

Dr. Karsten Holl-dack, Dr. Godehard Wüstefeld, Berliner Elektronenspeicher-ring-Gesellschaft für Synchrotronstrahlung mbH (BESSY), Albert-Einstein-Str. 15, 12489 Berlin

ruht. Neu daran ist jedoch, dass in einem Speicherring ein sehr stabiler Strahlungsprozess unter kontrollierten Bedingungen eingestellt werden kann [3]. In einem besonderen Betriebsmodus werden dann  $10^4$ - bis  $10^5$ -fach stärkere kohärente THz-Intensitäten erzeugt als beim vergleichbaren inkohärenten Prozess. Im stabilen Modus wird etwa 1 mW mittlere Leistung in einen Raumwinkel von  $60 \times 40$  mrad emittiert. Da sich hierbei die Elektronenpakete weder in Länge noch in der Form ändern, ist die Strahlung zeitlich und räumlich stabil und sehr gut für spektroskopische Experimente geeignet.

Ein erstes Experiment mit der bei BESSY erzeugten THz-Strahlung wurde kürzlich erfolgreich am Infrarot-Messplatz IRIS [4] abgeschlossen. Dabei wurden Eigenschaften von Hochtemperatur-Supraleitern untersucht, die wesentlich zum Verständnis der Supraleitung sind, jedoch bisher der Messung nicht zugänglich waren.

Erhöht man die Zahl der Elektronen pro Paket, wächst zwar die THz-Intensität, doch bei Überschreiten eines Schwellenstroms führt dies zu einem instabilen Speichermodus der Elektronen und damit zu stark schwankenden („bursting“) THz-Intensitäten. An anderen Speicherringen, z. B. an der Advanced Light Source (ALS) in Berkeley (USA), konnten bisher nur „bursting“-Intensitäten erzeugt werden, ein Hinweis darauf, dass Länge und Form der Elektronenpakete nicht konstant sind [5]. Diese Strahlung eignet sich deshalb nicht für spektroskopische Experimente.

Die Arbeiten von Carr et al. sind ein Meilenstein für die Bereitstellung breitbandiger, intensiver THz-Strahlung. Weitere solche Quellen werden durch LINACs für Freielektronen-Laser zur Verfügung stehen (z.B. BESSY, Berlin, DESY, Hamburg, ELBE, Rossendorf) [6]. Während LINAC-basierte Quellen intensiver sind, ist die THz-Strahlung von Speicherringen geeigneter für spektroskopische Untersuchungen. An der ALS wird derzeit eigens ein Speicherring für die Erzeugung kohärenter THz-Strahlung geplant. Mit beiden Wegen lässt sich das „THz-Gap“ überwinden, und so sollte in der nahen Zukunft ausreichend THz-Strahlung für neue Einsatzfelder verfügbar sein.

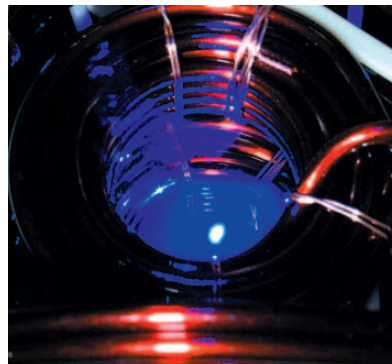
KARSTEN HOLLDAK UND  
GODEHARD WÜSTEFELD

- [1] H. Rubens, E.F. Nichols, Phys. Rev. **4**, 314 (1897)
- [2] G. L. Carr et al., Nature **420**, 153 (2002)
- [3] M. Abo-Bakr et al., Phys. Rev. Lett. **88**, 254801 (2002)
- [4] U. Schade et al., Rev. Sci. Instr. **73**(3), 1568 (2002)
- [5] J. M. Byrd et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 224801 (2002)
- [6] B. Faarz et al., DESY, FIR Coherent Radiation Workshop, Hamburg (2000)

## Kalzium als Taktgeber

**Atomuhren mit kalten Kalzium-Atomen können die Genauigkeit von Cäsium-Atomuhren innerhalb deutlich kürzerer Messzeit erreichen.**

Von den ausgefeilten Pendeluhr im 18. Jahrhundert, mit denen sich erstmals die geographische Länge auf See bestimmen ließ, bis zu den heutigen Cäsium-Atomuhren beruht der Fortschritt bei Zeit- und Frequenzstandards auf immer höheren Schwingungsfrequenzen: Höhere Frequenzen erlauben es, Zeitintervalle immer feiner zu unterteilen und damit die Zeit immer genauer



In dem Experiment zur Kalzium-Uhr befinden sich ca.  $10^8$  Kalzium-Atome in einer magneto-optischen Falle. Der hellblaue Fleck zeigt die Fluoreszenz der Atome (Foto: PTB)

zu messen. Die heute zur Realisierung der Sekunde herangezogenen Atomuhren benutzen einen Hyperfein-Übergang im Grundzustand von Cäsium als Taktgeber, bei einer Übergangsfrequenz von 9,2 GHz. Mit sog. Cäsium-Fontänenuhren werden dabei mittlerweile relative Genauigkeiten im Bereich von  $10^{-15}$  erzielt – dies entspricht einer Gangabweichung von 1 Sekunde in 30 Millionen Jahren. Um die Übergangsfrequenz mit einer derart geringen Unsicherheit zu bestimmen, muss das Anregungssignal allerdings über viele Stunden gemittelt werden. Jetzt hat eine Gruppe um

Jürgen Helmcke und Fritz Riehle an der Physikalisch-Technischen Bundesanstalt (PTB) in Braunschweig gezeigt [1], wie sich eine solche Genauigkeit mit einer um mehrere Größenordnungen höher liegenden Schwingungsfrequenz schon in erheblich kürzerer Zeit erzielen lässt, in Zukunft womöglich innerhalb des Bruchteils einer Sekunde.

Frequenzstandards werden einerseits durch ihre Genauigkeit, d. h. ihre systematische Unsicherheit, andererseits durch ihre Stabilität charakterisiert [2]. Die Genauigkeit beschreibt die Fehlergrenzen, innerhalb derer die Ausgangsfrequenz des Standards mit der ungestörten Übergangsfrequenz der verwendeten Atome übereinstimmt, die Stabilität hingegen die Schwankungen der Ausgangsfrequenz innerhalb eines gegebenen Zeitintervalls. Eine hohe Stabilität lässt sich insbesondere mit einer hohen atomaren Referenzfrequenz, einer schmalen Linienbreite des Übergangs, einem hohen Signal-zu-Rausch-Verhältnis bzw. einer langen Mittelungszeit  $\tau$  erzielen. Im Fall von quantenlimitiertem Rauschen nimmt die sog. Allan-Varianz, ein Maß für die Stabilität, mit  $\tau^{-1/2}$  ab, jedoch nur solange, bis sich innerhalb der Mittelungszeit zeitlich variable systematische Verschiebungen der Übergangsfrequenz bemerkbar machen, die auch die Genauigkeit begrenzen. Bei den im Experiment an der PTB verwendeten Kalziumatomen wird der  $^1S_0$ - $^3P_1$ -Übergang bei einer Wellenlänge von 657 nm (natürliche Linienbreite  $\gamma/2\pi = 320$  Hz) als Referenz verwendet. Die Übergangsfrequenz liegt hier um etwa einen Faktor  $10^5$  höher als bei den Cäsium-Atomuhren. Damit lässt sich prinzipiell – auch bei einer rund 1000-fach breiteren Resonanz – eine ähnliche Stabilität wie die des Mikrowellenstandards schon in sehr viel kürzerer Mittelungszeit erhalten. Bisher waren im Experiment die Stabilität und Genauigkeit allerdings durch die verbleibende Geschwindigkeit der Kalziumatome begrenzt. Durch eine neue Kühl- und Speichertechnik unter Verwendung des schmalbandigen  $^1S_0$ - $^3P_1$ -Übergangs ist es der Gruppe an der PTB jedoch kürzlich gelungen, die Temperatur der Atome um einen Faktor 200 zu reduzieren [3].

In dem Experiment werden Kalziumatome in einer magneto-optischen Falle (MOF) gespeichert und durch Doppler-Kühlung auf einige

Dr. habil. Joachim von Zanthier, Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans-Kopfermann-Str. 1, 85748 München

mK abgekühlt. Zur Abfrage des Referenzübergangs werden nach Abschalten der MOF die Atome im freien Fall durch jeweils zwei zeitlich aufeinanderfolgende Laserpulse geeigneter Intensität und Dauer aus entgegengesetzter Richtung auf dem  $^1S_0$ - $^3P_1$ -Übergang angeregt und die Fluoreszenz aus dem Zerfall des  $^3P_1$ -Niveaus registriert. Diese Art von Atominterferometer entspricht im Wesentlichen einem optischen Mach-Zehnder-Interferometer, wobei die zeitlich versetzten Laserpulse als Strahlteiler für die Atome fungieren. Die Phasenverschiebung zwischen den atomaren Teilstrahlen ergibt sich hier durch das Produkt aus der Zeitverzögerung zwischen den beiden Pulspaaren und der Laserverstimmung gegenüber der Resonanz, womit die Übergangsfrequenz bestimmt wird.

Für den Fall nicht vollständig parallel ausgerichteter Laserstrahlen und aufgrund von Wellenfrontkrümmungen werden in diesem Schema durch die verbleibende Geschwindigkeit der Atome allerdings zu verschiedenen Zeiten unterschiedliche lokale Phasen der Lichtstrahlen von den Atomen registriert, was zu einer Verschiebung des Interferenzsignals und damit zu einer größeren Frequenzunsicherheit führt. Zudem führt die Geschwindigkeit der Atome zu einer Doppler-Verbreiterung des Signals und einem reduzierten Kontrast, was sich negativ auf die Stabilität auswirkt.

Um die geschwindigkeitsabhängigen Effekte zu reduzieren, hat die PTB-Gruppe ein neues Speicher- und Kühlschema implementiert, bei dem die Doppler-Kühlung, die zunächst auf dem breiten  $^1S_0$ - $^1P_1$ -Übergang durchgeführt wird, anschließend auf dem schmalen  $^1S_0$ - $^3P_1$ -Übergang fortgesetzt wird [3]. Prinzipiell lassen sich auf derart schmalen Übergängen durch Doppler-Kühlung sehr tiefe Temperaturen (bis unterhalb des Photonenrückstoß-Limits) erzielen; allerdings sind die typischen Lichtkräfte durch die geringe Photonenstreurate kaum größer als die Gravitationskraft, sodass die Kühlung und magnetooptische Speicherung neutraler Atome auf solch schmalen Übergängen bisher nicht gelungen war. Die Gruppe an der PTB umging dieses Problem durch künstliche Verbreiterung des  $^3P_1$ -Zustands. Dazu wird der schmale  $^3P_1$ -Zustand mit Hilfe eines weiteren Lasers an ein höher gelegenes

Niveau mit großer natürlicher Linienebreite gekoppelt (sog. Quenching). Damit lassen sich Temperaturen von weniger als  $10 \mu\text{K}$  erzielen. Ähnlich niedrige Temperaturen sind mit einem analogen Kühlschema vor kurzem auch am amerikanischen NIST erhalten worden [4]. Durch die tiefe Temperatur und die damit einhergehende niedrige Driftgeschwindigkeit der Atome besitzt das Signal nun einen höheren Kontrast und ist nicht mehr durch den Doppler-Effekt begrenzt. Damit konnte das Signal-zu-Rausch-Verhältnis um einen Faktor 6 erhöht und eine Stabilität von  $5 \cdot 10^{-14}$  in einer Sekunde erreicht werden [1].

Der Theorie zufolge sollte sich dieser Wert sogar noch um drei Größenordnungen erhöhen lassen, auf  $4 \cdot 10^{-17}$  in einer Sekunde, falls u. a. ein hinreichend frequenzstabiler Laser für die Anregung zu Verfügung steht. Die tiefen Temperaturen wirken sich überdies auch auf die Genauigkeit des Standards aus. Durch die geringe Driftgeschwindigkeit wird die oben geschilderte Linienverschiebung auf 150 mHz begrenzt; der wesentliche Beitrag rührt von Stößen zwischen den Atomen her. Die insgesamt abgeschätzte relative Genauigkeit beträgt  $8 \cdot 10^{-16}$  und ist somit den derzeit besten Mikrowellenstandards und auch optischen Einzelionen-Frequenznormalen vergleichbar. Letztere haben, bei geringerer Stabilität in einer Sekunde aufgrund ihres kleineren Signal-zu-Rausch-Verhältnisses, allerdings das Potenzial einer Genauigkeit im Bereich von  $10^{-18}$  [2].

JOACHIM VON ZANTHIER

- [1] G. Wilpers et al., Phys. Rev. Lett. **89**, 230801 (2002)
- [2] Th. Becker et al., Physik Journal März 2002, S. 47
- [3] T. Binnewies et al., Phys. Rev. Lett. **87**, 123002 (2001)
- [4] E. A. Curtis et al., e-print physics/0208071 (2002)

## Atome im Kreisverkehr

**Mit mikrooptischen Zylinderlinsen lassen sich Leiter und Strahlteiler für Atome herstellen. Das Ziel sind miniaturisierte Atom-Interferometer.**

Die Interferometrie hat sich sowohl für die Grundlagenforschung als auch für technische Anwendungen als eine unentbehrliche Messtechnik erwiesen. Für einige Messun-