

Atomuhren mit AWG-Karten im PXle-Format weiterentwickelt

Großhansdorf, Deutschland – 16. September 2026. Weltweit werden Hunderte von Atomuhren kontinuierlich verglichen, um die Internationale Atomzeit (TAI) festzulegen. In Deutschland trägt die Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) mit zwei der weltweit führenden Cäsium-Fontänenuhren dazu bei. Der technisch extrem anspruchsvolle Betrieb dieser Uhren erfordert die Abkühlung von Atomwolken mit Lasern auf wenige Mikrokkelvin sowie Ramsey-Spektroskopie. AWG-Karten von Spectrum Instrumentation spielen eine Schlüsselrolle im aktuellen Aufbau dieser Atomuhren. Die Cäsium-Fontänenuhren CSF1 und CSF2 der PTB steuern die nationale Referenzzeit UTC (PTB) und geben damit die gesetzliche Zeit in ganz Deutschland vor. Sie synchronisieren alles, von Uhren und Zügen über Flugverkehr, Kommunikation und Rundfunk, bis hin zu Computersystemen und vielem mehr.

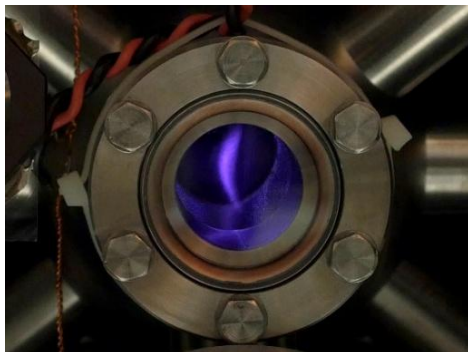
Cäsium-Fontänenuhren, wie sie an der PTB betrieben werden, nutzen das Quantenverhalten von Cäsiumatomen. Eine Sekunde ist definiert als die Dauer von exakt 9.192.631.770 Perioden der Strahlung, die dem Übergang zwischen den beiden Energieniveaus des Grundzustands des Cäsium-133-Atoms entspricht. In einer Vakuumkammer durchläuft eine ultrakalte Wolke dieser Atome zweimal einen Ramsey-Mikrowellenresonator, bevor ihr Endzustand mittels laserinduzierter Fluoreszenzspektroskopie gemessen wird.

Abkühlung der Cäsiumatome

Dr. Johannes Rahm, Mitglied der Abteilung Zeit und Frequenz der PTB, erklärt: „Vor der Messung muss zunächst eine Wolke ultrakalter Atome geladen werden. Dies geschieht mithilfe einer magneto-optischen Falle (CSF1) oder einer optischen Melasse (CSF2). In beiden Fällen werden Laser in einer spezifischen geometrischen Ausrichtung leicht unterhalb eines optischen Übergangs von Cäsium-133 verstimmt. Aufgrund der thermischen Restbewegung wird dieses Laserlicht zur Übergangsfrequenz hin Doppler-verschoben. Durch Absorption von Photonen des Lasers und Impulserhaltung werden die Atome in der Wolke abgebremst und somit abgekühlt.“

Arbeitszyklus der Cäsium-Fontänenuhr

Eine geringe Frequenzdifferenz zwischen den Lasern beschleunigt die Atomwolke nach oben, ähnlich wie ein Ball, der in die Luft geworfen wird. Dadurch entsteht der Fontäneneffekt: Die Atome durchlaufen den Ramsey-Resonator einmal auf dem Weg nach oben und erneut unter dem Einfluss der Schwerkraft auf dem Weg nach unten. Nach dem zweiten Durchgang durch den Ramsey-Resonator wird die Übergangswahrscheinlichkeit mittels Fluoreszenzspektroskopie bestimmt. Bei jedem Durchgang durch den Ramsey-Resonator wird ein Mikrowellenpuls angelegt. Die Frequenz dieses Pulses wird so eingestellt, dass die resultierende Übergangswahrscheinlichkeit etwa 50% beträgt. Mit jedem Fontänenzyklus, der aus der Ladephase, der Startphase, der Ramsey-Abfrage, der Detektion und den dazwischenliegenden ballistischen Flugphasen besteht, wird das Vorzeichen der Mikrowellenfrequenzverstimmung umgekehrt, sodass die linke und die rechte Seite der symmetrischen Übergangswahrscheinlichkeitsstruktur abgetastet werden. Die tatsächliche Übergangsfrequenz ergibt sich dann aus dem Mittelwert der beiden für die 50%-Übergangswahrscheinlichkeit eingestellten Frequenzen. Nach Abschluss der etwa 1,2 Sekunden dauernden Messung beginnt der Zyklus von Neuem und wiederholt sich 24 Stunden am Tag.



Infrarotaufnahme der Vakuumkammer mit einer fluoreszierenden Wolke aus Cäsiumatomen. (Foto: Mareike Bernien)



Die beiden Cäsium-Fontänenuhren der PTB liefern die gesetzliche Zeit für die gesamte Bundesrepublik Deutschland. (Foto: PTB)

Hauptsitz

Spectrum Instrumentation GmbH, Deutschland
Telefon: +49 4102-6956-0
E-Mail: info@spec.de

US-Büro

Spectrum Instrumentation Corp., USA
Telefon: (201) 562-1999
E-Mail: sales@spectrum-instrumentation.com

Weiterentwicklung der Atomuhren

Für den Betrieb der Cäsium-Fontänenuhren ist eine präzise Steuerung der Laser erforderlich. Dies wurde ursprünglich mit einer komplexen analogen Schaltung realisiert, die eine frühere Generation von PTB-Ingenieuren und -Wissenschaftlern entwickelt hatte. Die langfristige Wartung dieses anspruchsvollen Analogsystems wurde zunehmend schwieriger. Daher untersuchte Dr. Rahm, wie das analoge System durch eine digitale Alternative ersetzt werden könnte. Im Zuge seiner Untersuchungen entschied er sich für die Integration von Arbiträrgeneratoren im PXIe-Format von Spectrum Instrumentation. Diese Karten erzeugen die benötigten, extrem präzisen HF-Signale, um die Laser für Kühlung, Anregung und Detektion der Atome mithilfe akusto-optischer Modulatoren zu steuern.



Dr. Johannes Rahm bei der Überprüfung der Cäsium-Fontänenuhren, die rund um die Uhr in Betrieb sind. (Foto: PTB)

Schnelle Reaktion des Spectrum-Supports

Bei der Implementierung trat jedoch eine Herausforderung auf. Obwohl die M4x.6622-x4 AWG-Karten die Genauigkeitsvorgaben hervorragend erfüllten, entsprach keiner der möglichen Modi zur Signalgenerierung den speziellen Anforderungen der PTB. Für eine effiziente Gestaltung des Arbeitszyklus der Cäsiumfontänenuhr benötigt jeder Laser zu einem bestimmten Zeitpunkt des Zyklus einen spezifischen Satz von Wellenformen. Dr. Rahm wandte sich an den Support von Spectrum Instrumentation, der direkt von den Entwicklungsingenieuren geleistet wird. Innerhalb von nur zwei Tagen programmierten die Software-Entwickler eine neue Funktion namens „Sequence Restart Mode“. Die von Dr. Rahm durchgeführten Tests verliefen erfolgreich; der neue Modus funktioniert exakt wie vorgesehen.



AWG-Karte M4x.6622 im PXIe-Format von Spectrum Instrumentation. (Foto: Spectrum)

Spectrum Instrumentation hat inzwischen den Sequence Restart Mode als kostenloses Upgrade für alle AWGs der Serien 65xx und 66xx veröffentlicht. Der neue Modus lässt sich einfach durch die Installation der neuesten Treiber aktivieren.

Über Spectrum Instrumentation

Spectrum Instrumentation, gegründet 1989, kann dank seines modularen Konzepts eine große Auswahl von über 250 Digitizer- und Generatorprodukten anbieten. Die Produkte sind als PC-Karten (PCIe und PXIe) und als Standalone-Ethernet-Geräte (LXI) erhältlich. In mehr als 35 Jahren konnte Spectrum Kunden auf der ganzen Welt gewinnen, darunter viele führende Industrieunternehmen und praktisch alle Elite-Universitäten. Das Unternehmen hat seinen Hauptsitz nahe Hamburg und ist bekannt für die 5-jährige Gewährleistung sowie den hervorragenden Support direkt von den Entwicklungsingenieuren. Weitere Informationen finden Sie unter: www.spectrum-instrumentation.com

Hauptsitz

Spectrum Instrumentation GmbH, Deutschland
Telefon: +49 4102-6956-0
E-Mail: info@spec.de

US-Büro

Spectrum Instrumentation Corp., USA
Telefon: (201) 562-1999
E-Mail: sales@spectrum-instrumentation.com