

ner weiteren Reduzierung der Strukturgröße die Beschreibung des Objektes durch eine rein zwei-dimensionale Struktur nicht mehr möglich ist. Die Verteilung des elektrischen Feldes im Referenzstrahl muss dann in drei Dimensionen explizit berechnet werden. Der Übergang zu immer kleineren Referenzstrahlen und damit immer größerer Auflösung führt damit notwendigerweise auf Röntgenwellenleitereffekte [4] bis hinunter zur theoretischen Grenze minimaler Strahldurchmesser. Nach einer theoretischen Arbeit von Bergeman et al. zeigt sich nämlich, dass die Grenze der Fokussierung höchstwahrscheinlich nicht durch die Wellenlänge selbst, sondern zuvor schon auf fundamentale Weise durch den Brechungsindex des verwendeten Materials bestimmt wird [5]. Dies führt auf eine untere Grenze erreichbarer Strahldurchmesser von 8 nm bis 20 nm, je nachdem, welches Material man verwendet.

Neben der Auflösung ist der Kontrast die zweite wichtige Größe. Im Experiment von Eisebitt und Kollegen wird der magnetische Kontrast durch die Verwendung zirkular polarisierter Strahlung erreicht und durch Subtraktion zweier Hologramme entgegen gesetzter Helizität verstärkt. Der magnetische Streuquerschnitt wurde durch resonante Effekte an der Co-L₃-Kante überhöht. Auf Anhieb wurde eine mit dem Rasterröntgenmikroskop vergleichbare Auflösung und vergleichbaren Kontrast erzielt, mit einer linsenlosen und vergleichsweise einfachen experimentellen Anord-

nung. Die Erweiterung auf den harten Röntgenbereich und die Steigerung der Auflösung liefert sicherlich noch einige Herausforderungen für die Zukunft.

Bei welcher Auflösung und welchem Kontrast nanoskopische Proben mit nanoskopischen Röntgenstrahlen in Zukunft schließlich abgebildet werden können, bleibt offen. Die Vision, Materie mit ultrakurzen X-FEL-Röntgenpulsen bei hoher Orts- und Zeitauflösung „zu filmen“, ist sicherlich ein großer Ansporn. Ob und wie genau das Ziel erreicht wird, wissen wir nicht. Statt genau einer „Röntgenmikroskopie“ werden wir es in Zukunft wahrscheinlich mit einer Vielzahl von „Mikroskopie-en“ im Röntgenbereich zu tun haben. Welche Spielart sich bei welcher Photonenenergie und bei welcher Fragestellung durchsetzt, wird schließlich die Anwendung entscheiden. Die nun vorgestellte Fourier-Transformation-Holographie mit kohärenter Röntgenstrahlung ist ein wichtiger Meilenstein auf diesem Weg!

TIM SALDITT

- [1] M. Peuker, *Appl. Phys. Lett.* **78**, 2209 (2001)
- [2] J. W. Miao, P. Charalambous, J. Kirz und D. Sayre, *Nature* **400**, 342 (1999)
- [3] S. Eisebitt, J. Lüning, W.F. Schlotter, M. Lörgen, O. Hellwig, W. Eberhardt und J. Stöhr, *Nature* **432**, 885 (2004)
- [4] F. Pfeiffer, C. David, M. Burghammer, C. Riekkel und T. Salditt, *Science* **297**, 230 (2002)
- [5] C. Bergemann, H. Keymeulen und J. F. van der Veen, *Phys. Rev. Lett.* **91**, 204801 (2003)

■ Drei Ionen für ein Quantenbit

Quantencomputer sind auf Algorithmen zur Fehlerkorrektur angewiesen.

Redundanz in gespeicherten Daten kann man benutzen, um trotz Fehlern Informationen sicher und genau zu rekonstruieren. Dxaher ksoetet es ums lkaum Muhe, disen vollig fulsch geschriebenen Satz zu lesen, obwohl hier in fast jedem Wort ein Fehler steckt. In unserem Gehirn läuft eine Fehlerkorrektur ab. In jedem Computer, beim Hören einer CD und beim Empfang von Daten ist solch eine Fehlerkorrektur nötig, die im Hintergrund arbeitet. Für einen zukünftigen Quantencomputer sind derartige Algorithmen ebenfalls von entscheidender Bedeutung. Der Gruppe um D. Wineland am NIST in Boulder, USA, ist es kürzlich gelungen, auf einem elementaren Quantenprozessor einen Fehlerkorrektur-Algorithmus experimentell zu demonstrieren [1].

Das Interesse an Quantencomputern liegt in neuartigen Rechenprogrammen für spezielle Probleme, wobei die Gesetze der Quantenlogik geschickt benutzt werden und jeder herkömmliche Computer in den Schatten gestellt wird. Daher bemühen sich Forscher über diverse experimentelle Ansätze um dieses Ziel. Anders als ein klassisches Bit, das nur die binäre Information der logischen Werte 0 oder 1 speichert, tragen nun elementare Einheiten der Information (Quantenbits) eine Superpositionsinformation $\alpha|0\rangle + \beta|1\rangle$ mit komplexen Amplitu-

Prof. Dr. Tim Salditt,
Institut für Röntgen-
physik, Universität
Göttingen, Geiststr.
11, 37073 Göttingen

Prof. Dr. Ferdinand Schmidt-Kaler, Abteilung Quanten-Informationsverarbeitung, Universität Ulm, Albert-Einstein-Allee 11, 89069 Ulm

den $|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$, was nicht nur größere Möglichkeiten zu neuartigen Algorithmen bietet, sondern auch zusätzliche Probleme: Hier können nicht nur Bit-Flip-Fehler – analog zum klassischen Verwecheln von 0 und 1 – auftreten, sondern auch Phasenfehler. Theoretische Physiker haben die seit langem für klassische Bits gebräuchlichen Methoden der Fehlerkorrektur auf Quantenbits übertragen.

Statt nur ein Quantenbit zu benutzen, verwendeten die Forscher drei Quantenbits, die durch eine quantenlogische Gatteroperation in einen *verschränkten Zustand* gebracht wurden. Damit ist die Redundanz erreicht. Jetzt muss allerdings ein wichtiger Punkt beachtet werden: Quantenbits dürfen – anders als die klassischen Bits – nicht ausgelesen werden, da schon die Beobachtung ihren Superpositionszustand reduzieren würde! Der Ausweg ist, nur darauf zu schauen, ob alle Quantenbits in demselben Zustand sind, *ohne* dabei Kenntnis darüber zu erlangen, in welchem Zustand sich die einzelnen Quantenbits befinden. Auch dies kann man ebenfalls über Quantengatter erreichen.

Die kürzlich publizierten experimentellen Erfolge wurden mit einem elementaren Quantenprozessor erreicht, bei dem je ein einzelnes Ion in seinem elektronischen Anregungszustand ein Quantenbit speichert. Die Datenverarbeitung – also alle quantenlogischen Operationen – geschehen über die kohärente Manipulation dieser Zustände mittels Laserstrahlen, wobei drei Ionen – jeweils passend für den nächsten Rechenschritt – zwischen verschiedenen Segmenten einer linearen Paul-Falle hin- und herbewegt werden [2]. Im ersten Schritt des Experiments wird die Information in das erste Ion eingeschrieben. Das Ziel des Experiments ist es, dieses Quantenbit gegen die Fehler zu schützen. Dazu benutzen die Forscher eine Verschränkungsopeation mit zwei weiteren Ionen. Der von den Experimentatoren nun vorsätzlich verursachte Test-Fehler lässt sich daher über die Messung des Quantenzustands der beiden zusätzlichen Ionen ermitteln und schließlich am ersten Ion korrigieren.

Schon früher hatten Kernspin-Resonanz-Experimente die Kodierung eines Quantenbits auf mehrere Kernspins gezeigt [3]. Die anschließende Fehlerkorrektur reduzierte

in diesem Fall allerdings auch das messbare Signal, so etwa wie ein Lehrer, der fehlerhafte Klassenarbeiten in den Papierkorb wirft, damit sich das Gesamtergebnis verbessert. Neu an den Experimenten zur Quanten-Informationsverarbeitung mit einzelnen Ionen ist die deterministische und aktive Kontrolle des einzelnen Rechenprozesses, wie es auch in einer Reihe von Publikationen des letzten Jahres [4] dokumentiert ist.

Für die Zukunft wünscht man sich von den Experimenten noch eine höhere Güte der logischen Operationen. Außerdem können Quantenbits durch Bit-Flip-Fehler und auch durch Phasenfehler gestört werden. Während sich beim aktuellen Experiment die Korrektur auf den ersten Typus beschränkte, wäre die Korrektur aller möglichen auftretenden Fehler, ohne die Beschränkung auf nur einen bestimmten Typus, ein großes Ziel. Theoretische Physiker haben vorgeschlagen, fünf, sieben oder neun Quantenbits geschickt miteinander zu verschränken, um damit jeden nur möglichen Einzelfehler korrigieren. Um diese weit komplizierteren Algorithmen zu verwirklichen, werden die Experimentatoren voraussichtlich noch ein paar Jahre brauchen.

Noch wichtiger mag es daher sein, die Quantenbits in so genannte Dekohärenz-freie Unterräume

einzuschreiben und sie auf diese Weise sehr robust gegen zerstörerische Kopplungen zur Außenwelt zu machen. Experimente mit einzelnen Ionen [5] haben zeigen können, dass ein logisches Quantenbit – in diesem Fall war es aufgebaut aus zwei Ionen – gegen *kollektive* Rauschquellen äußerst immun war und damit ein ideales System darstellen sollte, um einen Dekohärenz-freien Speicher von Quanteninformation zu bilden. Die noch ausstehende Kombination der beiden Ansätze – aktive Fehlerkorrektur in dekohärenz-freien Unterräumen – verspricht einen entscheidenden Schritt hin zur Realisierung eines Quantencomputers.

FERDINAND SCHMIDT-KALER

- [1] J. Chiaverini et al., Nature **432**, 602 (2004)
- [2] T. Schätz und D. Leibfried, Physik Journal, Januar 2004, S. 23
- [3] D. G. Cory et al., Phys. Rev. Lett. **81**, 2152 (1998); E. Knill et al., Phys. Rev. Lett. **86**, 5811 (2001); D. Leung et al., Phys. Rev. **A60**, 1924 (1999)
- [4] M. Barrett et al., Nature **429**, 737 (2004); M. Riebe et al., Nature **429**, 734 (2004); C. Roos et al., Science **304**, 1478 (2004)
- [5] C. Roos et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 220402 (2004); D. Kielpinski et al., Science **291**, 1013 (2001)

Universelle Stalaktiten

Stalaktiten entstehen an der Decke von Höhlen, wenn Wasser in die Höhle eindringt, das darin gelöste CO_2 teilweise entweicht und dadurch Kalk ausfällt. Wie das Foto aus den amerikanischen Carlsbad Caverns zeigt, unterscheiden sich die Tropfsteine zwar je nach Alter stark in der Größe, ihre Formen ähneln sich aber sehr. Ein interdisziplinäres Wissenschaftlerteam aus Arizona, USA, hat nun ein Modell entwickelt, das für das Stalaktitenwachstum die Fluidynamik



des Wasserfilms, die Chemie von CaCO_3 sowie die CO_2 -Diffusion berücksichtigt [M. B. Short et al., Phys. Rev. Lett. **94**, 018501 (2005)]. Dar- aus ergibt sich eine Beziehung zwischen Wachstumsrate, lokalem Radius und Neigungswinkel des Stalaktits. Praktisch unabhängig von den Anfangsbedingungen nehmen die Stalaktiten demnach eine universelle Form an, die sehr gut mit Beobachtungen an natürlichen Tropfsteinen übereinstimmt. (Foto: NPS, Peter Jones)