

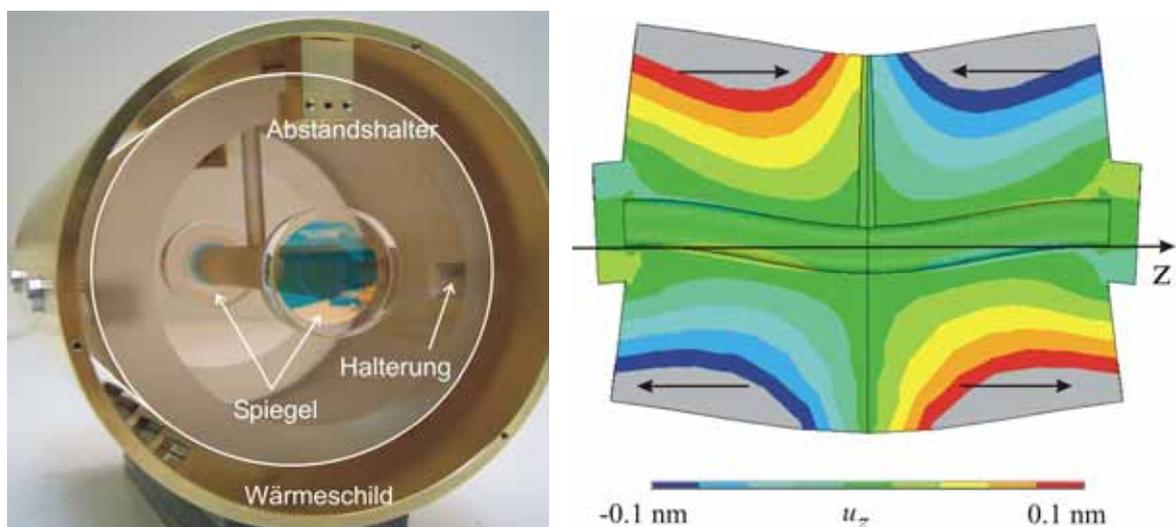
# Optische Uhren

EKKEHARD PEIK | UWE STERR

Dieses Dokument ist eine Ergänzung zum gleichnamigen Artikel in **Physik in unserer Zeit**, 39. Jahrgang 2008, Nr. 6, S. 288.

## Hochstabile Laser

Für Atomuhren ist neben den Atomen, die natürliche Linienbreiten von unter einem Hertz besitzen, auch die Linienbreite und Frequenzstabilität des Abfrageoszillators, das heißt des Lasers, von größter Bedeutung. Zurzeit sind die beobachteten Linienbreiten in fast allen optischen Atomuhren durch die Linienbreite der Abfragelaser begrenzt. Als Abfragelaser werden oft Diodenlaser benutzt, die jedoch nur Linienbreiten von einigen MHz besitzen.



**Abb. 1** Links: Dieser Referenzresonator eines hochstabilen Lasers hat 80 mm Durchmesser und eine Länge von 100 mm. Der Abstandshalter und die Spiegel bestehen aus Spezialglas mit sehr geringem Wärmeausdehnungskoeffizient ( $< 10^{-8} \text{ K}^{-1}$ ). Rechts: Deformation des Abstandshalters (im Schnitt) bei einer Beschleunigung von  $10 \text{ m/s}^2$ . Die Verformungen sind  $10^7$ -fach vergrößert dargestellt.

Zur Verringerung der Linienbreite werden Fabry-Pérot-Resonatoren benutzt, die im Vakuum sehr gut von Umwelteinflüssen abgeschirmt sind (Abbildung 1 links). Sie zeigen immer dann scharfe Resonanzen, wenn ein Vielfaches der halben Laserwellenlänge dem Abstand der Spiegel entspricht. Diese Resonanzen sind umso schärfer, je höher das Reflexionsvermögen der Spiegel ist. Mit den Reflektivitäten der besten erhältlichen Spiegel von 99,9997 % sind die Linienbreiten eines typischen, etwa 10 cm langen Resonators nur wenige Kilohertz breit. Weil diese Resonanzen sehr schnell und mit geringem Rauschen detektiert werden können, lassen sich mit einem elektronischen Regelkreis die Frequenzschwankungen der Laser bis auf Linienbreiten von knapp unter einem Hertz reduzieren.

Bis vor kurzem war diese geringe Linienbreite nur mit einer höchst aufwändigen Schwingungsisolation des Referenzresonators zu erreichen. In den letzten Jahren wurden neue Konstruktionen der Abstandhalter und ihrer Halterungen entwickelt, die um bis zu drei Größenordnungen unempfindlicher auf Vibrationen reagieren. Damit können jetzt Laserlinienbreiten von etwa 1 Hz mit weniger Aufwand erzielt werden (Abbildung 1 rechts) [1].

Die besten heutigen Laser sind durch thermische Fluktuationen der Resonatorlänge bei Raumtemperatur begrenzt, und die erreichbare relative Stabilität liegt bei  $10^{-15}$  für Zeiten von 0,1 bis 100 s. Der mittlere Abstand der Spiegel ändert sich dabei um wenige  $10^{-16}$  m, also weniger als einen Atomkerndurchmesser. Über längere Zeiten macht sich eine Frequenzdrift durch die Alterung und Relaxation des Materials bemerkbar.

## Optische Gitter

Auf neutrale Atome wirken in einem homogenen elektrischen Feld keine Kräfte. Die Felder können aber die Ladungsschwerpunkte der positiven Ladung (Atomkern) und der negativen Ladung (Elektronenhülle) im Atom gegeneinander verschieben. Sie induzieren so ein elektrisches Dipolmoment  $d$ , das proportional zum angelegten Feld  $E$  ist:

$$d = \alpha \cdot E.$$

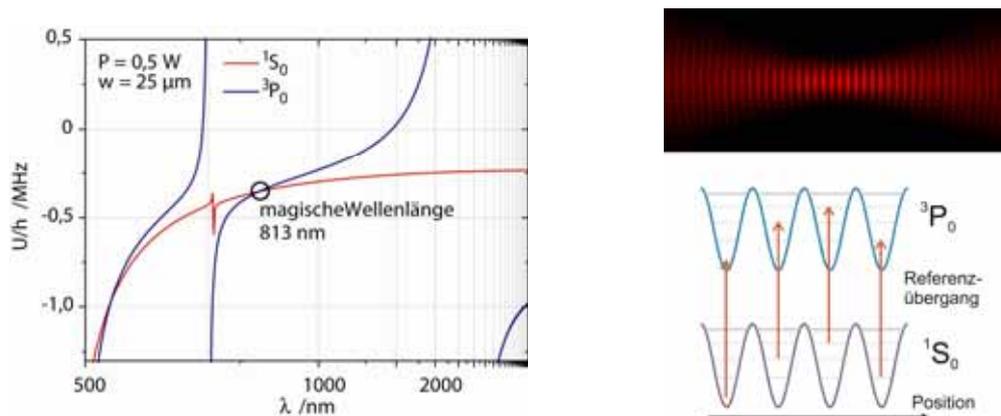
Dieses induzierte Moment wechselwirkt mit dem Feld mit einer Energie

$$U = -1/2 \cdot d \cdot E = -1/2 \cdot \alpha \cdot E^2,$$

die im inhomogenen Feld zu einem Potential für die atomare Bewegung führt.

Das Dipolmoment kann nicht nur durch ein Gleichfeld, sondern auch durch das Wechselfeld eines intensiven Lasers induziert werden. Dabei hängen der Betrag und das Vorzeichen der Wechselwirkung von der Lage der Laserfrequenz relativ zu atomaren Resonanzen ab. Analog zu einem klassischen getriebenen Oszillator ist der Dipol unterhalb der Resonanz in Phase mit dem angelegten Feld, darüber aber in Gegenphase. Im ersten Fall wird das Atom in Bereiche hoher Felder gezogen, im zweiten Fall in Bereiche niedriger Felder.

Je nach Zustand des Atoms tragen verschiedene Übergänge zum Dipolmoment bei (Abbildung 2 links). Das ist in der Abbildung für die beiden Zustände der Strontium-Uhr gezeigt. Den Verlauf des Grundzustandspotentials (rot) bestimmt die starke Absorptionslinie bei 462 nm, den Verlauf des angeregten Zustandes die Absorptionslinien in höher angeregte Niveaus bei 690 nm und 2300 nm Wellenlänge. Beide Kurven schneiden sich bei etwa 813 nm – bei der „magischen Wellenlänge“. Bei dieser Wellenlänge können die Atome durch inhomogene Felder in den Bereichen hoher Feldstärke gespeichert werden, ohne dabei die Referenzlinie zu verschieben.



**Abb. 2** Links: Verschiebung der beiden Niveaus einer optischen Uhr mit Strontium als Funktion der Wellenlänge des Fallenlasers. Rechts: Intensitätsverteilung einer Stehwelle und entsprechender Potentialverlauf für die beiden atomaren Zustände des Referenzübergangs.

Felder, deren Intensitätsverteilung sich innerhalb der optischen Wellenlänge  $\lambda$  ändern, können sehr einfach durch Interferenz von Laserstrahlen hergestellt werden. Im einfachsten Fall erzeugt man durch Zurückreflexion des Laserstrahls eine stehende Lichtwelle (Abbildung 2 rechts). Mit einer Periode von  $\lambda/2$  wechseln dunkle Bereiche mit Bereichen hoher Intensität – und damit hoher elektrischer Feldstärke – in denen die Atome gespeichert werden.

## Literatur

- [1] T. Nazarova, F. Riehle, U. Sterr, Appl. Phys. B **2006**, 83, 531.