

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 μ K 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

