

METROLOGIE

Die Optik macht es noch genauer

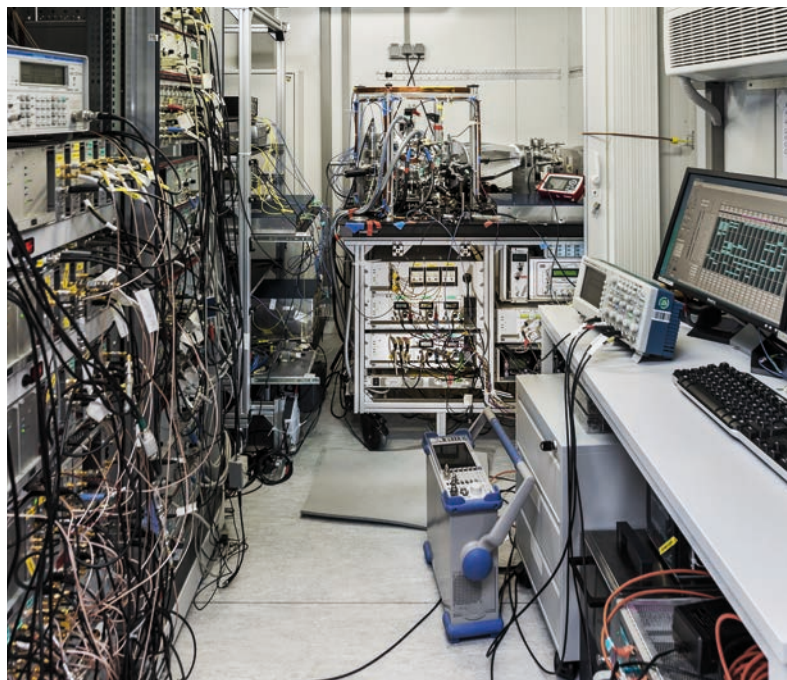
Die wesentlichen Schritte auf dem Weg zu einer Neudefinition der Sekunde über optische Übergänge sind gelungen.

Fritz Riehle

Seit mehr als fünfzig Jahren ist die Sekunde im Internationalen Einheitensystem über den Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Cäsiumatomen definiert. Atomuhren, die auf der Messung dieses Übergangs basieren, haben inzwischen eine relative Unsicherheit im Bereich von 10^{-16} erreicht. Atomuhren jedoch, die auf optischen Übergängen basieren, versprechen eine um zwei Größenordnungen höhere Genauigkeit und legen damit eine Neudefinition der Sekunde nahe.

Mache keine Messung, wenn es nicht eine Frequenzmessung ist! Diesen Rat hat Arthur Schawlow seinem Kollegen Theodor Hänsch mit auf den Weg gegeben [1]. Beide sind damit gut gefahren, denn jeder hat später einen Nobelpreis für Arbeiten erhalten, die in engem Zusammenhang mit optischen Atomuhren stehen. Bei diesen wird in den Atomen ein Quantenübergang mit extrem schmaler Linienbreite angeregt, der darüber hinaus möglichst unempfindlich gegen äußere Störungen ist. In der Cäsium-Atomuhr ist dies der Hyperfeinstrukturübergang im Grundzustand von atomarem Cäsium, der sich mit einer Radiofrequenz von 9 192 631 770 Hz anregen lässt. Dieser Übergang definiert seit 1967 die Sekunde als Basiseinheit des Internationalen Einheitensystems [2]. Seither verringerte sich die Unsicherheit, mit der diese Frequenz in den besten Cäsiumuhren realisiert ist, um etwa fünf Größenordnungen (Abb. 1). Das war unter anderem mithilfe lasergekühlter Atome möglich – eine Methode, die auf einen Vorschlag von Hänsch und Schawlow zurückgeht. Damit gelang es, die Wechselwirkungszeit der Cäsiumatome mit der Radiofrequenz um Größenordnungen zu verlängern und damit die in der Uhr aufgelöste Linienbreite zu verringern – diese entspricht nach Fourier der reziproken Wechselwirkungszeit.

In optischen Atomuhren regt ein Laser Übergänge an [3], deren Frequenzen bis zu fünf Größenordnungen höher sind als bei der Cäsiumuhr. Damit verbessert sich bei gleicher Wechselwirkungszeit die relative Linienbreite um genau diesen Faktor. Lässt sich das Zentrum einer 1 Hz schmalen Linie auf etwa 1/1000 der Linienbreite genau festlegen, so entspricht das im Optischen einer relativen Auflösung von 10^{-18} . Dabei ist vorausgesetzt, dass der Abfragelaser ebenfalls hin-



Die transportable Sr-Gitteruhr der PTB findet mit-samt Elektronik Platz in einem Container.

reichend schmalbandig ist und dass man beim Bau und Betrieb der Atomuhr alle frequenzverschiebenden Effekte mit vergleichbarer Genauigkeit im Griff hat. Glücklicherweise reduziert sich auch der Einfluss der Effekte, die proportional zur Frequenz sind, um den gleichen Faktor. Bei optischen Atomuhren ging daher die Entwicklung in der letzten Zeit noch schneller als bei den Cäsiumuhren voran (Abb. 1). Die Unsicherheit, das ungestörte Linienzentrum eines optischen Uhrenübergangs zu realisieren, wird in den besten Fällen zu wenigen 10^{-18} abgeschätzt [4]. Damit sind optische

KOMPAKT

- Optische Atomuhren sind hinsichtlich ihrer Genauigkeit und Frequenzstabilität den besten Cäsium-Atomuhren um etwa zwei Größenordnungen überlegen.
- Das legt eine Neudefinition der Sekunde im Internationalen Einheitensystem über optische Übergänge nahe.
- Für eine sekundäre Realisierung der Sekunde stehen mehrere unterschiedliche Systeme zur Verfügung, bei denen entweder einzelne Ionen oder Ensembles aus tausenden von Neutralatomen abgefragt werden.
- Optische Atomuhren erlauben Präzisionsexperimente zu den grundlegenden Fragen der Physik, dem Aufbau verbesserter Zeitskalen und Bezugssystemen in Geodäsie und Astronomie.

Dr. Fritz Riehle, Abteilung Optik, Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Bundesallee 100, 38116 Braunschweig

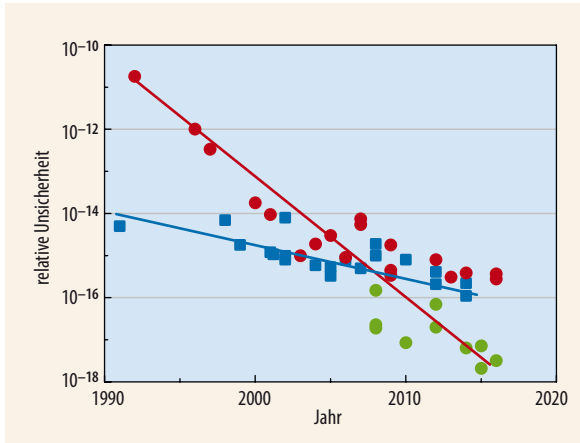


Abb. 1 Gegenüber der beeindruckenden Abnahme der relativen Unsicherheit von Cäsiumuhren (blau) ist die Entwicklung bei optischen Atomuhren noch rasanter: Rote Punkte geben die gegen die Cäsiumuhren gemessenen Unsicherheiten an, die grünen Werte stellen abgeschätzte Unsicherheiten dar.

Atomuhren heute die genauesten Messgeräte und kommen in den unterschiedlichsten Bereichen der Physik und Technik zum Einsatz.

Aufbau der Atomuhr

Um zu verstehen, welche Parameter heute und zukünftig die Genauigkeit optischer Atomuhren begrenzen, betrachten wir ihren Aufbau (Abb. 2). Ein zentrales Element ist der Anregungslaser für den Uhrenübergang, dessen Frequenz präzise durchstimmbare, aber gleichzeitig äußerst stabil sein muss. Die Laserfrequenz wird häufig auf eine Eigenmode eines optischen Resonators vorstabilisiert. Dieser besteht aus zwei höchstreflektierenden Spiegeln, deren Abstand durch geeignete Materialien und Isolierung von äußeren Einflüssen auf Bruchteile eines Atomkerndurchmessers stabil gehalten wird. Das von den besten Uhrenlasern produzierte Licht weicht nach 10^{15} Oszillationen nur um wenige Grad von einer idealen Sinusschwingung ab. Die feste Frequenz, die in der Nähe eines geeigneten „Uhren-

übergangs“ eines Atoms oder Ions mit der Frequenz ν_0 liegt, wird mithilfe einer Modulationseinheit gezielt variiert, um die atomare Linie zu überstreichen. Geeignet ist ein solcher Übergang, wenn seine Linienbreite schmal ist, er unempfindlich gegen äußere Felder ist und es möglich ist, die Wechselwirkungszeit mit einem hochkohärenten Laser hinreichend lang zu machen. Für lange Abfragezeiten und die damit verbundene schmale Linienbreite werden die lasergekühlten Atome entweder in einer elektrodynamischen Falle (Ionen) oder in einem optischen Gitter (neutrale Atome) festgehalten (Abb. 3). Nur einzelne Ionen können sich im feldfreien Bereich der Falle aufhalten, in dem die frequenzverschiebenden Effekte minimal sind. Dagegen lassen sich wenige hundert bis einige tausend neutrale Atome im optischen Gitter gleichzeitig abfragen, was zu einem besseren Signal-zu-Rausch-Verhältnis und damit zu kleineren Schwankungen der stabilisierten Frequenz führt.

Zur Abfrage wird das Atom für eine gewisse Zeit mit dem Uhrenlaser bestrahlt und anschließend überprüft, ob es angeregt wurde. Dazu beleuchtet ein zweiter Laser, der einen Übergang vom Grundzustand in einen geeigneten angeregten Zustand treibt, das Atom kurzzeitig. Fluoreszenzstrahlung tritt nur auf, wenn der Uhrenlaser das Atom nicht angeregt hat. Denn sonst müsste es sich im langlebigen angeregten Zustand befinden. Wenn nach jedem Zyklus die Laserfrequenz geändert wird, zeigt die Anregungswahrscheinlichkeit aus dem Grundzustand in den langlebigen angeregten Zustand als Funktion der Laserfrequenz eine schmale Anregungskurve $S(\nu)$ mit einem Maximum bei der Übergangsfrequenz ν_0 . Eine meist digitale elektronische Regelung hält die Frequenz des Uhrenlasers möglichst genau auf dem Zentrum dieser Kurve.

Um aus der optischen Frequenz des geregelten Uhrenlasers Sekundenimpulse zu erzeugen, welche die Anzeige der Uhr steuern können, kommt ein optischer Frequenzkamm zum Einsatz [1]. Dieser ist realisiert durch einen Femtosekundenlaser, dessen einzelne Impulse phasenstarr gekoppelt sind. Dem kohärenten Impulszug im Zeitbereich entspricht gemäß Fourier im

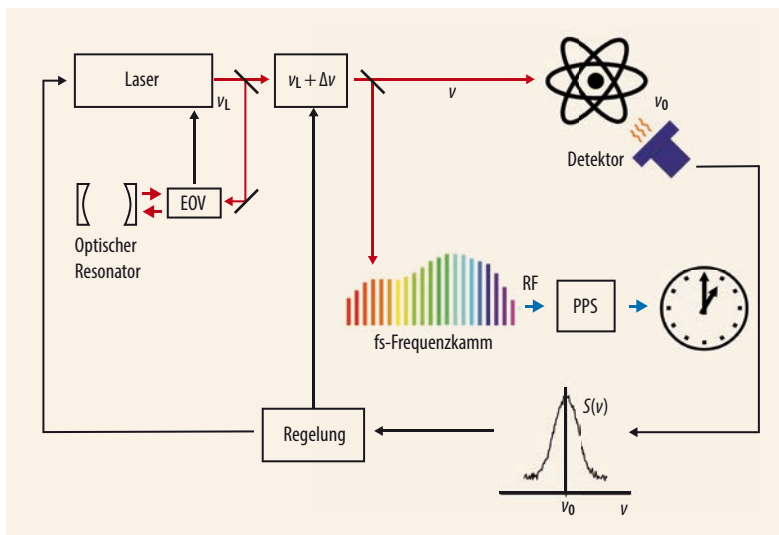


Abb. 2 Zentrales Element der optischen Atomuhr ist der Laser, der den optischen Übergang anregt. EOV steht für elektrooptische Vorstabilisierung, RF für Radiofrequenz, PPS für Pulse-per-second-Signal. Nähere Erläuterungen finden sich im Haupttext.

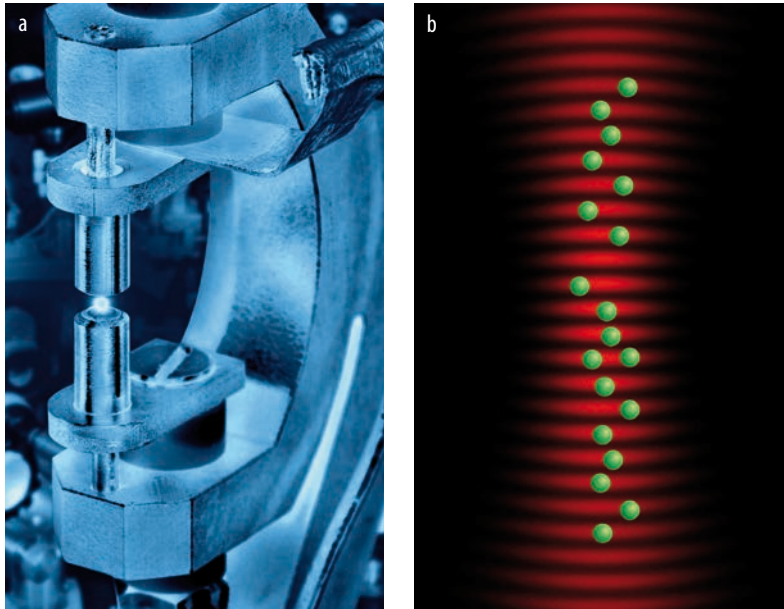


Abb. 3 Zwischen den Elektroden einer Ionenfalle erzeugt eine Radiofrequenz-Wechselspannung ein parabelförmiges Potential, in dem ein einzelnes Ion gespeichert ist (a). In einer stehenden Lichtwelle werden Neutralatome durch die hohe Feldstärke polarisiert und in den Maxima der stehenden Welle gespeichert (b).

Frequenzbereich ein Kamm von einzelnen Frequenzen. Benachbarte „Zinken“ unterscheiden sich dabei genau um die Repetitionsfrequenz des Femtosekundenlasers. Die Frequenz des Abfragelasers ist nun mit einem in der Nähe liegenden Zinken des Kamms zu vergleichen, dessen Frequenz sich aus der Repetitions- und einer Offsetfrequenz genau ableitet. Ist andererseits eine optische Frequenz des Kamms auf die Frequenz des Quantenabsorbers stabilisiert, lässt sich bei festgehaltener Offsetfrequenz aus der Repetitionsfrequenz ein PPS-Signal (Puls pro Sekunde) generieren.

Wie bei jeder Uhr ist auch bei einer Atomuhr interessant, wie genau sie geht und welche Effekte ihre Genauigkeit beeinflussen. Die einfachste Methode, ihren Gang mit dem einer noch genaueren Uhr zu vergleichen, funktioniert aber nur so lange, wie genauere Uhren zur Verfügung stehen. Bei den neuen optischen Atomuhren ist das oft nicht der Fall. Daher gilt es in diesem Fall, alle relevanten Einflüsse zu untersuchen, welche die Frequenz des stabilisierten Uhrenlasers verschieben können, ihren Einfluss beim Betrieb zu bestimmen und die Frequenzverschiebungen zu korrigieren. Da dies nur mit einer gewissen Genauigkeit geschehen kann, ist es üblich, die Gesamtheit aller möglichen Resteinflüsse als geschätzte Unsicherheit anzugeben.

Verschiedene Effekte können dazu führen, dass die Frequenz des Uhrenübergangs in einer realen Atomuhr von der Übergangsfrequenz des ungestörten Atoms abweicht: Dazu gehören die Temperaturstrahlung der Umgebung und die Einflüsse der äußeren elektromagnetischen Felder sowie der Lichtfelder, die zum Halten, zur Abfrage oder zur Manipulation der Atome dienen. All dies kann die Elektronenstruktur beeinflussen und den Uhrenübergang verschieben. Auch die relativistische Zeitdilatation der bewegten Atome ändert die Uhrenfrequenz; sie spielt vor allem bei Ionen mit kleiner Masse eine Rolle. Die Unterdrückung und Korrektur dieser Effekte bei den verwendeten Atomen führt zu unterschiedlichen Unsicherheiten (Tabelle). Bei den optischen Uhren liefert die Abschätzung der Unsicherheit nach der Korrektur dieser Effekte gegenwärtig einen bis zu zwei Größenordnungen kleineren Wert verglichen mit den besten primären Cäsiumuhren. Daher ist es wahrscheinlich, dass zu gegebener Zeit ein optischer Übergang dazu dienen wird, die SI-Sekunde zu definieren.

Bei Atomuhren ist es wichtig, dass sich die kleinen systematischen Unsicherheiten schon bei kurzen Messzeiten einstellen und dass nicht etwa Fluktuationen, die beispielsweise durch das Rauschen des Abfragesignals (Abb. 2) entstehen, lange Mittelungszeiten erforderlich

Unsicherheiten verschiedener optischer Atomuhren				
Spezies	Elektronischer Übergang	Frequenz in Hz	Relative Unsicherheit der Frequenz	Abgeschätzte system. Unsicherheit
⁸⁷ Sr-Neutralatome	5s ² 1S ₀ – 5s5p 3P ₀	429 228 004 229 873,0	4 × 10 ⁻¹⁶	(2,1 - 7,2) × 10 ⁻¹⁸
⁸⁸ Sr ⁺ -Einzelion	5s 2S _{1/2} – 4d 2D _{3/2}	444 779 044 095 486,5	1,5 × 10 ⁻¹⁵	1,5 × 10 ⁻¹⁷
¹⁷¹ Yb-Neutralatome	6s ² 1S ₀ – 6s6p 3P ₀	518 295 836 590 863,6	5 × 10 ⁻¹⁶	1 × 10 ⁻¹⁷
¹⁷¹ Yb ⁺ -Einzelion	2S _{1/2} – 2F _{7/2}	642 121 496 772 645,0	6 × 10 ⁻¹⁶	3,2 × 10 ⁻¹⁸
¹⁷¹ Yb ⁺ -Einzelion	6s 2S _{1/2} – 5d 2D _{3/2}	688 358 979 309 308,3	6 × 10 ⁻¹⁶	1,1 × 10 ⁻¹⁶
¹⁹⁹ Hg ⁺ -Einzelion	5d ¹⁰ 6s 2S _{1/2} – 5d ⁹ 6s ² 2D _{5/2}	1 064 721 609 899 145,3	1,9 × 10 ⁻¹⁵	7,2 × 10 ⁻¹⁷
²⁷ Al ⁺ -Einzelion	3s ² 1S ₀ – 3s3p 3P ₀	1 121 015 393 207 857,3	1,9 × 10 ⁻¹⁵	2,3 × 10 ⁻¹⁷
¹⁹⁹ Hg Neutralatome	6s ² 1S ₀ – 6s6p 3P ₀	1 128 575 290 808 154,4	5 × 10 ⁻¹⁶	7,2 × 10 ⁻¹⁷

Tabelle Optische Atomuhren basieren auf Ionen oder Atomen, die alternativ zur Cäsiumuhr mit der angegebenen Frequenz und Unsicherheit zur sekundären Realisierung der Zeiteinheit

dienen können. Die abgeschätzte Unsicherheit, das ungestörte Linienzentrum des jeweiligen Übergangs zu finden, ist um bis zu zwei Größenordnungen kleiner.

machen. Eine prinzipielle Grenze der Frequenzinstabilität ist hierbei durch das Quantenprojektionsrauschen gegeben, bei dem das Atom bei jedem Messprozess statistisch auf einen der beiden Zustände projiziert wird, die der Uhrenübergang verbindet. Der relative Einfluss des Rauschens nimmt mit der relativen Breite der abgefragten Linie, der Wurzel aus der Atomzahl und der Wurzel aus der Messzeit ab (Abb. 4). Bei den besten Cäsiumuhren beträgt die relative Schwankung gemittelt über eine Sekunde etwa 2×10^{-14} , die Rekorde bei den optischen Einzelionenuhren liegen bei etwa 10^{-15} und bei den Gitteruhren mit Neutralatomen unter 2×10^{-16} . Damit sind die Fluktuationen der Frequenz der optischen Atomuhren so klein, dass mit Mittelungszeiten von wenigen Stunden der statistische Beitrag zur Messung der Frequenz den systematischen Anteil unterschreitet.

Weltweite Uhrenvergleiche

Wenn es darum geht, die Frequenzen der atomaren Übergänge, insbesondere über große Entfernungen, miteinander zu vergleichen, können auch die Fluktuationen der Frequenz in den Übertragungstrecken eine wesentliche Rolle spielen (Abb. 4). Der Vergleich der Frequenzen der heute genutzten Atomuhren erfolgt hauptsächlich über Satelliten. Eine einfache und praktisch kostenlose Methode nutzt die Zeitsignale, die von den Satelliten der globalen Navigationssysteme stammen. Beim Zweiwegvergleich schicken zwei Nutzer über einen Satelliten gleichzeitig gegenläufige Signale, sodass sich die Laufzeiten auf dem gleichen Weg kompensieren. Dieses Verfahren ist zwar etwas genauer, aber dafür entstehen laufende Kosten für den Satellitenbetrieb. Satellitenverfahren bieten gegenwärtig – abgesehen von transportablen Uhren – die einzige Möglichkeit, transkontinentale Vergleiche durchzuführen. Prinzipiell lassen sich damit auch optische Uhren weltweit vergleichen, wenn ihre Frequenz mithilfe eines optischen fs-Frequenzkamms mit den zur Übertragung

benutzten Radiofrequenzen so verkoppelt werden, dass keine einzige optische Schwingung verlorengeht. Die Übertragung mit Signalen im Radiofrequenzbereich erfordert wegen ihrer niedrigen Frequenz, ihrer kleinen Amplitude und dem durch Laufzeitschwankungen in der Ionosphäre oder Troposphäre hohen Rauschen zu lange Mittelungszeiten, um Uhren mit kleiner Unsicherheit zu vergleichen (Abb. 4).

Um optische Atomuhren mit den angestrebten Unsicherheiten von wenigen 10^{-18} zu vergleichen, sind optische Übertragungsmethoden notwendig. Spezielle Faserverbindungen zur phasenkohärenten Übertragung optischer Frequenzen sind gegenwärtig an einigen Stellen aufgebaut, beispielsweise zwischen den nationalen Metrologie-Instituten in Braunschweig, Paris und Teddington bei London. Sie dienen bisher zu Frequenzvergleichen zwischen optischen Atomuhren mit relativen Gesamtunsicherheiten von wenigen 10^{-17} [5]. Um diese winzigen Unsicherheiten zu erreichen, ist es unerlässlich, die optische Weglänge der Faser zu stabilisieren. Eine Längenänderung von einem Mikrometer pro Sekunde auf der ganzen Strecke, wie sie durch thermische Ausdehnung schnell entsteht, bedeutet eine Verschiebung der optischen Frequenz um mehr als 2 Hz, was einer Abweichung in der Größenordnung von 10^{-15} entspricht. Die Faserlänge wird daher so stabilisiert, dass das am Faserende reflektierte Signal am Eingang keinen Frequenzversatz zeigt.

Faser- und optische Freistrahlsverbindungen erlauben es, optische Uhren über große Entfernungen innerhalb weniger Stunden im 10^{-18} -Bereich zu vergleichen. Transportable Atomuhren sind verschiedentlich im Aufbau. Die transportable Uhr der PTB (Abb. 5) kam bereits für internationale Frequenzvergleiche zum Einsatz und besitzt eine abgeschätzte Unsicherheit von 7×10^{-17} . Dieser Wert wurde beim Vergleich mit einer stationären Uhr bestätigt [6]. Während des Transports tickt die transportable Uhr nicht. Daher ist es zwar möglich, die Ganggenauigkeit optischer Uhren mit dieser Unsicherheit weltweit zu vergleichen, aber keine Zeitvergleiche durchzuführen.

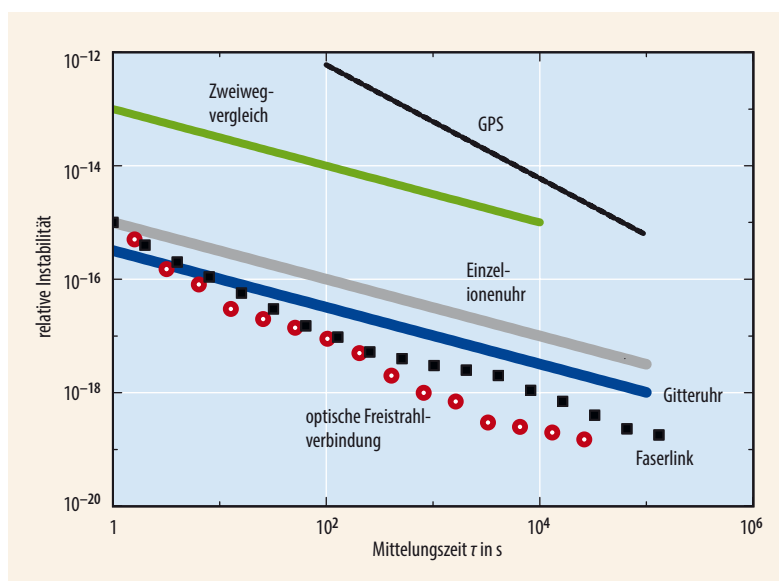


Abb. 4 Je länger die Mittelungszeit, umso geringer ist die relative Instabilität der Frequenz einer Einzelionenuhr (graue Linie) und einer optischen Gitteruhr (blaue Linie). Auch die Instabilitäten beim Frequenzvergleich räumlich getrennter Uhren hängen von der Mittelungszeit ab. Bei den Radiofrequenzsignalen über Satelliten betrug die Basislänge bei GPS 1000 km, beim Zweiwegvergleich über einen geostationären Satelliten 9000 km. Die optischen Frequenzen wurden über eine 1400 km lange Faser oder eine 4 km lange optische Freistrahlestrecke übertragen.

Anwendungen optischer Uhren

Optische Uhren sind ein wissenschaftlich äußerst interessantes Arbeitsgebiet der Physik, in dem laufend neue Ideen entstehen. Für den Metrologen, der sich für die Genauigkeit der Uhren mit mehr als einem Atom oder Ion interessiert, stellen frequenzverschiebende Wechselwirkungen ein Ärgernis dar, das es zu verstehen und möglichst zu eliminieren gilt. Umgekehrt ermöglicht es die hohe Genauigkeit der optischen Uhren mit ultrakalten Atomen, kleinste Wechselwirkungen in völlig neuen Regimen zu untersuchen. Aktuell geht man der Frage nach, ob sich mithilfe externer Lichtfelder die Wechselwirkung zwischen den Atomen gezielt verändern und damit auch ausschalten lässt. Die beim Bau der Uhren neu entwickelten innovativen Quantentechnologien und Abfragealgorithmen finden Anwendungen in ganz anderen Bereichen wie der Kryptographie, der höchstauflösenden Spektroskopie oder der Quantensimulation in optischen Gittern. Die ultrastabilen Laser, die zur Abfrage optischer Uhren entwickelt werden, haben eine Kohärenzlänge, die dem zehnfachen Abstand zwischen Erde und Mond entspricht. Damit können sie zu neuartigen Anwendungen im Radarbereich, der Atominterferometrie, der Navigation im tiefen Weltraum, atombasierter Gravitationswellendetektion oder der Suche nach Dunkler Materie führen.

In der Physik haben wir exzellente Theorien zur Beschreibung der Natur wie die Quantenelektrodynamik, die Allgemeine Relativitätstheorie oder das Standardmodell der Teilchenphysik. Nach gegenwärtiger Kenntnis schließen sich aber die grundlegenden Prinzipien, auf denen diese Theorien aufgebaut sind, teilweise aus. So ist die Allgemeine Relativitätstheorie eine lokale Theorie, während die Quantenmechanik intrinsisch nichtlokal ist. Ebenso sind die nichtverschwindenden Ruhemassen der Neutrinos, die Dunkle Materie oder die Dunkle Energie gegenwärtig nicht erklärbar. Lösungsansätze, um die fundamentalen Wechselwirkungen zu vereinheitlichen, implizieren eine mögliche zeitliche Variation fundamentaler Konstanten [7]. Optische Atomuhren als höchstgenaue kompakte Messgeräte stellen eine Alternative zu den großen Anlagen der Hochenergiephysik dar, die vielleicht erste Hinweise zur Lösung der drängenden Probleme der gegenwärtigen Physik liefern können. So erlaubten es Uhrenvergleiche, stringente Grenzen für eine mögliche Variation der Sommerfeldschen Feinstrukturkonstanten oder des Proton-Elektron-Massenverhältnisses zu bestimmen [8]. Weitere Messungen können diese Werte verfeinern, indem man ein Frequenzverhältnis zwischen Übergängen bestimmt, die in unterschiedlicher Weise von diesen Konstanten abhängen. Bei einer zeitlichen Variation der Konstanten müssen sich auch die gemessenen Frequenzverhältnisse ändern [9].

Ein komplett neues Forschungsfeld mit immensem Anwendungspotenzial ist die relativistische Geodäsie. Hebt man eine Uhr an der Erdoberfläche um $h = 1$ m an, erhöht sich aufgrund des veränderten Gravitations-



Abb. 5 In diesem Container befindet sich die transportable Sr-Gitteruhr.

potentials gemäß $\Delta v/v = gh/c^2$ (mit Erdbeschleunigung g und Lichtgeschwindigkeit c) die Frequenz der Uhr (vom Boden aus betrachtet) relativ um etwa 10^{-16} . Diese gravitative Rotverschiebung wurde oft überprüft, und ihr Einfluss wird schon lange beim Uhrenvergleich im internationalen Zeitsystem quantitativ berücksichtigt. Mit optischen Atomuhren und ihren angestrebten Unsicherheiten von rund 10^{-18} lassen sich Änderungen des Geopotentials messen, die einer Höhenänderung von einem Zentimeter entsprechen. Allerdings ist es dazu erforderlich, die Uhren mit der gleichen Genauigkeit vergleichen zu können. Eine relativistische Geodäsie kann helfen, das terrestrische Gravitationsfeld mithilfe von Satellitenmissionen zu bestimmen. Diese Missionen liefern die quantitative Basis für Änderungen der globalen und regionalen Massenverteilung und ein globales Gitter des Gravitationspotentials. Die Maschenweite dieses Gitters ist nur unwesentlich kleiner als 100 km; optische Uhren und Fasern können sie lokal deutlich reduzieren. Eine japanische Forschungsgruppe plant den Einsatz von optischen Atomuhren, um geologisch aktive und potenziell gefährliche Vulkanzonen zu überwachen. Ihre Präzision und Stabilität können auch dazu dienen, die Genauigkeit bei der Very Long Baseline Interferometry für die Astro- und Geophysik zu verbessern. In verschiedenen Projekten geht es momentan darum, optische Atomuhren für ihre Nutzung in Weltraumexperimenten und für die Deep-Space-Stationen der European Space Agency zu untersuchen.

Sekundäre Darstellungen der Sekunde

Eine wichtige Anwendung der Atomuhren besteht darin, die allgemeingültige und weltweit verfügbare Zeitskala UTC (Universal Coordinated Time) zu erstellen, die sich von der Internationalen Atomzeitskala ableitet. Schon kurz nach 2000 empfahl das internationale Komitee für Maße und Gewichte, geeignete optische

Uhren als sekundäre Realisierungen der Sekunde parallel zu den Cäsiumuhren zu verwenden und damit unterschiedliche Uhren im Hinblick auf eine zukünftige Neudefinition zu evaluieren. Natürlich können optische Uhren die Sekunde nie genauer als die besten Cäsiumuhren realisieren, solange letztere die Zeiteinheit definieren.

Gegenwärtig gibt es acht optische Uhren (Tabelle) und eine Mikrowellenuhr (Hyperfeinübergang in ^{87}Rb), die als sekundäre Realisierungen der Sekunde zur Verfügung stehen. Zu jeder dieser Atomuhren existieren unabhängige Frequenzmessungen durch Vergleich mit Cäsiumuhren. Diese Messungen sind letztlich durch die Unsicherheit begrenzt, mit welcher der ungestörte Hyperfeinstrukturübergang sich in den Cäsiumuhren realisieren lässt, sowie durch die Unsicherheiten, die beim Vergleich zwischen den Uhren entstehen. Sie liegt heute im niedrigen 10^{-16} -Bereich. Erfolgt ein rein optischer Frequenzvergleich zwischen den optischen Atomuhren, beispielsweise mit einem Femtosekundenlaserkamm, kann dieser wesentlich genauer sein. Die Gesamtheit aller dieser Messungen bildet ein überbestimmtes System für die Frequenzen der einzelnen optischen Uhren, aus dem sich mit den üblichen Methoden der Ausgleichsrechnung Bestwerte für diese ableiten. Alle zwei bis drei Jahre erfolgt eine solche Ausgleichung, zuletzt im Sommer 2017 [10].

Mögliche Neudefinition der Sekunde

Wann ist es geboten, die Sekunde über optische Frequenzen zu definieren? Das wird sicherlich deutlich nach der grundlegenden Revision des Internationalen Einheitensystems geschehen, bei dem es darum geht, die Zahlenwerte von sieben „Definierenden Konstanten“ für die sieben Basiseinheiten exakt festzulegen [11]. Die die Sekunde definierende Konstante, die Frequenz des Hyperfeinstrukturübergangs des Cäsiumatoms, würde bei einer späteren Neudefinition ersetzt.

Obwohl zu erwarten ist, dass die Genauigkeit optischer Atomuhren auch in Zukunft noch zunehmen

wird, erfordert es die Realisierung einer Zeitskala mit Unsicherheiten unterhalb von 10^{-18} , die Höhe der Uhr im Gravitationspotential der Erde auf mindestens einen Zentimeter exakt zu kennen. Das absolute Gravitationspotential so genau zu bestimmen, dürfte auf absehbare Zeit weltweit eine eminente Herausforderung darstellen. Mit einer Steigerung um zwei Größenordnungen und dem Potenzial einer stetigen Verbesserung bei einer Definition der Sekunde mit optischen statt mit Radiofrequenzen scheint daher jetzt der richtige Zeitpunkt gekommen, um eine Neudefinition vorzubereiten. Nach einer Neudefinition wäre der bisherige Standard für Zeit und Frequenz, der Hyperfeinstrukturübergang in Cäsium, als sekundäre Realisierung der Sekunde nach wie vor gültig. Im Gegensatz zu heute erhielte er aber eine Unsicherheit, die dadurch bestimmt würde, wie genau man mit den vorhandenen Cäsiumuhren diesen ungestörten Übergang realisieren kann. Damit würde also bei gleicher Anforderung an die Genauigkeit wie heute die gleiche Infrastruktur genügen. Für höhere Ansprüche würden die optischen Atomuhren mithilfe optischer Methoden der Verteilung bereits jetzt eine deutlich höhere Genauigkeit erlauben.

Der internationalen Meterkommission bleibt es vorbehalten, wann es die Sekunde auf Basis optischer Übergänge neu definiert. Die Meilensteine auf diesem Weg scheinen prinzipiell in wenigen Jahren erreichbar (Infokasten). Allerdings sind dafür noch mehr und genauere Vergleiche der optischen Uhren in den einzelnen Laboratorien und weltweit notwendig. Dabei können durchaus bisher übersehene Effekte oder unterschätzte Unsicherheiten zu Tage treten, deren Lösung zusätzlichen Aufwand erfordern würde. Gegenwärtig ist noch nicht klar genug, welcher optische Übergang sich von den bisherigen Kandidaten am besten eignet (Tabelle) [13]. Auch das lässt sich mit den Ergebnissen, die zum Erreichen der Meilensteine führen, in den nächsten Jahren klären, sodass eine Neudefinition bis zum Jahr 2030 möglich scheint. Der erste Meilenstein dürfte in etwa einem Jahr erreicht sein, und auch der dritte scheint zügig erreichbar. Am schwierigsten dürf-

MEILENSTEINE AUF DEM WEG ZU EINER NEUDEFINITION

In Vorbereitung einer Neudefinition wurden in einem Strategiedokument [12] fünf Meilensteine definiert, die an Beispielen nachweisen sollen, in welchem Umfang die gegenüber der Cäsiumuhr angestrebte Verbesserung um etwa zwei Größenordnungen erreicht worden ist und damit die Voraussetzungen für eine Neudefinition erfüllt sind.

- Demnach ist die Zeit reif, wenn erstens mindestens drei unterschiedliche optische Uhren entweder in unterschiedlichen Labors oder mit unterschiedlichen atomaren Referenzsystemen validierte Unsicherheiten erreichen, die um etwa zwei Größenordnungen kleiner sind als die der besten Cäsiumuhren.
- Der zweite Meilenstein ist erreicht, wenn diese drei Uhren mit einer relativen Unsicherheit von $\Delta\nu/\nu < 5 \times 10^{-18}$ miteinander verglichen wurden – entweder über transportable Uhren, verbesserte Frequenzverbindungen oder über gemessene Frequenzverhältnisse.

- Drittens sollen diese optischen Uhren mit drei unabhängigen Cäsiumuhren mit einer Unsicherheit von besser als 3×10^{-16} verglichen werden, um den kontinuierlichen Anschluss der zukünftigen an die gegenwärtige Definition der Sekunde zu gewährleisten.
- Der vierte Meilenstein sieht vor, dass mehrere optische Atomuhren als sekundäre Darstellungen der Sekunde regelmäßig zur Internationalen Atomzeitskala beitragen, um die technologische Reife für den Alltagsbetrieb nachzuweisen.
- Der fünfte Meilenstein will sicherstellen, dass das Potenzial der unterschiedlichen optischen Atomuhren für die Neudefinition ausgenutzt wird. Er ist erreicht, wenn optische Frequenzverhältnisse zwischen mindestens fünf optischen Normalen in mindestens zwei unterschiedlichen Laboratorien gemessen wurden.

te der Nachweis des zweiten Meilensteins sein, da sich im Rahmen der intensiven Vergleiche wahrscheinlich die eine oder andere Inkonsistenz ergeben wird, die dann auszuräumen ist.

Für diesen Prozess und um die Vorteile optischer Atomuhren für die hier nur angedeuteten neuen Forschungs- und Anwendungsfelder in vollem Umfang nutzen zu können, sind dauerbetriebsfeste und kompaktere Uhren erforderlich. Im Rahmen des vom BMBF neu geförderten Programms QUTEGA (Quantentechnologie – Grundlagen und Anwendungen), welches das Europäische Quantentechnologie-Flaggschiff unterstützt, wird eine höchstpräzise optische Einzelionenuhr für Anwender als eine der ersten und prominentesten Anwendungen der Quantentechnologien entwickelt [14].

*

Ich danke meinen Kollegen an der PTB, mit denen ich das Vergnügen hatte, an optischen Atomuhren zu arbeiten, und den Wissenschaftlern in den internationalen Gremien zur Vorbereitung einer Neudefinition. Ekkehard Peik, Nils Huntemann, Harald Schnatz und Stefan Kück danke ich für hilfreiche Diskussionen und Korrekturen zu diesem Beitrag.

Literatur

- [1] T. W. Hänsch, Rev. Mod. Phys. **78**, 1297 (2006)
- [2] PTB, 50 Jahre atomare Definition der Sekunde, PTB-Mitteilungen **127**, Heft 3 (2017), DOI: 10.7795/310.20170399
- [3] A. D. Ludlow et al., Rev. Mod. Phys. **87**, 637 (2015)
- [4] T. L. Nicholson et al., Nat. Commun. **6**, 6896 (2015);
N. Huntemann et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 063001 (2016)
- [5] C. Lisdat et al., Nat. Commun. **7**, 12443 (2016)
- [6] S. B. Koller et al., Phys. Rev. Lett. **118**, 073601 (2016)
- [7] J.-P. Uzan, Living Rev. Relativity **14**, 2 (2011)
- [8] R. Godun et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 210801 (2014);
N. Huntemann et al., Phys. Rev. Lett. **113**, 210802 (2014)
- [9] P. Schmidt und J. R. C. López-Urrutia, Physik Journal, Oktober 2016, S. 25
- [10] Bureau International des Poids et Mesures, Practical realizations of the definitions of some important units, bit.ly/2lSXkoY
- [11] J. Stenger und J. H. Ullrich, Physik Journal, November 2014, S. 27
- [12] Bureau International des Poids et Mesures, Strategy Documents, www.bipm.org/en/committees/cc/cctf/strategy.html;
F. Riehle et al., Metrologia, akzeptiert (2018)
- [13] P. Gill, Phil. Trans. R. Soc. A, **369**, 4109 (2011)
- [14] BMBF-Projekt opticklock, www.opticklock.de

DER AUTOR

Fritz Riehle (FV Quantenoptik und Photonik) studierte in Karlsruhe Physik. Nach seiner Habilitation evaluierte er in der PTB Berlin den Elektronenspeicherring BESSY als radiometrisches Strahlungsnormal. Seit 1987 forscht er in der Atom- und Quantenoptik, an optischen Frequenzstandards und arbeitet in den Gremien der Meterkonvention mit. Er ist Honorarprofessor an der Leibniz Universität Hannover und leitete von 2000 bis November 2016 die Abteilung Optik der PTB. Seit seiner Pensionierung beschäftigt er sich unter anderem mit der Entwicklung höchststabiler Laser.

