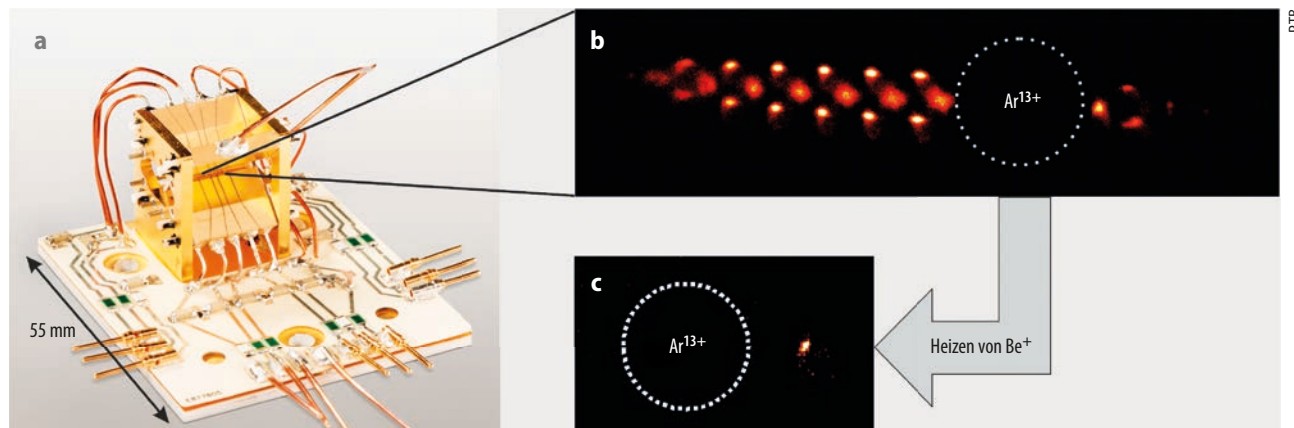


# Hochgeladen zu noch mehr Genauigkeit

Eine optische Atomuhr auf Basis eines hochgeladenen Argon-Ions verspricht, die relative Unsicherheit bei der Zeitmessung weiter zu reduzieren.

Wolfgang Quint



**Abb. 1** In der Paul-Falle (a) trifft das  $\text{Ar}^{13+}$ -Ion auf einen lasergekühlten  $\text{Be}^+$ -Ionenkristall, kühlt durch Coulomb-Stöße ab und nimmt einen Gitterplatz ein (b). Das Aufheizen des Kristalls regt die  $\text{Be}^+$ -Ionen zu Schwingungen an, sodass sie bis auf eines die Falle verlassen können (c).

Die Frequenz ist die physikalische Größe, die sich mit der höchsten Genauigkeit messen lässt. Entsprechend zitierte Theodor Hänsch in seiner Rede anlässlich der Verleihung des Nobelpreises 2005 seinen Freund und Mentor Arthur Schawlow: „Never measure anything but frequency.“ Ein Forschungsteam hat nun in einer richtungsweisenden Arbeit an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt in Braunschweig eine Atomuhr aufgebaut, die auf einem optischen Übergang eines hochgeladenen Argon-Ions  $\text{Ar}^{13+}$  in einer Paul-Falle basiert [1]. Dazu hat es die moderne Methode der Quantenlogik-Spektroskopie genutzt. Die relative Frequenzunsicherheit dieser neuartigen Atomuhr beträgt  $\delta\nu/\nu_{\text{Uhr}} \approx 3 \cdot 10^{-16}$  nach einer Mittelung über einige Stunden, was sie konkurrenzfähig zum international anerkannten Cäsium-Frequenzstandard macht.

Hochgeladene Ionen haben im Vergleich zu neutralen Atomen oder einfach geladenen Ionen bei der Realisierung einer Atomuhr den entscheidenden Vorteil, dass ihre atomaren Übergänge deutlich weniger empfindlich auf externe elektrische und magnetische Felder reagieren [2]. Weiterhin bietet eine Reihe spezieller hochgeladener Ionen die Perspektive,

die zeitliche Unveränderlichkeit der Naturkonstanten, z. B. der Feinstrukturkonstanten  $\alpha$ , mit bisher unerreichter Empfindlichkeit zu überprüfen [3].

Der letzte große Umbruch in der Zeit- bzw. Frequenzmessung fand 1967 statt. Bis dahin gab die Umlaufzeit der Erde um die Sonne den Takt unserer Uhren vor. Doch die stetige Weiterentwicklung der Rabi-Spektroskopie-Apparatur hatte die Messung von Hyperfeinstrukturübergängen im Mikrowellenbereich genauer gemacht als astronomische Zeitmessungen. Seitdem legen 9 192 631 770 Schwingungen des Hyperfeinübergangs im Grundzustand des Cäsiumatoms  $^{133}\text{Cs}$  die Sekunde fest [4]. Könnte schon bald ein optischer Frequenzstandard die international definierte Zeit vorgeben?

Die Experimentalphysik vollzieht oft bahnbrechende Fortschritte, wenn zwei bisher voneinander unabhängige Methoden oder Gebiete zusammenkommen. Die Forschenden von der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt und dem Max-Planck-Institut für Kernphysik in Heidelberg haben nun erstmals die Spektroskopie hochgeladener Ionen mit einer technischen Variante des Quantencomputers verknüpft: der linearen Paul-Falle. Diese speichert auf ihrer nahezu feldfreien

Achse eine Kette von Ionen. Laserkühlung bringt die Teilchen in der Falle bis in den Grundzustand ihrer quantenmechanischen Schwingungsbewegung, der Temperaturen unter einem Millikelvin entspricht. Die Quantenlogik-Spektroskopie benötigt lediglich zwei Ionen. Das hochgeladene Argon-Ion  $\text{Ar}^{13+}$  – das „Uhren-Ion“ – wird in der Falle an ein Beryllium-Ion  $\text{Be}^+$  gekoppelt, das die Rolle des „Quantenlogik-Ions“ übernimmt. Diese beiden gekühlten Ionen bilden in der Paul-Falle quasi ein zweiatomiges Molekül. Der Gleichgewichtsabstand zwischen den Ionen von typischerweise 20 Mikrometern ergibt sich aus ihrer gegenseitigen Coulomb-Abstoßung einerseits und den bindenden elektrischen Feldern der Paul-Falle andererseits. In der Atmungsmoden dieses Zwei-Ionen-„Kristalls“ schwingen beide Ionen gegenphasig im Rahmen ihrer gekoppelten Bewegung.

Die Anwendung von Quantentechnologien für Präzisionslaserspektroskopie an gespeicherten Ionen in einer Paul-Falle ermöglicht es, extrem schmalbandige bzw. langlebige „Uhrenübergänge“ mit Laserstrahlung anzuregen. Angeregte Energieniveaus des Uhren-Ions, die mehrere Sekunden leben, machen den Nachweis der

Anregung über die ausgesandte Fluoreszenzstrahlung eigentlich aussichtslos. Hier hilft das Logik-Ion  $\text{Be}^+$ : Nach Anregung des Uhrenübergangs überträgt eine Sequenz verschiedener Laserpulse den Zustand des Uhren-Ions über die gemeinsame Atmungsmoden auf das Logik-Ion. Ob der Uhrenübergang erfolgt ist oder nicht, lässt sich am Logik-Ion auslesen. Der schnelle 2S-2P-Übergang des  $\text{Be}^+$ -Ions bei 313 nm sorgt bei einer Lebensdauer des 2P-Niveaus von einigen Nanosekunden in Sättigung für eine Fluoreszenzrate von  $10^8$  Photonen/s, was selbst bei kleinem abgedeckten Raumwinkel eine Nachweiswahrscheinlichkeit von nahezu 100 Prozent bedeutet. Die Absorption eines einzelnen Photons durch das Uhren-Ion führt also durch die Kopplung der beiden Ionen zur Emission von  $10^8$  Photonen/s durch das Logik-Ion: eine fantastisch hohe Quantenverstärkung!

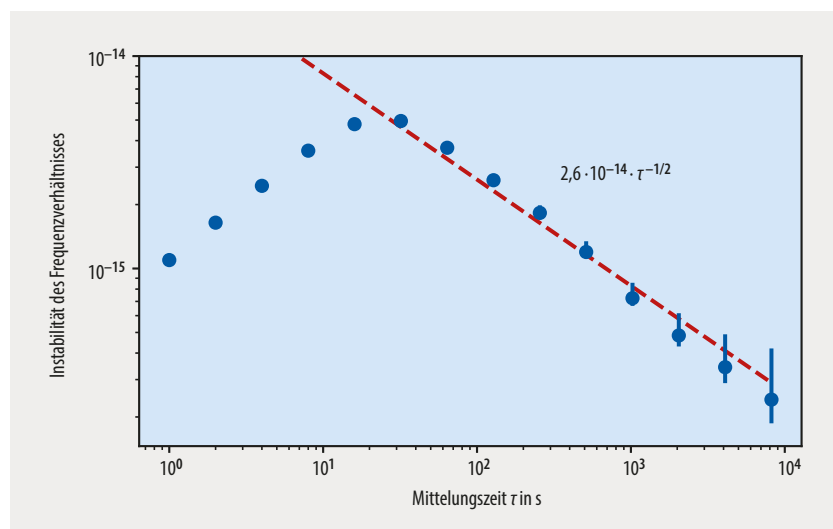
Für die neuartige optische Atomuhr wählten die Forschungsgruppen Argon im Bor-artigen Ladungszustand  $\text{Ar}^{13+}$ . Die fünf Elektronen in der Hülle bilden die Konfiguration  $1s^2 2s^2 2p_{1/2}$ . Der erste angeregte Zustand ist das Feinstrukturniveau  $^2P_{3/2}$ , das mit einer Lebensdauer von etwa 10 ms in den Grundzustand zerfällt. Nur in extrem gutem Vakuum lassen sich lange Speicherzeiten hochgeladener Ionen in der Paul-Falle und hohe Messgenauigkeiten erzielen. Da-

her wird die Fallenapparatur auf die Temperatur flüssigen Heliums (4 K) abgekühlt. Das Kryopumpen erlaubt einen Vakuumdruck von weniger als  $10^{-12}$  Pa, sodass die Speicherdauer des  $\text{Ar}^{13+}$ -Ions mehr als eine Stunde beträgt. Das  $\text{Ar}^{13+}$ -Ion wird in einer Elektronenstrahlionenfalle erzeugt und in die Paul-Falle (Abb. 1a) eingeschossen, wo es auf einen lasergekühlten  $\text{Be}^+$ -Ionenkristall trifft. Coulomb-Stöße mit den  $\text{Be}^+$ -Ionen kühlen das  $\text{Ar}^{13+}$ -Ion schnell ab; auf einem Gitterplatz im Ionenkristall erscheint es als dunkler Fleck, da es der Kühllaser mit 313 nm nicht anregt (Abb. 1b). Dann werden alle  $\text{Be}^+$ -Ionen bis auf eines durch die Anregung ihrer Schwingung aus der Falle entfernt (Abb. 1c). Die quantenlogische Laserspektroskopie an  $\text{Ar}^{13+}$  kann beginnen.

Ein stabiler Präzisionslaser mit einer Wellenlänge von 441 nm, der an einen optischen Frequenzkamm gekoppelt ist, regt den schmalen Übergang im Argon-Ion an. Der Frequenzkamm macht dabei optische Frequenzen messbar. Die Frequenzstabilität der neuen Atomuhr lässt sich durch einen Vergleich charakterisieren: Dazu dient eine andere optische Uhr, in der ein zweites Lasersystem einen Übergang im Ytterbium-Ion  $\text{Yb}^+$  spektroskopiert [5]. Die relative zeitliche Stabilität dieser beiden optischen Atomuhren ergibt sich über einen längeren Zeitraum aus dem

Verhältnis der beiden Übergangsfrequenzen. Die ersten Ergebnisse der Analyse der  $\text{Ar}^{13+}$ -Uhr im Vergleich zur  $\text{Yb}^+$ -Uhr sind vielversprechend: Nach einigen Stunden betragen die relativen Schwankungen der Uhrenfrequenzen lediglich  $3 \cdot 10^{-16}$  (Abb. 2). Unter sorgfältiger Berücksichtigung aller möglichen systematischen Fehlerquellen folgt der Schluss, dass für ausreichend lange Messzeiten und mit einfachen technischen Verbesserungen eine relative Unsicherheit einer optischen Atomuhr basierend auf hochgeladenen Ionen im Bereich von  $10^{-18}$  und darunter zu erwarten ist. Das entspricht Schwankungen von weniger als einer Sekunde über das Alter des Universums.

Das Forschungsteam hat anhand von Argon  $\text{Ar}^{13+}$  eindrucksvoll gezeigt, dass sich hochgeladene Ionen für eine optische Atomuhr bestens eignen. Nun möchte die Gruppe eine weitere Ionensorte untersuchen: hochgeladenes Kalzium  $\text{Ca}^{14+}$ . Ziel dabei ist es, Grenzen für die mögliche Existenz einer fünften Kraft zu setzen. Die starken Bindungskräfte in der verbleibenden Elektronenhülle eines hochgeladenen Ions sorgen dafür, dass die atomaren Übergangsfrequenzen eine geringe Empfindlichkeit auf äußere elektrische und magnetische Felder aufweisen, was systematische Fehlerquellen reduziert. Diese Situation treiben schwere hochgeladene Ionen wie wasserstoffartiges Blei  $\text{Pb}^{81+}$  auf die Spitze [2]. Solche Messungen befinden sich an der HITRAP-Anlage von GSI/FAIR in Darmstadt in Vorbereitung.



**Abb. 2** Nach einer Mittelungszeit von  $\tau \approx 30$  s verbessert sich die Instabilität des Frequenzverhältnisses  $R(^{36}\text{Ar}^{13+}) = \nu(^{36}\text{Ar}^{13+}) / \nu(\text{Yb}^+)$  der beiden Atomuhren basierend auf hochgeladenen Argon- bzw. einfach geladenen Ytterbium-Ionen gemäß  $\tau^{-1/2}$ . Der Fit (rot) an die Datenpunkte (blau) berücksichtigt Mittelungszeiten ab 300 Sekunden.

- [1] S. A. King et al., *Nature* **611**, 43 (2022)
- [2] S. Schiller, *Phys. Rev. Lett.* **98**, 180801 (2007)
- [3] J. Berengut et al., *Phys. Rev. Lett.* **105**, 120801 (2010)
- [4] J. Terrien, *Metrologia* **4**, 41 (1968)
- [5] R. Lange et al., *Phys. Rev. Lett.* **126**, 011102 (2021)

## Der Autor

**Priv.-Doz. Dr. Wolfgang Quint**, Abteilung Atom-, Quanten- und Fundamentalphysik, GSI Helmholtzzentrum für Schwerionenforschung, Planckstr. 1, 64291 Darmstadt