränkung von Ionen und Photonen, die durch Messung der Photonen-Zustände in eine Verschränkung der Ionen umgewandelt wird. Hierzu sind bereits Experimente in Vorbereitung [7].

Die Bedeutung der hier vorgestellten Experimente geht weit über die Verwirklichung der kontrollierten Quanten-Teleportation nach Bennett hinaus. Teleportation könnte den effizienten Transfer von Information in einem zukünftigen Quantencomputer ermöglichen. In beiden Experimenten wurden bereits alle wichtigen Elemente eines Ionenfallen-Quantencomputers demonstriert, wie man sie auch bei komplexeren Operationen benötigt. Sie stellen daher einen wichtigen Meilenstein dar.

WOLFGANG LANGE

- [1] M. Riebe et al., Nature **429**, 734 (2004)
- [2] M. D. Barrett et al., Nature **429**, 737 (2004)
- [3] C. H. Bennett et al., Phys. Rev. Lett. **70**, 1895 (1993)
- [4] D. Bouwmeester et al., Nature **390**, 575 (1997)
- [5] F. Schmidt-Kaler et al., Nature **422**, 408 (2003)
- [6] D. Leibfried et al., Nature **422**, 412 (2003)
- [7] B. B. Blinov et al., Nature **428**, 153 (2004)

## KURZGEFASST...

### ■ Großer Unterschied zwischen Materie und Antimaterie

Am Stanford Linear Accelerator hat die BaBar Collaboration bei Experimenten mit B-Mesonen und ihren Antiteilchen den bisher spektakulärsten Unterschied zwischen Materie und Antimaterie beobachtet. Bei insgesamt 227 Mio. erzeugten  $B^0\text{-}\bar{B}^0$ -Paaren konnte der Zerfall von 910  $B^0$ -Mesonen in das Teilchenpaar  $K^+\pi^-$  beobachtet werden, jedoch nur von 696  $\bar{B}^0$ -Mesonen in das Antiteilchenpaar  $K^-\pi^+$ . Diese „direkte“ Verletzung der CP-Invarianz war bisher nur in viel schwächerer Form bei  $K^0$ -Zerfällen beobachtet worden. Sie wird dafür verantwortlich gemacht, dass es im Universum viel mehr Materie als Antimaterie gibt. B. Aubert et al., (BaBar Collaboration) arxiv.org/hep-ex/0407057

### ■ Verschränkungsrekord

Fünf Photonen hat ein chinesisches-österreichisches Forscherteam an der Universität Heidelberg quantenmechanisch verschränkt und damit einen neuen Rekord aufgestellt.

Geeignete Messungen an zwei polarisationsverschränkten Photonenpaaren und einem einzelnen Photon ließen den für die Quantenfehlerkorrektur wichtigen Zustand entstehen. Darüber hinaus haben die Forscher mit vier verschränkten Photonen erstmals eine „open-destination Teleportation“ durchgeführt, bei der sie die Polarisation eines Photons auf ein beliebiges der drei anderen Photonen übergehen lassen konnten. Zhi Zhao et al. Nature **430**, 54 (2004)

### ■ Einzelnes Goldatom aufgeladen

Mit einem Rastertunnelmikroskop hat man jetzt auf ein einzelnes Goldatom gezielt ein Elektron gebracht und anschließend wieder entfernt, wie Forscher des IBM Forschungslabors in Rüschlikon und der Universität Göteborg berichten. Das geladene Goldatom verrät sich durch seine veränderten elektrischen Eigenschaften. Auf diese Weise ließen sich kleinstmögliche nichtflüchtige Speicher verwirklichen. J. Repp et al. Science **305**, 493 (2004)