

mK abgekühlt. Zur Abfrage des Referenzübergangs werden nach Abschalten der MOF die Atome im freien Fall durch jeweils zwei zeitlich aufeinanderfolgende Laserpulse geeigneter Intensität und Dauer aus entgegengesetzter Richtung auf dem  $^1S_0$ - $^3P_1$ -Übergang angeregt und die Fluoreszenz aus dem Zerfall des  $^3P_1$ -Niveaus registriert. Diese Art von Atominterferometer entspricht im Wesentlichen einem optischen Mach-Zehnder-Interferometer, wobei die zeitlich versetzten Laserpulse als Strahlteiler für die Atome fungieren. Die Phasenverschiebung zwischen den atomaren Teilstrahlen ergibt sich hier durch das Produkt aus der Zeitverzögerung zwischen den beiden Pulspaaren und der Laserverstimmung gegenüber der Resonanz, womit die Übergangsfrequenz bestimmt wird.

Für den Fall nicht vollständig parallel ausgerichteter Laserstrahlen und aufgrund von Wellenfrontkrümmungen werden in diesem Schema durch die verbleibende Geschwindigkeit der Atome allerdings zu verschiedenen Zeiten unterschiedliche lokale Phasen der Lichtstrahlen von den Atomen registriert, was zu einer Verschiebung des Interferenzsignals und damit zu einer größeren Frequenzunsicherheit führt. Zudem führt die Geschwindigkeit der Atome zu einer Doppler-Verbreiterung des Signals und einem reduzierten Kontrast, was sich negativ auf die Stabilität auswirkt.

Um die geschwindigkeitsabhängigen Effekte zu reduzieren, hat die PTB-Gruppe ein neues Speicher- und Kühlschema implementiert, bei dem die Doppler-Kühlung, die zunächst auf dem breiten  $^1S_0$ - $^1P_1$ -Übergang durchgeführt wird, anschließend auf dem schmalen  $^1S_0$ - $^3P_1$ -Übergang fortgesetzt wird [3]. Prinzipiell lassen sich auf derart schmalen Übergängen durch Doppler-Kühlung sehr tiefe Temperaturen (bis unterhalb des Photonenrückstoß-Limits) erzielen; allerdings sind die typischen Lichtkräfte durch die geringe Photonenstreurate kaum größer als die Gravitationskraft, sodass die Kühlung und magnetooptische Speicherung neutraler Atome auf solch schmalen Übergängen bisher nicht gelungen war. Die Gruppe an der PTB umging dieses Problem durch künstliche Verbreiterung des  $^3P_1$ -Zustands. Dazu wird der schmale  $^3P_1$ -Zustand mit Hilfe eines weiteren Lasers an ein höher gelegenes

Niveau mit großer natürlicher Linienebreite gekoppelt (sog. Quenching). Damit lassen sich Temperaturen von weniger als  $10 \mu\text{K}$  erzielen. Ähnlich niedrige Temperaturen sind mit einem analogen Kühlschema vor kurzem auch am amerikanischen NIST erhalten worden [4]. Durch die tiefe Temperatur und die damit einhergehende niedrige Driftgeschwindigkeit der Atome besitzt das Signal nun einen höheren Kontrast und ist nicht mehr durch den Doppler-Effekt begrenzt. Damit konnte das Signal-zu-Rausch-Verhältnis um einen Faktor 6 erhöht und eine Stabilität von  $5 \cdot 10^{-14}$  in einer Sekunde erreicht werden [1].

Der Theorie zufolge sollte sich dieser Wert sogar noch um drei Größenordnungen erhöhen lassen, auf  $4 \cdot 10^{-17}$  in einer Sekunde, falls u. a. ein hinreichend frequenzstabiler Laser für die Anregung zu Verfügung steht. Die tiefen Temperaturen wirken sich überdies auch auf die Genauigkeit des Standards aus. Durch die geringe Driftgeschwindigkeit wird die oben geschilderte Linienverschiebung auf 150 mHz begrenzt; der wesentliche Beitrag rührt von Stößen zwischen den Atomen her. Die insgesamt abgeschätzte relative Genauigkeit beträgt  $8 \cdot 10^{-16}$  und ist somit den derzeit besten Mikrowellenstandards und auch optischen Einzelionen-Frequenznormalen vergleichbar. Letztere haben, bei geringerer Stabilität in einer Sekunde aufgrund ihres kleineren Signal-zu-Rausch-Verhältnisses, allerdings das Potenzial einer Genauigkeit im Bereich von  $10^{-18}$  [2].

JOACHIM VON ZANTHIER

- [1] G. Wilpers et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 230801 (2002)
- [2] Th. Becker et al., Physik Journal März 2002, S. 47
- [3] T. Binnewies et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 123002 (2001)
- [4] E. A. Curtis et al., e-print physics/0208071 (2002)

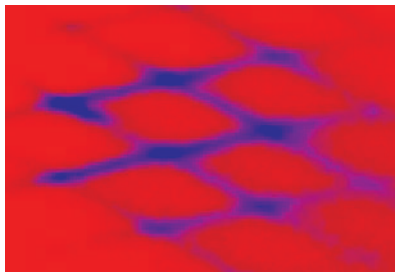
## ■ Atome im Kreisverkehr

**Mit mikrooptischen Zylinderlinsen lassen sich Leiter und Strahlteiler für Atome herstellen. Das Ziel sind miniaturisierte Atom-Interferometer.**

Die Interferometrie hat sich sowohl für die Grundlagenforschung als auch für technische Anwendungen als eine unentbehrliche Messtechnik erwiesen. Für einige Messun-

gen, zum Beispiel der Inertialkräfte, sind auf Materiewellen beruhende Atom-Interferometer um einige Größenordnungen empfindlicher als optische Instrumente. Eben wegen dieser großen Empfindlichkeit müssen sie allerdings auch robust hergestellt werden, was mithilfe von miniaturisierten Materiewellenleitern möglich ist. Nun hat die Gruppe um Wolfgang Ertmer und Gerhard Birkel am Institut für Quantenoptik in Hannover gezeigt, dass sich die Bausteine eines Atom-Interferometers auch mit Elementen aus dem hochentwickelten Feld der Mikro-Optik realisieren lassen [1].

Fluoreszenzbild von Rubidiumatomen (blau), die in einem optischen Potential aus Mikrolinsen eingefangen sind. Die Strecken und Kreuzungen wirken als Leiter und Strahlteiler für Materiewellen und erlauben so die Realisierung verschiedener Interferometer-Strukturen für Atome (aus [1]).



Im vergangenen Jahrzehnt wurden große Fortschritte erzielt beim Einfangen, Speichern und Leiten von Atomen in mikromechanisch hergestellten Strukturen. Dabei lag der Schwerpunkt dieser Aktivitäten bei magnetischen Atomleitern aus Mikrometergroßen stromführenden Drähten, permanenten oder schaltbaren Magneten und deren Kombinationen. Mit diesen Elementen wurde eine Vielfalt von Wellenleitern und Strahlteilern für kalte Atome und Bose-Einstein-Kondensate realisiert [2].

Neben magnetischen Kräften lassen sich Atome aber auch mithilfe derjenigen Kräfte manipulieren, die ein Lichtfeld auf sie ausübt. Befindet sich ein Atom in einem Lichtfeld, dessen Frequenz nahe eines atomaren Übergangs liegt, so wirkt auf das Atom das Dipolpotential  $U(\mathbf{r}) = -(3\pi c^2/2\omega_0^3)(\Gamma/\delta) I(\mathbf{r})$ , wobei  $\omega_0$  die Resonanzfrequenz des atomaren Übergangs,  $\Gamma$  seine Linienbreite,  $\delta$  die Verstimmung des Lasers zu  $\omega_0$  und  $I(\mathbf{r})$  die Lichtintensität ist. Je nach Vorzeichen der Verstimmung wirkt das Potential attraktiv (für eine längere Wellenlänge, „rot verstimmt Licht“) oder abstoßend (für eine kürzere Wellenlänge, „blau verstimmt Licht“). Im Gegensatz zu magnetischen Potentialen ist das optische Potential für alle magnetischen Hyperfeinzustände eines atomaren Zustands gleich stark.

Wenn also rot-verstimmtes

Laserlicht durch ein Linsenarray fokussiert wird, entsteht in den Brennpunkten ein Array von Mikrofallen, in denen Atome gefangen und gespeichert werden können [3]. Eine solche Fallenordnung lässt sich z. B. als Speicher für die Quanteninformationsverarbeitung verwenden. Werden die Linsen aus unterschiedlichen Winkeln und mit unterschiedlichen Wellenlängen gleichzeitig beleuchtet, so entstehen zwei verflochtene Arrays, die gegeneinander bewegt werden können. Jede einzelne Falle lässt sich zusätzlich von außerhalb des Gitters „adressieren“. Weil man das Muster einfach über ein Teleskop an eine beliebige Stelle abbilden kann, lassen sich die Linsen außerhalb der Vakuumkammer aufbauen, was die Flexibilität der Technik noch einmal vergrößert.

In der jüngsten Arbeit der Gruppe werden Atomleiter vorgestellt, die auf Zylinderlinsen beruhen, in deren Brennpunkten Laserlicht fokussiert wird [1]. Indem die Forscher die Intensitätsprofile zweier Linsenarrays in einer Ebene überlagern, entsteht ein zweidimensionales Gitter, durch das sie Atome führen können (Abb.). Jeder Punkt, an dem sich die Leiter kreuzen, bildet einen Strahlteiler [4], dessen Trennungsverhältnis vom Intensitätsverhältnis in den Armen abhängt. In dem Experiment ist die Lichtintensität in einem Kreuzungspunkt doppelt so groß wie in den Armen, d. h. das Potential ist doppelt so tief. Auf bislang unveröffentlichten Rechnungen beruht die Hoffnung, dass sich eine Materiewelle bei einem glatten Potentialverlauf zwischen den Armen und dem Strahlteiler kohärent aufspalten lässt.

Da das Lichtpotential von der Verstimmung abhängt, lassen sich mit dieser Anordnung auch Atome trennen, die in zwei verschiedenen Grundzuständen präpariert wurden: Dazu muss man die Laserfrequenz für eine der beiden Linsenarrays so wählen, dass sie zwischen den Resonanzfrequenzen für Übergänge zu einem gemeinsamen oberen Niveau liegt. Für einen der beiden Übergänge ist das Lichtfeld dann rot verstimmt, d. h. die zugehörigen Atome werden angezogen, für den anderen Übergang ist es blau verstimmt, d. h. die Atome werden abgestoßen.

Mit dem Vorschlag, wie sich ein Interferometer vom Michelson-Typ elegant aus einer einzelnen X-Kreu-

zung verwirklichen lässt, ist die Gruppe darüber hinaus dem Ziel eines ortsabhängigen Atominterferometers näher gekommen. Das Hauptergebnis dieser Arbeit ist jedoch die erstmalige Darstellung eines geschlossenen Kreises aus Atomleitern. Eine solche Gitterzelle aus vier Kreuzungen kann man als ein sog. *open-loop* Mach-Zehnder-Interferometer aus Atomleitern betrachten. Allerdings ist es noch nicht gelungen, experimentell zu zeigen, dass dieser Kreis tatsächlich als Interferometer wirkt, wie es allgemeine Betrachtungen zu Atominterferometern mit Atomleitern vermuten lassen [5].

Im gezeigten Aufbau erlauben es die Kreuzungen, eine Zelle mit weiteren Strukturen zu verbinden und damit z. B. ein komplettes Netzwerk mit einer höheren Empfindlichkeit zu bilden. Mit einem solchen Muster ließen sich auch interatomare Wechselwirkungen über die Zufallsbewegungen der Atome in einem geneigten streuenden Netzwerk, einem „Galton-Brett“ untersuchen. Während sich für klassische Teilchen, die an einem gemeinsamen Punkt starten, eine gaußförmige Verteilung an den Ausgängen einstellt, können in einem quantenmechanischen Galton-Brett für Materiewellen kleine Unterschiede in der Potentiallandschaft eine stark veränderte Verteilung ergeben.

Man darf gespannt sein auf die noch unveröffentlichte komplementäre theoretische Arbeit, welche die Kohärenzeigenschaften dieser gezeigten Strahlteiler und das Verhalten dieser Mach-Zehnder-Interferometer-Strukturen genau beschreibt. Die experimentellen Nachweise dieser Strukturen sind aber für sich schon sehr schön und viel versprechende Ergebnisse für die Zukunft der Atominterferometrie.

LOUW FEENSTRA

- [1] R. Dumke et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 220402 (2002)
- [2] R. Folman et al., Adv. At. Mol. Opt., **48**, 263 (2002)
- [3] R. Dumke et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 097903 (2002)
- [4] O. Houde et al., Phys. Rev. Lett. **85**, 5543 (2000)
- [5] E. Andersson et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 100401 (2002)

Dr. Louw Feenstra,  
Physikalisches Institut, Universität  
Heidelberg, 69120  
Heidelberg