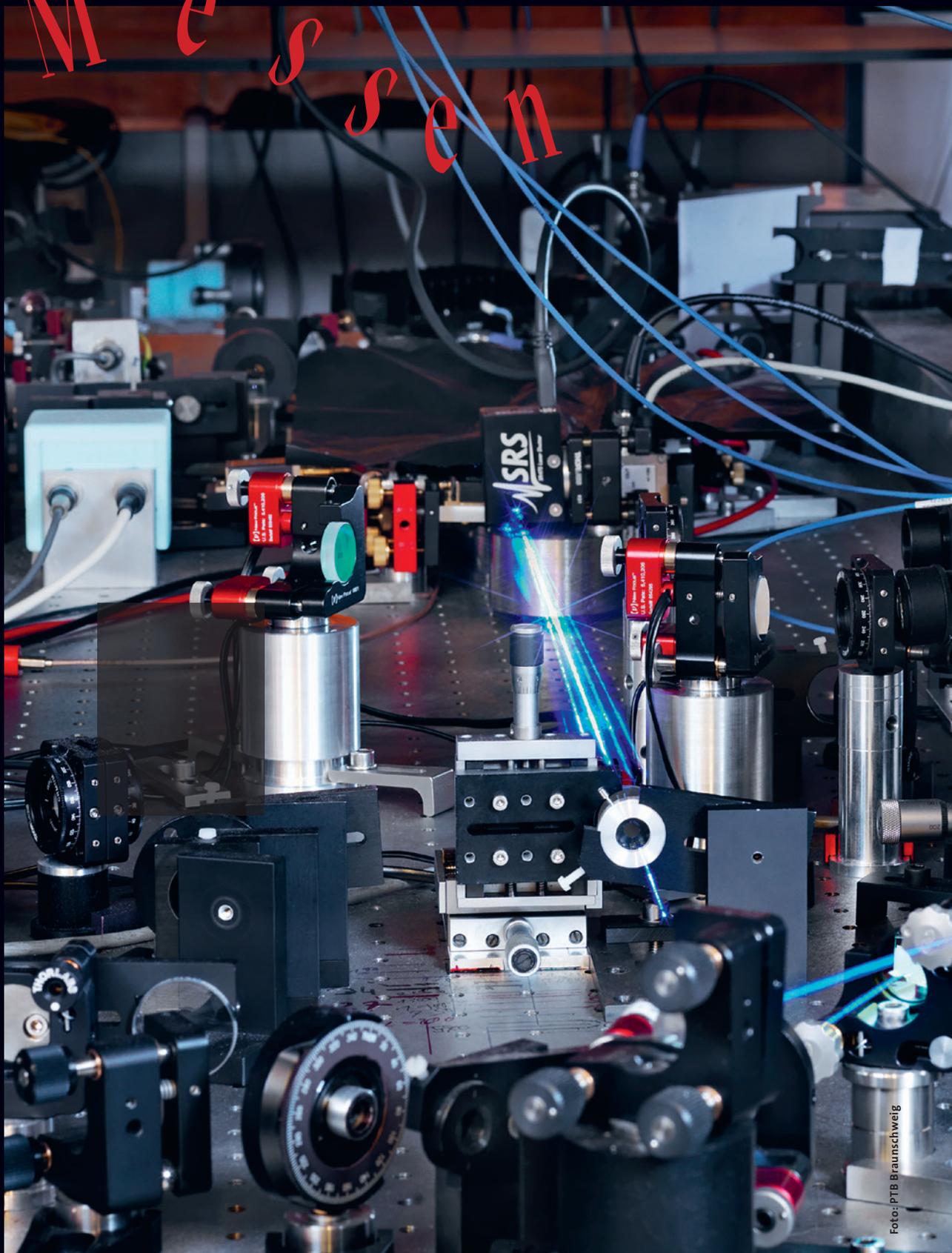
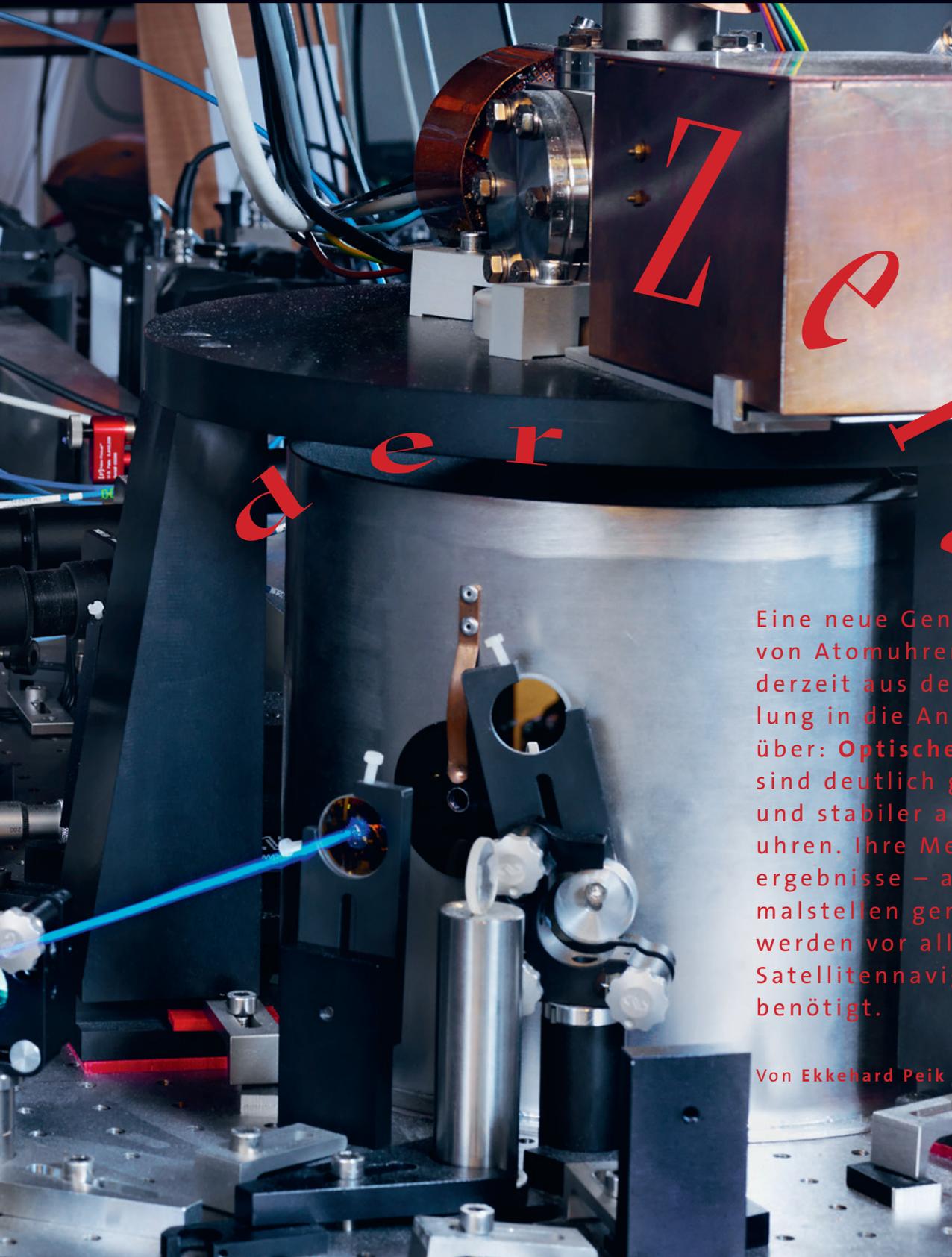


Messen Vom



Detail des Prototypen einer optischen Uhr: Blaues Laserlicht wird verwendet, um eine äußerst schmalbandige Resonanz in einem Ytterbium-Ion anzuregen.

Foto: PTB Braunschweig



Eine neue Generation von Atomuhren geht derzeit aus der Entwicklung in die Anwendung über: **Optische Uhren** sind deutlich genauer und stabiler als Cäsiumuhren. Ihre Messergebnisse – auf 18 Dezimalstellen genau – werden vor allem in der Satellitennavigation benötigt.

Von Ekkehard Peik



L ä u f t d i e z e i t k o n t i

„Was ist also Zeit? Solange mich niemand danach fragt, ist es mir, als wüsste ich es; doch fragt man mich, und ich soll es erklären, so weiß ich es nicht.“ Diese Aussage des Kirchenlehrers Augustinus von Hippo aus dem 4. Jahrhundert n. Chr. können auch heute, in einem ganz anderen Kontext, manche Naturwissenschaftler gut nachvollziehen, die sich mit Grundlagen der Physik beschäftigen. Zum Wesen der Zeit gibt es immer noch viele offene Fragen, wie zum Beispiel: Läuft die Zeit kontinuierlich von der Vergangenheit in die Zukunft, oder hat sie bei kurzen Zeitintervallen eine körnige oder schaumartige Struktur? Läuft die Zeit immer nur in eine Richtung, oder gibt es Schleifen und Tunnel in der Raumzeit, die auch in die Vergangenheit führen könnten? Gibt es wirklich feste Naturkonstanten, oder ist alles, wenn man es genau betrachtet, im Fluss, mit der seit dem Urknall andauernden Expansion des Universums?

Messung der Zeit

In einem praktischen Aspekt ist sich die Physik heute aber gewiss: Keine andere Größe lässt sich so genau messen wie die Zeit. Das dabei angewandte Konzept ist sehr einfach: Man beobachtet einen periodisch ablaufenden Vorgang und zählt dessen Zyklen. Je stabiler die Periodizität und je höher die Zahl der Zyklen in dem zu messenden Zeitintervall, desto genauer wird die Messung. Die Natur stellt uns eine Vielzahl von periodischen Vorgängen zur Verfügung. Lange hat sich die Menschheit dabei auf die Astronomie verlassen: Die tägliche Rotation der Erde um ihre Achse und der jährliche Umlauf der Erde um die Sonne lieferten die zeitlich stabilsten beobachtbaren Vorgänge. In den 1930er Jahren wurden dann erstmals Quarzuhren gebaut, die so präzise waren, dass sie durch den Vergleich mit astronomischen Beobachtungen Schwankungen in der Erdrotation nachweisen konnten: Durch die Verlagerung von Massen auf und in der Erde ändert sich die Rotationsperiode im Bereich einer Millisekunde, bei einer Tageslänge von 86.400 Sekunden also etwa an der achten Dezimalstelle.

Cäsiumuhren: Messen mit Atomen

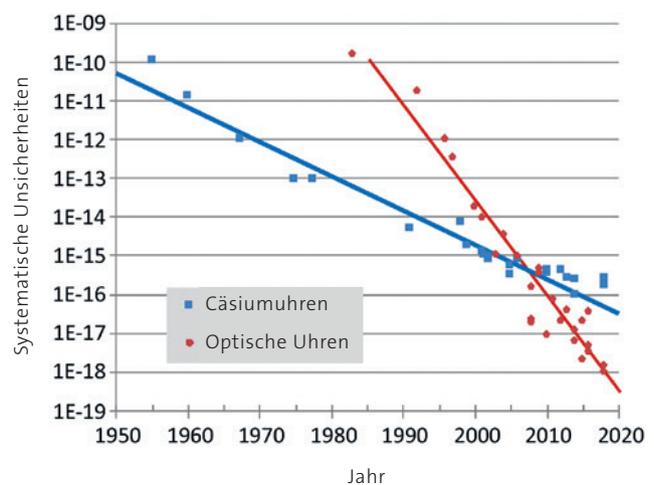
In den 1950er Jahren erfolgte der Durchbruch zur heutigen Zeitmessung mit Atomuhren. Alle Atome eines Isotops (des gleichen chemischen Elements und mit gleicher Atommasse) sind vollkommen identisch, und somit sind die Frequenzen der elektromagnetischen Wellen, die von der Elektronenhülle eines bestimmten Atoms

absorbiert oder emittiert werden, universell festgelegt und prinzipiell in jedem Labor reproduzierbar. Es genügt also, eine bestimmte atomare Resonanzfrequenz auszuwählen – man einigte sich dabei 1967 auf das Isotop Cäsium-133 und eine Resonanz bei etwa 9,19 GHz –, um die Dauer der Zeiteinheit im internationalen Einheitensystem zu definieren. Da geeignet gewählte atomare Resonanzfrequenzen nur wenig von äußeren Einflüssen (wie Temperatur, Magnetfeld, Stöße zwischen den Atomen in der Gasphase) gestört werden, ist damit zugleich eine hohe Genauigkeit erreichbar. In den 1960er Jahren waren Cäsiumuhren auf etwa 11 Dezimalstellen genau, das entspricht einer Unsicherheit von einer Mikrosekunde pro Tag. Derzeit sind in Metrologieinstituten weltweit etwa zehn Cäsiumuhren der höchsten Genauigkeit im Betrieb. Sie erreichen eine auf 16 Dezimalstellen präzise Taktfrequenz.

Optische Uhren

Derzeit geht eine neue Generation von Atomuhren aus der Phase der Forschung und Entwicklung schrittweise in die Anwendung über. Es zeigt sich, dass sie deutlich genauer und stabiler als Cäsiumuhren sein wird. Man spricht von optischen Uhren, weil hier eine atomare Resonanzfrequenz im Bereich von sichtbarem Licht verwendet wird, etwa 100.000 Mal höher als die Mikrowellenfrequenz

Fortschritte in der Genauigkeit von Atomuhren



Cäsiumuhren (blau) konnten seit 1955 um etwa sechs Größenordnungen verbessert werden, bei optischen Uhren (rot) verlief die Entwicklung noch schneller. Die besten Systeme erreichen heute eine Genauigkeit auf 18 Dezimalstellen.

Die zwei Cäsiumfontänen der Pysikalisch-Technischen Bundesanstalt: Lasergekühlte Atome werden innerhalb einer Vakuumapparatur etwa 1 m hoch geworfen, im freien Fall wird ihre Resonanzfrequenz bestimmt – auf 16 Stellen genau.



n u i e r l i c h v o n p e d e r V e i t t e r k a n n e n e i n e k ö n i g l i c h e i t i n d i e Z u k u n f t , o d e r h a t s i e b e i k u r z e n s c h e m a r t i g e S t r u k t u r ?

Läuft die Zeit immer

nur in eine

Richtung, oder

gibt es

ander

Ru

he

ut, wie auch

La

die vergan



Lange Zeit dienten astronomische Vorgänge wie der Lauf der Erde um die Sonne als Grundlage zur Messung der Zeit. Daran erinnert auch die Weltzeituhr am Berliner Alexanderplatz mit ihrer vereinfachten Darstellung des Sonnensystems.

Genauigkeit führen könnten?

der Cäsiumuhr. Ein frequenzstabilisierter Laser dient als Signalquelle und regt dabei eine Resonanz in einem in einer Falle gespeicherten Atom oder Ion an. Die Atome werden in Fallen aus elektrischen Wechselfeldern oder Laserlicht gehalten und – ebenfalls durch Wechselwirkung mit Laserlicht – auf eine Temperatur nahe am absoluten Nullpunkt gekühlt. Dies stellt sicher, dass es durch den Dopplereffekt bei einer Bewegung der Atome nicht zu einer Verschiebung der atomaren Resonanzfrequenz kommt. Schließlich muss die auf das Atom abgestimmte Laserfrequenz noch mit einem sogenannten Frequenzkamm wieder um den Faktor 100.000 fehlerfrei geteilt werden, um im Mikrowellenbereich ein elektronisch zählbares Signal zu erhalten, mit dem eine Zeitanzeige möglich wird. Die Laserkühlung und Speicherung von Atomen in Fallen und die Methode der optischen Frequenzteilung sind Ergebnisse der Grundlagenforschung, die in den vergangenen 30 Jahren mit Nobelpreisen ausgezeichnet wurden.



Mittlerweile waren mehrere Experimente mit optischen Uhren im Genauigkeitsbereich von 18 Dezimalstellen erfolgreich. So wurde an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig im zweiten Halbjahr 2017 ein Vergleich der optischen Frequenzen von zwei einzeln in separaten Fallen gespeicherten positiv geladenen Ytterbium-Ionen durchgeführt. Über mehr als 1.000 Stunden Mittelungszeit stimmten die Frequenzen bei 642.121.496.772.645 Hz bis auf eine Differenz von 0,002 Hz überein. Gleichzeitig konnte mit diesem Experiment eine Grundlage der Einsteinschen Relativitätstheorie mit verbesserter Genauigkeit überprüft werden: Eine Drehung der beiden Atome im Raum erzeugt keine Frequenzdifferenz zwischen ihnen, d. h. der Raum ist für die Bewegung der Elektronen im Atom isotrop.

Interessanterweise werden in den führenden Laboratorien für optische Uhren derzeit Atome und Ionen unterschiedlicher Elemente eingesetzt, darunter Aluminium, Strontium, Ytterbium und andere. Es ist daher noch nicht ausgemacht, welches Atom einmal dem Cäsium-133 für die Definition der Zeiteinheit nachfolgen wird. Die optischen Uhren werden weiter verbessert, und dabei ist es derzeit noch sehr hilfreich, mit unterschiedlichen Techniken und Methoden aufgebaute Uhren zu vergleichen, um Störeffekte und Ungenauigkeiten sicher erkennen und eingrenzen zu können.

Praktische Anwendungen

Da die Motivation dieser Forschungen letztlich auf praktische Anwendungen ausgerichtet ist, muss man fragen: Wo wird denn so eine hohe Genauigkeit in der Zeit- oder Frequenzmessung überhaupt gebraucht? Heute ist die Satellitennavigation die wichtigste Anwendung von hochgenauen Atomuhren: Im GPS und den anderen globalen Navigationssystemen ermittelt der Empfänger aus den Laufzeitdifferenzen der Signale und den bekannten Bahnen der Satelliten die eigene Position. In die Umrechnung von Zeit- zu Ortsinformation geht die Lichtgeschwindigkeit von etwa 300.000.000 Metern pro Sekunde ein, und man sieht sofort, dass eine sehr präzise Zeitmessung erforderlich ist, um eine Genauigkeit der Positionsangabe von einigen Metern zu erreichen. Dafür werden die Atomuhren auf den Satelliten laufend mit noch stabileren Masteruhren in Kontrollstationen am Boden verglichen und wenn nötig korrigiert. Zu Beginn des Jahres 2019 sind in den vier von den USA, Russland, China und der Europäischen Union betriebenen Navigationssystemen mehr als 100 Satelliten in Erdumlaufbahnen unterwegs und liefern global verfügbare präzise Zeit- und Ortsinformationen. Im neuen Mobilfunksystem 5G wird ein Smartphone zur schnelleren Datenübertragung gleichzeitig Informationen von mehreren Sendeantennen verarbeiten. Um den störungssicheren Betrieb eines solchen Netzwerks zu gewährleisten, werden Zehntausende von kleinen und kostengünstigen Atomuhren im Netz verteilt installiert werden. Diese Anwendungen werden wohl weiterhin im Mikrowellenbereich getaktet werden. Die optischen Uhren sind von der Genauigkeit hier schon einen Schritt voraus und werden wegen des noch relativ großen Aufwands für ihren Betrieb und Unterhalt zunächst bei den anspruchsvollsten Anwendungen als zentrale Masteruhren und in nationalen Metrologieinstituten für hochstabile Zeitskalen eingesetzt werden. Und sie können möglicherweise etwas zur Beantwortung einiger der eingangs gestellten grundlegenden Fragen beitragen, zum Beispiel zu der nach kleinen Veränderungen von Naturkonstanten, die über ihren Einfluss auf die atomaren Resonanzfrequenzen beobachtbar werden könnten. Vielleicht würde uns dies dann auch im Verständnis des Wesens der Zeit, zumindest für die Physik, etwas weiterbringen.

PD Dr. Ekkehard Peik

leitet den Fachbereich „Zeit und Frequenz“ der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig. Das Fachbereichsteam entwickelt derzeit optische Uhren auf der Basis eines einzelnen gespeicherten Ytterbium-Ions. Die Uhren der PTB bilden die Grundlage für die gesetzliche Zeit in der Bundesrepublik Deutschland.

Im April 2019 hielt Ekkehard Peik beim Kernspin-Symposium des BAdW-Forum Technologie einen Vortrag über „Atomuhren: der Kernspin als Unruh“. Das Manuskript ist erhältlich unter technologieforum.badw.de/die-symposien
