

mit einem mittlerweile auf Schuhkartongröße geschrumpften Apparat Frequenzen bis zu einigen  $10^{15}$  Hz fehlerfrei und kontinuierlich zählen. Auf dieser Basis gelang es, die ersten experimentellen optischen Uhren zu verwirklichen [4]. Nun ist der Ball wieder bei den Entwicklern der optischen Oszillatoren bzw. optischen Frequenzstandards.

In den vielen Jahren, in denen nach dem optimalen optischen Standard gefahndet wird, haben sich zwei Hauptlinien mit zum Teil komplementären Eigenschaften herauskristallisiert. Einzelne gespeicherte Ionen als Frequenzstandard lassen sich mit Hilfe von Laserstrahlen auf Temperaturen nahe des absoluten Nullpunkts abkühlen, sodass weder Stöße noch der Doppler-Effekt stören. Bei einer geschickten Wahl der Falle und des Ions lassen sich auch die Störeinflüsse durch die für das Speichern nötigen Felder weitgehend eliminieren, sodass eine relative Genauigkeit von  $10^{-18}$  zu erwarten ist. Problematisch ist jedoch das sehr schwache Signal eines einzelnen Ions, das zum Teil völlig unrealistische Mittelungszeiten notwendig machen würde, um diese Genauigkeit auch zu erreichen. Erschwerend kommt ein sehr schmaler Uhrenübergang mit einer entsprechend niedrigen Übergangsrate hinzu. Mit anderen Worten: Ionenfallen-Stan-

dards haben gewöhnlich eine gute Systematik (Genauigkeit), aber eine schlechte Statistik (Stabilität).

Im Gegensatz dazu gibt es optische Frequenzstandards mit Millionen von neutralen Atomen. Allerdings gelang es bislang nicht, so viele Atome einzusperren ohne große Störungen der Übergangsfrequenz. In Ionenfallen können nur einige wenige Teilchen am Feldnullpunkt sitzen, und bei Neutralatomen wirken sich die zum Fangen verwendeten Laserstrahlen aufgrund der AC-Stark-Verschiebung negativ aus. Bisherige Varianten dieser Frequenzstandards lassen die gekühlten Atome daher kurz vor dem Abfragen der Übergangsfrequenz fallen, indem die Fallen- und Kühllaser ausgeschaltet und der Uhrenlaser eingeschaltet wird. Die aufgrund der Gravitation beschleunigte Bewegung der Atome verursacht aber wiederum andere systematische Verschiebungen des Uhrenübergangs. Wie man es auch dreht: Bei den Standards mit neutralen Atomen hat man gewöhnlich eine gute Statistik, dafür aber eine schlechte Systematik; also genau andersherum wie bei den Ionenfallen-Standards.

Dieses Problem haben nun Masao Takamoto und Mitarbeiter gelöst [5]. Ihnen ist es gelungen, sehr viele Atome gleichzeitig zu fangen, ohne dass diese miteinander stoßen können oder sich

die Übergangsfrequenz durch das Einfangen verschiebt. Dazu werden Strontium-Atome durch Dipolkräfte in den Wellenbäuchen einer Stehwelle gefangen, die mit Hilfe zweier gegenläufiger Fallenlaserstrahlen erzeugt wird. Die Atome werden so, zumindest in Strahlrichtung, an der Bewegung gehindert und können in dieser Richtung auch nicht mehr stoßen. Im nächsten Schritt ist geplant, die Atome in einem optischen Gitter aus drei zueinander senkrechten Stehwellen einzusperren, sodass sie überhaupt nicht mehr stoßen können (Abb.). Wichtiger als die Unterdrückung von Stößen ist jedoch die Unterdrückung der AC-Stark-Verschiebung des Uhrenübergangs durch den Fallenlaser. Dies gelingt mit einem Trick: Die Frequenz des Fallenlasers  $\nu_F$  lässt sich über einen sehr großen Bereich verstimmen, ohne dass die Atome aus der Falle fallen. Takamoto und Mitarbeiter stellen ihren Fallenlaser genau auf eine „magische Wellenlänge“ ein, bei der die AC-Stark-Verschiebung der Übergangsfrequenz  $\Delta\nu$  das Vorzeichen wechselt. Rein rechnerisch müssen sie diesen Nullpunkt innerhalb von 1 MHz treffen, um den Uhrenübergang um weniger als 0,001 Hz oder  $4 \times 10^{-18}$  zu verschieben; ein leichtes Spiel, wenn man eine optische Uhr und einen Frequenzkamm zur Verfügung hat.

Mit diesen optischen Uhren werden bessere Tests der Allgemeinen Relativitätstheorie möglich. Bei einer Präzision von  $10^{-18}$  wird der Einfluss, den die Gravitation nach der Relativitätstheorie auf den Uhrengang ausübt, bereits messbar, wenn man die Uhr um nur einen Zentimeter anhebt. Eine weitere wissenschaftliche Anwendung können diese Uhren bei der Suche nach einer möglichen langsamen Variation gewisser Naturkonstanten haben [6]. In der Technik könnten sie helfen, die Satellitennavigation und die Synchronisation von schnellen Computernetzen zu verbessern.

THOMAS UDEM

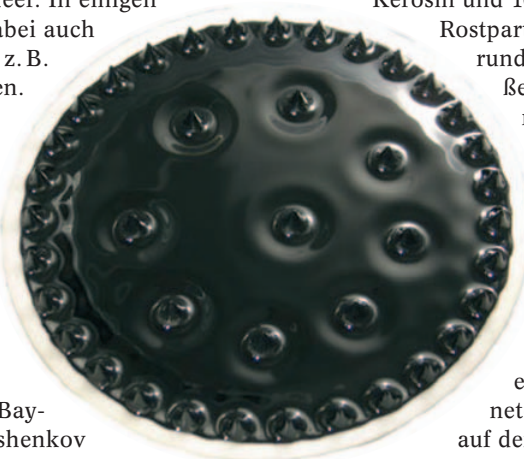
- [1] N. F. Ramsey, Phys. Rev. **78**, 695 (1950)
- [2] H. Schnatz et al., Phys. Rev. Lett. **76**, 18 (1996)
- [3] Th. Udem, R. Holzwarth, T. W. Hänsch, Nature **416**, 233 (2002).
- [4] S. Diddams et al., Science **293**, 825 (2001)
- [5] M. Takamoto et al., Nature **435**, 321 (2005)
- [6] M. Fischer et al., Phys. Rev. Lett. **92**, 230802 (2004)

Dr. Thomas Udem,  
MPI für Quantenoptik,  
Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748  
Garching

## Musterbildung ohne Dissipation

Regelmäßige Muster entstehen in der Natur sehr häufig, man denke nur an Sandmuster in Dünen oder im Meer. In einigen Fällen bilden sich dabei auch isolierte Strukturen, z. B. kleine Sandhügelchen. Damit solche Strukturen stabil bleiben, ist jedoch ein empfindliches Gleichgewicht zwischen Energiezufuhr und dissipativen Prozessen erforderlich.

Reinhard Richter von der Universität Bayreuth und Igor Barashenkov von der Universität Cape Town (Südafrika) haben nun gezeigt, dass isolierte Strukturen in einer magnetischen Flüssigkeit auch ohne Dissipation entstehen können. Das war bereits theoretisch vorhergesagt worden.



Für ihr Experiment gaben die beiden Physiker eine dickflüssige Mischung aus Kerosin und 10 Nanometer kleinen Rostpartikeln in eine flache, runde Schale. Anschließend legten sie ein äußeres Magnetfeld an. Bei bestimmten Feldstärken bildete sich ein ringförmiges Muster am Rand der Flüssigkeit. Unter ganz speziellen Bedingungen gelang es Richter und Barashenkov mit einem kleineren Magnet, isolierte Hügelchen auf der flachen Oberfläche zu erzeugen, die auch nach Abschaltung des Zusatzmagneten bestehen blieben, nur stabilisiert durch das Gleichgewicht aus Magnetfeld und Schwerkraft. [R. Richter und I. V. Barashenkov, Phys. Rev. Lett. **94**, 184503 (2005)]