

■ Starker Anstoß für Atome

Kürzlich ist es gelungen, einen neuen Rekord in puncto Impulsübertrag in der Atominterferometrie aufzustellen.

Ein frei fallendes Atom lässt sich als Materiewelle auffassen. Spaltet man eine solche Welle mit geeigneten Strahlteilern kohärent auf und rekombiniert sie anschließend, so tritt analog zum Lichtwelleninterferometer Interferenz auf. Während in der Optik dazu halbdurchlässige Spiegel dienen, kommen in der Atominterferometrie z. B. Laserpulse zum Einsatz: Wann immer das Atom ein Photon absorbiert, erfährt es auch den Rückstoß $\hbar k$ des Photons, der durch die Wellenzahl k und die Planck-Konstante \hbar gegeben ist. Wenn die Intensität und Dauer des Pulses so gewählt sind, dass der Prozess mit einer Wahrscheinlichkeit von 50 Prozent stattfindet, resultiert ein Strahlteiler für Materiewellen: Die Atome laufen mit unterschiedlichen Impulsen auseinander. Absorbiert das Atom mit einer Wahrscheinlichkeit von nahezu 100 Prozent ein Photon und erfährt dadurch einen Rückstoß mit 100 Prozent Wahrscheinlichkeit, ergibt sich ein Spiegel. Drei Laserpulse sind mindestens nötig, um das Interferometer zu schließen: einer zur Aufspaltung, ein zweiter zur Richtungsänderung und schließlich ein dritter, um die Atome wieder zu überlagern. Analog zur Interferometrie in der Optik führt konstruktive Interferenz zu einer großen Wahrscheinlichkeit, das Teilchen (Photon/Atom) am Interferometerausgang zu detektieren, destruktive Interferenz zu einer geringen. Die Detektionswahrscheinlichkeit ist durch $\cos^2(\Delta\varphi/2)$ gegeben, wobei $\Delta\varphi$ der Phasenunterschied zwischen den beiden Pfaden ist. Interferometer können als empfindliche Messinstrumente für alles dienen, was diese Phase beeinflusst. Da Atome im Unterschied zu Photonen eine Ruhemasse m haben, eignet sich die Atominterferometrie z. B. besonders für Messungen der Fallbeschleunigung [1], ihres Gradienten [2], Rotationen [3] oder Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie [4].

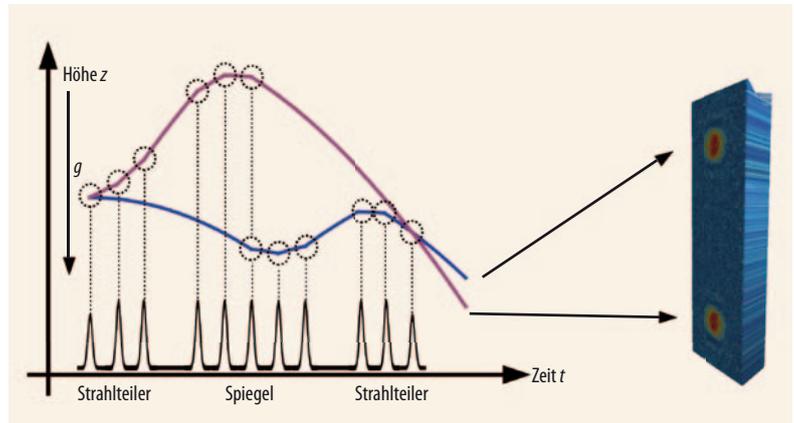


Abb. 1 Im Bragg-Interferometer, hier der Einfachheit halber eins mit $18 \hbar k$, steuert man die Interferometerarme mit drei Pulsgruppen an. Der erste Puls spaltet das Ensemble in zwei durch $6 \hbar k$ getrennte Impulszustände auf (Trajektorien in rot und blau gezeigt), der zweite und dritte Puls der ersten Gruppe übertragen jeweils weitere $6 \hbar k$ auf den roten Inter-

ferometerarm (links). Die folgende Gruppe aus fünf Pulsen kehrt den Impulszustand der Arme um, die dritte Gruppe aus drei Pulsen lässt sie interferieren. Der gesamte Prozess dauert einige Millisekunden. Die Detektion der Interferometerausgänge erfolgt durch Absorptions-Abbildung (rechts).

Genau wie in der Optik steigt die Empfindlichkeit eines Atominterferometers mit der zwischen den Armen eingeschlossenen Fläche. Diese ist bei Atominterferometern dadurch begrenzt, dass der Photonrückstoß $\hbar k$ dem Atom nur eine geringe Geschwindigkeit $\hbar k/m$ gibt und die Atome nur eine begrenzte Zeit zwischen den Strahlteilern auseinanderlaufen können. Daher liegt es nahe, den Rückstoß mehrerer Photonen zu kombinieren und so die Fläche zu vergrößern. Dies ist gleichbedeutend damit, dass der hohe Impulsübertrag die de-Broglie-Wellenlänge des Atoms verkleinert und so die Empfindlichkeit erhöht: Die verkleinerte de-Broglie-Wellenlänge geht bei konstanter Masse des Atoms immer mit einer erhöhten Geschwindigkeit und daher einer größeren Fläche einher.

Die übliche Methode, die Fläche zu erhöhen, besteht in der Verwendung zweier Laserstrahlen: Der erste wird vom Atom absorbiert und überträgt einen ersten Photonenrückstoß. Der zweite stimuliert das nunmehr angeregte Atom zur Emission eines Photons in Gegenrichtung und überträgt so

einen zweiten Impuls. Insgesamt erfährt das Atom also den Rückstoß zweier Photonen. Dabei kann sich der innere Quantenzustand des Atoms ändern (stimulierter Raman-Übergang) oder aber unverändert bleiben. Im letzteren Fall der sog. Bragg-Beugung unterscheidet sich der Anfangs- und Endzustand des Atoms nur durch den Impuls des gesamten Atoms. Im Allgemeinen ist es möglich, das Atom dazu zu bringen, $2n$ Photonenimpulse auszutauschen ($n = 1, 2, 3, \dots$). Bisheriger Rekord sind 24 Photonen [5].

Um den Impulsübertrag weiter zu erhöhen, haben Sheng-wei Chiow und seine Kollegen aus der Gruppe von Mark Kasevich an der Stanford University (bei Palo Alto, Kalifornien) nun Strahlteilerketten aus 17 Bragg-Pulsen verwendet, die jeweils $6 \hbar k$ übertragen [6]. Dies erfordert deutlich weniger Laserleistung als die Übertragung von $102 \hbar k$ mit einem einzigen Puls. Die Effizienz eines einzelnen Pulses ist mit 94 Prozent sehr hoch – auch dank der Verwendung eines sehr kalten (Bose-Einstein-kondensierten) Ensembles. Trotzdem hat die gesamte Kette eine Effizienz von nur 34 Prozent. Ein komplettes

Interferometer besteht aus drei Pulsgruppen, die die Trajektorien aufspalten, spiegeln und schließlich zur Interferenz wieder zusammenfügen (Abb. 1). Die hohen Verluste machen es schwierig, diese Methode zu noch höheren Impulsüberträgen zu skalieren.

Mit der Empfindlichkeit des Interferometers steigt naturgemäß auch die Empfindlichkeit gegenüber Vibrationen. Diese erzeugen Fluktuationen der Phase, die in dem Experiment in Stanford so stark waren, dass die Population an den Ausgängen des Interferometers stochastisch schwankte. Bei $102 \hbar k$ haben die Forscher diese hohe Empfindlichkeit auf Vibrationen als Nachweis für die Interferenzen benutzt. Allerdings war es nicht möglich, die Phase zu messen und das Interferometer damit als Messinstrument zu verwenden. Dies gelang lediglich mit einem Impulsübertrag von $30 \hbar k$. Dazu haben Chiow und seine Kollegen zwei Interferometer geschickt so kombiniert (sog. simultane konjugierte Interferometer), dass die Vibrationen herausfallen.

Derzeit wird weltweit daran gearbeitet, Impulsüberträge von vielen Hundert oder gar Tausend Photonenimpulsen und mehr zu erreichen. Damit wären z. B. sogar Gravitationswellensensoren auf Atominterferometerbasis denkbar. Die Verluste lassen sich im Prinzip z. B. durch kontinuierliche Beschleunigung von Materiewel-

len in optischen Gittern (Bloch-Oszillationen) verringern. Solche Methoden wurden bereits erprobt [7] und sollten es erlauben, dem Ziel näherzukommen. Eine spezielle Anwendung profitiert besonders stark vom hohen Impulsübertrag: Dient die Atominterferometrie dazu, die Feinstrukturkonstante zu messen, so skaliert das Signal mit der kinetischen Energie der Atome und damit dem Quadrat des Impulsübertrages. Solche Messungen erreichen bereits jetzt eine Genauigkeit von 7×10^{-10} [8]. Mithilfe der neuen Techniken könnten sie eines Tages die genaueste Messung der Feinstrukturkonstanten (derzeit eine Messung der gyromagnetischen Anomalie des Elektrons $g-2$) erzielen. Die relativ junge Atominterferometrie steht damit vor weiteren Durchbrüchen und befindet sich auf dem besten Wege, ihr großes Potenzial auszuschöpfen.

Dennis Schlippert und Holger Müller

- [1] A. Peters, K.-Y. Chung und S. Chu, *Nature* **400**, 849 (1999)
- [2] M. J. Snadden et al., *Phys. Rev. Lett.* **81**, 971 (1998)
- [3] T. L. Gustavson et al., *Phys. Rev. Lett.* **78**, 2046 (1997)
- [4] H. Müller et al., *Phys. Rev. Lett.* **100**, 031101 (2008); M. A. Hohensee et al., *Phys. Rev. Lett.* **106**, 151102 (2011)
- [5] H. Müller et al., *Phys. Rev. Lett.* **100**, 180405 (2008)
- [6] S.-w. Chiow et al., *Phys. Rev. Lett.* **107**, 130403 (2011)
- [7] H. Müller et al., *Phys. Rev. Lett.* **102**, 240403 (2009)
- [8] R. Bouchendira et al., *Phys. Rev. Lett.* **106**, 080801 (2011)

KURZGEFASST

■ Bewegung am Nullpunkt

In einem eindimensionalen optischen Gitter können Atome bei geringer Gittertiefe zum benachbarten Platz tunneln. Dadurch entstehen Paare aus leeren und doppelt besetzten Gitterplätzen. Physiker des MPI für Quantenoptik in Garching konnten diese Quantenfluktuationen, die selbst am absoluten Temperaturnullpunkt auftreten, erstmals direkt beobachten. Dazu nutzen sie aus, dass die Laserstrahlen, die das Quantengas aus Rubidiumatomen kühlen, die Atome gleichzeitig zum Leuchten anregen. Ein spezielles Mikroskop bildet die fluoreszierenden Atome ab. Dies liefert wichtige Informationen über das Vielteilchensystem. *M. Endres et al., Science* **334**, 200 (2011)

■ Unter die Oberfläche geblickt

Die Rastertunnelmikroskopie bildet Strukturen auf atomarer Ebene ab. Allerdings ist es nicht möglich, ins Innere komplexer Moleküle vorzudringen. Dies ist Jülicher Forschern gelungen, indem sie einzelne Atome zwischen Mikroskopspitze und Probe als eine Art Kontrastmittel nutzten. Durch kleine Lageverschiebungen reagieren die Atome extrem empfindlich auf die Kontur von Molekülen und beeinflussen dadurch den Tunnelstrom. Damit ließen sich Bilder von der Anordnung der Atome im Inneren komplexer Moleküle gewinnen und Wasserstoffbrückenbindungen sichtbar machen. *G. Kichin et al., J. Am. Chem. Soc.*, DOI: 10.1021/ja204626g (2011)