

Ein geschärfter Blick ins Uncharfe

Die Elektronenmikroskopie ermöglicht eine neue Sicht auf ultrakalte Materie.

In nahezu allen bisherigen Experimenten mit ultrakalten Quantengasen dient die optische Abbildung als Standardverfahren für Messungen. Die typischen Falschfarbenbilder von Bose-Einstein-Kondensaten oder entarteten Fermi-Gasen, die meist vor dunkelblauem Hintergrund die farb-codierten Dichteverteilungen der Quantengase wiedergeben, sind uns inzwischen geläufig.

In der Regel wird dafür die Dichteverteilung der Atome durch ein Linsensystem auf einen Bildsensor projiziert und die Fluoreszenz oder Absorption in einem nahresonanten Laser gemessen [1]. Phasenkontrastverfahren ermöglichen es darüber hinaus, die lokale Polarisation der Atome zu detektieren [2] und somit z. B. Spindomänen zu identifizieren [3].

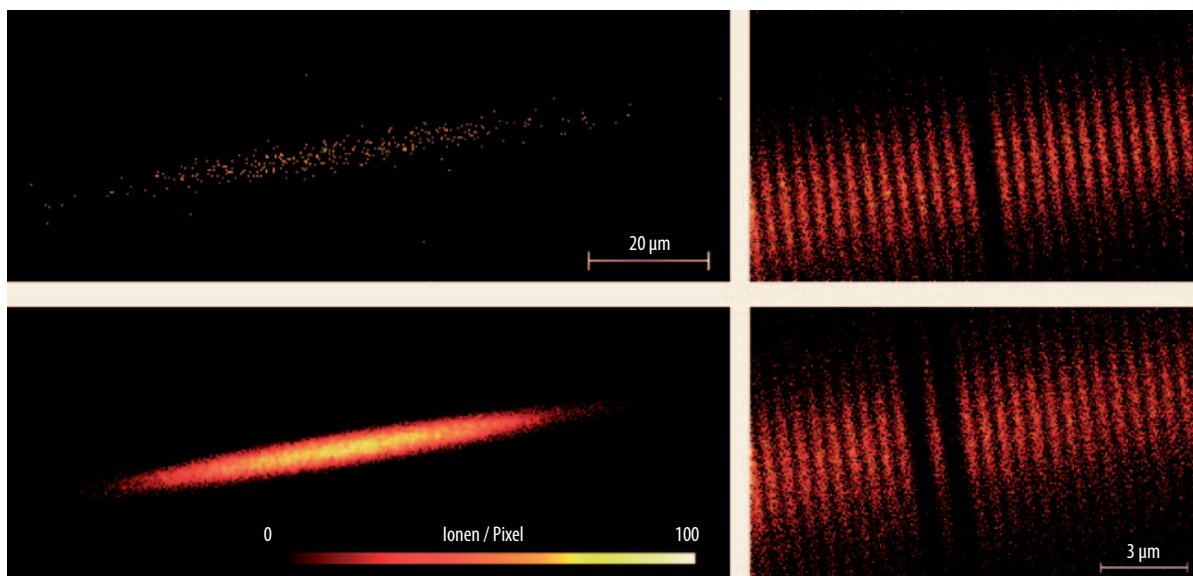
Alle optischen Verfahren unterliegen jedoch grundsätzlichen Beschränkungen, die den Blick auf die Materie trüben. So erlauben Abbildungsverfahren, die auf resonanter Absorption basieren, wegen des großen Streuquerschnitts des Lichts an den Atomen und der dadurch sehr hohen optischen Dichte gefangener ultrakalter Gase meist keine

Messungen in-situ. Stattdessen ist es notwendig, die Aufnahme im freien Fall zu machen, nachdem die Wolke durch Expansion genügend ausgedünnt ist. Dies ist gleichbedeutend damit, die Impulsverteilung der Atome abzubilden. Die Information über die ursprüngliche Ortsverteilung geht dabei verloren, und ein direkter Blick auf die Struktur des gefangenen Quantengases ist nur sehr eingeschränkt möglich. Hinzu kommt eine grundsätzliche Begrenzung der räumlichen Auflösung, die bei allen optischen Verfahren bestenfalls das Abbe-Limit erreicht. Die hierfür bestimmende Wellenlänge des zur Abbildung verwendeten Lichtes liegt üblicherweise im sichtbaren oder (wie hier bei Rubidium-Atomen) im nah-infraroten Spektralbereich. In der Praxis lässt sich jedoch maximal eine Auflösung in der Größenordnung von Mikrometern erreichen, unter anderem begrenzt durch die erreichbare numerische Apertur des Abbildungssystems, das mit den in der Atomoptik verwendeten Ultrahochvakuum-Apparaturen kompatibel sein muss.

Mit einem in der Atomoptik völlig neuartigen Abbildungsver-

fahren ist es nun Herwig Ott und den Mitarbeitern seiner Emmy-Noether-Nachwuchsgruppe an der Universität Mainz gelungen, diese Einschränkungen zu umgehen und Auflösungen zu erzielen, welche die genannten optischen Verfahren um mehr als eine Größenordnung übertreffen [4]. Dazu setzen die Wissenschaftler erstmals einen Elektronenstrahl ein, um ein Quantengas abzubilden. Das Signal liefern dabei die bei der Stoßionisation im Elektronenstrahl entstehenden Ionen. Ein statisches elektrisches Feld saugt diese ab, und ein Ionendetektor registriert sie mit hoher Effizienz. Der Querschnitt des Elektronenstrahls bestimmt dabei das Auflösungsvermögen.

Die Elektronenmikroskopie ermöglicht ganz neue Einblicke in die Struktur ultrakalter Gase: So zeigen die Mainzer Physiker Elektronenmikroskop-Aufnahmen eines gefangenen Bose-Einstein-Kondensats, das aus 100 000 Rubidium-Atomen besteht [4]. Die Aufnahmen entstanden mit einem Elektronenstrahl von 95 bis 140 nm Durchmesser und Rasterweiten bis hinunter zu 25 nm und erreichen Auflösungen bis 115 nm. Aufgrund



Mit dem Elektronenmikroskop lässt sich ein Bose-Einstein Kondensat aus Rubidium in der Falle abbilden (links oben). Die Überlagerung aus 300 solche Einzel-

aufnahmen zeigte die Atomdichte (links unten). Befindet sich das Kondensat in einem optischen Gitter, so lässt sich mit dem Elektronenstrahl eine Fehlstelle

oder ein isolierter Gitterplatz erzeugen und abbilden (rechts oben bzw. unten). (aus [4])

Dr. Axel Griesmaier,
5. Physikalisches
Institut, Universität
Stuttgart, Pfaffen-
waldring 57, 70569
Stuttgart

dieser Auflösung und des geringen Streuquerschnitts zwischen Elektronen und Atomen erlaubt es dieses Verfahren, einzelne Atome in einem Quantengas in-situ zu detektieren. Der geringe Streuquerschnitt von Elektronen und Atomen führt im Gegensatz zu optischen Abbildungen dazu, dass je nach Rastergeschwindigkeit nur ein sehr geringer Teil der Atome tatsächlich ein Elektron streut und zum Signal beiträgt. Im Hinblick auf diese ionisierten Atome ist das Verfahren zwar destruktiv, die Autoren zeigen in ihrem Artikel aber, dass bereits das von einigen hundert ionisierten Atomen gelieferte Bild ausreicht, um die komplette Dichteverteilung bis auf fünf Prozent Ungenauigkeit zu bestimmen. Der Verlust eines so geringen Anteils von weniger als einem halben Prozent der gesamten Atomzahl stört das Quantengas kaum. Daher besteht in Zukunft mit noch besserer Detektionseffizienz sogar die Möglichkeit, mehrere Aufnahmen desselben Kondensats zu machen, um etwa dynamische Prozesse zu verfolgen.

Ein wichtiger Aspekt dieser Methode rührt von der Tatsache her, dass in einem Bose-Einstein-

Kondensat alle Atome eine gemeinsame quantenmechanische Wellenfunktion besitzen, die sich als Produkt identischer Einteilchen-Wellenfunktionen darstellen lässt. Die Ausdehnung dieser Wellenfunktion ist durch die Größe des Kondensats gegeben und beträgt üblicherweise einige Mikrometer. Die Abbildung selbst muss als quantenmechanische Projektion im Ortsraum betrachtet werden und beinhaltet daher ein probabilistisches Element, das bei jeder Aufnahme eine zufällige Auswahl aus der gesamten Dichteverteilung trifft. Dass dies tatsächlich der Fall ist, zeigen die Autoren, indem sie viele solcher Aufnahmen summieren: Das Gesamtbild stimmt ausgezeichnet mit dem theoretischen Dichteprofil überein (**Abb. links**).

Die Vielseitigkeit und Leistungsfähigkeit ihres Verfahrens zeigen die Physiker besonders eindrucksvoll, indem sie ein Bose-Einstein-Kondensat in einem optischen Gitter abbilden und mit dem Elektronenstrahl gezielt manipulieren. Das Gitter mit einer Gitterkonstante von 600 nm entsteht hierbei durch die Überlagerung zweier Laser der Wellenlänge 850 nm unter einem

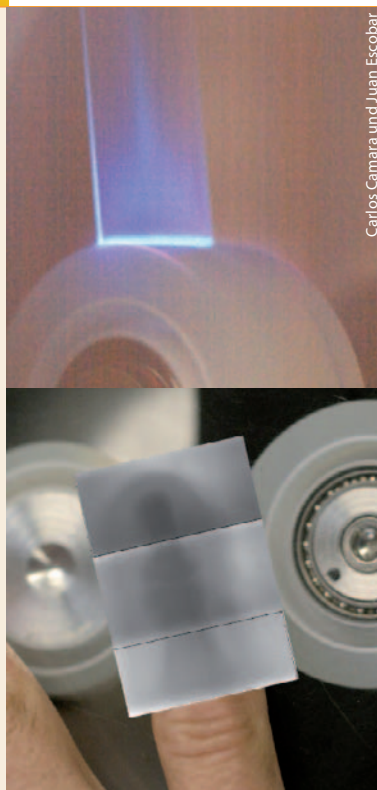
Winkel von 90°. Die periodisch angeordneten Intensitätsmaxima der durch Interferenz entstehenden Stehwelle, die gegenüber der atomaren Resonanz rot verstimmt ist, bilden für die Atome attraktive Potentialtöpfe [5]. Mithilfe des Elektronenmikroskops lassen sich solche kleinen Strukturen auflösen und die Atome an den einzelnen Gitterplätzen abbilden. Die Detektion einzelner Atome eröffnet hierbei zusätzlich ganz neue Möglichkeiten, um Korrelationen in Quantengasen zu messen.

Bei längerer Bestrahlung kann der Elektronenstrahl auch gezielt Atome durch Ionisation aus Gitterplätzen entfernen. Darin besteht die besondere Stärke des Verfahrens: So lässt sich z. B. eine Fehlstelle künstlich erzeugen und anschließend die mikroskopische Dynamik beim Wiederauffüllen durch Tunneln der Atome im optischen Gitter beobachten (**Abb. rechts**). Auch die Dispersion des Wellenpakets eines einzelnen, isoliert besetzten Gitterplatzes kann man untersuchen. Die zukünftigen präparativen Möglichkeiten gehen sogar noch weiter. Über die Wechselwirkung der atomaren Spins mit dem vom Elektronenstrahl erzeugten Magnetfeld eröffnet sich die viel versprechende Möglichkeit, einzelne Atome in einem Quantengas kohärent zu manipulieren. Das Elektronenmikroskop ist also ein sehr vielseitiges Instrument, mit dem sich ganz neue Perspektiven für die Detektion und Manipulation von Quantengasen ergeben.

Axel Griesmaier

RÖNTGENBLICK VON DER ROLLE

Mit Tesafilm lassen sich Finger röntgen. Diese überraschende Erkenntnis haben Seth Putterman und seine Kollegen von der University of California in Los Angeles gemacht, als sie das mechanisch erzeugte Leuchten („Tribolumineszenz“) beim Abziehen von Tesafilmrollen untersuchten. Dafür entwickelten sie einen Apparat, mit dem sich das Klebeband wie in einem Tonbandgerät mit einer konstanten Geschwindigkeit von der Rolle abziehen lässt. Die Physiker maßen sowohl die zum Abziehen nötige Kraft als auch die Eigenschaften der emittierten Strahlung. An Luft zeigte sich ein helles bläuliches Leuchten, in einer Vakuumkammer verbreiterte sich das Spektrum, zusätzlich traten stoßweise Röntgenphotonen mit einer Energie bis zu 100 keV auf. Diese entstanden immer dann, wenn die zum Abwickeln nötige Kraft nachließ und die mechanische Energie plötzlich frei wurde. Die Strahlung war intensiv genug, um damit in 20 Sekunden einen Finger zu durchleuchten.
C. G. Gamara et al., Nature 455, 1089 (2008)



Carlos Camara und Juan Escobar

- [1] W. Ketterle, D. S. Durfee und D. M. Stamper-Kurn, in: Bose-Einstein condensation in atomic gases, Proc. Int. School of Physics „Enrico Fermi“, IOS Press (1999), S. 67
- [2] M. R. Andrews, M.-O. Mewes, N. J. van Druten, D. S. Durfee, D. M. Kurn und W. Ketterle, Science 273, 84 (1996)
- [3] M. Vengalattore, S. R. Leslie, J. Guzman und D. M. Stamper-Kurn, Phys. Rev. Lett. 100, 170403 (2008)
- [4] T. Gericke, P. Würtz, D. Reitz, T. Langen und H. Ott, Nature Physics, doi:10.1038/nphys1102 (2008)
- [5] I. Bloch, Nature Physics 1, 23 (2005)