



Mekka der Mega-Uhren

Ohne Atomuhren gäbe es weder Internet noch GPS oder ein flächendeckendes und verlässliches Mobilfunknetz. Viele davon kommen aus Neuchâtel in der Schweiz. Dort tüfteln die Forscher zurzeit an einer neuen Generation der hochgenauen Zeitmesser – mit verblüffenden Fähigkeiten

Text: NIKOLAUS FECHT, Fotos: RALF BAUMGARTEN



Pascal Rochat, Chef der Schweizer Firma Spectratime, präsentiert Rubidium-Atomuhren, die das Unternehmen in Serie produziert – für Telefone oder Radarsysteme.

Mindestens 100 Millionen Jahre – so lange müsste man warten, bis eine moderne Cäsium-Atomuhr gerade mal eine Sekunde falsch geht. Bei einer Quarzarmbanduhr wäre es bereits nach einigen Tagen so weit, selbst die besten mechanischen Armbanduhren vertun sich bei der Zeitmessung noch weitaus mehr. Die unvorstellbar hohe Präzision der Zeitmessung ist möglich, weil in den Mega-Uhren quantenmechanische Prozesse in den Elektronenhüllen der Atome eines bestimmten chemischen Elements den Takt vorgeben (siehe Grafik auf Seite 91, „Das Ticken der Atome“). Und die laufen tatsächlich so exakt wie das sprichwörtliche Schweizer Uhrwerk.

In vielen Bereichen der Technik ist die extreme Präzision und Stabilität notwendig,

um etwa komplizierte Berechnungen oder elektronische Schaltvorgänge aufeinander abzustimmen – zum Übertragen von Daten übers Internet, für die Positionsbestimmung durch ein Navigationssystem oder bei Telefongesprächen im Mobilfunknetz.

Für die meisten dieser Anwendungen genügt die Ganggenauigkeit herkömmlicher Atomuhren. Doch manche Aufgaben, etwa in der Grundlagenforschung, benötigen eine noch deutlich höhere Präzision: zum

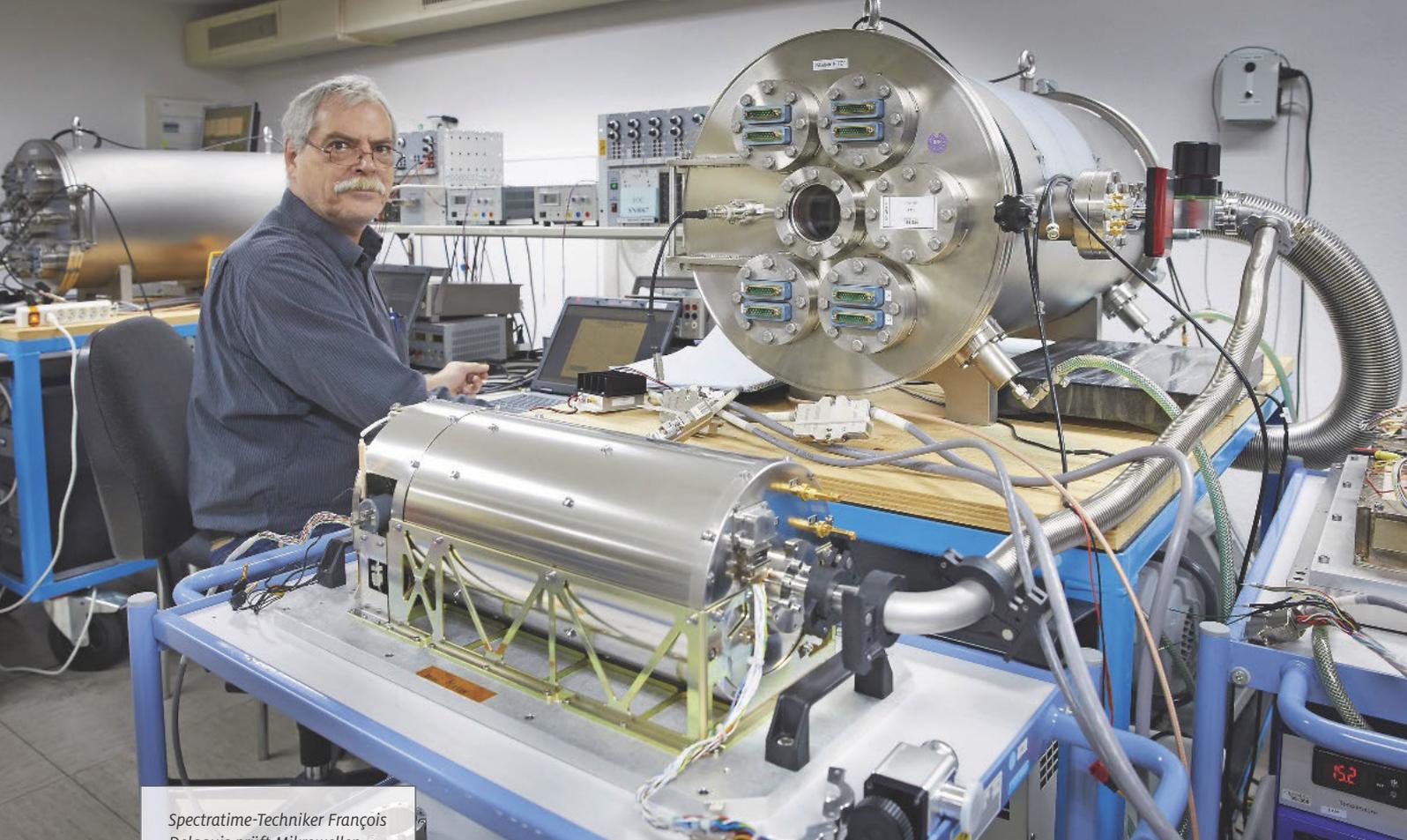
KOMPAKT

- Mit optischen Atomuhren lässt sich die Genauigkeit der Zeitmessung auf das 1000-Fache von Funkuhren steigern.
- In der Schweiz werden atomare Chronometer in großem Maßstab produziert.
- Eine neue Technik kann Armbanduhren mit einer Atomuhr synchronisieren.

Beispiel, um das Schwerfeld der Erde hochgenau zu vermessen. Dabei dienen Atomuhren nicht als Zeitmesser, sondern als empfindlicher Gravitationsensor. So wollen Physiker der Universität Zürich mit Experimenten im Rahmen des Projekts ACES (Atomic Clock Ensemble in Space) der Europäischen Raumfahrtagentur ESA die Vorhersagen der Allgemeinen Relativitätstheorie testen – und dazu Atomuhren ins All schicken.

Für solche Einsätze entwickeln Wissenschaftler weltweit seit einigen Jahren sogenannte optische Atomuhren. Sie sind der nächste Entwicklungsschritt im Ringen um immer bessere Instrumente zum Messen der Zeit. Bei einer optischen Atomuhr werden die zeittaktgebenden Atome nicht durch Mikrowellen angeregt – wie etwa





Spectratime-Techniker François Delaquais prüft Mikrowellen-Laser für Galileo-Satelliten.

bei den Cäsium-Atomuhren in Braunschweig –, sondern durch sichtbares Licht aus einem Laser. Das hat eine viel kürzere Wellenlänge und ermöglicht dadurch eine weitaus höhere Ganggenauigkeit.

Optische Atomuhren sind rund 100 bis 1000 Mal so genau wie andere atomare Zeitmesser. Sie gehen pro Tag nicht mehr als eine Femtosekunde falsch – eine milliardstel Sekunde. Bis eine solche Atomuhr eine Sekunde nachgeht, müssten also etliche Jahrmilliarden vergehen.

Das Schweizer Atomuhren-Zentrum

Ein Hotspot für neue Entwicklungen in der Technik und Anwendung von Atomuhren ist die Region um die Stadt Neuchâtel im Westen der Schweiz. Was Wissenschaftler und Ingenieure dort praktizieren, ist die perfekte Arbeitsteilung: Oben auf einem Hügel erforschen die Physiker Gaetano Mileti und Thomas Südmeyer mit ihren Teams am Labor für Zeit und Frequenz (LTF) der Universität Neuchâtel die Grundlagen und neue Anwendungen für atomare Chronometer, unten im Tal stellen drei Firmen die Geräte in großer Stückzahl her.

Mileti interessiert dabei besonders der Technologietransfer zur lokalen Industrie:

Das Unternehmen Spectratime produziert unter anderem Rubidium- und Wasserstoffmaser-Atomuhren für Satelliten. Maser sind Laser, die nicht mit sichtbarem Licht, sondern im Mikrowellenbereich arbeiten. Bei T4Science entstehen hochpräzise aktive Wasserstoffmaser für Anwendungen in der Messtechnik und Wissenschaft. Oscilloquartz stellt Cäsium-Atomuhren her, mit

Optische Atomuhren gehen pro Tag maximal eine milliardstel Sekunde falsch

denen sich Abläufe in der Telekommunikation synchronisieren lassen.

Zu den langjährigen Pionieren des Ortes zählt Pascal Rochat, Geschäftsführer der Spectratime GmbH, wo seit fast drei Jahrzehnten Atomuhren entwickelt werden. 1991 wurde er Technischer Direktor der Sternwarte in Neuchâtel, einer Keimzelle der Schweizer Atomuhren-Szene. Der damalige Sternwartenleiter Giovanni Busca startete ein Forschungsprojekt rund um Rubidium-Atomuhren, an dem sich auch

Gaetano Mileti beteiligte, damals noch Doktorand an der Universität. Kurz darauf beschlossen Busca und Rochat, die Atomuhren-Fabrik Spectratime aufzubauen.

Das Ergebnis kann sich sehen lassen: Die heutige Tochter des französischen Mutterkonzerns Orolia hat bereits etliche Galileo-Satelliten mit Atomuhren ausgestattet. Rund 150 Spectratime-Atomuhren befinden sich derzeit im All, darunter 100 in den Satelliten des Navigationssystems Galileo – der europäischen Alternative zum US-amerikanischen GPS-System. Erst kürzlich schloss das Unternehmen mit dem Galileo-Betreiber ESA einen neuen Vertrag im Umfang von 26 Millionen Euro.

Damit der Ausfall von Atomuhren, die eine exakte Messung von Signallaufzeiten und damit Abständen zwischen Satellit und Erdoberfläche gewährleisten, die Funktion des Navigationssystems nicht gefährdet, setzt die europäische Raumfahrtbehörde auf vierfache Redundanz: In jedem Galileo-Satelliten ticken zwei Rubidium- und zwei Wasserstoffmaser-Atomuhren als stabile Frequenzreferenz.

Die Technik ist bewährt und kommt seit mehr als zehn Jahren zum Einsatz. Die Unternehmen Spectratime und T4science



Komponenten für Atomuhren werden in großer Zahl produziert. Das Rubidium als Herz der Uhr wird in eine Glasröhre eingeschweißt (unten links). Vor dem Einsatz im All steht ein Test im Vakuum (rechts).



sind die einzigen in Europa, die dafür geeignete Atomuhren anbieten. „Viele öffentliche Labors und Universitäten geben viel Geld für Forschungsarbeiten zu Atomuhren aus – doch die Resultate sind selten für praktische Anwendungen nutzbar“, sagt Pascal Rochat.

Tausende Atomuhren pro Jahr

Bei Spectratime entstehen in industrieller Serienproduktion jährlich einige Tausend Atomuhren, die selbst unter schwierigen Einsatzbedingungen zuverlässig mehr als ein Jahrzehnt funktionieren – etwa beim Synchronisieren von Telefonen oder Radarsystemen. Dazu verfügt das Unternehmen über Reinraumtechnik, Prüf- und Dauer-testanlagen, die von der ESA zertifiziert und kontrolliert werden.

Vor der Auslieferung durchläuft jede Atomuhr harte Prüfungen: zum Beispiel das sogenannte Burn-In, bei dem Prüflinge aussortiert werden, die kritische Umgebungsbedingungen wie hohe oder tiefe

Temperaturen nicht lange genug überstehen. Burn-in-Versuche simulieren auch den jahrelangen Einsatz. „Denn wir können ja schlecht beim Ausfall einer Atomuhr ein Serviceteam ins All schicken“, heißt es bei Spectratime. „Wegen des hohen Aufwands dauert die Entwicklung von Atomuhren lang und kostet viel Geld“, erklärt Geschäftsführer Rochat. „Manchmal verdienen wir erst nach zehn Jahren an einer neuen Atomuhr.“

Kein Wunder, dass ein Unternehmen in dieser hochspezialisierten Branche lieber abwartet, ehe es eine jahrzehntelang bewährte Technik ersetzt. Es gibt bereits Weiterentwicklungen hin zu kleineren Systemen, die mit Laserdioden arbeiten, erklärt Rochat. „Doch es dauert manchmal sehr lange, bis wir ein Verfahren entwickelt haben, mit dem sich Atomuhren Tag für Tag mit gleichbleibender Qualität herstellen lassen.“

Daher lässt man sich bei Spectratime Zeit mit der Einführung einer neuen Zeit-

messtechnik, zumal die heutigen Atomuhren in den Satelliten bereits mit einer sehr hohen Präzision laufen. Für eine über Jahre hinweg stabile Ganggenauigkeit sorgt die regelmäßige Synchronisierung über Funk mit einem Netz, in dem mehr als 260 Atomuhren in Dutzenden Institutionen rund um den Globus zusammenschaltet sind.

Wiedergeburt einer Legende

Eine der spannendsten und exklusivsten Anwendungen ist die Nutzung einer Atomuhr des Unternehmens aus Neuchâtel als Taktgeber für mechanische Armbanduhren. Zwei Pioniere der Schweizer Uhren-Avantgarde – der Uhrmachermeister Felix Baumgartner und Martin Frei, Chefdesigner von Urwerk – wagten damit die Wiedergeburt einer Legende: Die beiden Gründer der Marke Urwerk aus Genf und Zürich wurden inspiriert durch eine Erfindung ihres Landsmanns Abraham Louis Breguet, die er 1795 in einem Brief so beschrieb: „Ich habe ein Mittel erfunden, um Taschenuhren



Urwerk-Chefdesigner Martin Frei (links) und Uhrmacher Felix Baumgartner haben eine Schnittstelle zwischen Armband- und Atomuhr entwickelt.

zu stellen und zu regulieren, ohne dass sich jemand darum kümmern muss ... Jeden Abend, wenn man zu Bett geht, platziert man die Taschenuhr auf der Tischuhr. Am Morgen oder eine Stunde später ist sie genau mit der Tischuhr abgeglichen. Es besteht nicht einmal die Notwendigkeit, die Taschenuhr zu öffnen.“

Es handelte sich dabei keineswegs um eine Luxusspinnerei für Reiche, sondern um eine messtechnische Notwendigkeit – etwa für den damals aufkommenden internationalen Eisenbahnverkehr. Breguet baute 12 bis 15 Paare der „sympathischen Pendulen“ mit je einer Taschen- und einer Pendeluhr, die jeden Tag um Mitternacht die Taschenuhr sekundengenau einstellte und ihren Gang regulierte. So war sichergestellt, dass sie kaum vor- oder nachging.

Atome regeln eine Taschenuhr

Die Erfindung von Breguet, der im heutigen Atomuhren-„Mekka“ Neuchâtel geboren wurde, ließ Baumgartner nicht mehr los. Schließlich steckte er auch Urwerk-Mitgründer Frei mit seiner Begeisterung an. Die beiden starteten die Entwicklung von sogenannten Atomar-Mechanischen Regel-

einheiten (Atomic Mechanical Control, AMC). Sie basieren auf dem Prinzip der elektronischen Regelung mechanischer Armbanduhren, wobei als steuernde „Mutteruhr“ eine Atomuhr dient. Sie reguliert den Gang einer eingelegten speziellen Taschenuhr und reduziert deren Vor- oder Nachgang auf ein Minimum.

Das Aluminium-Gehäuse der Atomuhr passt in einen Schuhkarton

Für die Entwicklung der AMC-Technik nutzten die Urwerk-Pioniere die Expertise der Forscher Mileti und Rochat. Die Umsetzung der Idee geschah im Produktionsnetzwerk des Unternehmens, das aus mehreren kleinen Manufakturen besteht, unter anderem in Genf und Zürich. Einen wesentlichen Part übernahm der Uhrmacher Dominique Buser, der in Buchs im Aargau zusammen mit seinem Kollegen Cyrano Devanthey eigene und Urwerk-Uhren entwickelt und baut. Buser ist ein Traditiona-

list, dessen Uhren mit Computertechnik entwickelt, dann aber rein mechanisch auf alten Hochpräzisionsmaschinen gefertigt werden. Eine Ausnahme machen beim AMC-Projekt die Spectratime-Atomuhr und ihr 35 Kilogramm schweres Gehäuse, das vollständig aus Aluminium besteht und das in einen großen Schuhkarton passt.

Doch die eigentliche Innovation ist die mechanische Schnittstelle zwischen der atomaren Hauptuhr, die mit einer maximalen Gangabweichung von einer Sekunde in 317 Jahren den Takt vorgibt, und der Armbanduhr, deren Unruh viermal pro Sekunde schwingt und die von Hand aufgezogen wird. Die Atomhauptuhr, der sogenannte Monolith, passt sich eigenständig an Netzspannungen von 90 bis 240 Volt an. Ein eigens dafür entwickelter Schaltkreis stellt sicher, dass die in vielen elektrischen Netzen üblichen Schwankungen von Frequenz und Spannung nicht den präzisen Takt der beiden Schwingkreise – eines Yttrium-Eisen-Granat- und eines Rubidium-Oszillators – beeinflussen. Für zusätzliche Genauigkeit sorgt die Synchronisation über GPS-Signale, die per Funk oder Internet auch die richtige Zeitzone einstellen.



Das Sekundenrad zeigt, ob die Uhr richtig geht (oben). Unten: Über eine mechanische Schnittstelle gibt die Atomuhr den Takt vor.



Der Monolith zieht die Armbanduhr auf, stellt die richtige Uhrzeit ein und reguliert gegebenenfalls ihren Gang. Bei Breguets Erfindung befand sich der gesamte Mechanismus zur Gangregulierung in der Taschenuhr und wurde zu einem festgelegten Zeitpunkt durch eine von der Taschenuhr in die Taschenuhr führende Stange ausgelöst. Bei der AMC wird das gleiche Prinzip angewandt: Zum Zeitpunkt der Gangregulierung erhält die Armbanduhr einen Impuls über einen Drücker. Dadurch wird ein Hebel betätigt, an dessen gegenüberliegenden Ende sich eine auf einer Achse drehende Schere befindet. Die beiden Scherenteile schließen sich um die halbmondförmige Scherenscheibe, die sich auf der Welle des Sekundenzeigers dreht.

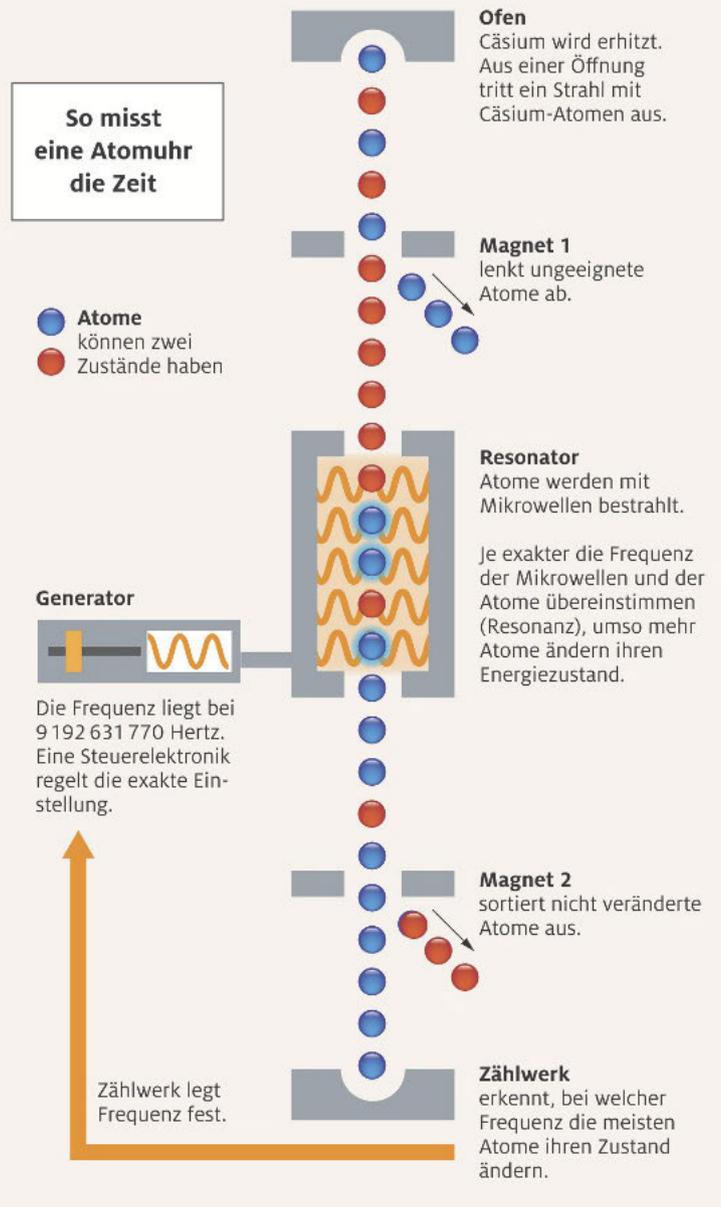
Ein pfiffiger Scheren-Mechanismus

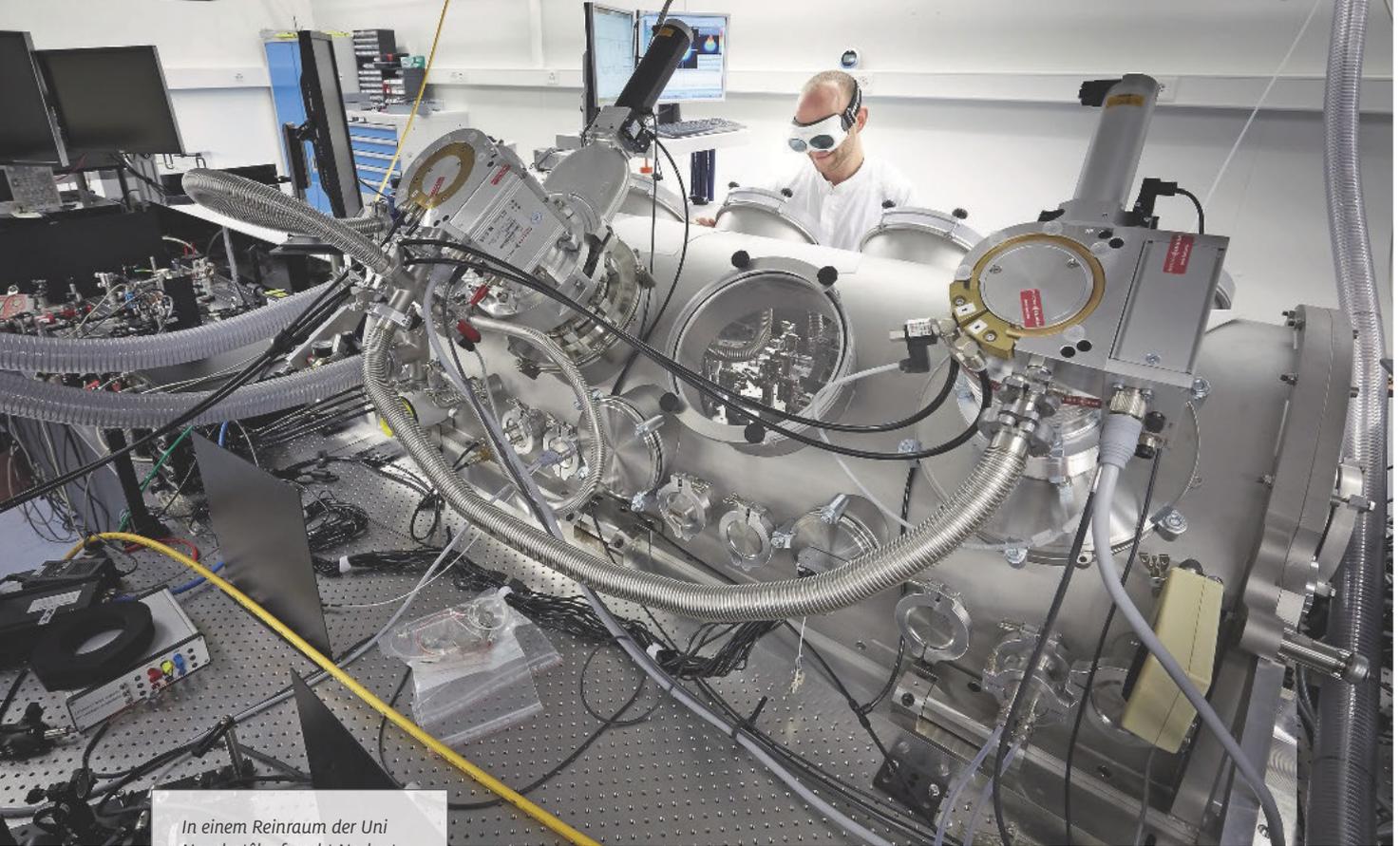
Stimmen die Uhrzeit der Atomuhr und der Armbanduhr auf die Sekunde genau überein, liegen die Scherenteile ganz außen an der Scherenscheibe an. Ist die Uhrzeit aber nicht exakt synchronisiert, schließt sich einer der Scherenteile weiter als der andere. Dadurch dreht sich die Scherenscheibe ebenfalls. Doch aufgrund ihrer Form kann



Das Ticken der Atome

Im Prinzip funktionieren Atomuhren wie alle Uhren: mit einem Taktgeber und einem Zählwerk. Allerdings arbeitet der Taktgeber weder mechanisch noch elektronisch. Statt Pendel, Unruh oder elektronischem Schwingkreis übernehmen Atome die Aufgabe, den Rhythmus des „Tickens“ vorzugeben – dank ihrer Eigenschaft, beim Übergang zwischen verschiedenen Energiezuständen elektromagnetische Wellen einer festen Frequenz aufzunehmen oder abzugeben. Typisch ist der Aufbau einer Cäsium-Atomuhr: Bei großer Hitze wird das Cäsium in einem Ofen verdampft, wodurch die Atome des Alkalimetalls ihren energieärmsten Zustand einnehmen können. In einem Resonator bringt dann ein Mikrowellenfeld die Teilchen dazu, in einen anderen Energiezustand zu wechseln. Schließlich landen die Atome in einer Kammer, wo ein Zählwerk sie registriert. Die Zahl der aufgefangenen Atome ist am größten, wenn die Mikrowellen im Resonator mit einer bestimmten Frequenz schwingen: der Resonanzfrequenz. Sie dient als exaktes Maß für die Zeit – und definiert eine Sekunde im Internationalen Einheitensystem (SI): Nach genau 9 192 631 770 Schwingungen ist eine Sekunde vergangen.





In einem Reinraum der Uni Neuchâtel erforscht Norbert Madsching die Grundlage der nächsten Atomuhr-Generation.

sich nur einer der beiden Scherenteile bewegen. Die Korrektur sorgt dafür, dass die Uhr am nächsten Tag etwas schneller oder langsamer läuft.

Doch was kostet eine solche Spezialentwicklung, von der die Firma Urwerk mit ihren rund 15 Mitarbeitern nur drei Stück baut? Ein AMC-Paar aus Atom- und Taschenuhr kostet 2,7 Millionen Schweizer Franken. Und trotz dieses stolzen Preises sind laut Urwerk alle drei Zeitmess-Duos bereits verkauft. Für das Team in Neuchâtel ist die Entwicklung in erster Linie eine Demonstration, die zeigt, wie sich elektronische, atomare und mechanische Systeme kombinieren lassen.

Die Miniaturisierung von Atomuhren ist weltweit ein wichtiges Forschungsthema. So haben Wissenschaftler am National Institute of Standards and Technology (NIST) der USA in Boulder in Colorado bereits 2003 eine Rubidiumuhr gebaut, die nur so groß ist wie ein Fingerhut. Auch die Forscher bei Spectratime entwickeln neue winzige Atom-Zeitmesser.

Kleine tragbare Atomuhren nutzen als Taktgeber Rubidium-Atome, die in luftleeren Glaskolben eingeschlossen sind und

von einer quarz-getakteten Elektronik über elektromagnetische Felder mit hohen Frequenzen im Mikrowellenbereich angeregt werden. Erst wenn das Mikrowellenfeld im gleichen Takt wie die Atome schwingt, befindet es sich im präzisen Zeittakt. Physiker sprechen bei diesem Zustand von Kernspinresonanz. Sie dient als Vergleichsmaßstab. Das Messen der Schwingungen in dem Röhrchen geschieht mithilfe eines Lichtsignals aus einer Plasma-Entladungslampe. Diese kleinen Vakuumröhrchen, die weltweit nur wenige Firmen wie Spectratime in Neuchâtel herstellen, dienen als hochpräzise Zeitgeber etwa in Satelliten.

Nur die Gravitation als Begrenzung

Neben dem Trend zur Miniaturisierung ringen die Entwickler von Atomuhren auch um immer genauere Geräte. Den derzeit genauesten atomaren Chronometer haben ebenfalls die US-Wissenschaftler am NIST entwickelt. Die optische Atomuhr, die im November 2018 erstmals vorgestellt wurde, hat eine so geringe systematische Unsicherheit bei der Zeitmessung, dass ihre Messungsgenauigkeit erstmals nur von der Gravitation begrenzt wird.

Mit so präzisen Zeitmessern könnten sich künftig ganz neue Herausforderungen meistern lassen. So belegen Analysen von

Forschern der Universität Zürich, dass sich Atomuhren nutzen lassen, um Vulkane zu überwachen. Laut Albert Einsteins Allgemeiner Relativitätstheorie laufen Uhren langsamer, wenn sich ihnen eine Masse nähert. Fließt Lava in eine Kammer unterhalb eines Vulkans, verlangsamt sich der Gang einer Atomuhr am Berg geringfügig im Vergleich zu einer weiter entfernten Uhr.

Bislang werden Vulkane mit GPS-Empfängern überwacht. Ihre Messdaten müssen jahrelang gesammelt werden, bevor sich daraus das Volumen von neuem Magma abschätzen lässt. Vor Ort aufgestellte Atomuhren dagegen könnten diese Information schon nach wenigen Stunden liefern. ■



NIKOLAUS FECHT ist Journalist in Gelsenkirchen. Den auf Reportagen spezialisierten Autor hat das zugleich bescheidene und kreative Ambiente enorm beeindruckt.



RALF BAUMGARTEN ist Fotograf in Köln. Von dem Fotojournalisten stammt die Idee zu diesem Bericht aus dem „Mekka der Atomuhren“.



„Ich setze auf Quanteneffekte“

Der Puls der industriellen Welt schlägt in Neuchâtel. Dort forscht der Physiker Gaetano Mileti mit seinen Kollegen an der Zeitmessung im atomaren Takt, während unweit davon drei Unternehmen Tausende von Atomuhren herstellen
Das Gespräch führte NIKOLAUS FECHT

Prof. Gaetano Mileti

leitet das Labor für Zeit und Frequenz (LTF) am Institut für Physik der Universität Neuchâtel. Der Physiker erforscht seit Anfang der 1990er-Jahre Uhren auf Basis von Rubidium- oder Cäsium-Atomen. Seit einigen Jahren liegt sein Fokus zudem auf der Anwendung von Lasertechnik für optische atomare Zeitmesser.

Herr Prof. Mileti, warum brauchen wir überhaupt Atomuhren, genügt nicht auch eine Quarzuhr?

Quarzuhren reichen für die meisten Anwendungen wie Mobiltelefon oder Computer aus. Funkuhren haben ein Quarzlaufwerk, dessen Uhrzeit über Funk verglichen und bei Abweichung elektronisch nachgestellt wird. Doch manche Aufgaben erfordern mehr Genauigkeit und Uhren mit einer täglichen Abweichung von maximal einer Mikrosekunde. Alle Netzwerkaktivitäten wie Telekommunikation und Energieversorgung erfordern eine solche Genauigkeit, damit die beteiligten Systeme sich stets im gleichen Zeittakt befinden. Eine noch 1000 Mal höhere Ganggenauigkeit ist bei Satelliten und GPS nötig. Bei U-Booten oder Autos im Tunnel, die keine GPS-Signale empfangen können, oder in tiefen Häuserschluchten ist zudem eine sehr präzise Uhr nötig, die auch ohne Abgleich per Funk oder Internet stabil und hochgenau geht.

Wie sähe die Welt ohne Atomuhren-Takt aus?

Es gäbe weder unser heutiges Internet noch ein großes, gut funktionierendes Mobilfunknetz und auch keine Navigation per GPS. Die Versorgung mit Energie wäre nicht so stabil, sicher und zuverlässig, denn auch dort ist die Synchronisation der Energieströme nötig. Jeder Knoten in diesen Verteilernetzen muss sich in einem physikalischen Gleichgewichtszustand befinden. Atomuhren beeinflussen also fast alle Bereiche unseres Lebens.

Wie funktioniert eine mobile Atomuhr?

Die Hersteller nehmen zum Beispiel Rubidium-Atome, die sie in einen kleinen luftleeren Glaskolben einschließen. Dort werden sie von präziser quarz-getakteter Elektronik elektromagnetisch mit hohen Frequenzen im Mikrowellenbereich angeregt. Diese kleinen Vakuumröhrchen dienen als hochgenaue Zeitgeber, etwa in Satelliten. Erst wenn das Mikrowellenfeld im gleichen Takt wie die Atome schwingt, befindet es sich im Zeittakt. Messen lassen sich die Schwingungen im Vakuumröhrchen mit einem Lichtsignal aus einer Plasma-Entladungslampe. Wir arbeiten daran, diese alte Technik durch Laserdioden zu ersetzen.

Atomuhren sind ins Gerede gekommen, weil zehn davon an Bord von Galileo-Satelliten, der europäischen Alternative zum GPS-System der USA, ausgefallen sind. Was war der Grund?

Alle Atomuhren in Satelliten fallen gelegentlich aus. Die Europäer und ihre Raumfahrtbehörde ESA kommunizieren das offener und ehrlicher als andere Staaten. Die damalige Fehlerursache wurde erkannt und behoben. Zudem erhalten Satelliten immer genug Atomuhren, damit Ausfälle nicht die Funktionsfähigkeit des Systems bedrohen.

Was verbirgt sich hinter optischen Atomuhren?

Hier kommt die Quantenmechanik ins Spiel, die mit Lasertechnik arbeitet. Sie lässt sich für viele Anwendungen nutzen. Auch das Labor für Zeit und Frequenz arbeitet auf diesem Gebiet. Der Laser ersetzt in optischen Atomuhren den Quarzoszillator, der in der Cäsium-Atomuhr das Mikrowellenfeld erzeugt. Das ist nur ein kleiner Schritt, keine technische Revolution. Der zweite Schritt ist, die Bewegung der Atome per Kühlung zu bremsen. Und der dritte Schritt besteht darin, die Resonanzfrequenz – bisher rund neun Milliarden Schwingungen pro Sekunde – deutlich zu erhöhen, indem ein atomarer Übergang im optischen statt im Mikrowellen-Bereich genutzt wird. Doch optische Atomuhren befinden sich noch im Entwicklungsprozess.

Was ist mit der industriellen Anwendbarkeit?

Wir denken über einen physikalischen Kompromiss nach. Können wir diese Technik nutzen, um bessere optische Atomuhren zu bauen, die sich als industrielle Produkte verkaufen lassen? Warum eine Ganggenauigkeit von 10^{-18} ? Würde für viele Anwendungen nicht 10^{-16} reichen? Und: Lässt sich eine transportable Lösung entwickeln, die nicht ein ganzes Labor füllt? Das geht vielleicht mit einer optischen Atomuhr, dürfte aber noch 15 bis 20 Jahre dauern.

Wie sehen Ihre nächsten Pläne aus?

Ich setze auf die Anwendung der Quanteneffekte. Daher werde ich erkunden, wie sich Atome und Photonen im Zusammenspiel quantenmechanisch verhalten. ■