

FOCS-1: Das Primärfrequenznormal von METAS

Einleitung

Die Masseinheit für Zeitintervalle im Internationalen Einheitensystem (SI) ist die Sekunde. Bis 1967 basierte die Definition der Sekunde auf astronomischen Beobachtungen und somit mindestens vom Prinzip her einfach nachvollziehbar. Die aktuelle Definition scheint weniger zugänglich:

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

Im folgenden Artikel soll das Prinzip eines Cäsium-Frequenznormal und die Realisierung der Sekunde kurz erläutert werden.

Prinzip

Funktionsweise eines Frequenznormal

Das Grundprinzip eines Frequenznormal ist in Figur 1 dargestellt.

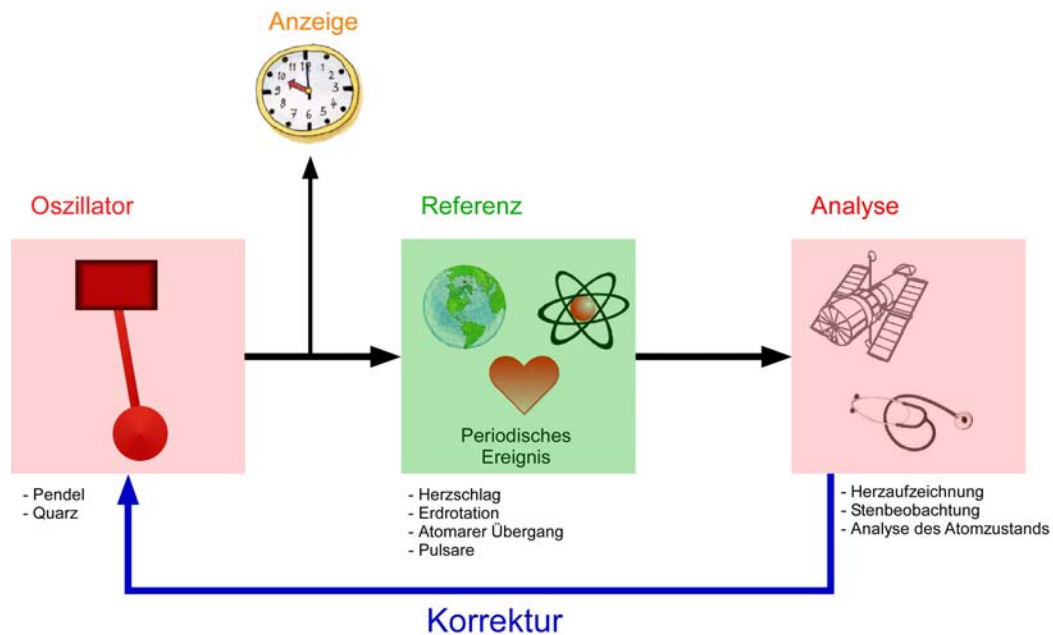


Fig. 1: Grundprinzip eines Frequenznormal

Jede Uhr enthält in irgendeiner Form ein Oszillator, der ein regelmässiges Ereignis stetig wiederholt. Als Oszillator kann etwa ein mechanisches Pendel oder ein Quarz-Kristall verwendet werden. Damit verschiedene Uhren mit der gleichen Geschwindigkeit voranschreiten, muss der Oszillator auf eine Referenz abgestimmt werden. Als Referenz eignet sich theoretisch jedes periodische Ereignis, wie etwa die Erdrotation oder andere astronomische Begebenheiten. Wichtige Kriterien für die Auswahl einer guten Referenz sind einerseits die allgemeine Verfügbarkeit und andererseits eine höchstmögliche Stabilität über die Zeit.

Um den Oszillator der Uhr mit der Referenz abzustimmen, werden die beiden in einem Experiment, das je nach Referenz verschieden ausfallen kann, verglichen und schliesslich die Frequenz des Oszillators korrigiert.

Atomare Übergänge als Referenz

Gemäss der heute gültigen Definition der Sekunde wird ein atomarer Übergang als Referenz verwendet. Wie kann ein Atom als Referenz eingesetzt werden?

Für die folgende Beschreibung wird angenommen, dass ein Atom zwei innere Zustände annehmen kann, die mit a und b bezeichnet werden. Wird ein Atom, das vorgängig im Zustand a vorbereitet wurde, während einer bestimmten Zeit einem Mikrowellenfeld ausgesetzt, so ist die Wahrscheinlichkeit, dass das Atom in den Zustand b übergeht eine Funktion der Mikrowellenfrequenz. Bei korrekter Wahl der Parameter ist die Wahrscheinlichkeit des Übergangs maximal, falls die Frequenz der Mikrowelle genau jener des Übergangs entspricht. Man spricht von der Eigenfrequenz der Atome. Figur 2 illustriert einen solchen atomaren Übergang (2a) und die Übergangswahrscheinlichkeit als Funktion der Mikrowellenfrequenz (2b).

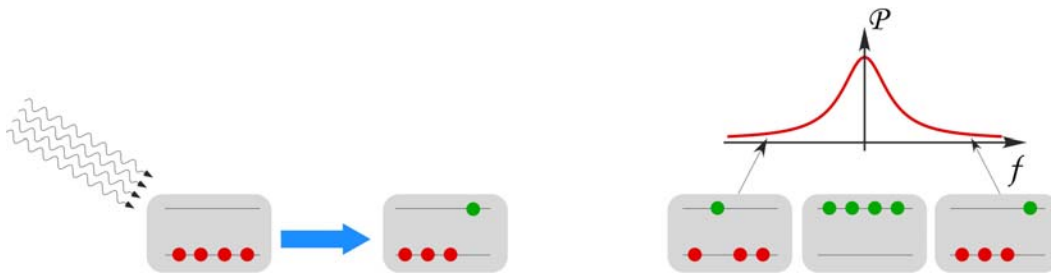


Fig. 2 a)

Vereinfacht funktioniert somit ein Frequenznormal wie folgt:

- Vorbereiten der Atome in einem der beiden Grundzustände
- Interaktion der Atome mit dem Mikrowellenfeld
- Abfragen der Atome, ob der Übergang stattgefunden hat oder nicht
- Korrektur der Frequenz des Mikrowellenfeldes
- Wiederholen des Vorgangs, bis alle Atome den Übergang vollziehen

Verlängerung der Beobachtungszeit

Vereinfacht ausgedrückt kann die Eigenfrequenz umso besser bestimmt werden, je länger das Atom dem Experimentator zur Verfügung steht. Die thermische Bewegung der Atome bei Raumtemperatur limitiert aber die Zeit, während welcher die oben beschriebenen Schritte durchgeführt werden können. So haben etwa Cäsiumatome bei Raumtemperatur Geschwindigkeiten von über 100 m/s. Aus diesem Grund werden seit den 90-er Jahren Frequenznormale gebaut, in denen die Atome mittels Laserstrahlen abgebremst werden. Die so abgebremsten Atome gehorchen einer Geschwindigkeitsverteilung, die einer Temperatur nahe beim absoluten Nullpunkt entspricht und man spricht deshalb oft von Laserkühlung. Wie funktioniert Laserkühlung?

Wird ein Atom mit einem Lichtquant (Photon) von genau definierter Frequenz bestrahlt, kann das Atom dieses Photon absorbieren, was zu einer Impulsänderung des Atoms führt. Zusätzlich wird das Atom in einen angeregten Zustand gebracht, den es allerdings nur sehr kurze Zeit beibehält (typischerweise 60 ns), bevor es unter Abstrahlung eines Photons wieder in den Grundzustand zurückkehrt. Während die absorbierten Photonen alle aus derselben Richtung kommen, findet das Abstrahlen mit gleicher Wahrscheinlichkeit in alle Richtungen des Raumes statt. Im Mittel ist somit die Impulsänderung über mehrere Abstrahlungsvorgänge gleich Null, was für die Impulsänderung über mehrere Absorptionsvorgänge nicht der Fall ist. Ein Impulstransfer vom Licht auf die Atome ist das Resultat (mechanischer Effekt des Lichtes). Pro Absorptions-Emissionszyklus reduziert sich die Geschwindigkeit des Cäsiumatoms um etwa 3.5 mm/s. Wird nun dasselbe Prinzip in allen drei Dimensionen des Raumes angewandt, so ist es im

Schnittpunkt der verschiedenen Laserstrahlen möglich, eine Wolke von Cäsiumatomen auf wenige μK abzukühlen.

Die hier beschriebenen Vorgänge sind unter dem Namen "Doppler-Kühlung" bekannt und erlauben einen theoretischen Tiefstwert von $125 \mu\text{K}$ für die Temperatur der Cäsiumatome. Sehr schnell wurde jedoch gezeigt, dass dieser Wert unterboten werden kann. Die theoretischen Grundlagen für das "Sub-Doppler-Cooling" wurden von einem der drei 1997 ausgezeichneten Nobelpreisträger (C. Cohen Tannoudji) 1989 veröffentlicht.

Aufbau des Primärfrequenznormals FOCS-1

In einer langjährigen Zusammenarbeit mit dem Observatorium Neuenburg hat METAS ein Primärfrequenznormal entwickelt. In diesem wird als weltweit einziges Gerät ein kontinuierlicher Strahl von lasergekühlten Cäsiumatomen benutzt, um einen externen Oszillator auf die Eigenfrequenz des atomaren Übergangs abzustimmen. Wie die Geometrie des Atomstrahles es suggeriert spricht man von einem Springbrunnen (oder franz. Fontaine). FOCS-1 steht somit für **F**ontaine **C**ontinue **S**uisse.

Figur 3 zeigt einen Schnitt durch das Vakuumsystem, in dem die Cäsiumatome abgetastet werden.

Kalte Atome werden in der linken Hälfte des untern Teil des Vakuumsystems (1) vorbereitet. Hier werden Cäsiumatome verdampft, die als thermisches Gas diesen Teil füllen. Durchkreuzen solche thermische Atome den Schnittpunkt (3) der 6 Laserstrahlen (2), so werden sie stark abgebremst. Gleichzeitig wird ihnen eine vertikale Geschwindigkeit von ca. 3.8 m/s gegeben, wodurch die Atome auf einen Parabelflug (5) geschickt werden. Während dem Parabelflug durchqueren die Atome die Mikrowellenkavität (4) in die durch Koaxialkabel (6) die Mikrowelle eingespiessen wird. Schliesslich wird der Zustand der Atome am Ende des Parabelfluges optisch detektiert (8). Um die Störung der Atome durch magnetische Variationen in der Interaktionsregion zu eliminieren, ist die Region oberhalb der Mikrowellenkavität mit drei konzentrischen Magnetabschirmungen (7) geschützt.

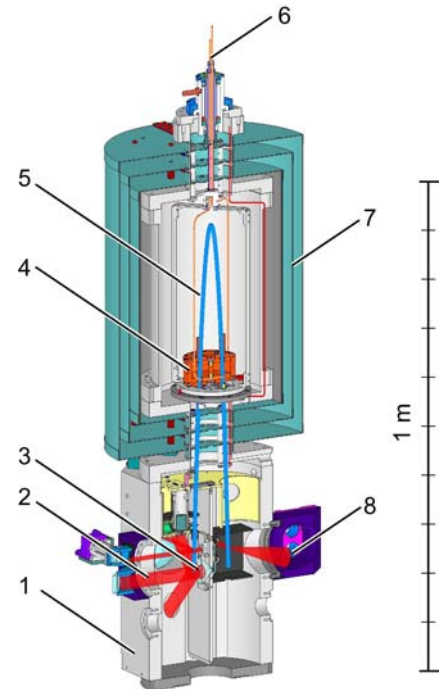


Fig 3: Schnitt durch den Resonator von FOCS-1

Bild FOCS-1

Projektverlauf

Die ersten kalten Atome wurden in Neuenburg im Jahr 1993 beobachtet. Seither ist das Abkühlen von 100 Mio Atomen auf einige Mikrokkelvin zur Routine geworden. 1996 wurde gezeigt, dass es möglich ist, die Atome gleichzeitig zu kühlen und als kontinuierlichen Strahl vertikal abzuwerfen.

1998 wurde am Observatorium mit dem Design und dem Aufbau von FOCS-1 begonnen. Ende 2000 war das Gerät in den wesentlichen Teilen fertig gestellt und erste Messungen konnten durchgeführt werden. Im April 2003 wurde Primärfrequenznormal – eigentlich ein ganzes Labor ans METAS überführt, wo es nun evaluiert werden soll.

Fig. 4: Bild des Primärfrequenznormals im Labor von METAS

Resultate

Ramsey-Fringes

Die Methode zur Abtastung der Atome durch zwei getrennte Interaktionsregionen wurde in den 50-er Jahren durch N. Ramsey vorgeschlagen. Wird die Mikrowellenfrequenz durchgestimmt erhält man bei dieser Methode die typischen Ramsey-Fringes. Figur 5 zeigt solche Ramsey-Fringes, wie sie mit FOCS-1 aufgezeichnet wurden. Auf der horizontalen Achse ist die Verstimmung der Mikrowellenfrequenz gegenüber der Eigenfrequenz der Atome in Hertz, in der vertikalen Richtung die Wahrscheinlichkeit des atomaren Übergangs aufgetragen (Einheit nicht bestimmt).

Die verschiedenen Maxima im untern Teil der Grafik entsprechen den einzelnen Übergängen $\Delta m_F = 0$ für die verschiedenen Zeeman-Unterniveaus. Der obere Teil der Grafik ist ein Zoom zum Übergang $m_F = 0$; $\Delta m_F = 0$, der der Definition der Sekunde zu Grunde liegt.

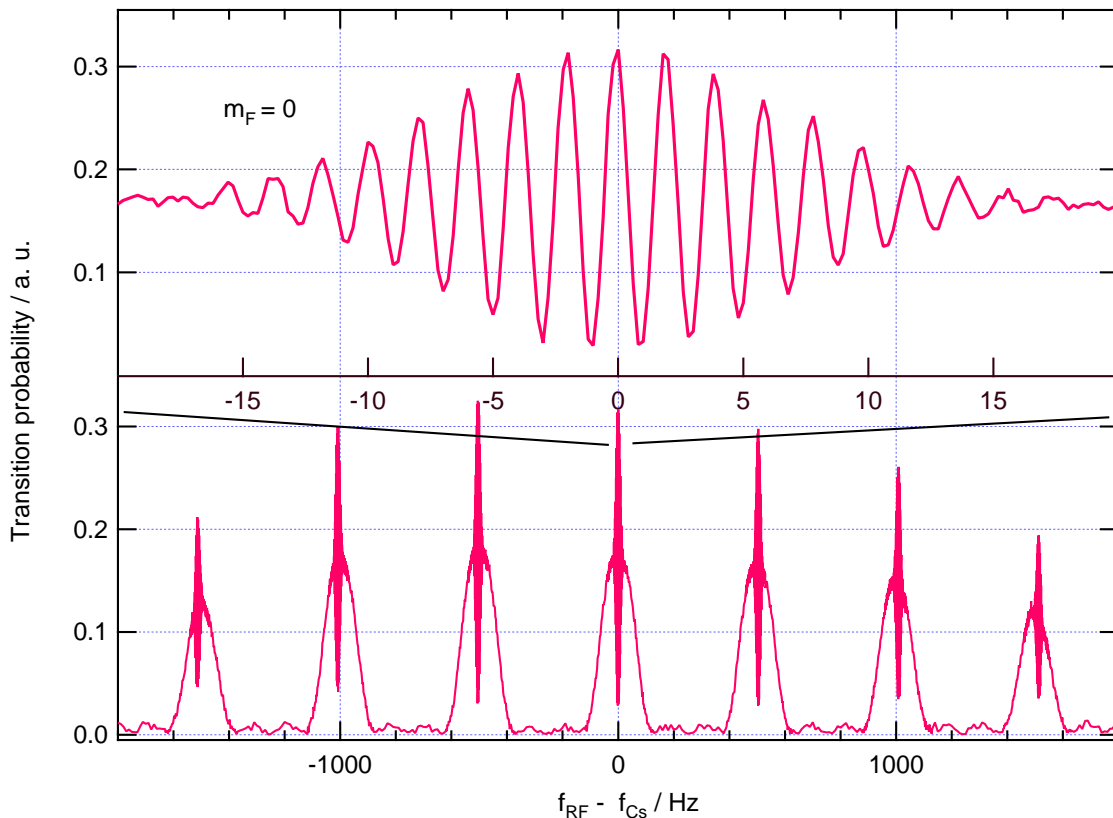


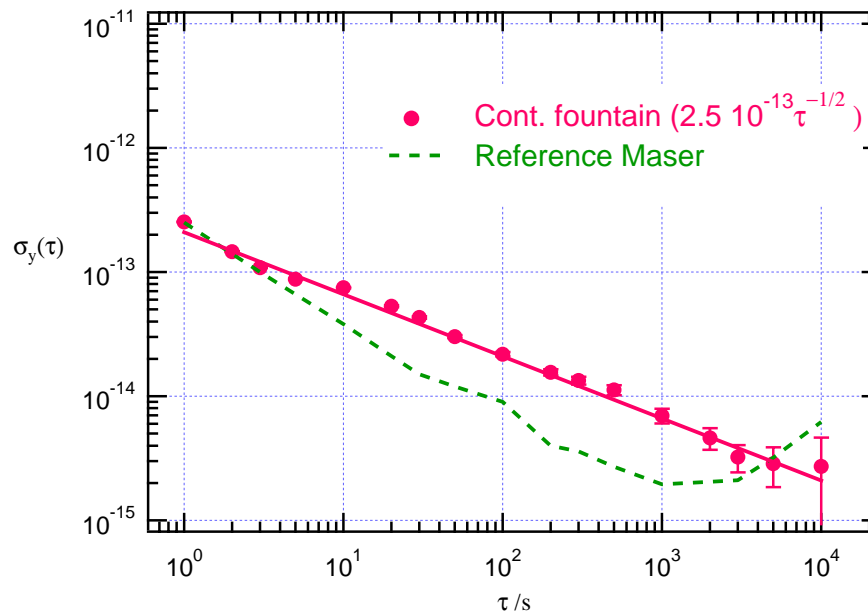
Fig. 5: Antwort des Resonators von FOCS-1, wenn die Frequenz der Mikrowelle durchgestimmt wird.

Die volle Breite bei halber Höhe (FWHM) des Resonanzsignales ist durch die Beobachtungszeit der Atome und somit durch die Geometrie der Konstruktion gegeben. Bei FOCS-1 dauert diese Beobachtungszeit rund 0.5 s was eine Linienbreite von 1 Hz entspricht (cf. Fig. 5 oben).

Stabilitätsmessungen

Wird FOCS-1 als Frequenznormal betrieben, so wird die Mikrowellenfrequenz mittels eines elektronischen Regelkreises auf dem Maximum der mittleren Resonanzkurve von Figur 5 gehalten. Ein wichtiger Hinweis für die Qualität des Frequenznormals ist die Kurzzeit-Instabilität. Um diese zu messen, wird ein Signal, dessen Frequenz starr mit der Mikrowellenfrequenz

verbunden ist mit einem Signal eines zweiten Frequenznormals verglichen. Das statistische Hilfsmittel, das zur Darstellung der Instabilität eines Frequenznormals zur Anwendung kommt wird Allan-Abweichung genannt. Figur 6 zeigt die Instabilität von FOCS-1 gemessen gegenüber einem Wasserstoff-Maser.



Referenzen

Allgemeine Artikel zu Frequenznormalen

W. M. Itano and N. F. Ramsey

Accurate Measurement of Time

Scientific American, pp 46 – 53, July 1993.

S. Chu

Laser Trapping of Neutral Particles

Scientific American, pp 49 – 54, February 1992.

BB

Publikationen zu FOCS-1 in Fachzeitschriften

P. Thomann

Vers une Horloge primaire à atomes froids

OFMETInfo 4, pp. 3 – 6, 3/1997

G Dudle, N Sagna, P Thomann, E Aucouturier, P Petit, N Dimarcq

Generation of a Continuous Beam of Cold Cesium Atoms

Proceeding of the 5th Symposium on Frequency Standards and Metrology, Woods Hole MA, USA

P Berthoud, A Joyet, G Dudle, N Sagna; P Thomann

A continuous beam of slow, cold cesium atoms magnetically extracted from a 2D magneto-optical trap

Europhys Lett **41**, pp. 141-146, 1998

P Berthoud, E Fretel, A Joyet, G Dudle, P Thomann

Toward a Primary Frequency Standard Based on a Continuous Fountain of Laser-Cooled Cesium Atoms

IEEE Trans. IM **48**, pp 516 - 519, 1999

G Dudle, G Mileti, A Joyet, E Fretel, P Berthoud, P Thomann
An Alternative Cold Cesium Frequency Standard: The Continuous Fountain
IEEE Trans. UFFC **47**, pp. 438 - 442, 2000

A Joyet, G Mileti, G Dudle, P Thomann
Theoretical Study of the Dick Effect in a Continuously Operated Ramsey Resonator
IEEE Trans. IM **50**, 150 - 156, 2001

G Dudle, A Joyet, P Berthoud, G Mileti, P Thomann
First results with a cold cesium continuous fountain resonator
IEEE Trans. IM **50**, 510 - 514, 2001

Gregor Dudle
Dez-2004