Atomuhren und die neue Sekunde

QUANTENTECHNOLOGIE · MESSEN

Hebt man eine sehr gute Uhr um einen Zentimeter an, geht sie schneller. Nicht viel, um etwa ein Milliardstel eines Milliardstels, aber messbar. Das ist keine Spielerei, sondern Einsteins allgemeine Relativitätstheorie: Je schwächer die Schwerkraft, desto schneller vergeht die Zeit. Dass man diesen Effekt auf einen Zentimeter genau sehen kann, verdanken wir einer neuen Generation von Atomuhren, so genau, dass sie über das Alter des Universums keine Sekunde falsch gehen würden. Sie sind so gut, dass die Sekunde selbst neu festgelegt werden soll.

Was eine Atomuhr misst

Jede Uhr braucht etwas, das gleichmäßig schwingt, und einen Zähler. Bei der Pendeluhr ist es das Pendel, bei der Armbanduhr ein kleiner Quarzkristall, der 32 768 Mal pro Sekunde vibriert. Das Problem: Jedes Pendel und jeder Quarz ist ein bisschen anders, ändert sich mit der Temperatur und altert. Atome dagegen sind alle gleich. Ein Cäsiumatom in Braunschweig verhält sich genau wie eines in Tokio.

In einem Atom können die Elektronen nur bestimmte Energiestufen besetzen. Strahlt man Licht oder Mikrowellen ein, deren Frequenz genau zum Abstand zweier Stufen passt, springt das Atom. Eine Atomuhr stellt ihre Frequenz so lange nach, bis die Atome bestmöglich reagieren, und zählt dann die Schwingungen. Seit 1967 ist die Sekunde genau so definiert: als die Dauer von 9 192 631 770 Schwingungen der Mikrowellenstrahlung, die zu einem bestimmten Übergang im Cäsiumatom gehört [1]. Die erste brauchbare Cäsiumuhr hatten Louis Essen und Jack Parry 1955 am National Physical Laboratory bei London gebaut [2].

In Deutschland ist die Physikalisch-Technische Bundesanstalt in Braunschweig gesetzlich dafür zuständig, die gesetzliche Zeit darzustellen und zu verbreiten [3]. Ihre Atomuhren steuern über einen Langwellensender jede Funkuhr im Land.

Vom Mikrowellen- zum Lichttakt

Wie genau eine Uhr sein kann, hängt auch davon ab, wie fein sie die Zeit unterteilt. Eine Uhr, die neun Milliarden Mal pro Sekunde tickt, ist gut. Eine, die mehrere hundert Billionen Mal tickt, kann noch viel besser sein. Genau so schnell schwingt sichtbares Licht. Optische Atomuhren nutzen deshalb nicht Mikrowellen, sondern Laserlicht, das zu einem Übergang in Atomen wie Strontium, Ytterbium oder in einzelnen geladenen Ionen passt.

Lange gab es dabei ein unüberwindliches Problem: Kein elektronischer Zähler kommt mit hunderten Billionen Schwingungen pro Sekunde mit. Gelöst haben es John Hall und Theodor Hänsch mit dem optischen Frequenzkamm, einem Laser, dessen Licht aus einer langen Reihe exakt gleich weit auseinanderliegender Frequenzen besteht, wie die Zinken eines Kamms. Er übersetzt die rasend schnellen Lichtschwingungen in zählbare Radiofrequenzen. Dafür bekamen die beiden 2005 den Physik-Nobelpreis [4].

Heute sind die besten optischen Uhren etwa hundertmal genauer als die Cäsium-Fontänenuhren, mit denen die Sekunde derzeit realisiert wird [5]. Eine Strontiumuhr am JILA in Boulder, in der tausende Atome in einem Gitter aus Laserlicht gefangen sind, erreichte 2024 eine systematische Unsicherheit von $8 \cdot 10^{-19}$ [6]. Was das bedeutet, zeigt Abb. 1.

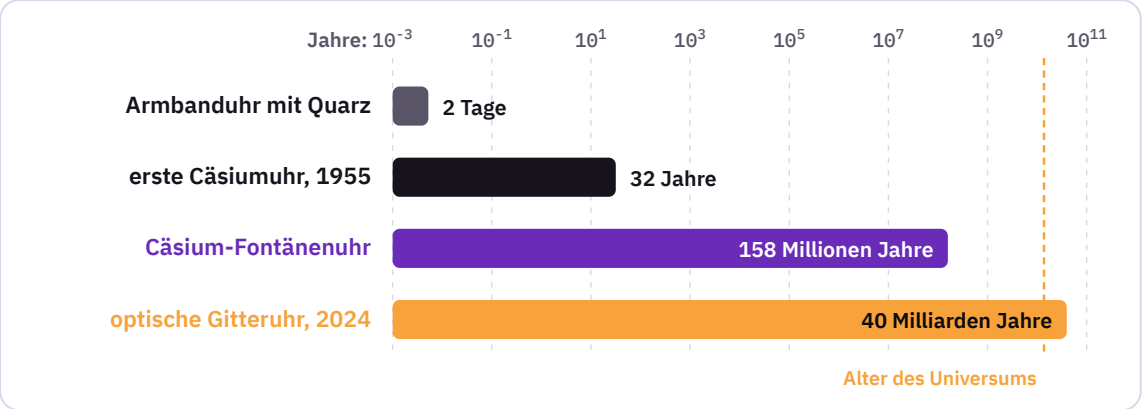


Abb. 1: Wie lange eine Uhr laufen müsste, bis sie eine Sekunde falsch geht, in Jahren, logarithmisch. Eigene Berechnung nach typischen Werten und [2],[6].

Eine Uhr, die die Höhe spürt

Bei dieser Genauigkeit wird eine Uhr zu etwas anderem als einem Zeitmesser. Nach der allgemeinen Relativitätstheorie hängt der Gang einer Uhr von der Schwerkraft an ihrem Ort ab. Für den Unterschied zweier Uhren, die um die Höhe Δh versetzt sind, gilt in Erdnähe

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{g \cdot \Delta h}{c^2} \tag{1}$$

mit der Erdbeschleunigung g und der Lichtgeschwindigkeit c. Pro Zentimeter sind das rund 10^{-18}. 2010 zeigten Forscher am NIST mit zwei Aluminium-Ionenuhren, dass eine um 33 Zentimeter angehobene Uhr tatsächlich schneller läuft [7]. 2022 gelang es am JILA, den Unterschied sogar innerhalb einer einzigen Atomwolke über einen Millimeter Höhe zu messen [8].

Damit wird aus der Uhr ein Messgerät für die Erde selbst. Vergleicht man optische Uhren an verschiedenen Orten, kann man Höhenunterschiede im Zentimeterbereich bestimmen, und das unabhängig von Satelliten und Vermessungspunkten. Geodäten hoffen, damit

eines Tages ein weltweit einheitliches Höhensystem aufzubauen, was überraschend schwierig ist, weil Länder ihre Höhen auf unterschiedliche Pegel beziehen. Auch Massenverschiebungen im Erdinneren, etwa durch Magma oder schmelzendes Eis, verändern die Schwerkraft und damit den Uhrengang.

Die Sekunde wird neu definiert

Wenn die besten Uhren der Welt hundertmal genauer sind als die Definition der Sekunde, ist die Definition das schwächste Glied. Die internationalen Gremien der Metrologie arbeiten deshalb an einer neuen Definition auf Basis optischer Übergänge. Offen ist noch, welcher: ein bestimmtes Atom, oder ein Mittelwert aus mehreren. Bevor es so weit ist, müssen optische Uhren in mehreren Ländern verlässlich über lange Zeit laufen und über Kontinente hinweg verglichen werden können.

Den frühestmöglichen Termin nennt das Internationale Büro für Maß und Gewicht: Die Generalkonferenz für Maß und Gewicht könnte 2030 über die neue Definition entscheiden, sofern bis dahin alle Bedingungen erfüllt sind und Einigkeit besteht. In Kraft treten würde sie danach [5]. Im Alltag wird davon niemand etwas merken, die Sekunde bleibt so lang, wie sie ist. Aber die Grundlage, auf der Navigation, Mobilfunknetze, Stromnetze und der Hochfrequenzhandel an den Börsen ihre Zeit beziehen, wird um zwei Größenordnungen genauer.

Zum Weiterlesen

Experimentalphysik 3: Atome, Moleküle und Festkörper

Wolfgang Demtröder · Springer, 2016 · ISBN 978-3-662-49093-8

Die Atomphysik hinter der Atomuhr: Energieniveaus, Hyperfeinstruktur und Laserspektroskopie.

Bei Amazon ansehen*

Eine kurze Geschichte der Zeit

Stephen Hawking · Klett-Cotta, 2025 · ISBN 978-3-608-98895-6

Wie Schwerkraft die Zeit verbiegt, erklärt Hawking ohne Formeln, und genau diesen Effekt messen optische Uhren heute im Zentimeterbereich.

Bei Amazon ansehen*

* Werbelink: Kaufen Sie über diesen Link, erhalten wir von Amazon eine kleine Provision, am Preis ändert sich für Sie nichts. Mehr Empfehlungen auf unserer Seite Bücher zur Quantenphysik.

Quellen

1. Bureau International des Poids et Mesures: *The International System of Units (SI).* 9. Auflage, 2019. bipm.org/en/publications/si-brochure.
2. L. Essen, J. V. L. Parry: *An Atomic Standard of Frequency and Time Interval: A Cæsium Resonator.* In: Nature 176 (1955), S. 280–282, doi:10.1038/176280a0.
3. *Gesetz über die Einheiten im Messwesen und die Zeitbestimmung (Einheiten- und Zeitgesetz)*, § 6. gesetze-im-internet.de/mezg/__6.html.
4. Nobel Prize Outreach: *The Nobel Prize in Physics 2005.* nobelprize.org/prizes/physics/2005/summary.
5. Bureau International des Poids et Mesures: *Frequently Asked Questions concerning the Redefinition of the Second.* bipm.org/faq-redefinition-second.
6. A. Aeppli, K. Kim, W. Warfield, M. S. Safronova, J. Ye: *Clock with 8 × 10^{-19} Systematic Uncertainty.* In: Physical Review Letters 133 (2024), 023401, doi:10.1103/PhysRevLett.133.023401.
7. C. W. Chou, D. B. Hume, T. Rosenband, D. J. Wineland: *Optical Clocks and Relativity.* In: Science 329 (2010), S. 1630–1633, doi:10.1126/science.1192720.
8. T. Bothwell, C. J. Kennedy, A. Aeppli, D. Kedar, J. M. Robinson, E. Oelker, A. Staron, J. Ye: *Resolving the gravitational redshift across a millimetre-scale atomic sample.* In: Nature 602 (2022), S. 420–424, doi:10.1038/s41586-021-04349-7.

Zitiervorschlag

quanten.de: *Atomuhren und die neue Sekunde.* Stand: Oktober 2026. URL: https://quanten.de/atomuhr.html (PDF: https://quanten.de/pdf/atomuhr.pdf)

Texte und Abbildungen © 2026 quanten.de. Nutzung mit Quellenangabe und Link gern, kommerzielle Nutzung nach Absprache: info@quanten.de

Weiterlesen: Quantensensoren · Wie funktioniert ein Laser? · Atommodelle · Stephen Hawking