

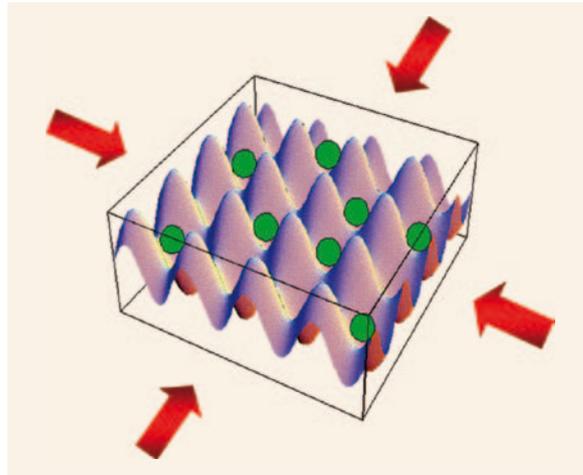
■ Die „stabilste“ Uhr der Welt

Atomuhren, die auf einem optischen Übergang beruhen, sind um Größenordnungen genauer als Caesium-Uhren.

Auf das neue Jahr 2013 hat meine Familie um mehrere Sekunden zu spät angestoßen. Ich weiß das genau, weil ich die Fernsehuhren mit meiner Armbanduhr verglichen habe, die von einer Caesium-Atomuhr der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) über Funk gesteuert wird. Für diesen Vergleich genügte mir ein kurzer Blick von weniger als einer Sekunde. In dieser Zeit können jetzt Forscher des US-amerikanischen National Institute of Standards and Technology (NIST) relative Abweichungen zwischen zwei ihrer optischen

Atomuhren, die sie als die stabilsten Uhren der Welt bezeichnen [1], von wenigen 10^{-16} messen und nach einer Mittelungszeit von vier Stunden sogar 2×10^{-18} . Dieses Ergebnis ist der gegenwärtige Höhepunkt einer langen Entwicklung immer stabilerer und genauerer Atomuhren. Damit einher treten verschiedene Fragen auf: Was tun, wenn die eigene Uhr so gut ist, dass es keine genauere mehr für einen Vergleich gibt? Was tun, wenn die Anzeigen der Uhren mehr schwanken, als es ihrer Genauigkeit entspricht? Welche Messungen ermöglichen diese Uhren zukünftig?

Die Zeit ist heute mithilfe von Caesium-Atomuhren definiert. Dazu wird ein bestimmter Übergang im ^{133}Cs durch Mikrowellenstrahlung angeregt und die Anregung abgefragt; eine Sekunde entspricht definitionsgemäß 9 192 631 770 Periodendauern dieser Strahlung des ungestörten Übergangs [2]. Wenn es um höchste Genauigkeit geht, können viele Effekte leider selbst einen atomaren Übergang stören, sodass der Einfluss aller Störungen auf die Übergangsfrequenz korrigiert werden muss. Diese Korrektur ist nur mit einer gewissen Unsicherheit möglich. Wenn es keine genauere Uhr mehr gibt, mit der sich eine neue verbesserte Atomuhr vergleichen lässt, bleibt den Entwicklern keine andere Möglichkeit, als alle frequenzverschiebenden Beiträge



Ist das die Uhr der Zukunft? Ein optischer Übergang in Yb- oder Sr-Atomen (grün), die sich in einem optischen Gitter befinden, erlaubt eine sehr präzise Zeitmessung.

einzelnen zu untersuchen und ihre Größe abzuschätzen. Die Gesamtunsicherheit wird als Standardunsicherheit angegeben, und ihr Kehrwert ist ein Maß für die Genauigkeit der Uhr. Die Herausforderung besteht darin, diese Abschätzung „richtig“ durchzuführen, da sich die abgeschätzte Genauigkeit später mit noch besseren Uhren jederzeit überprüfen lässt. Es zeigt sich, dass die relative Unsicherheit der besten Cs-Atomuhren in den letzten 50 Jahren alle zehn Jahre um etwa eine Größenordnung verbessert wurde (Abb. 1). Selbst diese großartige Entwicklung lässt sich noch übertreffen mit geeigneten optischen Übergängen in Atomen oder Ionen, die an Stelle der Mikrowellenstrahlung durch Laserstrahlung angeregt werden (optische Atomuhren). Bei den besten optischen Atomuhren ist heute die relative Unsicherheit um mehr als eine Größenordnung kleiner als bei den besten Caesium-Atomuhren.

Die von der Atomuhr ausgelesene Frequenz schwankt immer etwas um ihren Mittelwert. Diese Instabilität rührt zum Teil von technischen Unvollkommenheiten her, aber selbst wenn diese reduziert werden, gibt es eine prinzipielle untere Grenze, das Quantenprojektionsrauschen. Dieses rührt daher, dass bei einer Abfrage des Uhrenübergangs durch den Laser der Zustand des Atoms auf einen Eigenzu-

stand projiziert wird. Generell gilt, dass die Instabilität umso kleiner wird, je kleiner die Breite der abgefragten Linie, je höher die Mittenfrequenz der Resonanz und je besser das Signal-zu-Rauschverhältnis beim Auslesen der Resonanz ist. Bei Mittelung über einen längeren Zeitraum nimmt das relative Rauschen umgekehrt mit der Wurzel aus der Messzeit ab (Abb. 1). Wegen ihrer um etwa fünf Größenordnungen höheren Frequenz können optische Atomuhren gegenüber den Atomuhren im Mikrowellenbereich bei gleicher Linienbreite der Resonanz eine um den gleichen Faktor erhöhte Stabilität haben.

In jeder ihrer optischen Atomuhren am NIST nutzen Hinkley und seine Kollegen etwa 5000 Ytterbium-Atome gleichzeitig, was das Signal-zu-Rauschverhältnis gegenüber einem einzelnen Atom oder Ion noch deutlich steigert (Abb. 1). Die Atome werden lasergekühlt und in den Bäuchen einer optischen Stehwelle (optisches Gitter) für etwa eine Sekunde gespeichert, wo sie vorbereitet und abgefragt werden. Das optische Gitter weist eine „magische“ Wellenlänge auf, bei der die Gitterlaser den Uhrenübergang möglichst nicht stören. Ähnliche relative Stabilitäten von wenigen 10^{-16} in einer Sekunde sind auch mit Strontium-Gitteruhren möglich, die mehrere Institute weltweit und auch die PTB betreiben. Die Bedeu-

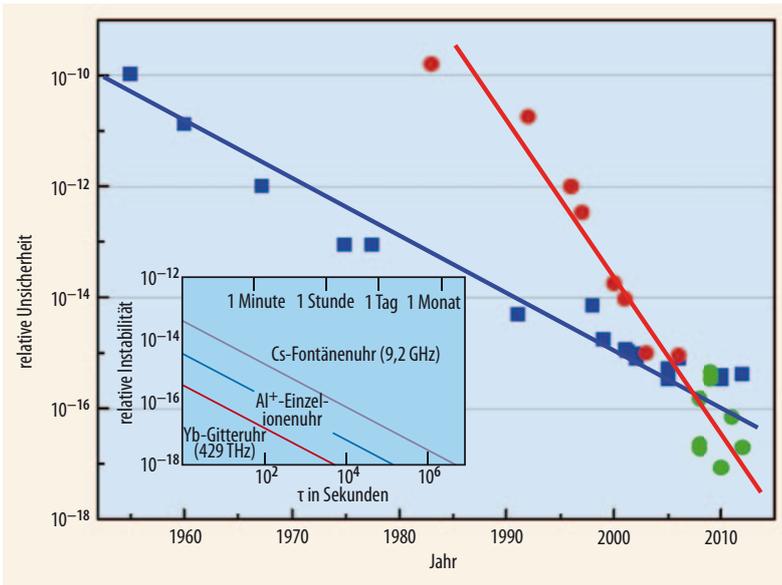


Abb. 1 Die relative Unsicherheit von Cs-Atomuhren (blaue Punkte) ist den letzten Jahrzehnten geringer geworden. Solange die Unsicherheit der optischen Uhren größer war (rote Punkte), ließ sie sich durch Vergleich mit den Cs-Uhren angeben, inzwischen lässt sie sich aber

nur noch abschätzen (grün). Das Inset zeigt die erreichte Instabilität für Atomuhren, die etwa 10^5 Cs-Atome in einer Fontäne (PTB), ein Al^+ -Ion mit Quantenlogikspektroskopie [3] oder ca. 5000 Yb-Atome in einem optischen Gitter [1] abfragen.

tung der Arbeit von Hinkley und Kollegen liegt darin, dass sie die Instabilität ihrer zwei Yb-Gitteruhren soweit reduziert haben, dass genaue Vergleiche bis herunter zu etwa 10^{-18} möglich sind. Die relativen Unsicherheiten ihrer Uhren sind allerdings noch deutlich höher, bei der weniger genauen der beiden Uhren liegt sie bei etwa 10^{-16} . Beide Uhren wichen nur um etwa 10^{-17} voneinander ab, was mit der abgeschätzten Unsicherheit verträglich ist. Mit der gezeigten Stabilität ist es jetzt bequem möglich, alle Beiträge zur Unsicherheit in einem Bereich von 10^{-18} zu untersuchen und dann auch eine relative Unsicherheit in dieser Größenordnung zu erreichen. In der Tat wurde jüngst eine relative Unsicherheit von 6×10^{-18} für eine Sr-Gitteruhr abgeschätzt [4].

Uhren mit dieser Stabilität und Genauigkeit sollten in absehbarer Zeit nicht nur eine Neudefinition der Zeiteinheit ermöglichen, sondern auch ganz neuartige Anwendungsfelder eröffnen. Fundamentale Theorien, die Quantenmechanik und Allgemeine Relativitätstheorie vereinigen wollen, sagen oft eine zeitliche Änderung von Naturkonstanten wie der Feinstrukturkonstanten voraus. Frequenz-

verhältnisse von verschiedenen optischen Uhren erlauben es, die Konstanz der Konstanten zu überprüfen [3]. Ein ganz neues Feld ist die „relativistische Geodäsie“. Die Differenz des Gravitationspotentials der Erde an zwei unterschiedlichen Orten lässt sich durch den unterschiedlichen Gang der optischen Atomuhren bestimmen, wie sie von der Relativitätstheorie gefordert wird. Hätte man Uhren mit einer relativen Unsicherheit von 10^{-18} zur Verfügung, würde man das Geoid der Erde auf wenige Zentimeter vermessen und überwachen können, mit weitreichenden Perspektiven für die Geodäsie, die Umwelt- und Klimaforschung und – wenn man ganz optimistisch ist – sogar für die Erdbebenvorhersage. In jedem Fall sind dafür höchststabile Atomuhren erforderlich, die Messungen in der benötigten kurzen Zeit verlässlich erlauben.

Fritz Riehle

- [1] N. Hinkley et al., *Science* **341**, 1215 (2013)
- [2] SI base units, www.bipm.org/en/si/base_units
- [3] P. O. Schmidt, *Physik Journal*, Juni 2012, S. 47
- [4] B. Broom et al: www.arxiv.org/pdf/1309.1137