

## ■ Kalte Präzision

Die Atominterferometrie mit ultrakalten Quantengasen ermöglicht hochpräzise Messungen von Kräften und Rotationen. Erstmals gelang es nun, mit einem Atominterferometer sukzessive alle drei Raumachsen zu erfassen.

Seit langem hat sich die Interferometrie für die genaue Messung von Distanzen, Kräften und Rotationen bewährt, man denke nur an das berühmte Michelson-Interferometer zum Nachweis der Erdrotation gegen einen hypothetischen Äther. Ein modernes Beispiel sind „optische Kreisel“, die z. B. ein wichtiger Bestandteil des Autopilotensystems von Flugzeugen sind<sup>1)</sup>: Hier schickt man durch eine Glasfaserspule zwei entgegengesetzt laufende Lichtstrahlen. Wenn nun die ganze Anordnung rotiert, verkürzt sich für den einen Strahl der Lichtweg, während er sich für den anderen verlängert. Die entsprechende Laufzeitänderung lässt sich mit Hilfe der Interferenz beider Strahlen messen.

Da die de Broglie-Wellenlänge ultrakalter Atome sehr viel kürzer ist als die Wellenlänge von Licht, versprechen so genannte atomare Sagnac-Interferometer prinzipiell noch präzisere Messungen von Kräften und Rotationen.<sup>2)</sup> Daher arbeiten zahlreiche Arbeitsgruppen an kompakten und robusten Atominterferometern, die sich flexibel einsetzen lassen und einfach zu handhaben sind. Diese könnten klassische Verfahren bei der Messung niederfrequenter kleiner Beschleunigungen und Rotationen ergänzen. Typische Messgrößen sind z. B. Schwankungen der Erdrotation und der Gravitation bzw. Bewegungen aufgrund der Tektonik.

Seit den ersten sehr beeindruckenden Demonstrationsexperimenten in den 80er- und 90er-Jahren wächst dieses weltweite Forschungsfeld stetig [1]. Gerade in Europa hat das Gebiet neben der Quanteninformation und der Physik entarteter Quantengase eine neue Dynamik gewonnen. Beispiele für die vielfältigen Aktivitäten zu atomaren Inertialsensoren sind die Entwicklung neuartiger Gyroskope, die auf intensiven kal-

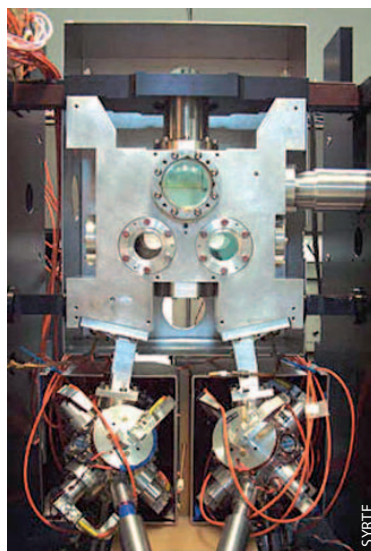


Abb. 1 Mit diesem Atominterferometer ließen sich in Paris erstmals Beschleunigungen und Kräfte sukzessive für alle drei Raumachsen messen. Zu erkennen sind unten die beiden Quellen für die ultrakalten Cäsiumatome.

ten atomaren Fontänen basieren, in Paris (SYRTE) und Hannover, ein atomares Gravimeter für die Wattwaage (LNM, Paris), das Experiment MAGIA zur Bestimmung der Gravitationskonstante (LENS, Florenz), sowie die zukünftigen atomaren Gravimeter in Paris (ONERA) und Berlin (Humboldt-Universität).<sup>3)</sup>

In den USA sind als Beispiele zu nennen: ein Gravigradiometer am JPL in der Gruppe um L. Maleki, ein neues Atominterferometer zur genauesten Bestimmung der Feinstrukturkonstante in der Gruppe um S. Chu in Stanford und insbesondere die Arbeiten von M. Kasevich, die vermutlich auf Grund ihrer Relevanz für militärische Anwendungen oder für kommerzielle Produkte zum großen Teil nicht mehr öffentlich zugänglich sind.

### Kompakte Konstruktion

Das jüngste Beispiel für den Fortschritt auf diesem Gebiet ist ein vergleichsweise kompakter atomarer Inertialsensor (Abb. 1) von der Gruppe von A. Landragin am

SYRTE in Paris [2]. Dieser Sensor kann erstmalig Beschleunigungen und Rotationen sukzessive entlang allen drei Raumachsen vollständig erfassen, wie es z. B. zur Navigation von U-Booten erforderlich ist. Der Sensor beruht auf der bereits in der Neutronen-Interferometrie genutzten Mach-Zehnder-Geometrie. Dabei werden die Materiewellen durch Übertragung von Vielfachen des Photonenrückstoßes mit Hilfe so genannter Raman-Prozesse kohärent aufgespalten. Durch geschickte Wahl des Aufbaus und der Anordnung der Strahlteilergeometrien lassen sich sämtliche Bewegungsrichtungen erfassen.

Die differentielle Atominterferometrie [3] ermöglicht es, zwischen Beschleunigungen und Rotationen zu unterscheiden. Bei dieser Methode werden die Bewegungen entlang jeder Raumachse simultan mit zwei Atominterferometern gemessen, wobei die Atome in entgegengesetzter Richtung propagieren. Fontänen mit etwa 10 Millionen Cäsiumatomen bei einer Temperatur von  $3 \mu\text{K}$ , die auch sehr erfolgreich für Atomuhren eingesetzt werden, erlauben einen im Vergleich zu früheren Arbeiten kompakten Aufbau und die präzise Präparation kalter Ensembles. Der Sensor erreichte eine Auflösung von  $2,2 \times 10^{-6} \text{ rad/s}$  für 1 s Mittelungsdauer. Damit lässt sich die Erdrotation durch Integration mit einer Genauigkeit von etwa 1 % ermitteln. Deutlich höhere Sensitivitäten bis zu  $10^{-9} \text{ rad/s}$  für Rotationen (bzw.  $10^{-8} \text{ m/s}^2$  für Beschleunigungen), wie sie für thermische Atomquellen gezeigt wurden [4], lassen sich bei gleicher Mittelungsdauer für andere Geometrien und neuartige kalte Quellen [2, 5] erreichen.

Klassische Alternativen mit noch besserer Auflösung sind das  $16 \text{ m}^2$  große Ringlasergyroskop in Wettzell (Deutschland), das eine Achse der Erdrotation mit einer

1) s. Physik Journal, Oktober 2003, S. 57

2) Wegen der experimentellen Wartezeit bei einer Messmethode, die Inkremente der Ortsänderung erfasst, spielt die Tatsache, dass sich die Atome deutlich langsamer als Licht bewegen, eine entscheidende Rolle.

3) Die universitären Forschungsaktivitäten in Europa werden seit kurzem in einem neuen Forschungsprojekt im 6. Rahmenprogramm der EU im Bereich „New Emerging Sciences and Technology“ zur Entwicklung neuartiger atomarer Inertialsensoren „FINAQS“ (Future Inertial Atomic Quantum Standards) gefördert.

relativen Auflösung von  $10^{-8}$  der Erdrotation erfasst<sup>4)</sup>, Methoden der Radioastronomie (VLBI Very Long Baseline Interferometry), welche Schwankungen der Tageslänge von etwa 1 ms in 24 Stunden auflösen können, oder das kryogene Gyroskop von Gravity Probe B in Stanford, das für knapp zwei Jahre im Weltraum zum Nachweis des Lense-Thirring-Effektes eingesetzt wurde.

Die Entwicklung atomarer Gyroskope wird nicht zuletzt dadurch motiviert, die teilweise sehr aufwändigen Methoden durch kompaktere Apparaturen zu ergänzen bzw. zu ersetzen und auf drei Achsen zu erweitern, etwa um die Erdrotation kontinuierlich mit einer Genauigkeit von  $10^{-8}$  bei einer Mittelungsdauer von 10 000 s zu beobachten. Dann ließen sich z. B. die noch wenig verstandenen freien Präzessionsbewegungen der Erde (Chandler Wobble) erfassen.

Auch Satellitenmissionen wie HYPER (Abb. 2) [5] zur Messung



Abb. 2 Der geplante Satellit HYPER soll atomare Inertialsensoren tragen.

der räumlichen Struktur des Lense-Thirring-Effektes bzw. zum Test des Äquivalenzprinzips mit Materiewellen setzen zuverlässige hochauflösende atomare Inertialsensoren voraus. Diese profitieren vom ausgedehnten freien Fall – den sie ja gerade möglichst perfekt darstellen sollen –, da die Empfindlichkeit quadratisch mit der Messzeit ansteigt. Im Gegensatz zu terrestrischen Anwendungen, bei denen Gravitation und niederfrequente Störungen eine große Herausforderung darstellen, sind diese Sensoren

im Weltraum letztlich nur durch die Temperatur der Atome begrenzt.

Die schnelle Erzeugung ultrakalter atomarer Ensembles für die Atominterferometrie ist daher ein wichtiger Forschungsgegenstand, dem sich z. B. auch das Projekt QUANTUS der DLR am Fallturm in Bremen widmet. Hier werden derartige Quellen für den robusten Betrieb für mobile Anwendungen und dem Einsatz unter der Bedingung des ausgedehnten freien Falls untersucht.

Ernst M. Rasel

- [1] R. Paul Berman (Hrsg.), Atom Interferometry, Academic, London (1997)
- [2] B. Canuel et al., Phys. Rev. Lett. **97**, 010402 (2006)
- [3] P. Cheinet et al., Journal de Physique IV **119**, 153 (2004)
- [4] T. L. Gustavson, P. Bouyer und M. A. Kasevich, Phys. Rev. Lett. **78**, 2046 (1997), D.S. Durfee, Y. K. Shaham und M. A. Kasevich, quant/ph 0510215
- [5] C. Jentsch, T. Müller, E. M. Rasel und W. Ertmer, Gen. Rel. Grav. **36**, 2193 (2004)

Priv.-Doz. Dr. Ernst M. Rasel, Institut für Quantenoptik, Fachbereich Physik, Universität Hannover, Welfengarten 1, 30167 Hannover;

4) s. Physikal. Blätter, Oktober 2001, S. 7