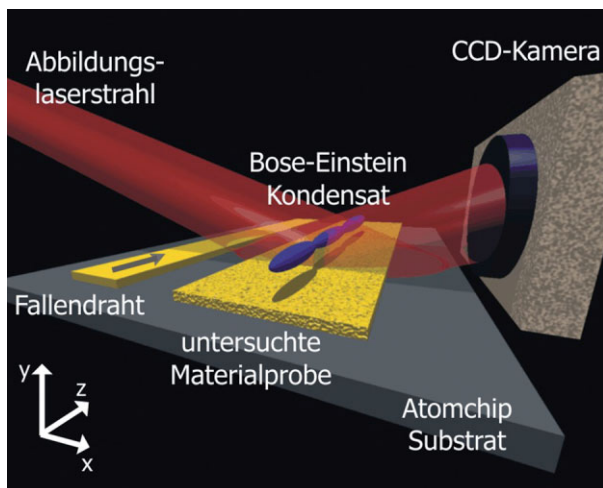


## QUANTENOPTIK

## Bose-Einstein-Kondensat als Magnetfeldsensor

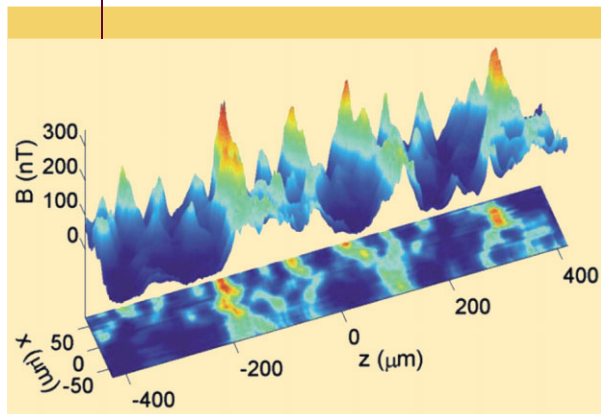
Physikern der Universität Heidelberg ist es gelungen, mit einem Bose-Einstein-Kondensat (BEK) mit hoher Empfindlichkeit Magnetfelder zu messen [1, 2]. Die neue Methode vereint hohe räumliche Auflösung von  $3 \mu\text{m}$  mit einer sehr guten Sensitivität im Bereich von Nanotesla.

Der neue Sensor nutzt die sehr hohe Empfindlichkeit von ultrakalten neutralen Atomwolken auf Variationen einer Potentiallandschaft aus.



**Abb. 1** Ein BEK wird in einer von einem Fallendraht erzeugten Magnetfalle über einer zu untersuchenden Materialprobe positioniert. Eine CCD-Kamera misst die atomare Dichteverteilung als Schattenwurf in einem Laserstrahl.

### ABB. 2 | MESSERGEBNIS



Zweidimensionale Magnetfeldlandschaft oberhalb eines  $100 \mu\text{m}$  breiten und  $3,1 \mu\text{m}$  hohen stromführenden Golddrahts. Sie wurde in einem Abstand von  $10 \mu\text{m}$  oberhalb des Drahtes gemessen und aus 28 eindimensionalen Magnetfeldmessungen an verschiedenen transversalen Positionen zusammengesetzt.

Dies lässt sich mit folgender Analogie veranschaulichen. Man denke sich die Potentiallandschaft aus Hügeln und Tälern bestehend, die man komplett mit einer Flüssigkeit auffüllt. Die glatte Oberfläche der Flüssigkeit stellt eine Äquipotentialfläche dar. Um das lokale Potential zu bestimmen, muss man an jeder Stelle die Tiefe der Flüssigkeit messen: In den Tälern sammelt sich viel Flüssigkeit an, an Hügeln wenig.

Diese Situation ist analog zu Atomen in einem BEK in einer magnetischen Potentiallandschaft. Hier beschreibt man das Wechselwirkungspotential durch  $U = \mu B$  mit dem magnetischen Moment  $\mu$  eines Atoms und dem lokalen Magnetfeld  $B$ . An Stellen mit tiefem Wechselwirkungspotential (Tal) sammeln sich viele Atome und bei hohem Wechselwirkungspotential (Hügel) wenig Atome. In unseren Experimenten entspricht die Dichteverteilung im BEK typischerweise einer Magnetfeldvariation von einigen  $100 \text{ nT}$ . Dies erklärt die sehr hohe Sensitivität des Magnetfeldsensors.

In dem Experiment wird ein etwa einen Millimeter langes BEK aus Rubidiumatomen in einer zylinderförmigen Atomfalle wenige Mikrometer oberhalb einer zu untersuchenden Materialprobe positioniert (Abbildung 1). Diese Atomfalle wird durch Magnetfelder gebildet, die mit Hilfe eines stromdurchflossenen Golddrahts (Fallendraht) auf einem Substrat – dem so genannten Atomchip [3] – erzeugt werden. Kleinste Variationen des Magnetfelds oberhalb der Materialprobe (beispielsweise durch einen zweiten stromführenden Draht auf dem Atomchip) verursa-

chen eine Variation der Potentiallandschaft der Falle. Diese bewirken eine lokale Variation der eindimensionalen Dichte des BEK.

Aus der atomaren Dichteverteilung lässt sich das Magnetfeld bestimmen. Hierzu werden die Atome mit einem resonanten Laserstrahl beleuchtet und die Lichtabsorption als Schattenbild mit einer CCD-Kamera aufgezeichnet (Abbildung 1). Aus dieser Aufnahme kann die longitudinale eindimensionale Dichteverteilung der Atome und daraus die Potentiallandschaft entlang der Falle berechnet werden. Mit einer einzigen Messung erhält man die gesamte Potentialinformation entlang des BEKs auf einer Länge von etwa einem Millimeter. Verschiebt man das BEK in transversaler Richtung, so vermisst man die Magnetfeldlandschaft zweidimensional (Abbildung 2).

Die verwendete optische Abbildungstechnik beschränkt die räumliche Auflösung dieser Messung auf einige Mikrometer, während die erreichte Magnetfeldsensitivität von einigen Nanotesla durch fundamentales Schrotrauschen (shot noise) in der Atomzahlmessung limitiert ist. Mit einer höheren Atomdichte wird es voraussichtlich möglich sein, die Sensitivität noch um eine Größenordnung zu verbessern [2].

Dieser Sensor ist die erste konkrete Anwendung eines BEKs außerhalb des Bereichs der Atomphysik und Quantenoptik. Er ermöglicht es, neue Phänomene in der Halbleiter- und Oberflächenphysik zu untersuchen. Da der Magnetfeldsensor sehr sensitiv auf Richtungsänderungen eines Stromflusses ist, ließen sich damit dünne stromführende Leiter untersuchen. Hier sind beispielsweise Halbleiter-Quantum-Wellen oder der Isolator-zu-Leiter-Übergang sehr interessante Forschungsobjekte.

[1] S. Wildermuth et al., *Nature* **2005**, 435, 440.

[2] S. Wildermuth et al., *Appl. Phys. Lett.* **2006**, 88, 264103.

Stephan Wildermuth, *Univ. of Otago, Neuseeland, Jörg Schmiedmayer, Univ. Heidelberg und TU Wien.*