



Lars von der Wense

Die Grenzen der Zeitmessung: Von der Atomuhr zur Kernuhr

Die Zeitmessung dient den Menschen seit jeher als wichtiges Werkzeug in Wissenschaft und Gesellschaft. Jede technologische Verbesserung der Zeitmessung hat zu neuen Anwendungen geführt, welche häufig von konkretem praktischem Nutzen waren.¹ Ein berühmtes historisches Beispiel ist das 1735 von John Harrison entwickelte Marinechronometer, welches zu einer drastisch verbesserten Navigation auf dem Meer und damit zu einer Vereinfachung der globalen Handelsbeziehungen führte.²

Die heute genauesten Uhren sind optische Atomuhren. Diese Uhren erreichen eine Genauigkeit von nur einer Sekunde Abweichung in ca. 30 Milliarden Jahren – länger als das Alter des Universums.³ Naturgemäß sind die Anwendungen für eine derartige Genauigkeit anders geartet als noch vor 300 Jahren. Verwendung finden Atomuhren beispielsweise in der Satellitennavigation, wo der genaue Zeitpunkt des Eintreffens eines Signals genutzt wird, um Abstände zu vermessen und somit über Triangulation Positionsinformation zu gewinnen. Ein anderes Anwendungsfeld ist die Informationstechnologie: Datenpakete können umso höher getaktet werden, je genauer der Zeitpunkt ihres Eintreffens bekannt ist. Der moderne Datenaustausch wäre ohne Atomzeit-basierte Taktung nicht möglich.

Das Funktionsprinzip von optischen Atomuhren beruht darauf, dass ein atomarer Übergang, unabhängig vom Ort des Atoms und unabhängig vom Zeitpunkt seiner Betrachtung, immer die gleiche Energie besitzt. Diese Energie entspricht einer bestimmten Schwingungsfrequenz, welche benötigt wird, um den atomaren Übergang mit Hilfe von Licht anzuregen. Vermittels eines Lasers, welcher auf den atomaren Übergang stabilisiert wird, lässt sich diese Frequenz hochgenau vermessen. Im Umkehrschluss können die Schwingungen des La-

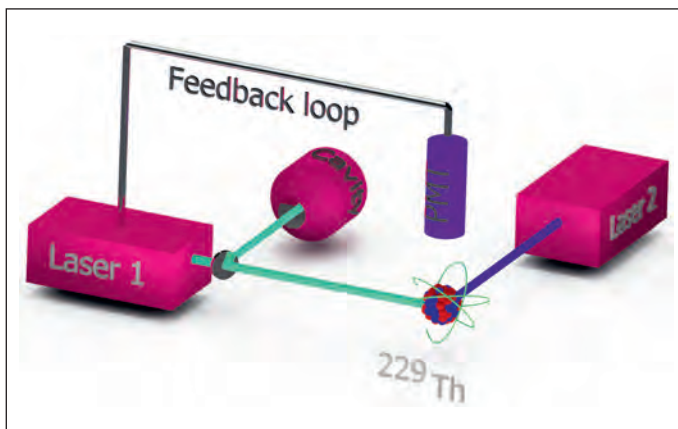
serlichts gezählt werden, um einer bestimmten Zeitspanne, beispielsweise eine Sekunde, eine bestimmte Anzahl von Schwingungen des stabilisierten Laserlichts zuzuordnen. Somit wird die Zeit gemessen, indem die Schwingungen des Laserlichts gezählt werden.⁴

Obwohl dieses Prinzip offensichtlich ausgesprochen gut funktioniert, unterliegt die erreichbare Genauigkeit der optischen Atomuhren gewissen Einschränkungen. Diese sind dadurch bedingt, dass die Energie von atomaren Übergängen bestimmten Störungen unterliegt, wie sie durch äußere Einflüsse, beispielsweise elektrische und magnetische Felder, hervorgerufen werden. Diese Störungen führen zu einer veränderten Frequenz des atomaren Überganges und damit zu einer ungewollten Verschiebung der Zeitmessung.

Eine Möglichkeit, den Einfluss von äußeren Störfeldern auf die Zeitmessung zu reduzieren, wurde 2003 von Ekkehard Peik und Christian Tamm (Physikalisch-Technische Bundesanstalt) vorgeschlagen.⁵ Der Grundgedanke ist es, statt eines atomaren Hüllenüberganges, einen Übergang im Atomkern zur Zeitmessung zu verwenden. Dieses Konzept wurde unter dem Namen „Kernuhr“ bekannt. Eine Kernuhr verspricht eine deutlich verbesserte Resistenz gegenüber äußeren Störeinflüssen, da, anschaulich gesprochen, der Atomkern um etwa einen Faktor 100.000 kleiner ist als die Atomhülle. Dieses führt zu einer erwarteten Verbesserung in der Genauigkeit der Zeitmessung um etwa einen Faktor 10 und damit zu einer Abweichung von einer Sekunde in ca. 300 Milliarden Jahren.⁶

Mögliche Anwendungen einer Kernuhr werden in Bereichen gesehen, in denen auch herkömmliche Atomuhren ihren Einsatz finden, wie beispielsweise in der Satellitennavigation, wo sie diese ergänzen oder teilweise ersetzen könnten. Eine verbesserte Genauigkeit der Zeitmessung

könnte allerdings auch neue Anwendungsfelder öffnen. Ein Beispiel hierfür ist die relativistische Geodäsie:⁷ Der Einstein'schen allgemeinen Relativitätstheorie zufolge vergeht die Zeit an jedem Punkt im Gravitationsfeld der Erde etwas anders. Je größer die Gravitationskraft, desto langsamer vergeht die Zeit. Dieser Effekt ist als gravitative Zeitdilatation bekannt und lässt sich bereits mit herkömmlichen Atomuhren messen. Je höher eine Uhr über der Erdoberfläche positioniert wird, desto schneller vergeht die Zeit. Ein Höhenunterschied von einem Zentimeter entspricht hierbei einem relativen Gangunterschied von 10^{-18} der Uhren, welcher bereits messbar ist.⁸ Immer genauere Uhren erlauben es nun, immer feinere gravitative Schwankungen messbar zu machen und eröffnen im Rahmen der relativistischen Geodäsie Rückschlüsse auf Veränderungen im Erdinneren oder plattentektonische Aktivitäten. Weitere Anwendungen einer Kernuhr werden in fundamentalphysikalischen Bereichen gesehen, beispielsweise in der Untersuchung möglicher Zeitabhängigkeiten von Naturkonstanten⁹ oder in der Detektion von topologischer dunkler Materie.¹⁰

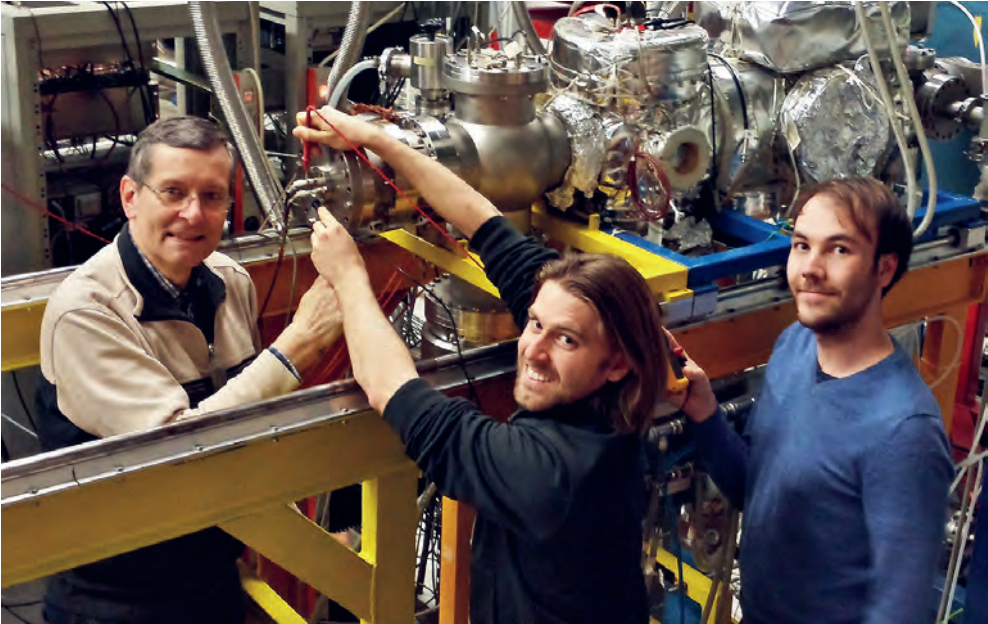


Überblick über das Konzept einer Kernuhr: Ein Kern des Elementes Thorium-229 wird mit Hilfe eines Lasers (Laser 1) angeregt und die Laserfrequenz mit Hilfe einer Rückkopplungsschleife auf den Kernübergang stabilisiert. Ein zweiter Laser (Laser 2) dient dazu, die erfolgreiche Kernanregung zu überprüfen. Die Zeit wird gemessen, indem die Schwingungen des Laserlichts gezählt werden. Da das frequenzstabilisierte Laserlicht immer die gleiche Anzahl von Schwingungen pro Sekunde vollführt, ist nach einer fest definierten Anzahl von etwa 2.000.000.000.000.000 (2 Billionen) Schwingungen eine Sekunde verstrichen. (Quelle: Lars v. d. Wense)

Obwohl der Vorschlag einer Kernuhr bereits einige Jahre zurück liegt, wurde diese bislang noch nicht realisiert. Der Grund hierfür ist recht einfach: Der Bau einer Kernuhr verlangt die direkte Laseranregung eines Überganges im Atomkern, was bisher technologisch nicht möglich war. Diese Situation hat sich jedoch in den vergangenen drei Jahren grundlegend geändert und basierend auf dem heutigen Kenntnisstand ist es nur eine Frage der Zeit, bis eine Kernuhr realisiert wird. Im Folgenden werde ich die Herausforderungen beschreiben, welche sich beim Aufbau einer Kernuhr ergeben und erläutern wie sich die Situation in den vergangenen Jahren verändert hat.

Wie bereits erläutert, erfordert der Aufbau einer Kernuhr die direkte Laseranregung eines Überganges im Atomkern. Ein zentrales Problem, welches den Aufbau einer großen Vielzahl verschiedener Kernuhren verhindert, ist, dass typische Kernübergänge Energien besitzen, welche um etwa einen Faktor 100.000 oberhalb dessen liegen, was mit derzeitiger Lasertechnologie erreichbar ist. Glücklicherweise gibt es jedoch eine (und nur eine!) bekannte Ausnahme, nämlich einen Kernübergang,

welcher eine so geringe Anregungsenergie besitzt, dass er mit existierender Lasertechnologie angeregt werden kann. Dieses ist der erste angeregte Zustand des Kerns Thorium-229, wobei die Zahl 229 die Summe der Protonen und Neutronen im Kern angibt. Dass Thorium-229 einen Anregungszustand mit außergewöhnlich geringer Energie besitzt, ist bereits seit 1976 bekannt und wurde mit verschiedenen indirekten Methoden bestätigt.¹¹ Jedoch ist es erst 40 Jahre später, 2016, gelungen, den Zerfall dieses angeregten Kernzustandes direkt sichtbar zu ma-



Von links nach rechts: Peter G. Thirolf, Lars von der Wense und Benedict Seiferle vor dem experimentellen Aufbau, mit dem nach 40 Jahren Suche die erstmalige direkte Detektion des angeregten Kernzustandes von Thorium-229 gelang. (Foto: Franz Englbrecht)

chen.¹² Diese direkte Detektion des ersten angeregten Kernzustandes von Thorium-229 kann als Grundstein für den Aufbau einer Kernuhr betrachtet werden.

Das Problem, welches bis dato bestand, war, dass die genaue Anregungsenergie des Kerns nur über indirekte Methoden bestimmt werden konnte. Dieses hatte zur Folge, dass die Energie nur mit großer Unsicherheit vermessen war. Beispielsweise ging man im Zeitraum von 1994 bis 2007 von einer Energie von etwa 3.5 eV aus,¹³ während von 2007 bis heute der mehr als doppelt so große Wert von ca. 7.8 eV die beste Messung darstellte.¹⁴ Diese große Unsicherheit ist ein zentrales Hindernis für eine direkte Laseranregung des Kerns und damit für den Aufbau einer Kernuhr. Einerseits ist es dadurch erforderlich, einen sehr großen Energiebereich laserspektroskopisch abzusuchen, was zu sehr langen Messzeiten führt. Andererseits ist die Unsicherheit in der Energie so groß, dass nicht einmal klar ist, welche Lasertechnologie für eine direkte Anregung des Atomkerns die richtige ist. Dieses macht eine präzise Vermes-

sung der Anregungsenergie vor dem Aufbau einer Kernuhr unumgänglich.

Die direkte Detektion des angeregten Kernzustandes von Thorium-229, im Folgenden ^{229m}Th genannt („m“ steht für metastabil), erlaubt es erstmals, dessen Energie auf direktem Wege zu vermessen. Eine derartige Messung ist mit einer vergleichsweise geringen Unsicherheit behaftet und liefert ein deutlich genaueres Ergebnis als es mit bisherigen indirekten Methoden der Fall war. Damit legt die direkte Detektion des Kernzustandes zusammen mit der damit verbundenen Möglichkeit einer genaueren Vermessung der Anregungsenergie den Grundstein für den Aufbau einer Kernuhr. Ein anderer wichtiger Parameter, nämlich die Lebensdauer der Kernanregung in neutralem ^{229}Th , konnte bereits 2017 experimentell bestimmt werden.¹⁵

Ein weiterer Meilenstein, welcher basierend auf der direkten Detektion von ^{229m}Th erzielt wurde, ist der zerstörungsfreie Nachweis der Kernanregung.¹⁶ Im Konzept einer Kernuhr ist es nicht allein notwendig, den Atomkern mit Hilfe eines Lasers anzuregen, es ist des Weiteren auch er-

forderlich, diese Anregung auf kurzen Zeitskalen nachzuweisen. Es kann dabei nicht auf den Zerfall der Anregung gewartet werden, da diese auf einer Zeitskala von Stunden stattfindet, was für das Konzept einer Kernuhr zu lang ist. Bereits im ursprünglichen Vorschlag einer Kernuhr war deshalb ein Konzept des zerstörungsfreien Nachweises der Kernanregung enthalten. Dieses macht es sich zu Nutze, dass Grund- und Anregungszustand des Kerns unterschiedliche Spins (Eigendrehimpulse) aufweisen. Im Falle einer erfolgreichen Kernanregung wird hierdurch eine Verschiebung der atomaren Hüllenübergänge bewirkt, welche laserspektroskopisch nachweisbar ist. Es kann also über einer Laserspektroskopie der Atomhülle festgestellt werden, ob sich der Atomkern im angeregten oder im Grundzustand befindet. Diese Methode ist als so genannte „Doppelresonanzmethode“ bekannt.¹⁷ In einer 2018 publizierten Messung ist es erstmals gelungen, die durch die Kernanregung induzierte Verschiebung der Hüllenzustände von ²²⁹Th nachzuweisen.¹⁸ Dieses bildet die Grundlage für eine zukünftige zerstörungsfreie Nachweismethode der Kernanregung und ist somit ein weiteres wichtiges Element für die Entwicklung der Kernuhr. Der nächste Schritt wird es sein, den Kern erstmals direkt mit Hilfe eines Lasers anzuregen.¹⁹ Sämtliche hierfür erforderlichen Informationen sowie die notwendige Technologie sind bereits vorhanden, so dass es einzig eine Frage der Zeit ist, bis dieses Ziel erreicht sein wird. Im Anschluss wird es möglich sein, die Energie schrittweise weiter zu präzisieren, bis am Ende ein erster nuklearer Zeitstandard erreicht ist.²⁰

Anmerkungen:

¹ K. Higgins et al., A walk through time, online available: <http://physics.nist.gov/time> [22. 1. 2019].

² R. T. Gould, The marine chronometer: its history and development, J. D. Potter, London (1923).

³ W. F. McGrew et al., Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level, *Nature* 564, 87 (2018).

⁴ A. D. Ludlow et al., Optical atomic clocks, *Rev. Mod. Phys.* 87 637 (2015).

⁵ E. Peik, C. Tamm, Nuclear laser spectroscopy of the 3.5 eV transition in ²²⁹Th, *Eur. Phys. Lett.* 61 181 (2003).

⁶ C. J. Campbell et al., Single ion nuclear clock for metrology at the 19th decimal place, *PRL* 108 120802 (2012).

⁷ T. E. Mehlstäubler, Atomic clocks for geodesy, *Reports on Progress in Physics* (2018).

⁸ W. F. McGrew et al., Atomic clock performance enabling geodesy below the centimetre level, *Nature* 564, 87 (2018).

⁹ V. Flambaum, Enhanced effect of temporal variation of the fine structure constant and the strong interaction in ²²⁹Th, *PRL* 97 092505 (2006).

¹⁰ A. Derevianko, M. Pospelov, Hunting for topological dark matter with atomic clocks, *Nature Physics* 10 933 (2014).

¹¹ L. A. Kroger, C. W. Reich, Features of the low energy level scheme of ²²⁹Th as observed in the alpha decay of ²³³U, *Nucl. Phys. A* 259 29 (1976).

¹² L. von der Wense et al., Direct detection of the ²²⁹Th nuclear clock transition, *Nature* 533 47 (2016); L. von der Wense, *On the direct detection of ²²⁹mTh*, Springer Theses (2018).

¹³ R. G. Helmer, C. W. Reich, An excited state of ²²⁹Th at 3.5 eV, *Phys. Rev. C* 49 1845 (1994).

¹⁴ B. R. Beck et al., Energy splitting of the ground-state doublet in the nucleus ²²⁹Th, *PRL* 98 142501 (2007); B.R. Beck et al., Improved value for the energy splitting of the ground-state doublet in the nucleus ²²⁹mTh, *LLNL-PROC-415170* (2009).

¹⁵ B. Seiferle et al., Lifetime measurement of the ²²⁹Th nuclear isomer, *PRL* 118 042501 (2017).

¹⁶ J. Thielking et al., Laser spectroscopic characterization of the nuclear-clock isomer ²²⁹mTh, *Nature* 556 321 (2018).

¹⁷ E. Peik, C. Tamm, Nuclear laser spectroscopy of the 3.5 eV transition in ²²⁹Th, *Eur. Phys. Lett.* 61 181 (2003).

¹⁸ Siehe ebd.

¹⁹ L. von der Wense et al., A laser excitation scheme for ²²⁹mTh, *PRL* 119 132503 (2017).

²⁰ Ein aktueller Rückblick auf den Stand der Entwicklung einer Kernuhr kann in folgender Referenz gefunden werden: L. von der Wense et al., Towards a ²²⁹Th-based nuclear clock, *Measurement Techniques* 60 1178 (2018).

Kontakt:

L.Wense@physik.uni-muenchen.de