

MOTT-ISOLATOR-ZUSTAND

Perfekte Ordnung am Nullpunkt

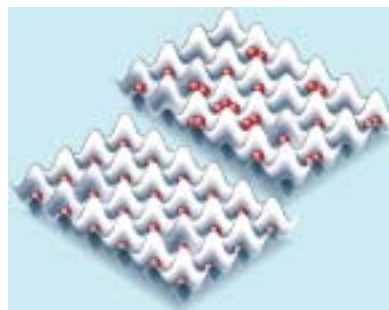
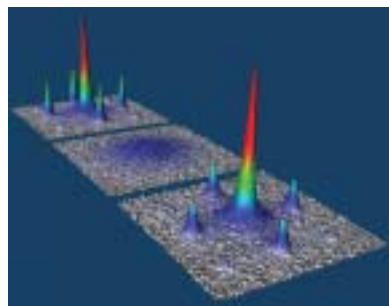
Nirgends wird die Welleneigenschaft von Materie so deutlich wie in einem Bose-Einstein-Kondensat. Dennoch ist es möglich, ein wellenartiges Bose-Einstein-Kondensat in ein geordnetes Teilchengitter zu überführen. Dieser Mott-Isolator-Zustand wurde kürzlich erstmals von Physikern an der LMU München und dem MPI für Quantenoptik in Garching erzeugt [1].

Bei Temperaturen unterhalb von einem Mikrokkelvin überlappen sich die Wellenpakete von Atomen und schließen sich zu einem Bose-Einstein-Kondensat zusammen. Dann besetzen alle Atome den gleichen quantenmechanischen Zustand und können durch eine gemeinsame Wellenfunktion beschrieben werden. Die Atome sind superfluide und bilden ein kohärentes, also interferenzfähiges Ensemble, das in mancher Hinsicht mit kohärentem Laserlicht vergleichbar ist (vgl. *Physik in unserer Zeit* 32, 2001, 242).

Den Mott-Isolator-Zustand hatte schon Sir Neville Mott in den sechziger Jahren im Rahmen von Metall-Isolator-Übergängen in Festkörpern vorausgesagt. Wir konnten ihn jetzt mit einem Bose-Einstein-Kondensat aus Rubidiumatomen realisieren.

Hierzu erzeugen wir zunächst mit drei sich kreuzenden, stehenden Laserwellen ein dreidimensionales optisches Gitter. Dieses formt eine periodische Potentiallandschaft, die einem winzigen Eierkarton ähnelt, wobei jede Vertiefung einem Gitterplatz entspricht. In dieser Potentiallandschaft verteilt sich das Bose-Einstein-Kondensat auf etwa 100.000 Gitterplätze mit durchschnittlich einem Atom pro Gitterplatz.

Solange die Potentialbarriere zwischen den Gitterplätzen nicht zu hoch ist, sind die Atome superfluid und das Atomgas kann sich leicht durch das Gitter hindurch bewegen. Die Atome bilden auch im Gitter ein Bose-Einstein-Kondensat, und jedes Atom ist materiewellenartig über alle Gitterplätze ausgedehnt. Dies kann man leicht nachweisen, indem man den Einschluss durch das Gitterpo-



tential und die Magnetfalle abschaltet und nach einiger Zeit die Atomwolke fotografiert. Von jedem Gitterplatz geht eine Materiewelle aus, und diese Wellen überlagern sich und bilden ein dreidimensionales Materiewellen-Interferenzmuster (Abbildung 1 links und rechts). Die schmalen Interferenzmaxima zeigen eindrucksvoll, dass die Atome im Gitter kohärent sind und die Materiewellen an jedem Gitterplatz die gleiche Phase haben.

Diese Gleichphasigkeit bedeutet jedoch, dass die Zahl der Atome an jedem Gitterplatz prinzipiell unbestimmt ist. Der Grund hierfür ist die Heisenbergsche Unschärferelation, die es verbietet, gleichzeitig die Phase und die Atomzahl eines Gitterplatzes genau zu kennen. Bei einer Messung würde man daher an jedem Platz eine zufällige Zahl von Atomen finden (Abbildung 2 oben).

Erhöht man jedoch die Stärke des Gitterpotentials, wird die abstoßende Wechselwirkung zwischen den Atomen immer wichtiger, und das System geht in den neuen Materiezustand über – den Mott-Isolator. Im Gegensatz zum superfluiden Zustand befindet sich nun eine genau festgelegte Zahl von Atomen an jedem Gitterplatz, zum Beispiel genau ein Atom (Abbildung 2 unten). Nach der Heisenbergschen Unschärferelation muss jetzt jedoch die Phase vollkommen unbestimmt sein, und tatsächlich verschwindet in Abbildung 1 im mittleren Bild das Interferenzmuster vollständig, da die Phasen der interferierenden Materiewellen keine feste Beziehung mehr zueinander haben.

Wie der Name Mott-Isolator vermuten lässt, können die Atome nun nicht mehr frei durch das Gitter fließen, sondern sind auf Gitterplätze lokalisiert. Im Experiment konnten wir dieses Verhalten nachweisen und außerdem beobachten, dass der Phasenübergang zwischen dem superfluiden und dem Mott-Isolator-Zustand reversibel durchschritten werden kann. Dieser Quantenphasenübergang kann auch am absoluten Temperaturnullpunkt geschehen, wenn nur noch Quantenfluktuationen existieren und alle thermischen Fluktuationen „ausgefroren“ sind.

Es gibt vielversprechende Vorschläge auf Basis des Mott-Isolator-Zustands, in dem die Atome kontrolliert über ein Gitter verteilt sind, einen Quantencomputer zu realisieren. Die Ausrichtung des magnetischen Moments eines Atoms kann dabei als „Quantenbit“ dienen, und die Atome im Gitter würden ein großes Rechenregister bilden. Bis zu diesem Ziel ist es sicher kein leichter Weg, aber die rasante Entwicklung auf dem Gebiet der ultrakalten Atomgase hat schon für manche Überraschungen gesorgt.

[1] M. Greiner et al., *Nature* 2002, 415, 39.

*Markus Greiner, Theodor W. Hänsch
und Immanuel Bloch,
LMU München*

Abb. 1 Nach Abschalten des optischen Gitterpotentials gehen von jedem Gitterplatz Materiewellen aus, die miteinander interferieren (links und rechts). Mitte: Quantenphasenübergang in den Mott-Isolator-Zustand ohne Phasenkohärenz.

Abb. 2 Im superfluiden Zustand (oben) ist jedes Atom wellenartig über das Gitter ausgedehnt. Im Mott-Isolator (unten) ist an jedem Gitterplatz genau ein Atom lokalisiert (Foto: Nature).