

Phasenverhaltens und der Phasenumwandlungskinetik in diesem Modellsystem sollte aber auch direkte Implikationen für die Anwendung elektrorheologischer Fluide mit ihren im Feld veränderlichen Fließeigenschaften haben. Eine Fixierung der neu gefundenen Strukturen (z. B. durch Einbettung in eine polymere Matrix) sollte weiterhin zu Materialien mit hochinteressanten optischen Eigenschaften führen. Nicht zu unterschätzen ist aber vor allem der ästhetische Genuss und dadurch der motivierende Charakter dieser Arbeiten, bei denen man unmittelbar sehen kann, wie verschiedenste Wechselwirkungen beim Aufbau exotischer Strukturen einander ergänzend zusammenwirken.

THOMAS PALBERG

- [1] W. van Meegen, *Transport Theory and Statistical Phys.* **24**, 1017 (1995)
- [2] A. K. Sood, *Solid State Physics* **45**, 1 (1991)
- [3] V. J. Anderson, H. N. W. Lekkerkerker, *Nature* **416**, 811 (2002)
- [4] H. Löwen, A. R. Denton, J. K. G. Dhont (Hrsg.), *J. Phys. Condens. Matter* **11**, 10047 (1999)
- [5] H. Löwen, *J. Phys. Condens. Matter* **13**, R415 (2001)
- [6] A. Yethiraj und A. v. Blaaderen, *Nature* **421**, 513 (2003)

## Carnot und die Quanten

**Fortschritte in der Halbleitertechnologie und der Quantenoptik machen es denkbar, Wärmemaschinen zu konstruieren, die Quanteneffekte ausnutzen. Dabei stellt sich die Frage, wie es solche quantenmechanischen Wärmemaschinen mit dem Carnotschen Grenzwert für den Wirkungsgrad halten.**

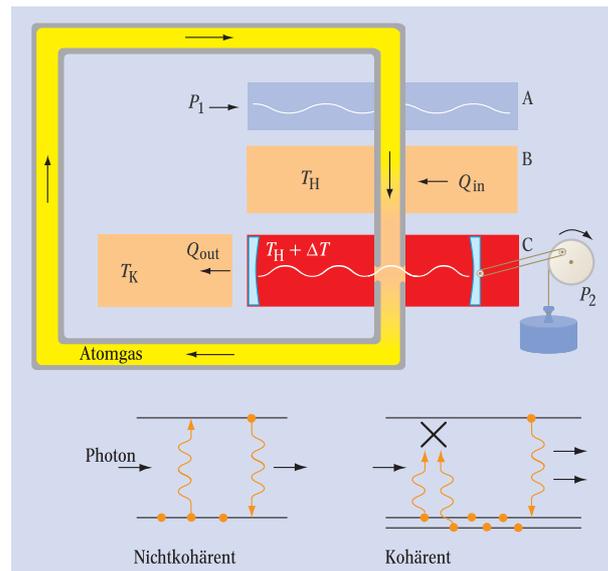
Sadi Carnot erkannte Anfang des 19. Jahrhunderts, dass jede Wärmekraftmaschine nicht nur eine Wärmequelle benötigt, sondern auch ein Kühlbad für die Abwärme. Das Temperaturgefälle treibt die Maschine an und bestimmt ihren maximalen Wirkungsgrad. Wenn beide Bäder dieselbe Temperatur haben (oder wenn gar nur ein Bad vorhanden ist) und wenn das gesamte System sich auch sonst im thermischen Gleichgewicht befindet, dann ist keine Leistungserzeugung möglich. Diese Einsicht ist der Kern des Zweiten Hauptsatzes der Wärmelehre.

Vor kurzem hat nun die Forschergruppe um Marlan Scully (Texas A&M University) und Herbert Walther (MPI für Quantenoptik, Garching) eine quantenoptische Wärmekraftmaschine vorgeschlagen, die dem Anschein nach mit nur einem Wärmebad auskommt [1]. Das Kernstück dieses Vorschlages ist ein Mikrolaser-Hohlraum, der von zwei Spiegeln gebildet wird (siehe C in der Abbildung). Der eine Spiegel ist beweglich und dient, von Photonendruck getrieben, als Kolben. In einem Carnot-ähnlichen Kreislauf (nicht dargestellt) kann das Photonengas von einem heißen Bad ( $T_H$ ) Wärme empfangen, Arbeit erzeugen ( $P_2$ ) und Restwärme an ein Kühlbad ( $T_K$ ) abgeben.

Wärme wird dem Photonengas zugeführt durch ein Gas heißer Zwei-Niveau-Atome, deren Elektronenresonanz mit dem Hohlraum resonant sind. Wenn die Zustände gemäß einer hohen Temperatur bevölkert sind, sich also relativ viele Elektronen in dem oberen der beiden Niveaus befinden, dann ist die Wahrscheinlichkeit für stimulierte Emission relativ hoch und die für Photonenabsorption relativ gering. Dementsprechend erhöht sich die Photonendichte im Hohlraum, bis sich ein Gleichgewicht von Absorption und Emission einstellt, das heißt, bis die Temperatur des Photonengases dem des Atomgases entspricht. Wenn man es dabei beliebe, dann wäre die vorgeschlagene Quantenmaschine nichts anderes als eine neue Realisierung des klassischen Carnot-Kreislaufes.

Der Clou ist nun, dass die Autoren vorschlagen, zur Wärmezufuhr ein kohärentes Atomgas zu benutzen, das drei Zustände hat, wobei die beiden niedrigeren sehr nahe beieinander liegen und quantenmechanisch überlagert sind. Das heißt, die zwei tiefen Niveaus haben beide einen endliche Wahrscheinlichkeitsamplitude und eine wohldefinierte gegenseitige Phase. Die Kohärenz führt nun zu Interferenz zwischen den Übergangswahrscheinlichkeiten und ändert die Wahrscheinlichkeit für die Photonenabsorption. Wenn die Phase zwischen den beiden kohärenten Grundzuständen gerade 180 Grad beträgt, dann unterbindet destruktive Interferenz die Anregung von Elektronen aus den tiefen Zuständen in den angeregten Zustand. Die Absorption von Photonen durch das Atomgas wird also reduziert, während die stimulierte

Emission aus dem oberen (nichtkohärenten) Zustand unverändert bleibt. Im Resultat stellt sich eine größere Photonendichte ein als der Temperatur des Atomgases entspricht. Dieses Prinzip ist bekannt von inversionslosen Lasern, in denen Verstärkung auftritt, weil Photonenabsorption durch destruktive Interferenz reduziert wird [2].



Eine quantenoptische Carnot-Maschine. Ein Atomgas durchläuft in einem geschlossenen Kreislauf zunächst einen Mikrowellenresonator, der eine kohärente Überlagerung zwischen zwei beinahe entarteten Grundzuständen der Atome erzeugt. Ein Wärmebad (B) bringt die Temperatur des Gases auf  $T_H$ , bevor es in einen Mikrolaser eingebracht wird. Die Kohärenz des Atomgases macht Photonenabsorption unwahrscheinlich, lässt aber, unter Kohärenzverlust, Photonenemission zu. Dies führt zu einer Photonentemperatur im Resonator, die höher ist als  $T_H$ , und ein Carnot-ähnlicher Prozess (nicht gezeigt) erlaubt Leistungserzeugung sogar dann, wenn das Kühlbad dieselbe Temperatur hat wie das Wärmebad, also wenn  $T_K = T_H$ . Allerdings ist die erzeugte Leistung  $P_2$  kleiner als die Leistung  $P_1$ , die nötig ist, um die Kohärenz in jedem Durchlauf neu zu erzeugen. Ohne Kohärenz funktioniert die Maschine nur, wenn  $T_K < T_H$ .

Wie in der Abbildung illustriert, ließe sich dieser Effekt ausnutzen, indem man in einem geeigneten Atomgas zunächst mit einem Mikrowellengenerator (A) Phasenkohärenz erzeugt und das Gas dann auf die Badtemperatur  $T_H$  bringt (B). Wenn das Atomgas anschließend im Mikrolaser (C) in Kontakt mit dem Photonengas gebracht wird, führt die reduzierte Wahrscheinlichkeit der Photonenabsorption zu einer überhöhten Photonendichte und damit einer Photonentemperatur  $T_H + \Delta T$  (C). Der höhere Druck erlaubt den Entzug von Arbeit, und das Kühlbad kann dem Photonengas selbst dann noch Wärme entziehen, wenn  $T_K = T_H$ , das heißt, Wärmebad und Kühlbad können identisch sein.

Das thermodynamisch Entscheidende ist nun, dass die Kohärenz

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.<sup>1)</sup> 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  $\mu$ 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)

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

