

unter Zufuhr von Arbeit in einem Mikrowellenresonator erzeugt wird. Die vollständige Analyse des Energiehaushaltes der Wärmemaschine muss also die Kohärenzerzeugung miteinfassen, und es zeigt sich, im Einklang mit den klassischen Gesetzen der Thermodynamik, dass die Arbeitszufuhr größer ist als die erzeugte Arbeit [1]. Die Quantenwärmemaschine funktioniert also mit nur einem Wärmebad, aber unter Zufuhr von elektrischer Energie an den Mikrowellengenerator. Und natürlich ist die elektrische Energie ja irgendwo erzeugt worden – vermutlich mit Hilfe zweier Wärmebäder.

Die Autoren des Originalartikels wählen für ihre Diskussion den Standpunkt, dass der Mikrowellengenerator nicht Teil der Wärmekraftmaschine ist, und nehmen das kohärente Gas als gegeben an. Bei dieser Sichtweise ist es entscheidend, dass die Kohärenz des Atomgases einen Nichtgleichgewichtszustand darstellt: Sich selbst überlassen würde die Kohärenz nach einiger Zeit spontan zerfallen. Der Zweite Hauptsatz und der Carnot-Wirkungsgrad sind aber nur für Gleichgewichtssysteme relevant. Wenn ein System nicht im thermischen Gleichgewicht ist, dann ist es im Allgemeinen immer möglich, aus dem Übergang zum Gleichgewicht Arbeit zu gewinnen. Dies ist das Arbeitsprinzip einer ganzen Reihe klassischer und quantenmechanischer „Brownscher“ Motoren [3, 4]. Die Leistung, die nötig ist, um das Nichtgleichgewicht aufrechtzuerhalten, ist dabei immer größer als die erzeugte Leistung.

Die klassische Wärmelehre ist schon seit ihrer Geburt eine Wissenschaft der Wärmemaschinen gewesen. Arbeiten wie die von Scully et al. führen diese erfolgreiche Tradition fort und zeigen, dass sich aus Gedankenexperimenten noch immer viel über Thermodynamik lernen lässt. Die oben beschriebene quantenoptische Maschine illustriert beispielsweise eine unerwartete Eigenschaft der Kohärenz: Sie lässt sich zur Energiespeicherung verwenden und leistet dabei ganz Ansehnliches. Ein Bruchteil der theoretisch möglichen Kohärenz erhöht den Wirkungsgrad der Photo-Carnot-Maschine um mehrere Prozent. Im Prinzip kann man sich also durchaus vorstellen, dass die Quantenmechanik in Nischenanwendungen einmal zur Kraft-

erzeugung herangezogen werden könnte.

Während die theoretische Physik sich sicher ist, dass man auch mit der Quantenmechanik den Carnot-Wert nicht überschreiten kann, gibt es einen anderen Grund, bei Quanteneffekten in Wärmemaschinen ganz genau hinzusehen. Man kann es nämlich nicht als gegeben ansehen, dass sich der Grenzwert im Prinzip immer erreichen lässt. Möglicherweise führt Phasendekohärenz in einigen Quantenmaschinen zu unvermeidbaren Verlusten und damit sogar zu einem niedrigeren Grenzwert als im klassischen Fall [5].

HEINER LINKE

- [1] M. O. Scully, M. Suhail Zubairy, Girish S. Agarwal, H. Walther, *Science* **299**, 862 (2003)
- [2] S. E. Harris, *Physics Today*, Juli 1997, S. 36
- [3] P. Reimann, *Phys. Rep.* **361**, 57 (2002)
- [4] R. D. Astumian und P. Hänggi, *Physics Today*, November 2002, S. 33
- [5] S. Lloyd, *Phys. Rev. A* **56**, 3374 (1997)

Dr. Heiner Linke,
Physics Department
and Materials Science
Institute, University
of Oregon, USA

Supraleitende Quantenbits

Mit Josephson-Kontakten wurden Meilensteine auf dem Weg zum Festkörper-Quantencomputer erreicht

Die Verheißungen des Quantencomputers und der Quantenkommunikation sind die treibende Kraft für die weltweite Suche nach geeigneten physikalischen Realisierungen von Quantenbits (Qubits), die sich kontrolliert manipulieren lassen. Geeignet erscheinen zunächst mikroskopische Systeme wie Ionen und Atome in Fallen, Kernspins in Molekülen sowie Photonen und Atome in Kavitäten, an denen es in beeindruckenden Experimenten gelang, bis zu sieben Qubits zu koppeln und erste Beispiele von Quantenalgorithmen zu implementieren. Zwei kürzlich veröffentlichte Artikel von Arbeitsgruppen in Delft und bei NEC in Tsukuba berichten nun über wichtige experimentelle Fortschritte bei der quantenmechanischen Manipulation von makroskopischen Festkörperbauelementen, die aus supraleitenden Tunnelkontakten (Josephson-Kontakten) aufgebaut sind [1, 2].

Ein Kindheitsbild des Universums

Mit bisher unerreichter Präzision hat der amerikanische Satellit WMAP die Anisotropie sowie die Polarisation der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung vermessen.¹⁾ Diese Strahlung ist bereits rund 380000 Jahren nach dem Urknall freigesetzt worden, als

Atome entstanden und das Universum durchsichtig wurde. Seither ist ihr

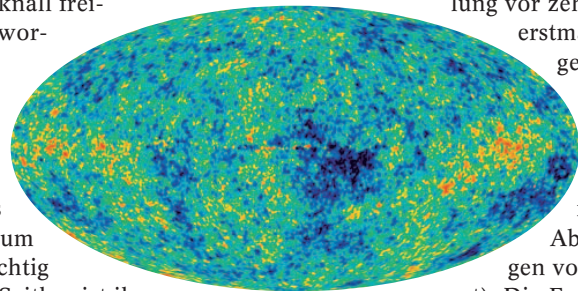
Spektrum aufgrund der Expansion des Universums zu immer tieferen Frequenzen verschoben worden; es entspricht heute dem Spektrum eines Schwarzen Körpers der Temperatur 2,73 K. Das kosmologische Standardmodell sagt voraus, dass Galaxien und Galaxienhaufen aus geringen Dichtefluktuationen entstanden sind, die zum Zeitpunkt der Emission der Hintergrundstrahlung bereits existierten und sich in ihr als Temperaturschwankungen ausdrücken. Diese

Schwankungen in der Größenordnung von 100 μK hat WMAP nun mit einer 40fach höheren Winkelauflösung als der COBE-Satellit aufgezeichnet, mit dem die Anisotropie in der Hintergrundstrahlung vor zehn Jahren

erstmals nachgewiesen wurde (rot: positive, blau: negative Abweichungen vom Mittelwert). Die Ergebnisse

schränken zahlreiche kosmologische Parameter ein: Demnach ist das Universum 13,7 Milliarden Jahre alt und besteht zu 4% aus gewöhnlicher, leuchtender Materie, zu 23% aus dunkler Materie sowie zu 73% aus dunkler Energie. Darüber hinaus entstanden die ersten Sterne früher als bislang gedacht bereits 200 Millionen Jahre nach dem Urknall. (SJ)

¹⁾ <http://map.gsfc.nasa.gov/>, siehe auch *Physik Journal*, Dezember 2002, S. 18



Eine wesentliche Voraussetzung für all diese Systeme ist eine lange Quantenkohärenzzeit, während der sich das System nach den Regeln der Quantenmechanik entwickelt, und die Möglichkeit, die Qubits kontrolliert zu manipulieren. Weiterhin sollte man eine möglichst große Anzahl von Qubits koppeln können. Die mikroskopischen Realisierungen erreichen eine lange Kohärenzzeit (Sekunden oder länger) auf Grund der schwachen Kopplung der Quantenfreiheitsgrade an die Umgebung, gleichzeitig dauern aber auch die Manipulationen lange (10 μ s oder länger). Außerdem sind die Möglichkeiten, eine größere Zahl von Qubits zu koppeln, begrenzt.

Festkörperbauelemente lassen sich hingegen im Prinzip unbegrenzt erweitern, außerdem sind sie leicht in elektronische Schaltungen zu integrieren. Eine Entkopplung von Rauschquellen ist aber im Allgemeinen schwierig und die Kohärenzzeit entsprechend kurz. Eine Abhilfe bieten supraleitende Bauelemente, in denen die Energielücke bei tiefen Temperaturen

die Existenz von störenden Anregungen unterdrückt. Als Qubits können supraleitende Bauelemente dienen, die aus Josephson-Kontakten aufgebaut sind. Dabei gibt es zwei Varianten [3]: einerseits Fluss-Qubits, bei denen der Quantenfreiheitsgrad der magnetische Fluss durch einen kleinen SQUID-Ring (Superconducting QUantum Interference Device) ist, wobei bei geeigneter Wahl der Parameter und Kontrollfelder nur zwei Werte, die sich um ca. ein Flussquant unterscheiden, eine Rolle spielen, oder andererseits Ladungs-Qubits, bei denen der Quantenfreiheitsgrad die Cooper-Paarladung auf einem kleinen supraleitenden Korn ist. Bei genügend kleiner Kapazität und geeigneten Kontrollspannungen spielen nur zwei um $2e$ unterschiedliche Ladungszustände eine Rolle. Für beide Varianten gibt es etablierte Fabrikations- und Kontrolltechniken, die im Zusammenhang mit der SQUID-Technologie und Einzelladungseffekten weit entwickelt wurden.

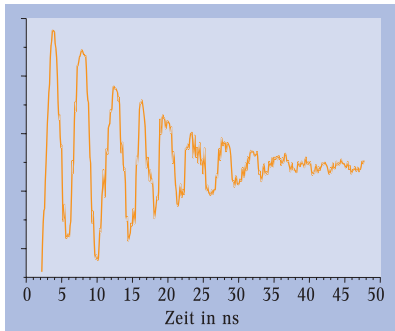
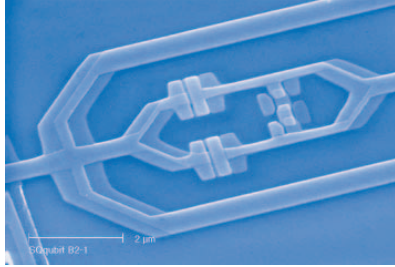
Vor vier Jahren gelang es der Gruppe am NEC erstmals, Quan-

tenmanipulationen an einem Ladungs-Qubit durchzuführen [4]. Dazu wurde das System in einer Superposition von Eigenzuständen präpariert, die sich entsprechend der Quantenmechanik mit verschiedenen Phasenfaktoren entwickeln und so zu Oszillationen geeigneter Erwartungswerte führen. Diese Oszillationen mit einer Periode von ca. 100 ps wurden zeitaufgelöst nachgewiesen. Die hohe Sensitivität der Einzelladungssysteme auf Ladungsänderungen macht Ladungs-Qubits aber auch sehr empfindlich auf alle Ladungsfluktuationen irgendwo im System. Dies begrenzte die Phasenkohärenzzeit auf einige Nanosekunden. Verbesserungen beim Design und der Auslesetechnik, wie sie in Saclay entwickelt wurden [5], ermöglichten den Nachweis der kohärenten Oszillationen über eine Dauer von ca. 1 μ s.

Nach verschiedenen früheren Versuchen, die möglicherweise aufgrund zu starken niederfrequenten magnetischen Rauschens erfolglos blieben, gelang es nun der Gruppe in Delft zum ersten Mal, kohärente

Dr. Yuriy Makhlin,
Prof. Dr. Gerd Schön
und Dr. Alexander
Shnirman, Institut
für Theoretische
Festkörperphysik,
Universität Karlsruhe,
Engesserstr. 7,
76128 Karlsruhe

Oszillationen auch an Fluss-Qubits zu demonstrieren [1]. Sie führten verschiedene, aus der NMR-Technik bekannte Experimente durch: Rabi-Oszillationen, Ramsey-Interferenzen und Spinechoexperimente. (Im Gegensatz zu diesen Quantenoszillationen ist der Josephson-ac-Effekt eine klassische Zeitent-



Das Fluss-Qubit der Delfter Gruppe besteht aus einem kleinen Ring (rechts) mit drei Josephson-Kontakten (hergestellt mit Schattenbedampfungsmethoden aus zwei Richtungen) und dem größeren Auslese-SQUID mit zwei Kontakten [1]. Im unteren Teil sind die Oszillationen im Auslesesignal dargestellt.

wicklung.) Das in verschiedener Hinsicht optimierte System besteht aus einem supraleitenden Ring mit drei Josephson-Kontakten (Abb.). Es hat zwei Eigenzustände mit entgegengesetzter Richtung des zirkulierenden Stromes, die als die beiden logischen Zustände eines Qubits dienen. Diese beiden Zustände unterscheiden sich makroskopisch, denn sie involvieren Milliarden von Elektronen. Die kohärenten Oszillationen belegen, dass auch makroskopische Systeme in einer Superposition von Quantenzuständen vorkommen können, und beantworten damit zugleich die vor Jahren von Leggett [6] gestellte Frage, ob diese fundamentale Eigenschaft der Quantenmechanik auch auf diesem Niveau gültig ist.

Alle bisher beschriebenen Experimente manipulierten nur ein einzelnes Josephson-Qubit, nichttriviale quantenlogische Operationen erfordern aber die Kopplung von Qubits und die Erzeugung verschränkter Zustände. Diese Zustän-

de sind an sich schon interessant, wie das bekannte Einstein-Podolsky-Rosen-Experiment verdeutlicht. In der neuen Arbeit der NEC-Gruppe wurden nun zum ersten Mal kohärente Oszillationen an zwei gekoppelten Ladungs-Qubits beobachtet [2]. Die Analyse der Oszillationen deutet darauf hin, dass ein verschränkter Zustand vorlag, wenn es auch noch nicht gelang, die Korrelation des verschränkten Zustandes direkt zu messen.

Beide Experimente sind wichtige Meilensteine auf dem Weg zu Festkörper-Quantenbauelementen. Mit den erfolgreichen Experimenten an dem Fluss-Qubit wurde eine neue Route eröffnet. Weitere Experimente werden zeigen, welche der Varianten (Fluss-, Ladungs- oder gemischte Qubits) die geeignetsten sind. Die Experimente an zwei gekoppelten Qubits sind der erste Schritt auf dem Weg zu quantenlogischen Bauelementen mit mehre-

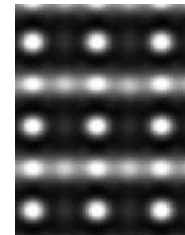
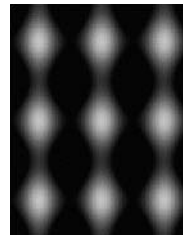
ren (wenigen) Qubits mit möglichen Anwendungen z. B. in der Quantenkryptographie. Sie sind auch der erste Schritt auf dem langen Weg zum Quantenregister mit möglicherweise bis zu Tausenden von Qubits, wie sie für interessante Quantenalgorithmen benötigt werden.

YURIY MAKHLIN, GERD SCHÖN,
ALEXANDER SHNIRMAN

- [1] I. Chiorescu et al., Scienceexpress 10.1126/science.1081045, erscheint in Science
- [2] Yu. A. Pashkin et al., Nature **421**, 823 (2003)
- [3] Yu. Makhlin, G. Schön, A. Shnirman, Rev. Mod. Phys. **73**, 357 (2001)
- [4] Y. Nakamura, Yu. A. Pashkin und J.S. Tsai, Nature **398**, 786 (1999)
- [5] D. Vion et al., Science **296**, 886 (2002)
- [6] A. J. Leggett, A. Garg, Phys. Rev. Lett. **54**, 857 (1985)

Sauerstoff im Visier

Bereits vor weit über 100 Jahren hat Ernst Abbe gezeigt, wie sich Sammel- und Zerstreuungslinsen zu einem optischen Aplanaten anordnen lassen, in dem die Abbildungsfehler der einzelnen Linsen kompensiert werden. Daher verfügen heute auch einfachste optische Geräte über eine Bildqualität, die in der Optik mit Elektronen noch vor wenigen Jahren unerreichbar erschien. Die Ursache liegt darin, dass runde Elektronenlinsen immer Sammellinsen sind, also der Gegenpart fehlt, um die Abbildungsfehler zu kompensieren. Daher ist es mit einem gewöhnlichen Elektronenmikroskop nicht möglich, einzelne Atome aufzulösen, selbst wenn die de-Broglie-Wellenlänge der Elektronen nur ein Zehntel eines Atomradius beträgt. In den letzten Jahren ist es jedoch gelungen, die Fehler von runden Elektronenlinsen mithilfe unrunder Linsen, insbesondere Sextupol-Linsen, zu korrigieren und dadurch mit einem 200-keV-Elektronenmikroskop eine Auflösung von 0,13 nm zu erreichen.¹⁾ Knut



Urban und Mitarbeiter am Forschungszentrum Jülich haben nun gezeigt, dass sich mit einem solchen aberrationskorrigierten Transmissionselektronenmikroskop einzelne Sauerstoff-Atome in Perowskiten abbilden lassen.²⁾ Zu diesen keramischen Materialien gehören zum Beispiel SrTiO₃, das aufgrund seiner hohen Dielektrizitätskonstante in der

Hochfrequenzelektronik eingesetzt wird, sowie der Hochtemperatur-Supraleiter YBa₂Cu₃O₇. Während in einem „normalen“ Mikros-

kop nur die schweren Strontiumatome zu sehen sind (links), zeigt das korrigierte Mikroskop auch die leichten Sauerstoffatome (rechts; beide Abbildungen sind Simulationen). Mit dieser Abbildungstechnik ist es nun erstmals möglich, Abweichungen vom korrekten stöchiometrischen Verhältnis oder Strukturdefekte, die die elektronischen Eigenschaften der Materialien beeinträchtigen, ortsaufgelöst nachzuweisen. (SJ)

¹⁾ vgl. Phys. Bl., Mai 1998, S. 411

²⁾ C. L. Jia, M. Lentzen und K. Urban, Science **299**, 870 (2003)