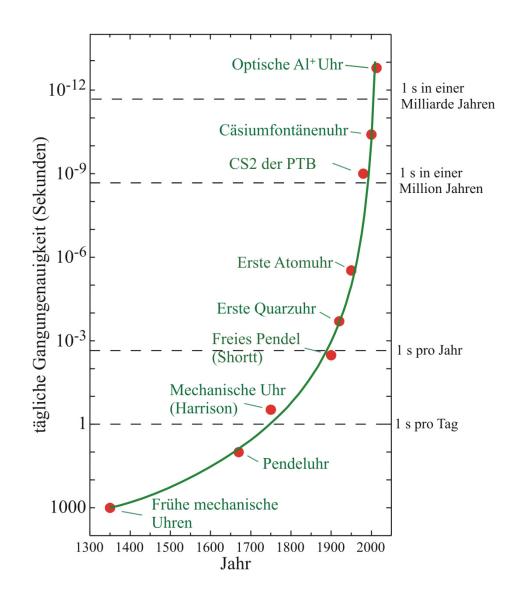


Optische Atomuhren

Entwicklung der Genauigkeit von Uhren

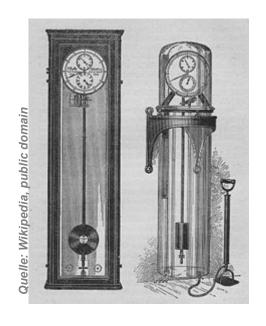


In den letzten Jahrhunderten wurde die Genauigkeit der Uhren von einigen Sekunden pro Tag zu einer Sekunde in mehreren Milliarden Jahren gesteigert. Diese Steigerung der Genauigkeit war nur durch den Einsatz neuer Technologien, die von mechanischen Uhren über Quarzuhren zu den Atomuhren reichte, möglich. Mit jedem neuen Technologieschritt ging eine Erhöhung der Frequenz des "Pendels" von Hz-Bereich (mech. Uhr) über den MHz-Bereich (Quarzuhr) zum GHz-Bereich (Atomuhr) einher. Eine weitere Erhöhung in den PHz-Bereich (10¹⁵ Hz) ist mit optischen Atomuhren möglich, bei dem mit einem Laser ein atomarer Übergang abgefragt wird.



Entwicklung der Genauigkeit von Uhren









Beispiele für Uhren: Präzisionspendeluhren, eine Quarzuhr (Funk) und eine kommerzielle transportable Uhr.

Vergleich der Periodendauer des Uhrenpendels (Frequenz = 1/Periodendauer):

Mechanisches Pendel 1 s

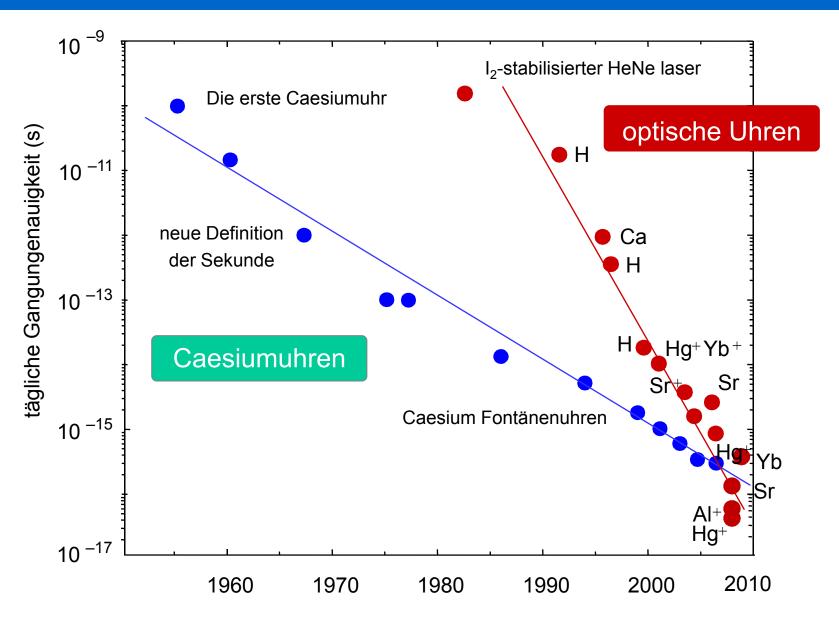
Quarz 0.000 001 s

Caesium Atomuhr 0.000 000 000 11 s

Optische Atomuhr 0.000 000 000 000 002 s

Entwicklung der Genauigkeit von Atomuhren

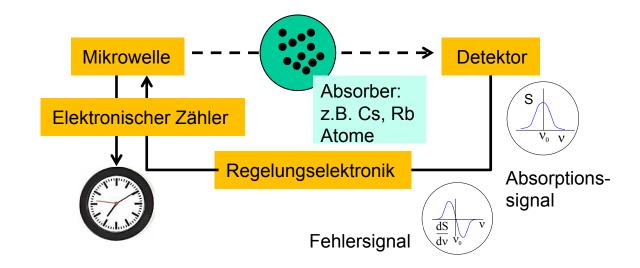




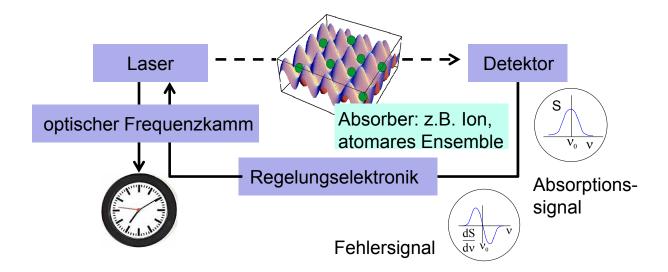
Prinzip einer Atomuhr



Schema: "klassische" Atomuhr.



Schema: optische Atomuhr.



Prinzip einer optischen Atomuhr (Folie 5)



- In einer "Falle" werden Absorber gespeichert, dies ist entweder ein einzelnes Ion (Einzelionenuhr, Folie 15) oder ein ganzes Ensemble vieler Atome (Gitteruhr, Folie 18). In der Falle werden die Absorber mit Hilfe von Laserkühlung auf einige Mikrokelvin gekühlt und sind praktisch in Ruhe (Folie 13, 14).
- Ein frequenzstabiler Laser regt die gekühlten Absorber mit Licht an. Der Absorber kann nur bestimmte Energien absorbieren, die den für das Medium spezifischen energetischen Übergängen entsprechen. Wenn sich die Energie des Laserlichtes der Übergangsenergie annähert, wird das Licht bereits teilweise absorbiert. Das Absorptionssignal erreicht ein Maximum, wenn die Frequenz genau der Übergangsfrequenz entspricht (Folien 10,11).
- Die detektierte Frequenz des Absorptionsübergangs im Absorber stellt eine Referenz für eine Uhr dar. Mit Hilfe eines Frequenzkammgenerators (siehe dazu Folie 21), kann diese Frequenz aus dem optischen Bereich in den Radio-Frequenzbereich (~ 200 MHz) übertragen werden, wo sie sehr genau zählbar ist und einen Sekundentakt generiert.

Primäre und sekundäre Realisierung der Sekunde



Wegen der höheren Frequenz einer optischen Atomuhr kann derer relative Genauigkeit verglichen mit Caesium-Atomuhren um eine bis zwei Größenordnungen besser sein.

Die Zeiteinheit, die Sekunde, ist durch einen Caesium-Übergang definiert:

"Die Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids ¹³³Cs entsprechenden Strahlung."

Quelle: BIPM (Bureau International des Poids et Mesures): Internationales Büro für Maß und Gewicht, 1967.

Damit kann eine Uhr, die auf einem anderen Übergang basiert, nicht genauer werden als die Caesium-Atomuhr.

Um die stabileren optischen Uhren auch für die Zeitmessung zu nutzen, wurde von Internationalen Büro für Maß und Gewicht eine sog. sekundäre Realisierung der Sekunde mit Hilfe von anderen Mikrowellen- und optischen Übergängen empfohlen.

Bislang können Einzelionen-Uhren mit Hg⁺, Yb⁺, Sr⁺ sowie auch die Sr-Gitteruhr für eine sekundäre Realisierung der Sekunde eingesetzt werden. Das ist ein Schritt hin zu einer künftigen Neudefinition der Sekunde.

Auf dem Weg zur Neudefinition der Sekunde



Im Jahr 2009 wurden vom CIPM (International Committee for Weights and Measures) die folgenden sekundären Realisierungen empfohlen:

Übergangsion	Übergangsfrequency [Hz]	Unsicherheit
⁸⁷ Sr	429 228 004 229 873.7	1 × 10 ⁻¹⁵
¹⁹⁹ Hg ⁺	1 064 721 609 899 145	3×10^{-15}
⁸⁸ Sr ⁺	444 779 044 095 484	7 × 10 ⁻¹⁵
¹⁷¹ Yb ⁺	688 358 979 309 308	9×10^{-15}
⁸⁷ Rb	6 834 682 610.904 324	3 × 10 ⁻¹⁵

Quellen:

Procès-Verbaux des Séances du Comité international des Poids et Mesures, 95th meeting (2006) 2007, RECOMMENDATION 1 (CI-2006): Updates to the list of standard frequencies, page 249 -250; Procès-Verbaux des Séances du Comité international des Poids et Mesures, 98th meeting (2009) 2010, RECOMMENDATION 2 (CI-2009): Updates to the list of standard frequencies, page 235; http://www.bipm.org/en/committees/cipm/publications_cc.html http://www.bipm.org/en/publications/mep.html

Anhang

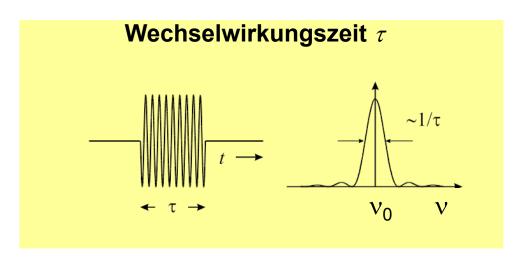


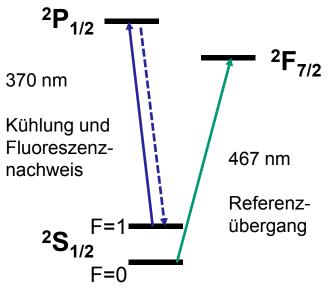
- Uhrenübergang
- Detektion über Quantensprünge
- Uhrenübergang und seine Detektion
- Laserkühlung
- Eine Falle für einzelne lonen
- Eine Falle f
 ür neutrale Atome
- Speicherung von Atomen im optischen Gitter
- Magneto-optische Falle f
 ür neutrale Atome
- Bestimmung der Referenz-Frequenz: Frequenzkamm
- Wofür braucht man zukünftig noch genauere Uhren?
- Weiterführende Literatur: Optische Atomuhren.

Uhrenübergang



Für optische Atomuhren sind Systeme geeignet, die einen physikalisch schwach erlaubten Übergang als Referenz-Übergang der Uhr aufweisen (z.B. Bild links, grüner Pfeil). Solche energetisch angeregten Zustände "leben" lange (Millisekunden bis Sekunden), können also in dieser Zeit lange mit Licht wechselwirken.





Vereinfachtes Energie-Niveauschema des ¹⁷¹Yb⁺ Ions.

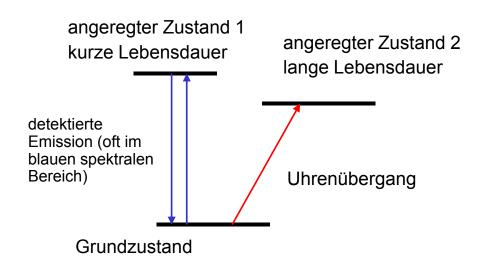
Je länger die Wechselwirkungszeit τ ist, desto genauer kann die Frequenz ν eines Atomüberganges bestimmt werden.

Die gemessene Frequenzlinie ist immer verbreitert, wobei die Verbreiterung $\Delta v \sim 1/\tau$ ist, d.h. eine längere Wechselwirkungszeit τ führt zu einer kleineren Linienbreite und damit zu besserer Stabilität. Beispiel: 1 ms Wechselwirkungszeit ergibt etwa eine kHz Linienbreite, 1 s Wechselwirkungszeit ergibt etwa ein Hertz Linienbreite.

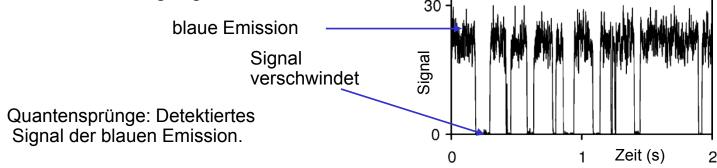
Detektion über Quantensprünge



Wie detektiert man, dass das Atom (Ion) in den angeregten Zustand 2 übergegangen ist (Uhrenübergang)?

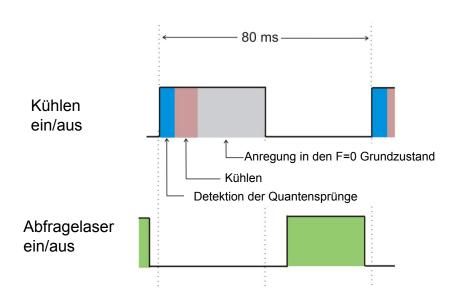


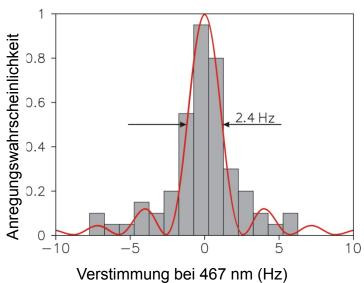
Dazu wird das kurzlebige Niveau (Zustand 1) angeregt und dessen Emission detektiert. Mit einer kleinen zeitlichen Verschiebung (Messzyklus - siehe Folie 12) wird der Uhrenübergang des Atoms mit dem Abfragelaser bestrahlt, wobei die Anregungsfrequenz durchgestimmt wird. Wenn beide Anregungsenergien jeweils in Resonanz mit den Atomniveaus sind, stehen die Anregungsprozesse in Konkurrenz zueinander. Aus dem Verschwinden des Signals der Emission aus dem kurzlebigen Niveau (Zustand 1) schließt man, dass das abzufragende, langlebige Niveau (Zustand 2) besetzt worden ist. Die Frequenz des Abfragelasers entspricht dann dem Uhrenübergang.



Uhrenübergang und seine Detektion







Schema (Beispiel) für den zeitlichen Ablauf eines Messzyklus' im optischen ¹⁷¹Yb⁺-Frequenznormal.

Beobachtetes Resonanzsignal bei der Anregung eines gespeicherten ¹⁷¹Yb⁺-Ions auf dem Referenz-Übergang $({}^{2}S_{1/2} - {}^{2}F_{7/2})$. Die Resonanzbreite wird bestimmt durch die Länge der Probelaser-Pulse (300 ms). Jeder Messpunkt entspricht einer Mittelung über 20 Messzyklen.

Laserkühlung



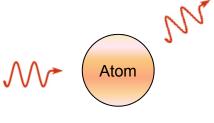
Um Atome speichern zu können, müssen sie auf eine Temperatur im Bereich von einigen µK gekühlt werden. Das geschieht üblicherweise mit Laserkühlung, für deren Entwicklung 1997 ein Nobelpreis verliehen wurde.

Das Prinzip der Laserkühlung basiert auf der Abbremsung der Atome durch Rückstöße mit dem Laserlicht.

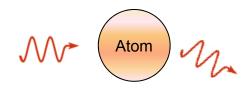
Die Geschwindigkeit der Atome wird durch einen Impulsübertrag aus dem Laserlicht verringert. Der Impulsübertrag erfolgt immer, wenn ein Photon von einem Atom absorbiert oder emittiert wird.

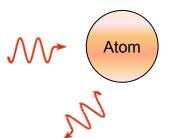
Während bei der Absorption der Rückstoß, den das Atom erfährt, immer in Richtung des Laserstrahles geschieht, erfolgt die Emission ungerichtet in alle Raumrichtungen.

Über viele Absorptions- und Emissionsprozesse gemittelt wird jeweils der Impuls des Photons auf das Atom übertragen.



Photon aus dem Laserstrahl wird von Atom absorbiert





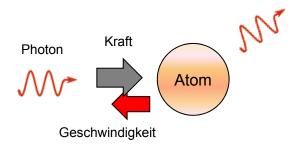
ein spontan emittiertes Photon wird in beliebige Richtung abgestrahlt

Laserkühlung



Bei der Absorption nutzt man aus, dass Atome, die sich auf die Quelle zubewegen, eine kleinere Übergangsfrequenz besitzen als ruhende Atome (Dopplereffekt). Wenn Laserlicht dieser verschobenen Frequenz eingestrahlt wird, dann absorbieren vorzugsweise Atome, die sich auf die Quelle zubewegen.

Da der übertragene Impuls der Bewegungsrichtung entgegengesetzt ist, erfahren sie dadurch eine Abbremsung. Dabei wird die Temperatur der Atome reduziert. Photon höherer Energie wird ausgestrahlt



Atom wird abgebremst

Ein praktischer Aufbau erfolgt in alle drei Raumrichtungen mit zwei Lasern in jeweils entgegen gesetzter Richtung. Damit werden alle Atome, die sich in einer Vakuumzelle befinden, stufenweise abgebremst und abgekühlt (Abbildung Folie 20, MOT).

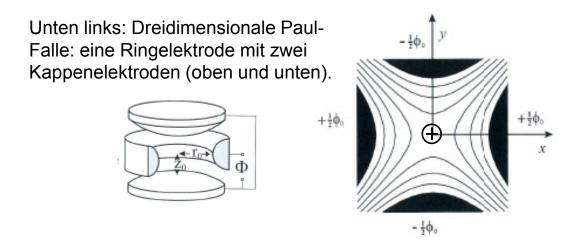
Eine Falle für einzelne lonen



Ionen (geladene Teilchen) können in einem elektromagnetischen Feld gefangen und "gespeichert" werden. Die Herstellung der Ionen erfolgt durch die Ionisation von Atomen (in Fallenbereich durch Elektronenstoßanregung oder durch Photoionisation). Danach werden die Ionen durch Laserkühlung abgekühlt. Ein elektrisches Wechselfeld baut ein dreidimensionales Potential auf, um die Bewegung der Ionen einzuschränken ("Paul-Falle", Nobelpreis 1989).



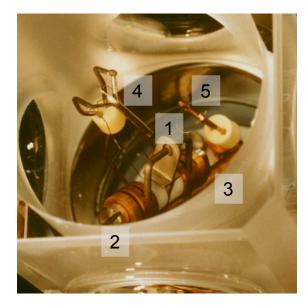
Wolfgang Paul (1913-1993), ein deutscher Physiker, erhielt 1989 den Nobelpreis (u.a. für die Entwicklung einer nach ihm benannten Ionen-Falle).



Rechts: Schema einer Paul-Falle mit einem positiv geladenem Teilchen. Das elektrische Feld wird durch einen Quadrupol aus Endkappen (oben und unten) und Ringelektrode (links und rechts) erzeugt. Die periodischen Wechsel der Spannung mit positiver und negativer Ladung an den Endkappen halten das ionisierte Teilchen in der Mitte des Feldes.

Eine Falle für einzelne lonen

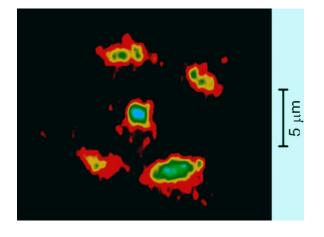






Vergrößerung der Ringelektrode 1 mit zwei Kappenelektroden (oben und unten).

Auf den Fotos ist die in den PTB-Experimenten verwendete Ionenfalle zu sehen. In der Bildmitte links sind die Ringelektrode 1 (Durchmesser 1,3 mm) und die zwei Kappenelektroden (2,3) zur Erzeugung des Quadrupol-Fallenfeldes zu erkennen. Außerdem sieht man einen mit Ytterbium gefüllten Ofen (4, Metallrohr, links) und die Elektronenquelle 5 (Glühdraht, rechts oberhalb der Falle). Alles befindet sich in einer Vakuumkammer.



Unten rechts: Fluoreszenzemission von fünf lasergekühlten ¹⁷²Yb-Ionen. Zur Kontrasterhöhung wurde die Helligkeitsinformation des Kamerabildes in eine Farbdarstellung umgewandelt (rot: niedrige Helligkeit; blau: große Helligkeit).

Nur ein Ion befindet sich im Zentrum der Ionenfalle, wo das elektromagnetische Feld verschwindet. Die gegenseitige Abstoßung der Atome führt dazu, dass die anderen Ionen weiter außerhalb sind. In dieser Art der Falle wird daher für optische Uhren nur ein einzelnes Ion gespeichert, damit keine Frequenzverschiebungen auftreten.

Eine Falle für neutrale Atome



Zur Speicherung von neutralen Atomen nutzt man aus, dass sich im elektrischen Feld deren positive Ladung (Atomkern) und die negative Elektronenladung verschieben (das Atom wird polarisiert). In einem elektrischen inhomogenen Feld wirkt auf polarisierte Atome eine Kraft ($F = \alpha E^2$, E: elektrische Feldstärke, α : Polarisierbarkeit).

Auf ein Objekt, das sich im Fokus eines Laserstrahles befindet, wirken starke elektromagnetische Felder. Das Prinzip wird auch in der sog. optischen Pinzette, die ein fokussierter Laserstrahl darstellt, ausgenutzt. Damit können kleine Teilchen, wie z.B. mikroskopische biologische Objekte, unter einem Mikroskop festgehalten bzw. bewegt werden.

Besonders stark ist der Effekt in abwechselnd abfallenden und ansteigenden elektrischem Potential, das sich in einer Stehwelle aufbaut. Eine Stehwelle kann durch Interferenz von Laserstrahlen erzeugt werden.



Eindimensionales optisches Gitter: eine Stehwelle.

$$E = E_0 \cos(\omega t - kz) + E_0 \cos(\omega t + kz)$$

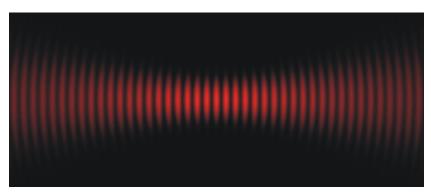
= $2E_0 \cos(kz) \cos(\omega t)$

Speicherung von Atomen im optischen Gitter

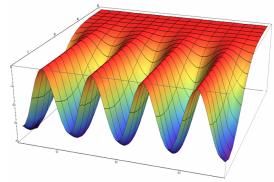


Neutrale Atome, die für eine optische Atomuhr geeignet sind, wie z.B. Sr, werden in einer magneto-optischer Falle gekühlt und gehalten (Folie 20) und danach in einem optischen Gitter gefangen. Durch Interferenz mehrerer Laserstrahlen wird ein Stehwellenfeld erzeugt, wo sich Bereiche minimaler und maximaler Intensität abwechseln.

Die Atome werden in den Potentialminima gespeichert, die im Bereich der höchsten Intensität der Stehwelle liegen, dies ist ein ca.150 µm ausgedehnter Bereich.



Das einfachste optische Gitter entsteht in einem in sich zurückreflektierten Laserstrahl.



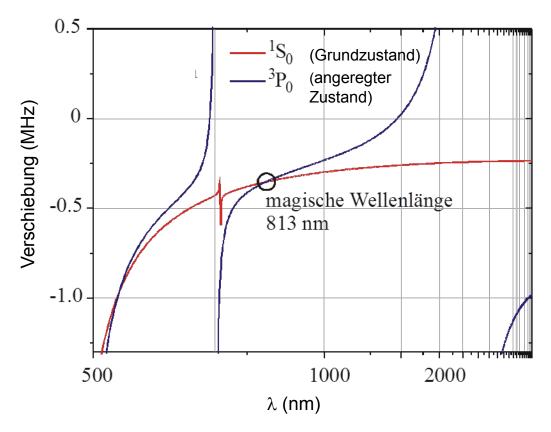
Darstellung des Potentialverlaufes in einer stehenden Welle.

Typische Potentialtiefen entsprechen einer Temperatur von ca. 100 μK, d.h. die Atome müssen vor dem Einfang per Laser stark abgekühlt werden. Stöße mit anderen Molekülen stoßen die Atome aus dem Gitter. Deswegen benötigt man als Umgebung ein Ultrahochvakuum. Die Speicherzeit der Atome beträgt typischerweise einige Sekunden.

Speicherung von Atomen im optischen Gitter



Das starke Lichtfeld des Gitterlasers verschiebt die atomaren Niveaus und führt damit auch zu einer Verschiebung des Uhrenübergangs. Bei der sog. "magischen Wellenlänge" ist die Verschiebung für den angeregten und den Grundzustand genau gleich - dann können die Atome gefangen werden, ohne dass die Frequenz des Uhrenübergangs gestört wird.



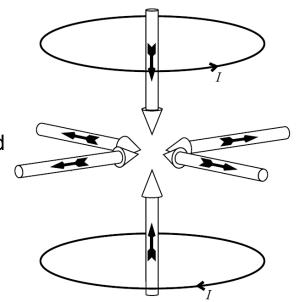
Verschiebung der beiden Energieniveaus des Referenzübergangs einer Sr-Gitteruhr als Funktion der Wellenlänge des Fallenlasers.

Magneto-optische Falle für neutrale Atome

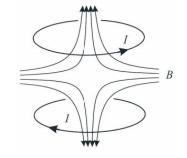


Die Laserkühlung und Speicherung von mehreren neutralen Atomen erfolgt oft zusammen in einer magnetooptischen Falle (MOT). Die Atome werden nach dem Laserkühlungsprinzip durch drei orthogonale Paare von Laserstrahlen, die sich im Zentrum kreuzen, abgekühlt (Bild links, die Pfeile symbolisieren Laserlichtrichtungen).

Die Falle befindet sich im Vakuum. Ein Spulenpaar (1,2) (Anti-Helmholz-Spulen) erzeugt ein inhomogenes magnetisches Feld, dessen Wert in der Mitte der Falle verschwindet und entlang der Achsen zunimmt.



Oben: Schema einer MOT; links: schematischer Verlauf der magnetisches Feldlinien *B* zwischen zwei Spulen mit den Strömen in Gegenrichtung.



Das Magnetfeld wechselwirkt mit dem magnetischen Moment des Atoms und bewirkt eine ortsabhängige Verschiebung der Atomniveaus (sog. Zeeman-Aufspaltung, proportional zum Magnetfeld). Wenn die Frequenz der Laserstrahlen mit geeigneter Polarisation rot verschoben ist, werden die Atome gekühlt und durch die nach außen ansteigende Kraft in die Mitte der Falle verschoben.

Bestimmung der Referenz-Frequenz: Frequenzkamm



Um eine Frequenz, die im optischen Bereich liegt, in einen elektronisch "zählbaren" Frequenzbereich zu übertragen, verwendet man einen sog. Frequenzkamm. Das Frequenzspektrum eines Femtosekundenlasers (mit phasenkorrelierten Impulsen) besteht aus scharfen Linien mit einem konstanten Frequenzabstand (wie "Zinken" eines "Kammes"): $f_{\rm m} = m \cdot f_{\rm rep} + f_{\rm CEO}$.

Wenn m und $f_{\rm rep}$ (Pulswiederholrate) bekannt sind (m ist interferometrisch messbar) und $f_{\rm CEO}$ ("Schlupffrequenz") gemessen wird, ist die Frequenz jeder optischer Linie

des Kammes bekannt.

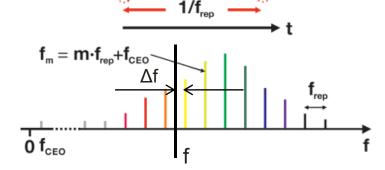


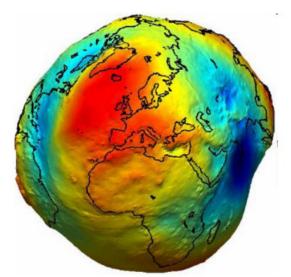
Bild rechts: Pulsfolge eines Femtosekundenlasers (oben) und dazugehöriges Frequenzspektrum (unten).

Der zu vermessende Lichtstrahl einer unbekannten Frequenz f (z. B. Uhrenfrequenz) lässt man mit dem Spektrum eines Frequenzkammes interferieren. Es bildet sich dann eine Schwebung zwischen dem Licht unbekannter Frequenz und einer Kammlinie mit bekannter Frequenz. Aus der Schwebungsfrequenz und der Kammlinienfrequenz lässt sich dann die gesuchte Frequenz bestimmen.

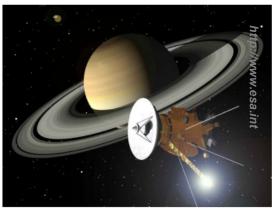
Wofür braucht man zukünftig noch genauere Uhren (I)?



- Kontrolle und Referenz für primäre Cs-Atomuhren;
- bessere Satellitennavigation und Satellitenpositionierung, hochgenaue Verfolgung von Raumsonden;
- astronomische Beobachtungen, z. B. Bestimmung der Periodendauer von Pulsaren;
- Experimente zu den Grundlagen der Physik, wie z.B.:
 - Messung von Naturkonstanten;
 - Test der speziellen und allgemeinen Relativitätstheorie;
- zukünftige relativistische Geodäsie mit cm-Genauigkeit.



http://www.esa.int



Gravitationsfeldpotential der Erde in Falschfarbendarstellung: blau – Bereiche stärkeren Gravitationsfeldes, rot – Bereiche schwächeren Gravitationsfeldes.

Wofür braucht man zukünftig noch genauere Uhren (II)?



Aus der allgemeinen Relativitätstheorie folgt, das der relative Frequenzunterschied $(\Delta v/v)$ von Uhren, die sich auf verschiedener Höhe befinden, von der Höhendifferenz h abhängig ist:

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{gh}{c^2}$$

g ist die Schwerebeschleunigung (\sim 9,81 m/s²), c ist die Lichtgeschwindigkeit (299 792 458 m/s).

Eine Höhendifferenz von 1 Meter verursacht damit eine relative Frequenzverschiebung $\Delta v/v$ von etwa 1·10⁻¹⁶.

Diese Tatsache wurde schon bei Tests der Relativitätstheorie ausgenutzt (Experimente zur Rotverschiebung). Beispielweise ergibt eine Höhendifferenz von etwa 1600 m (zwischen PTB, Braunschweig und NIST, Boulder, USA) eine relative Frequenzverschiebung von etwa 1,8·10⁻¹³. Der Vergleich der Frequenz der genauen Uhren in diesen zwei metrologischen Institutionen bestätigt die Gültigkeit der Theorie.

Uhren, die auf 10⁻¹⁷– 10⁻¹⁸ genau wären, könnten zukünftig Potentialunterschiede "aufspüren", die Höhenunterschieden im cm-Bereich entsprechen, d.h. damit könnte man die Erde und ihr Gravitationsfeld sehr genau vermessen.

Weiterführende Literatur: Optische Atomuhren



Mehr Informationen unter: www.ptb.de

- Ein Beitrag in PTB Mitteilungen 119 (2009), 2, Themenschwerpunkt: QUEST; Seite 123: E. Peik and U. Sterr "Optische Uhren" http://www.ptb.de/cms/fileadmin/internet/publikationen/mitteilungen/2009/PTB-Mitteilungen_2009_Heft_2.pdf
- Abteilung Optik, Fachbereiche: Zeit und Frequenz; Quantenoptik und Längeneinheit; http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt4.html,
- Abteilung Optik, QUEST Gruppe der PTB: Centre for Quantum Engineering and Space-Time Research; http://www.quantummetrology.de/quest/index.php?id=home
- Abteilung Optik, Messtechnik: Von der Forschung zur Anwendung in Beispielen: Präsentation "Wie funktioniert eine Atomuhr?" http://www.ptb.de/cms/fachabteilungen/abt4/messtechnik-vonder-forschung-zur-anwendung-in-beispielen.html#c44119 und die weiterführende Literatur dazu.

Andere Quellen:

- F. Riehle: Frequency Standards: Basic and Applications, Wiley-VCH, Weinheim (2004), ISBN: 3527402306.
- D. Meschede: Optik, Licht und Laser, Vieweg + Teubner in GWV Fachverlage GmbH (2005), ISBN:
 3519132486
- Vortrag von Nobelpreisträger W. Paul, 1989,
 http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1989/paul-lecture.pdf
- Der Frequenzkamm: Vortrag von Nobelpreisträger T. W. Hänsch; 2005,
 http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2005/hansch-lecture.pdf
- Laserkühlung: http://www.mpq.mpg.de/bec-anschaulich/html/laserkuhlung.html
- Optische Pinzette: http://psi.physik.kit.edu/182.php





Foto: Wächtergruppe von Friedrich-Wilhelm Voswinkel (1982) am Eingang der PTB, Braunschweig.

Physikalisch-Technische Bundesanstalt PTB Bundesallee 100 38116 Braunschweig http://www.ptb.de Abteilung 4 - Optik,

Sekretariat: Tel.: (05 31) 592-40 11

E-Mail: Abteilung4@ptb.de