Atomuhren:
Zeit und Frequenzen auf 18 Stellen genau

Ekkehard Peik

PTB
Fachbereich Zeit und Frequenz
Braunschweig
ekkehard.peik@ptb.de

Physikalisch-Technische Bundesanstalt
Braunschweig und Berlin

Physikalisch-Technische Bundesanstalt:

Deutschlands nationales Metrologieinstitut

Metrologie: Die Wissenschaft des Messens

mit Anwendungen in Forschung, Technik und Wirtschaft

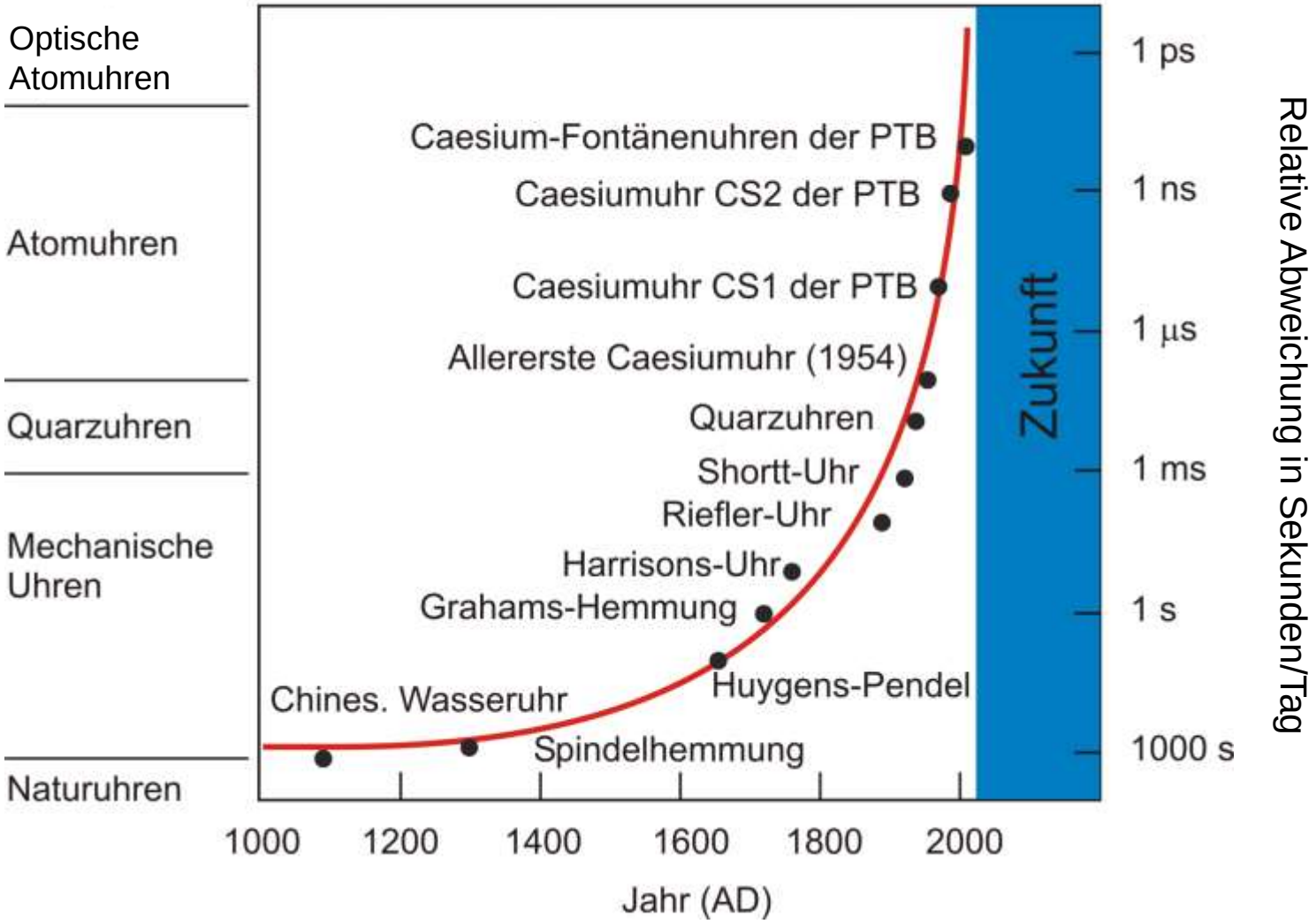
Metrologie

Meteorologie

Uhrenhalle im Kopfermann-Bau der PTB, Braunschweig

- Gesetzliche Zeit für Deutschland
- 4 primäre Caesium-Uhren (2 Cs-Fontänenuhren)
- Zeit-Übertragung über Langwelle DCF77 / Internet / Telefon
- Zeit-Übertragung über Satelliten für die internationalen Zeitskalen TAI und UTC
- Optische Uhren mit gespeicherten Ionen

Entwicklung der Genauigkeit von Uhren



Unsicherheiten in den Realisierungen der SI Basiseinheiten

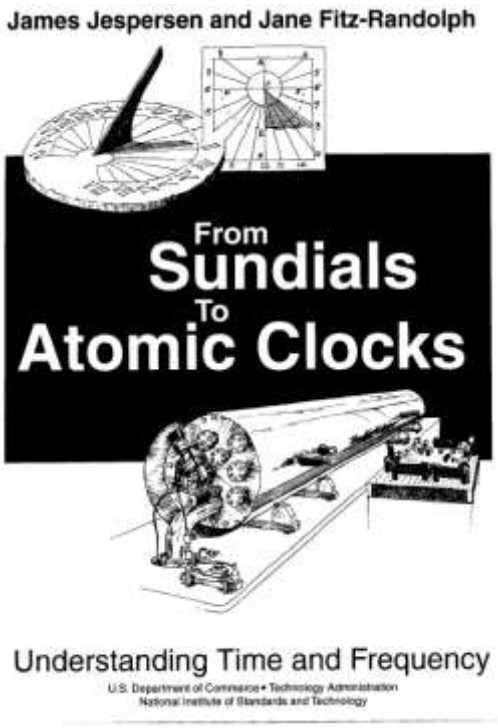
Sekunde	$2*10^{-16}$	
Meter	10^{-11}	(Definition ist an die Sekunde gebunden)
Kilogramm	0	(für den Prototypen, 10^{-9} für Massenvergleiche)
Ampere	$4*10^{-8}$	
Kelvin	$3*10^{-7}$	
Candela	10^{-4}	
Mol	$8*10^{-8}$	

Literatur

von der PTB:
www.ptb.de/Zeit/

General publications on Time and Frequency by NIST:
http://tf.nist.gov/timefreq/general/generalpubs.htm

General reading: J. Jespersen, J. Fitz-Randolph:
From Sundials to Atomic clocks

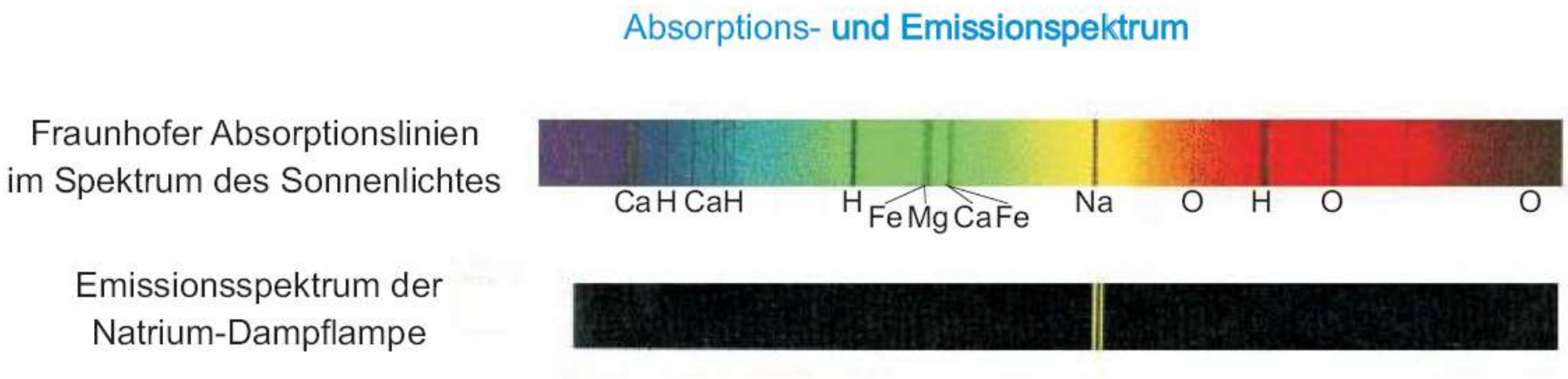


Die Grundidee der Atomuhr ist mehr als hundert Jahre alt:

„Wenn man dauerhafte Einheiten für Länge, Zeit und Masse wünscht, so darf man sie nicht in der Größe, Bewegung oder Masse unseres Planeten suchen,
sondern in der Wellenlänge, Frequenz und Masse der unvergänglichen, unveränderlichen und
vollkommen gleichartigen Moleküle.“

James Clerk Maxwell, 1870

Woran hat Maxwell gedacht?



Die Farbe (Wellenlänge, Frequenz) des absorbierten oder emittierten Lichts ist eine charakteristische Eigenschaft des Atoms. Auf diese Weise kann das chemische Element identifiziert werden (Bunsen, Kirchhoff).

Der erste realisierbare Vorschlag einer Atomuhr:

Isidor I. Rabi, 1945, aufbauend auf der Molekularstrahlmethode und der Entwicklung von Mikrowellenelektronik für Radar.

'COSMIC PENDULUM' FOR CLOCK PLANNED

Radio Frequencies in Hearts of Atoms Would Be Used in Most Accurate of Timepieces

DESIGN TERMED FEASIBLE

Prof. I. I. Rabi, 1944 Nobel Prize Winner, Tells of Newest Developments

By WILLIAM L. LAURENCE

Blueprints for the most accurate clock in the universe, tuning in on radio frequencies in the hearts of atoms and thus beating in harmony with the "cosmic pendulum," were outlined yesterday at the annual New York meeting of the American Physical Society, at Columbia University, by Prof. I. I. Rabi, who delivered the Richtmyer Memorial Lecture under the auspices of the American Association of Physics Teachers.

New York Times 21.1.1945

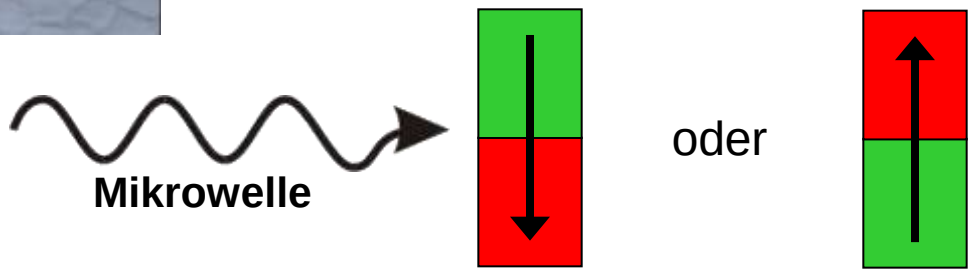
Warum Caesium?

Caesium (Cs):

- metallisch, relativ häufig, ungiftig, chemisch ähnlich Natrium
- leicht zu verdampfen
- leicht nachzuweisen (als elektrischer Strom mit Heißdrahtdetektor)
- geeignete Resonanzfrequenz (für die Elektronik der 1950er Jahre):
  etwa 9,2 GHz (Mikrowelle)
- nur ein stabiles Isotop (Cs-133) : alle natürlich vorkommenden
  Cs-Atome haben dieselbe Frequenz

Caesium (Cs):

Der Grundzustand existiert in zwei stabilen Unterzuständen:



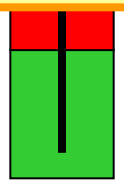
Durch Einstrahlen einer Mikrowellen-Frequenz von
exakt 9 192 631 770 Hz lässt sich der Zustand „umklappen“.

$$\nu_0 = (E_2 - E_1) / h$$

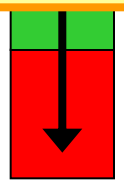
h: Planck-Konstante

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

Quelle: BIPM (Bureau International des Poids et Mesures)



oder

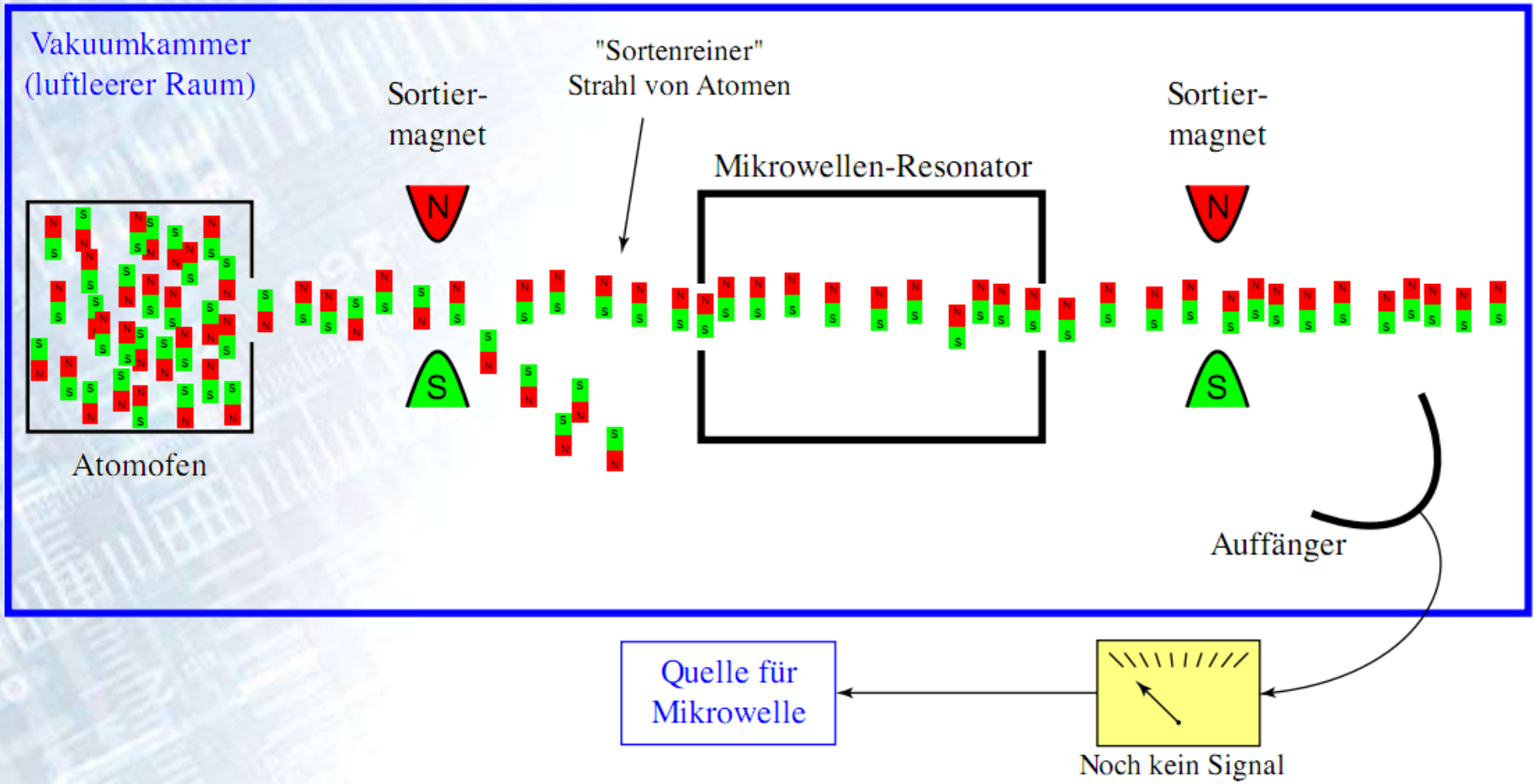


Durch Einstrahlen einer Mikrowellen-Frequenz von **exakt 9 192 631 770 Hz** lässt sich der Zustand „umklappen“.

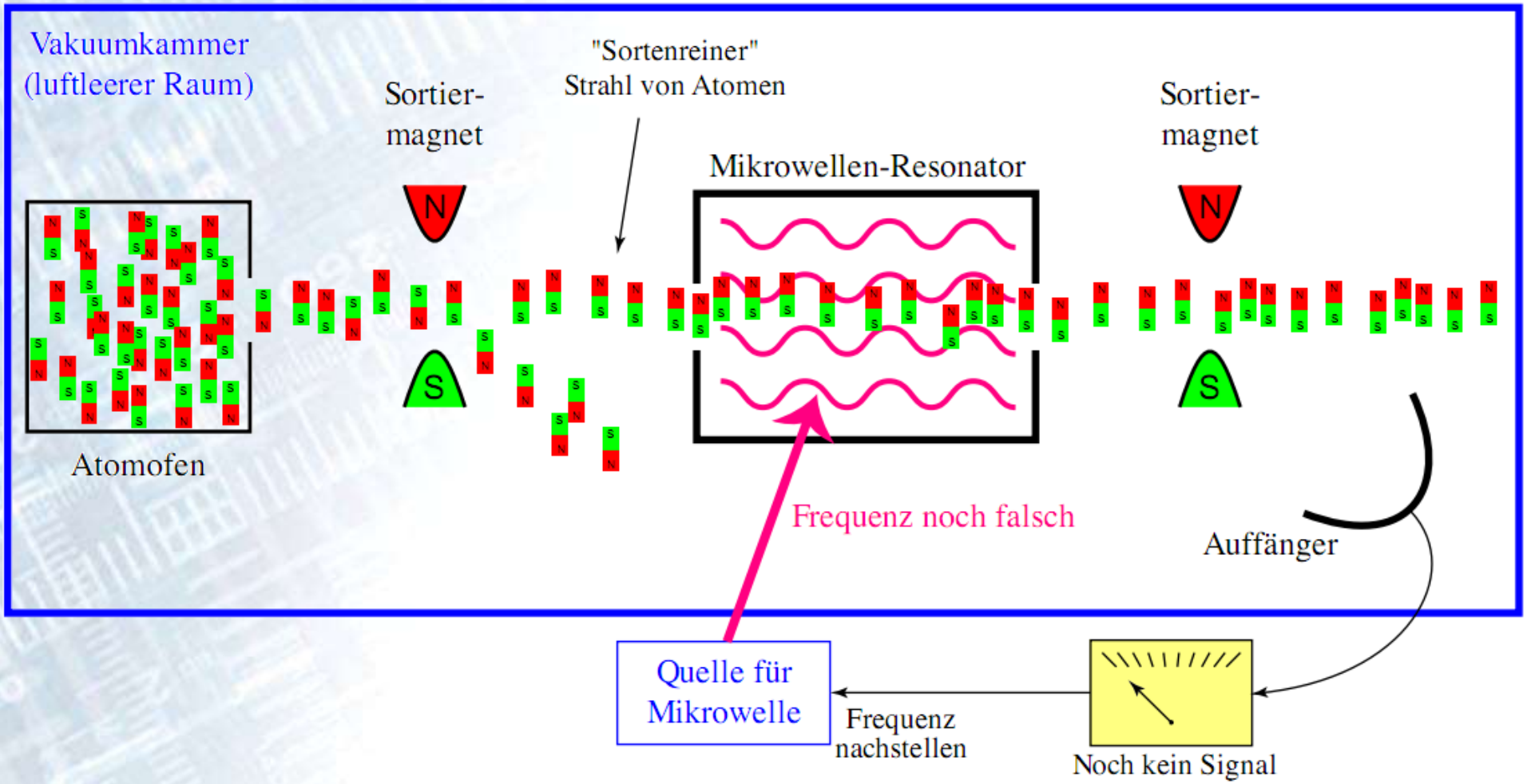
$$\nu_0 = (E_2 - E_1) / h$$

h: Planck-Konstante

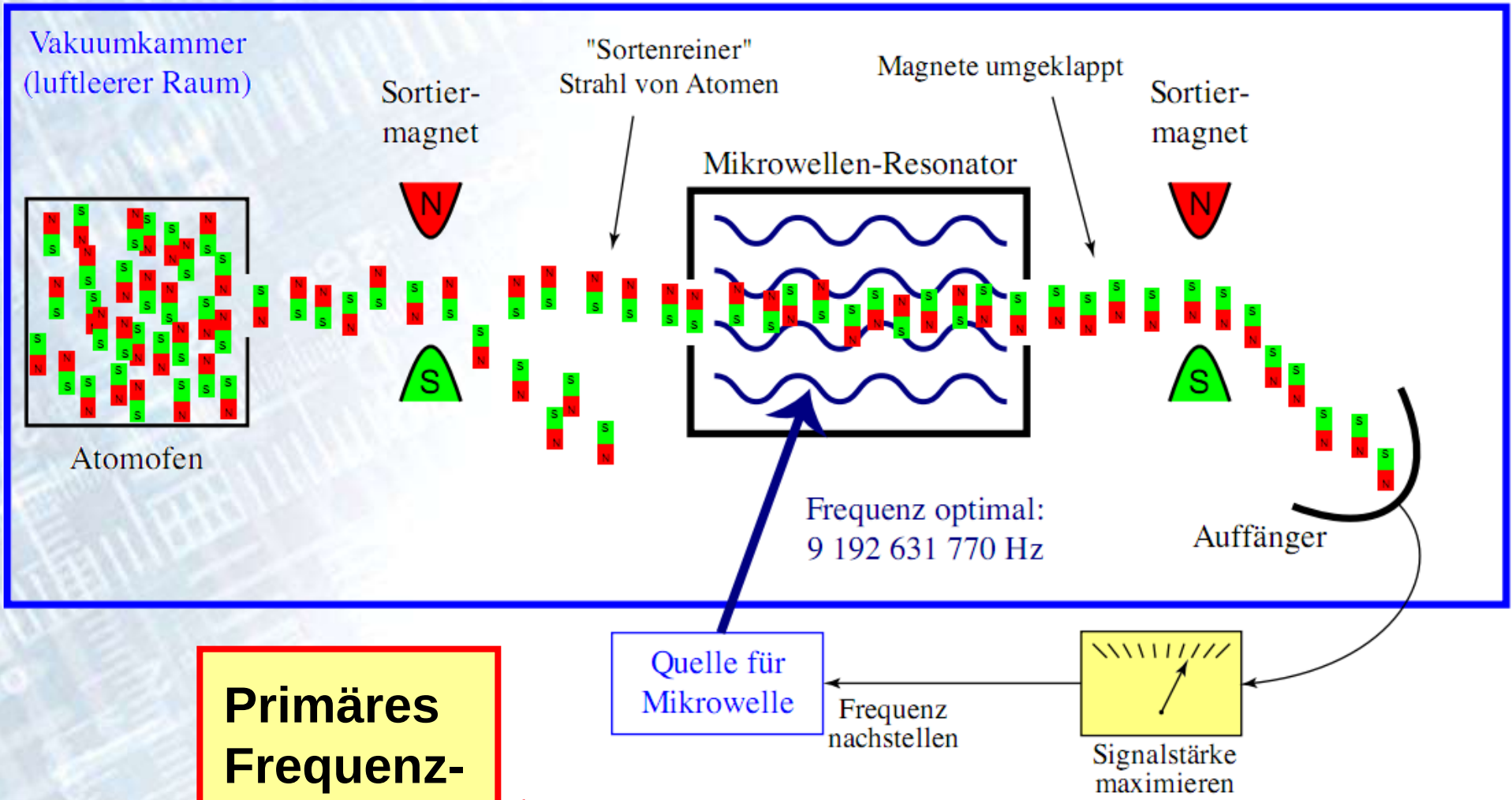
Aufbau einer Atomuhr



Aufbau einer Atomuhr

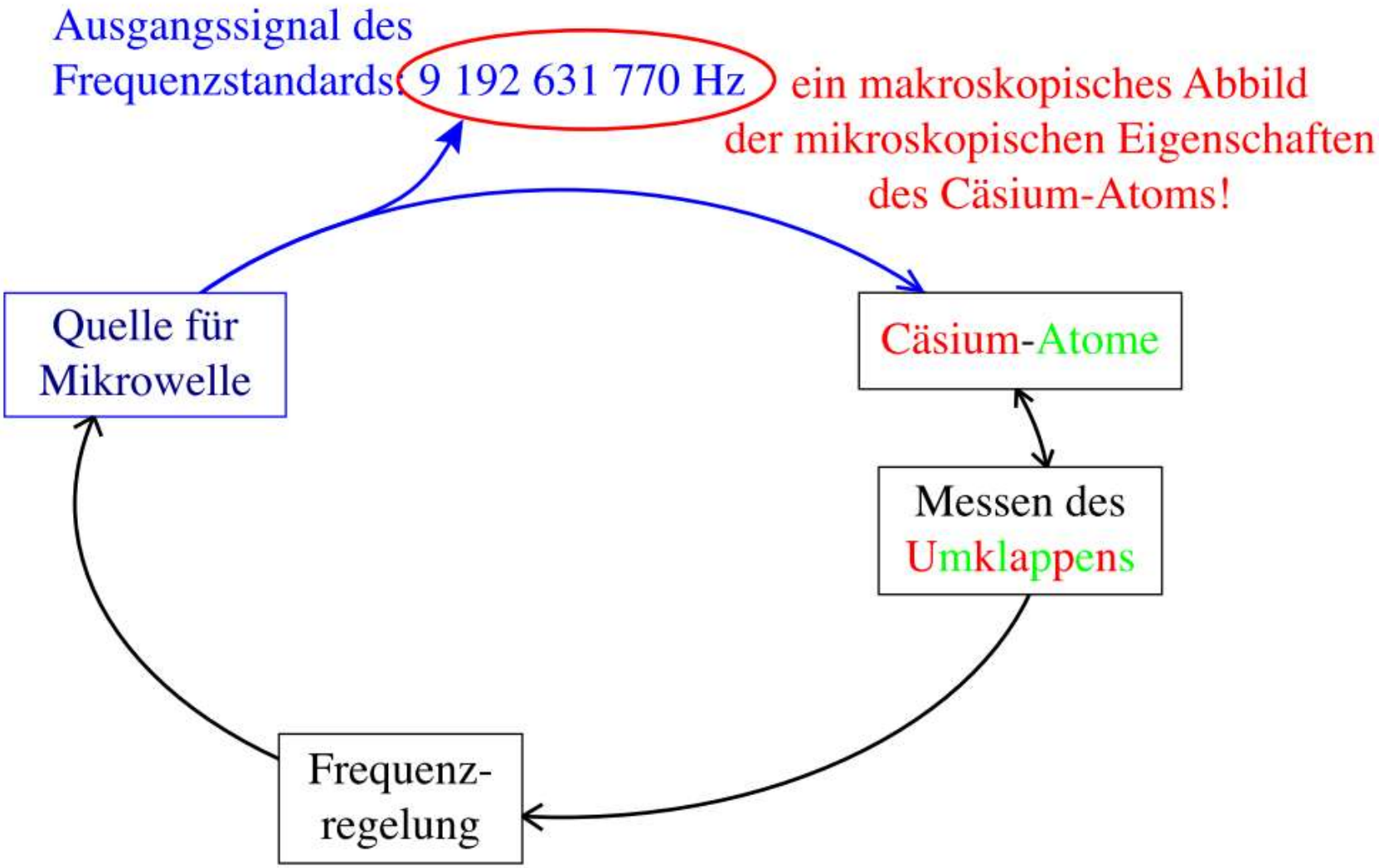


Aufbau einer Atomuhr



Primäres Frequenz-normal

Wenn der Zustand der Cäsium-Atome optimal umgeklappt wird, ist die Frequenz der Mikrowelle **genau 9 192 631 770 Hz.**


Ausgangssignal des
Frequenzstandards: 9 192 631 770 Hz
ein makroskopisches Abbild
der mikroskopischen Eigenschaften
des Cäsium-Atoms!
Quelle für
Mikrowelle
Cäsium-Atome
Messen des
Umklappens
Frequenz-
regelung

Woher kommt der Wert 9 192 631 770 Hz?

Vergleich der astronomischen Sekunde mit der Cs-Frequenz 1955-58.

FREQUENCY OF CESIUM IN TERMS OF EPHEMERIS TIME

W. Markowitz and R. Glenn Hall,
United States Naval Observatory, Washington, D. C.

and
L. Essen and J.V. L. Parry,
National Physical Laboratory, Teddington, England
(Received July 7, 1958)

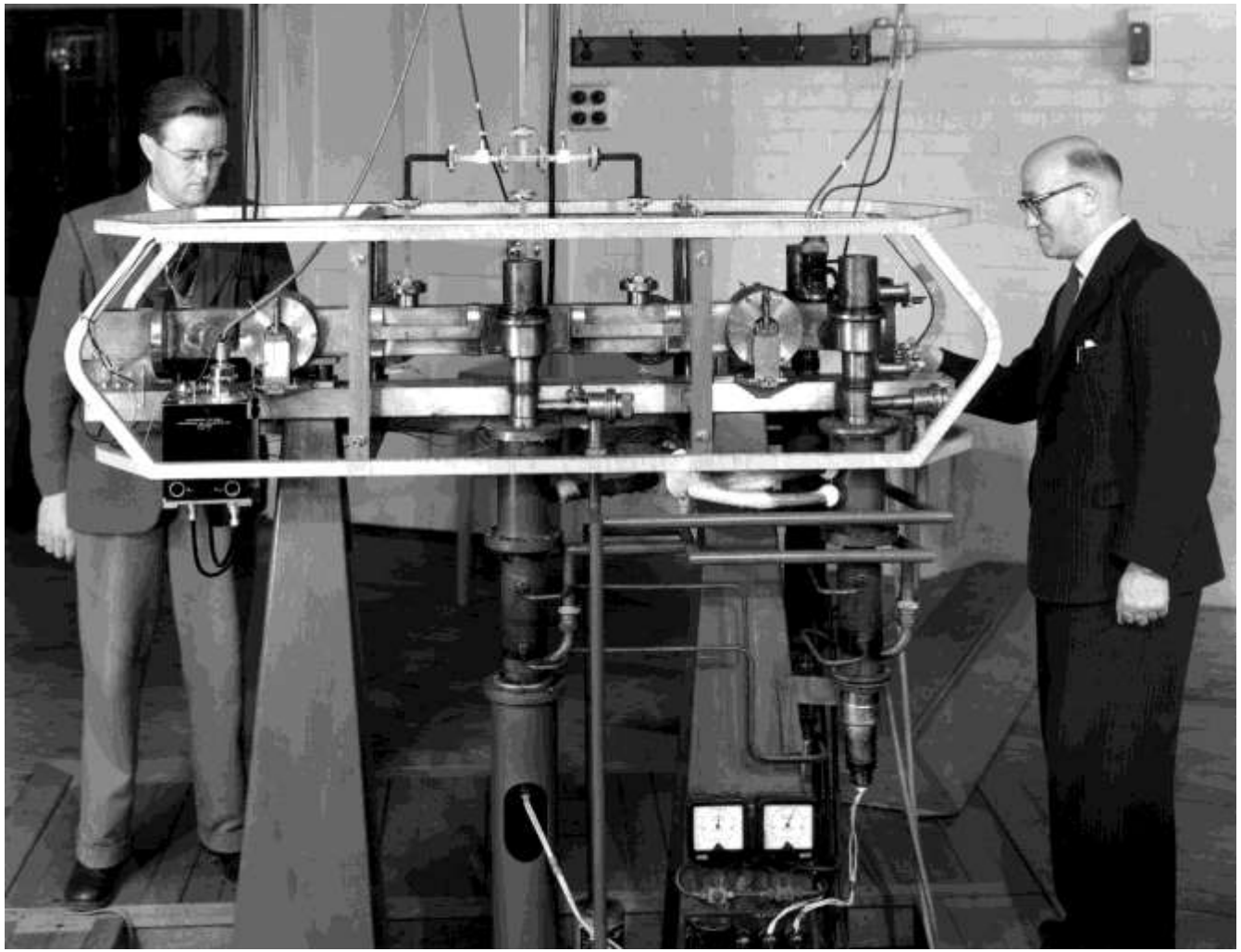
We find, thus, the transition frequency of cesium (4, 0) — (3, 0) at zero magnetic field is

$$\nu_E = 9\,192\,631\,770 \pm 20 \text{ cycles per second (of E.T.) at 1957.0.}$$

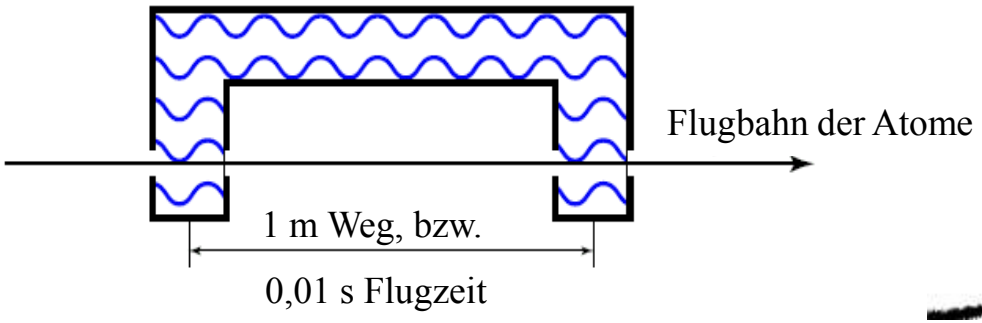
W Markowitz mit der dual-rate moon camera zur Messung der Okkultation von Sternen durch den Mond. Foto: USNO

Unsicherheit etwa 0,1 s an einem Tag

Die erste Caesium-Atomuhr



Essen und Parry, National Physical Laboratory, UK, 1955



Ramsey – Resonanz

Ramsey–Resonator

Norman Ramsey

1915 – 2011
Nobelpreis 1989

Erzielung kleiner Linienbreiten gelingt mit zwei Bestrahlungen mit dem Mikrowellenfeld, mit möglichst großem zeitlichen Abstand T

In großen Atomstrahl-Uhren wird $T \approx 0{,}01$ s erreicht, damit eine Linienbreite $1/(2T)$ von 50-100 Hz.

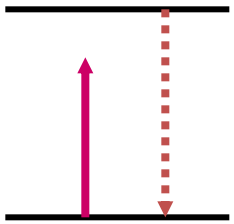
Diese „Ramsey-Anregung“ wird heute in allen Cs-Atomuhren benutzt.

Analog: Beugung am Doppelspalt
(Spektrum ist Fourier-Transformierte
des Zeitverlaufs der beiden Anregungspulse)

CS1 - CS4, PTB, ca. 1992

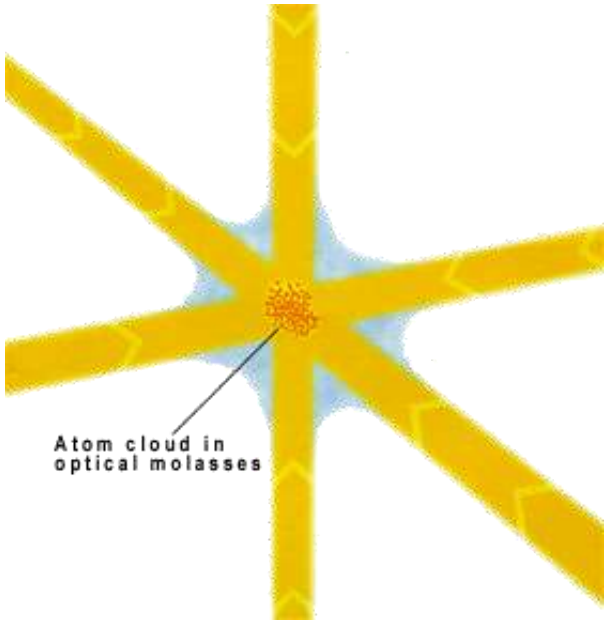
Laserkühlung von Atomen

Abbremsung durch den Strahlungsdruck eines Laserstrahls.

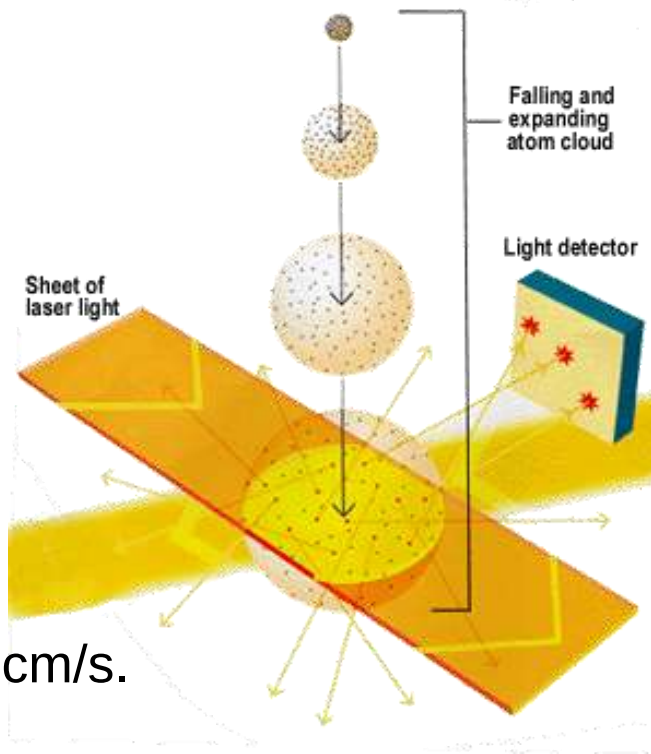


Nobelpreis 1997
Chu, Cohen-Tannoudji, Phillips

Kühlen und Speichern von Atomen aus dem Hintergundgas

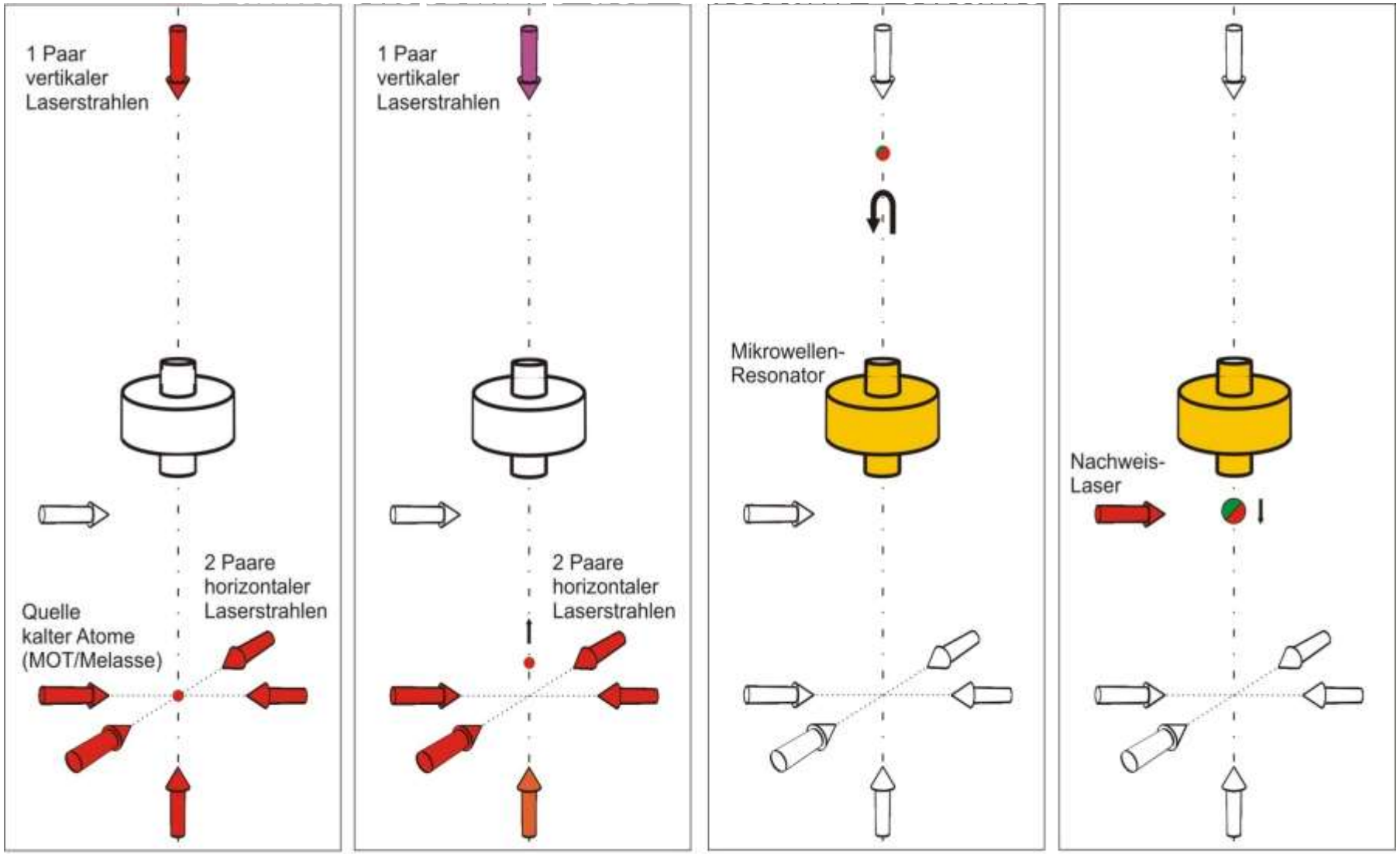


Optische Melasse
Wo sich die sechs Laserstahlen überlagern, entsteht für die Atome ein „zähes“ Medium.



Cs-Atome erreichen dabei eine Temperatur von etwa 1 μK, bzw. eine Geschwindigkeit von 1 cm/s.

Der Ablauf in einer Caesium-Fontänenuhr



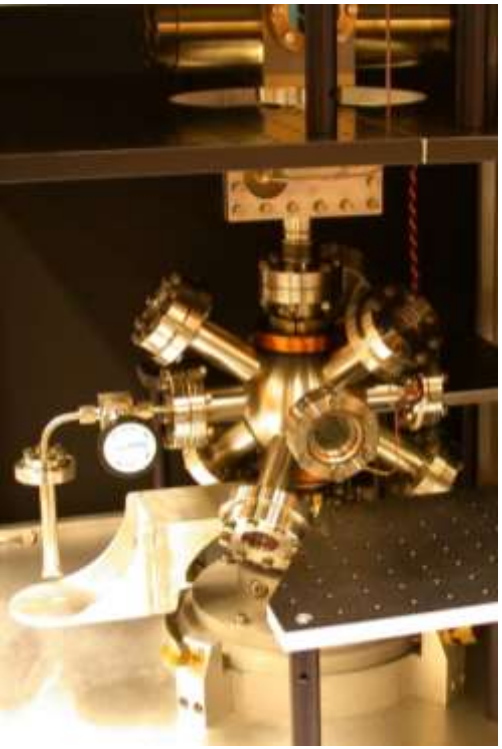
Laden einer Wolke von kalten Caesiumatomen

Starten der Wolke im Zustand (1) durch Verstimmen der Frequenzen der vertikalen Laserstrahlen

Wechselwirkung der Atome mit dem Mikrowellenfeld im Resonator beim Aufsteigen und Fallen

Nachweis der Besetzung der atomaren Zustände (1) und (2) in der Wolke

Die Caesium-Fontänenuhren der PTB



Deutschlands genaueste Uhren,
CSF1 und CSF2.

Ungenauigkeit 2×10^{-16} :
1 Sekunde in 160 Millionen Jahren,

Genauere Uhren durch:

- Längere Beobachtungszeit : „kalte Atome“ in einer Fontäne oder Falle
→ es können mehr Schwingungsperioden der Atome verfolgt werden

- Höhere Frequenzen: „Optische Uhr“ mit Laserlicht statt Mikrowelle
→ die Zahl der Schwingungsperioden pro Sekunde ist höher

Stabilität eines atomaren Frequenznormals (Allan Standardabweichung)

$$\sigma_y(\tau) \approx \frac{\Delta\nu}{\nu_0}\sqrt{\frac{T_c}{N\tau}}$$

$\Delta\nu$: observed linewidth
ν_0: reference frequency
N: atom number (projection noise limited detection)
T_c: cycle time

Mikrowelle $\longrightarrow$ optischer Frequenz
ν_0 erhöht sich um 5 Größenordnungen

Ein Einzel-Ionen-Frequenznormal mit $\Delta\nu=1$ Hz liefert eine höhere Stabilität als eine Caesium-Fontäne mit 10^6 Atomen.

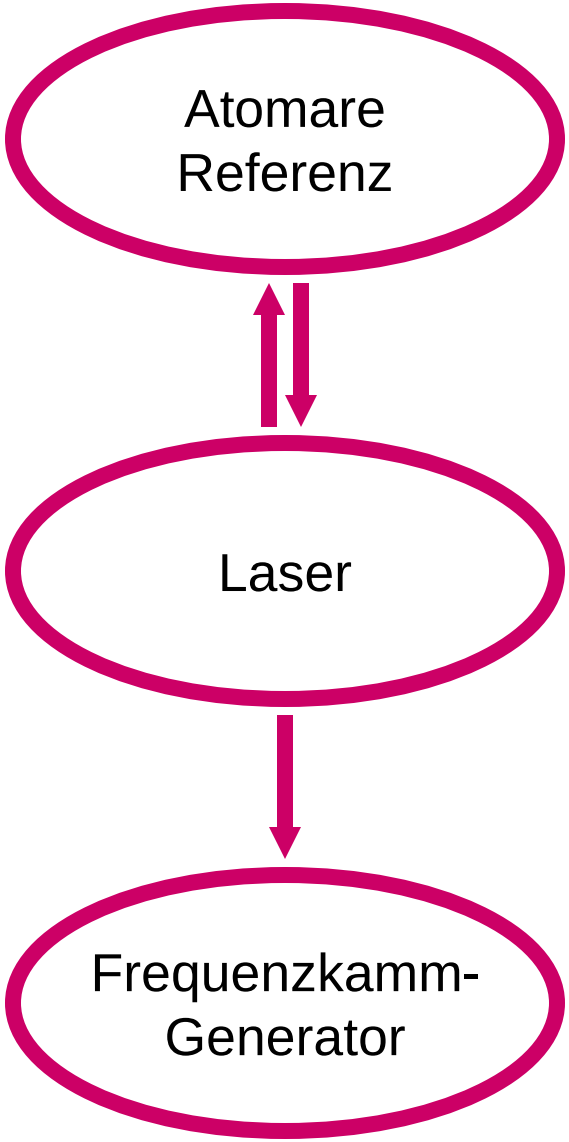
Genauigkeit (Unsicherheit): Systematische Frequenzverschiebungen

Manche Verschiebungen sind proportional zur Frequenz:
Doppler-Effekt 2. Ordnung (Zeitdilatation): $\delta\nu \sim \nu\, v^2/c^2$

Andere Effekt haben eine absolute Größenordnung (in Energie bzw. Frequenz), und sind daher für eine optische Uhr weniger problematisch:

	relative Verschiebung für:	
	Cs 9,19 GHz	Yb^+ 642 THz
quadrat. Zeeman Effekt bei 1 μT	$4{,}7\times10^{-12}$	$-3{,}2\times10^{-18}$
Stark-Effekt durch thermische Strahlung bei 300 K	$-1{,}7\times10^{-14}$	-7×10^{-17}

Optische Uhr / Optisches Frequenznormal

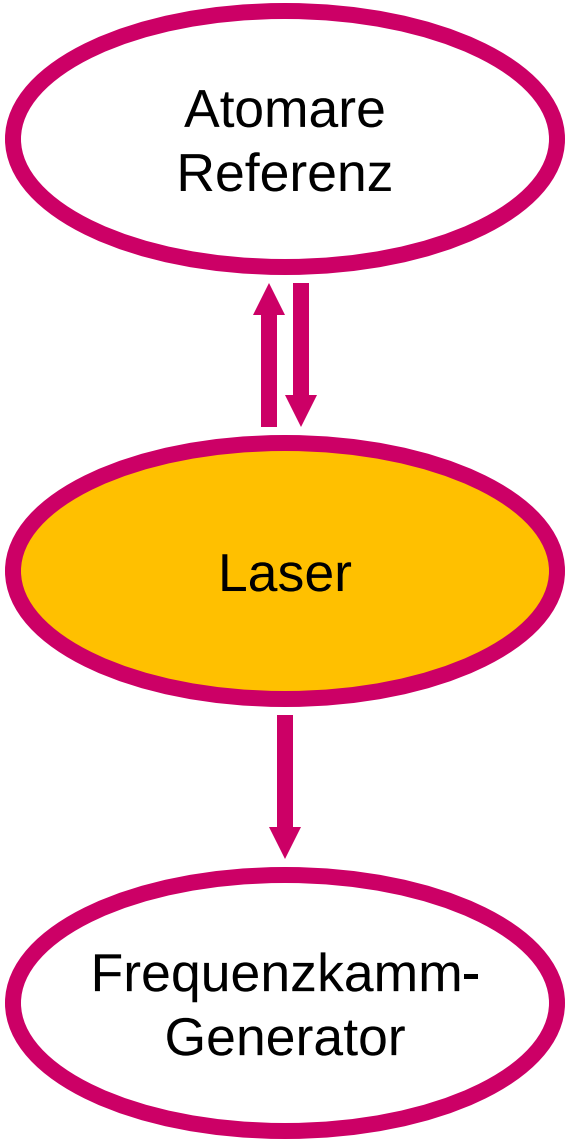


„verbotener“ Übergang in Laser-gekühlten Atomen oder Ionen

Auf die atomare Resonanzfrequenz stabilisiert, Kurzzeitstabilität von einem passiven Fabry-Perot Resonator

„Optisches Uhrwerk“, kann HF-Ausgangssignale erzeugen und ermöglicht den Vergleich optischer Frequenzen

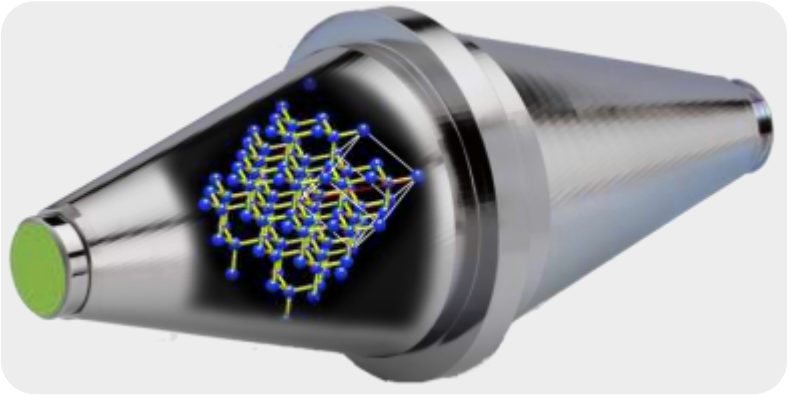
Optische Uhr / Optisches Frequenznormal

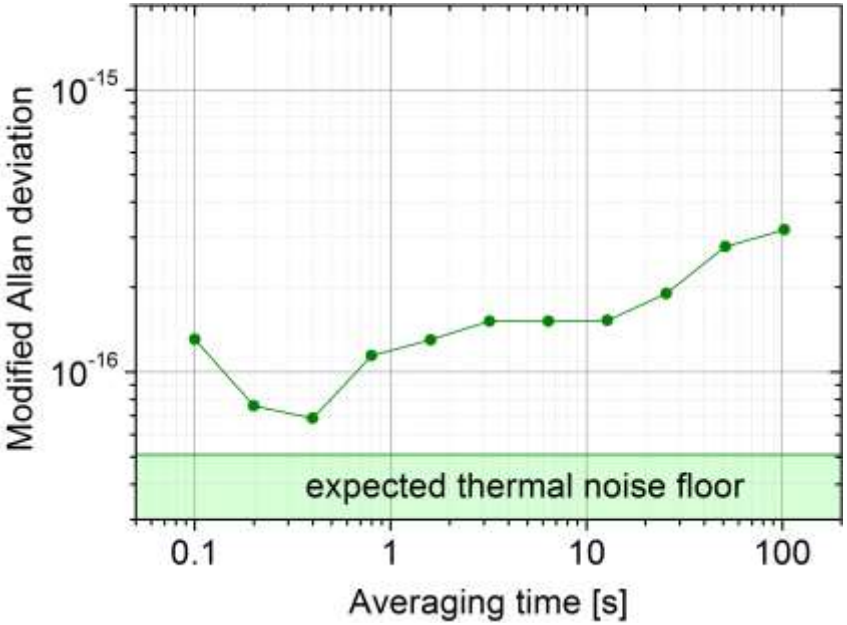


Auf die atomare Resonanzfrequenz stabilisiert, Kurzzeitstabilität von einem passiven Fabry-Perot Resonator

Reference resonators with low thermal noise

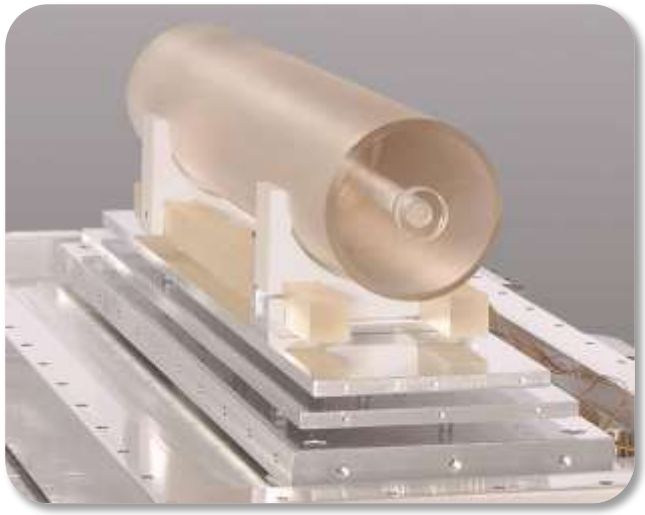
Silicon single-crystal at 124 K,
drift <5×10^{-19} /s

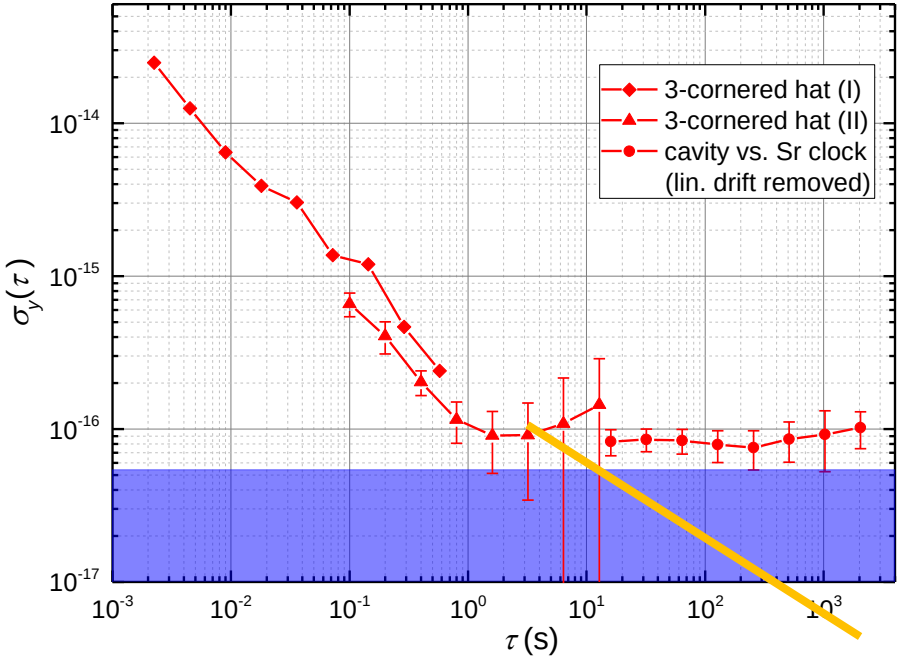




T. Kessler *et al.*, Nature Photonics, **6** (2012) 687
PTB-JILA cooperation

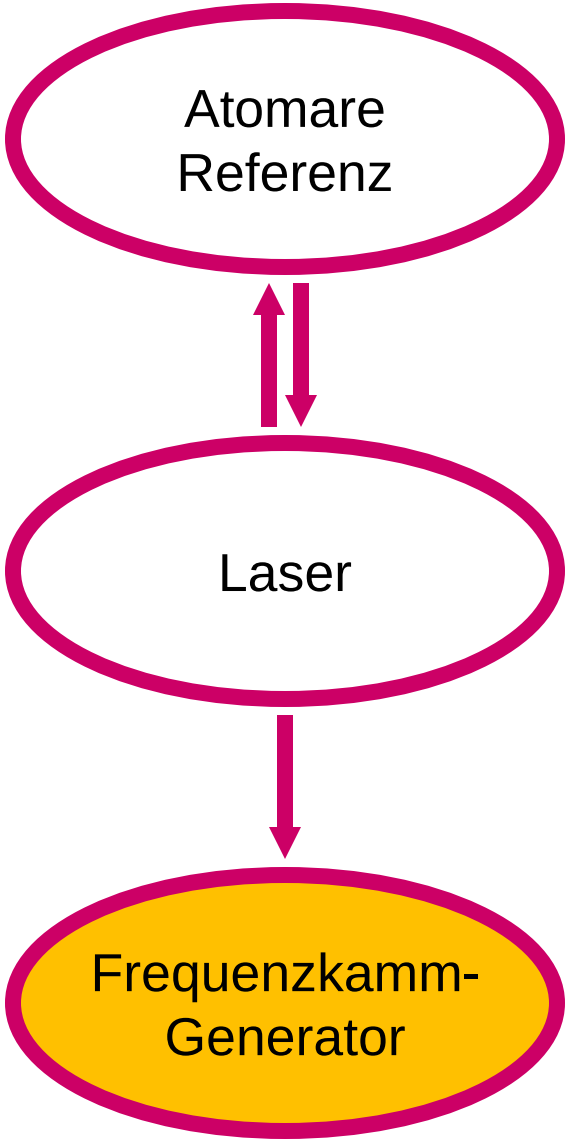
48 cm ULE cavity





S. Häfner *et al.*, Opt. Lett. **40**, 2112 (2015)

Optische Uhr / Optisches Frequenznormal



Physik-Nobelpreis 2005

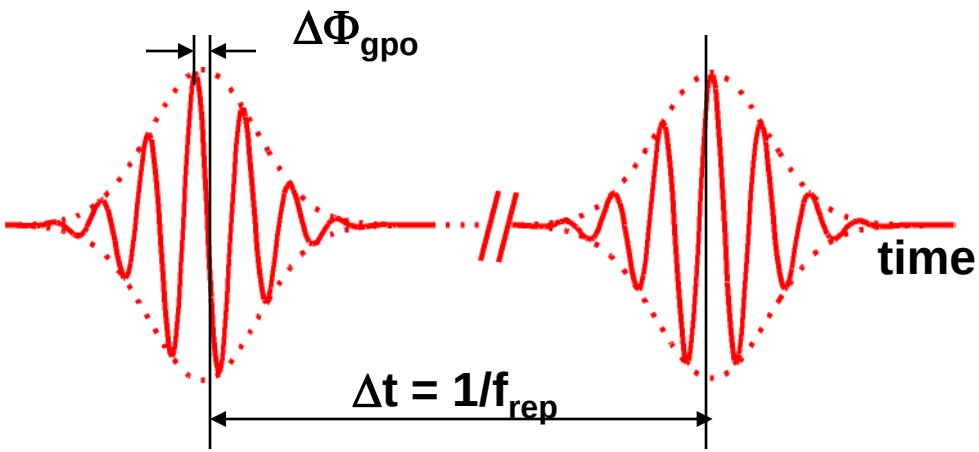
Photo: Sears.P.Studio — John L. Hall

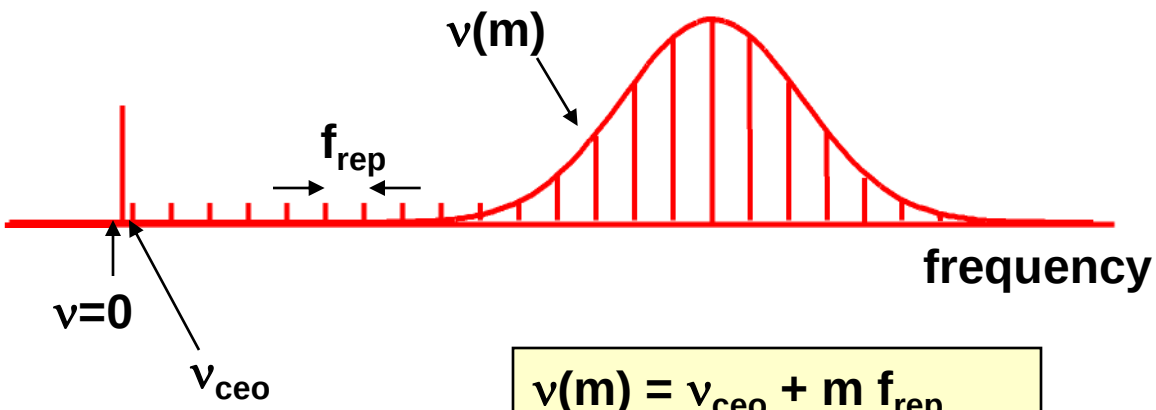
Photo: F.M. Schmidt — Theodor W. Hänsch

„Optisches Uhrwerk“, kann HF-Ausgangssignale erzeugen und ermöglicht den Vergleich optischer Frequenzen

Femtosecond laser as optical frequency comb generator

T. Hänsch, MPQ, J. Hall, JILA ..... PTB NIST NPL ILP...

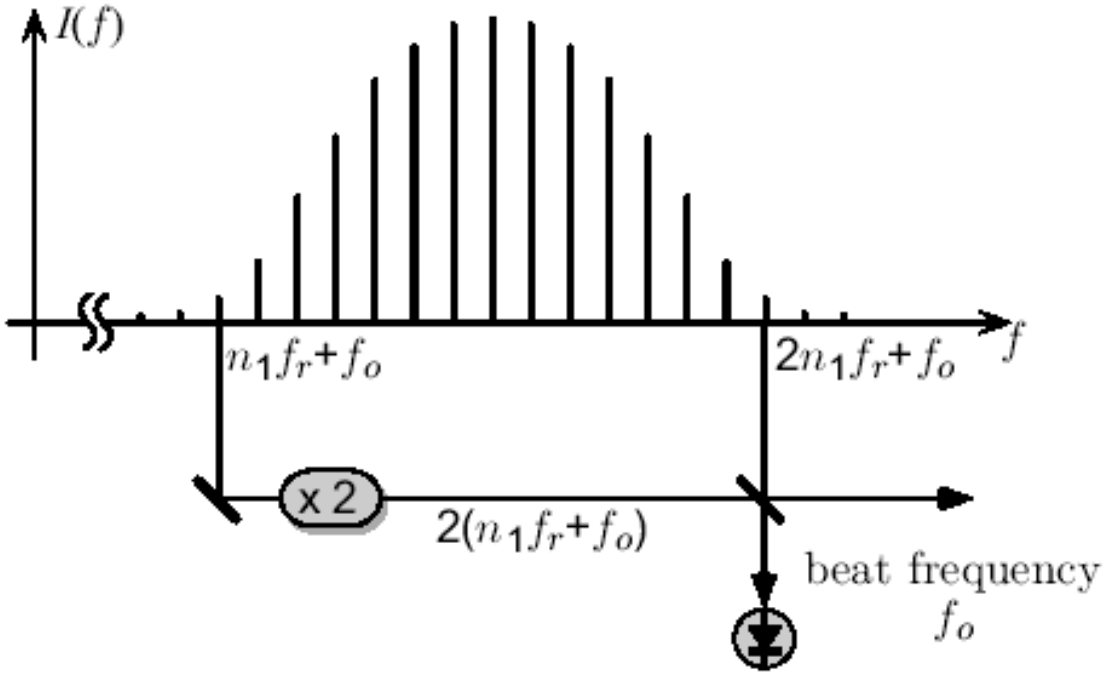




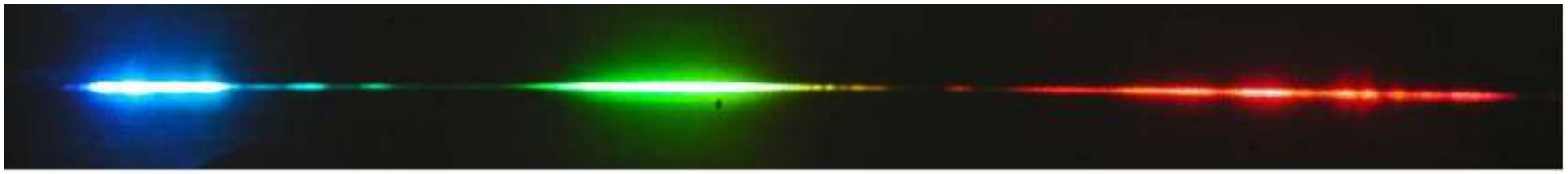
$$\nu(m) = \nu_{ceo} + m\, f_{rep}$$

Measurement of ν_{ceo} and f_{rep} fixes the frequencies of all modes

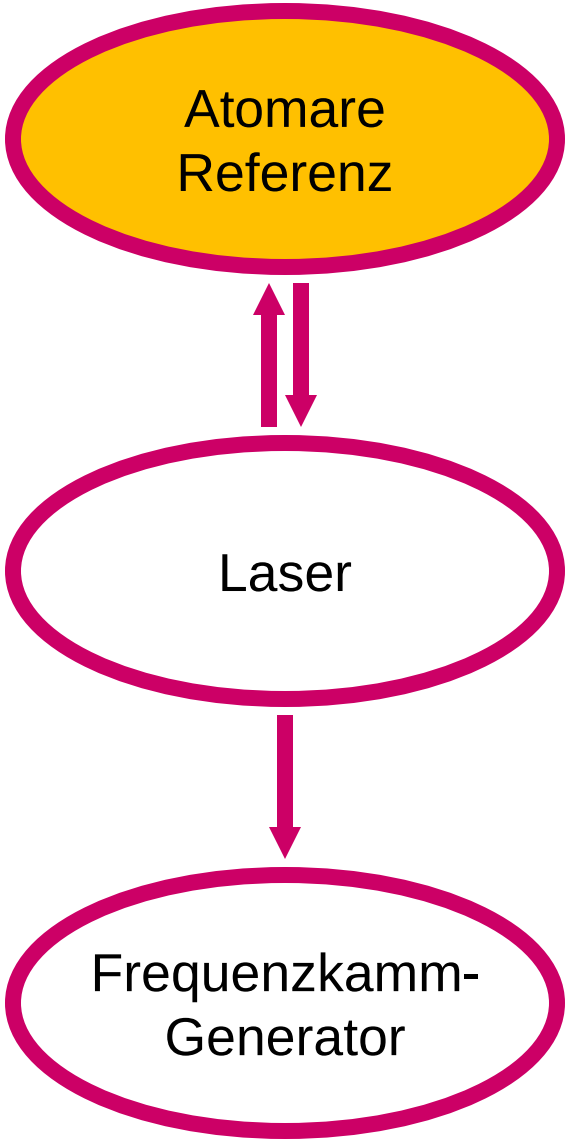
Measuring the CEO frequency with an octave-spanning comb



System: Kerr-lens mode-locked Ti:Sa Laser, Er-doped fiber laser, ...
broadened via self-phase modulation in a photonic crystal fiber



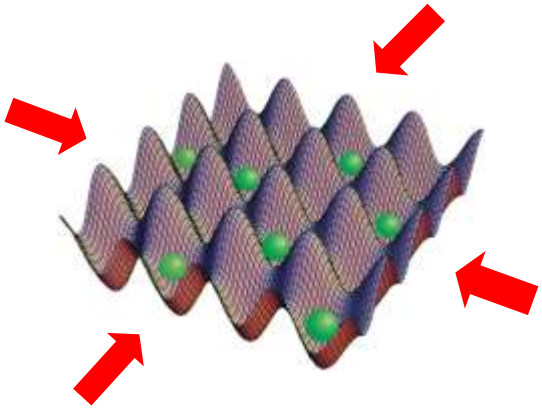
Optische Uhr / Optisches Frequenznormal



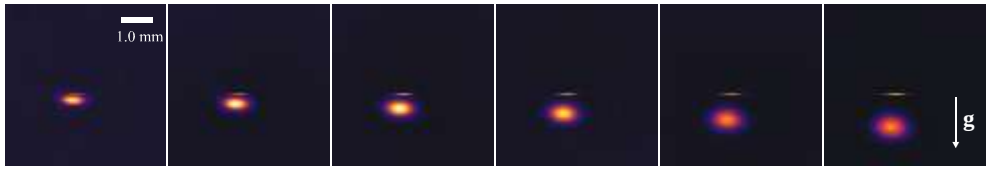
„verbotener“ Übergang in
Laser-gekühlten Atomen oder Ionen

Zwei Systeme für optische Uhren mit Atomen in Fallen

Gitteruhr mit neutralen Atomen



- Optisches Gitter: Laserfalle bei „magischer” Wellenlänge
- ~10^6 Atome können gleichzeitig abgefragt werden

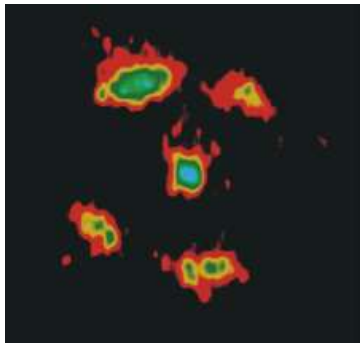


T_2 = 6 ms 8 ms 10 ms 12 ms 14 ms 16 ms

Absorptionsbilder der gefangenen Sr-Atome und der expandierenden Wolke freier Atome

Ein Ion in Ionenfalle

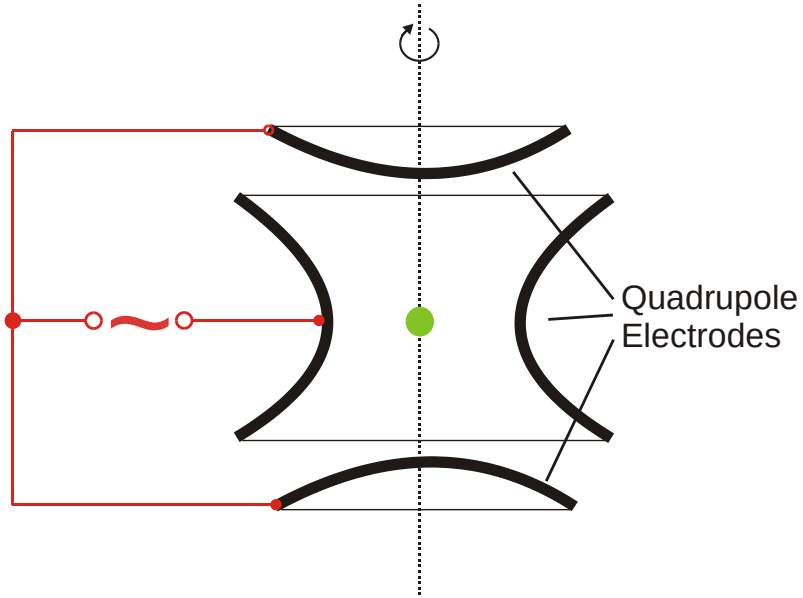
- Speicherung bei minimaler Störung durch das Fallenpotential
- unbegrenzte Beobachtungszeit
- ein Ion: keine Stoßverschiebung



5 Yb^+ Ionen

Optische Uhr mit einem einzelnen, laser-gekühlten Ion in einer Paul-Falle

Ein spektroskopisches Idealsystem: Ein isoliertes Atom in Ruhe im freien Raum



- Lamb-Dicke Lokalisierung $\Delta x < \lambda$ mit vernachlässigbaren Niveau-Verschiebungen
- Laserkühlung auf $T < 1$ mK
- unbegrenzte Wechselwirkungs-zeit in einer gut kontrollierten Umgebung (Stöße, Felder)

→ Sehr hohe Genauigkeit ist möglich (bis 10^{-18})
Vorgeschlagen von Hans Dehmelt 1975

Die Physik Nobelpreisträger von 1989

Hans Dehmelt

Wolfgang Paul

Norman Ramsey

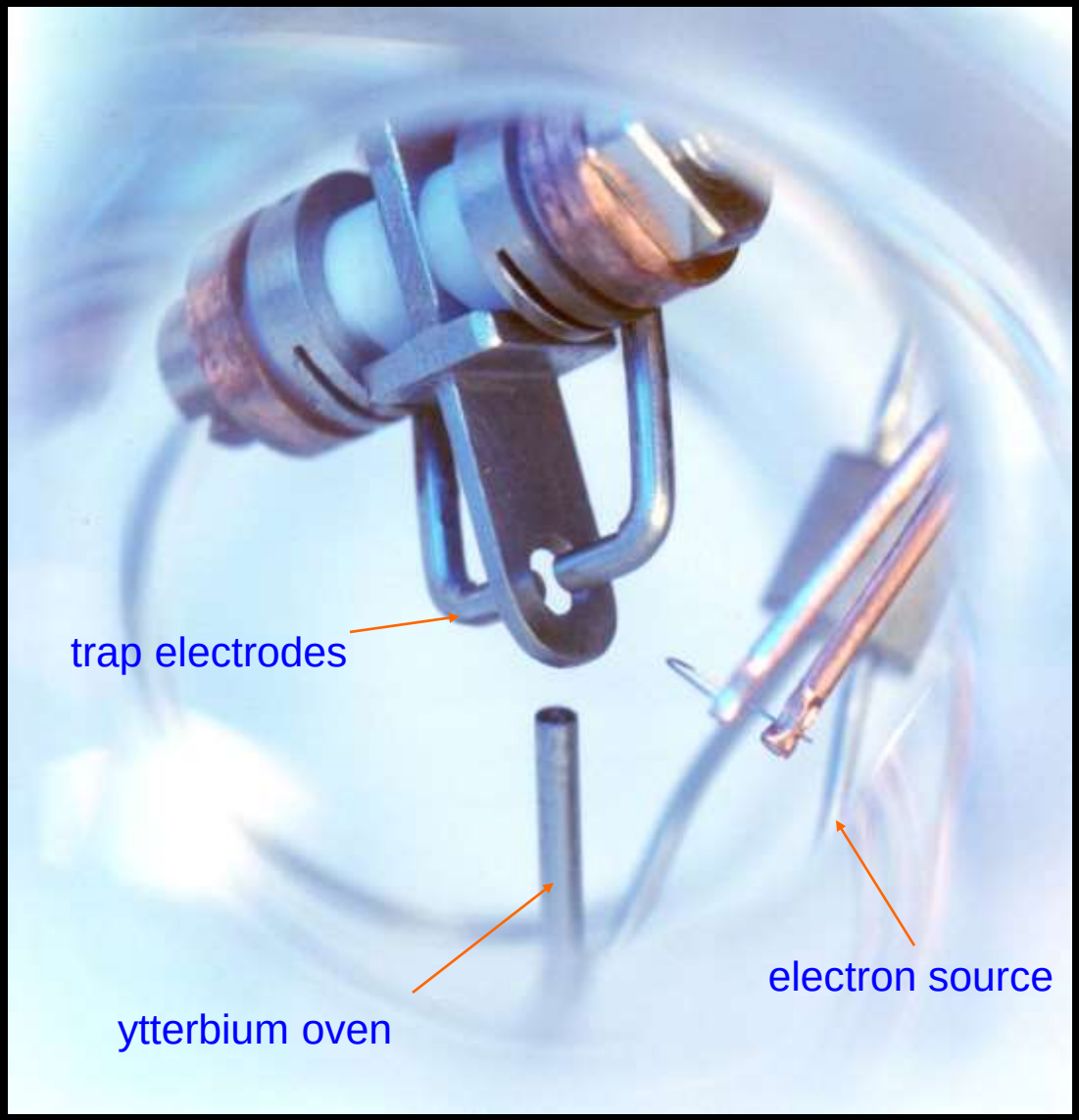
Einzelne Elektronen und Positronen
Laserkühlung
Einzel-Ion optische Uhr

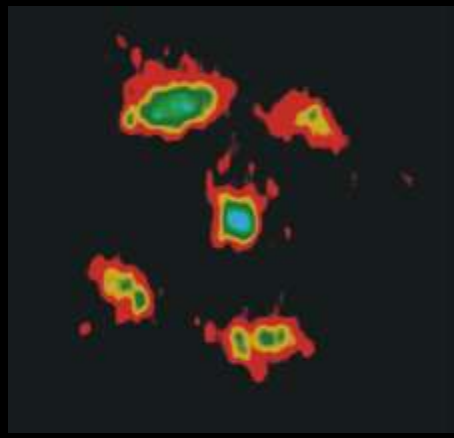
Quadrupol Massenspektrometer
Paul Falle

Ramseyanregung
Caesium-Uhr
Wasserstoff-Maser

PTB's trap for Yb^+

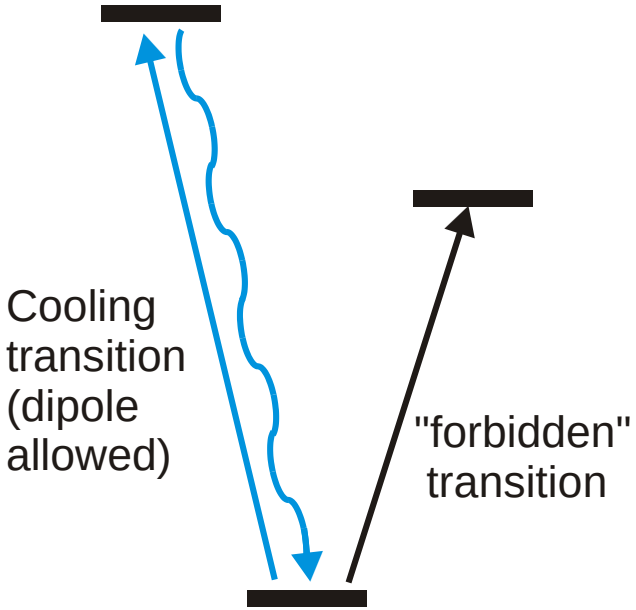
d=1.4 mm
U=600 V
at 16 MHz

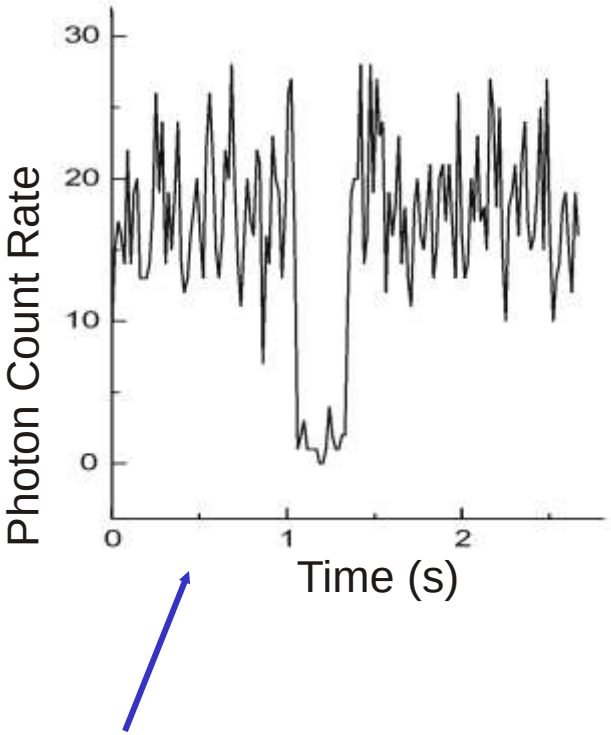




5 Yb^+ Ions

Zustandsnachweis an einem einzelnen Ion mit „electron shelving“



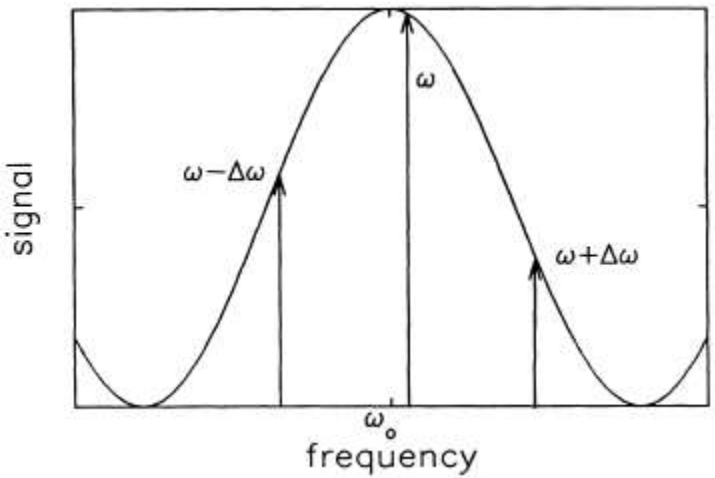


Fluoreszenzsignal eines einzelnen Ions (In^+):
Beobachtung von Quantensprüngen

PHYSICAL REVIEW A VOLUME 47, NUMBER 5 MAY 1993

Quantum projection noise: Population fluctuations in two-level systems

W. M. Itano, J. C. Bergquist, J. J. Bollinger, J. M. Gilligan, D. J. Heinzen,* F. L. Moore,*
M. G. Raizen,* and D. J. Wineland



Messungen der Besetzung eines 2-Niveau-Systems in einem einzelnen Atom ergeben eine Zufallsfolge der Werte 0 und 1 (durch Zustandsprojektion).

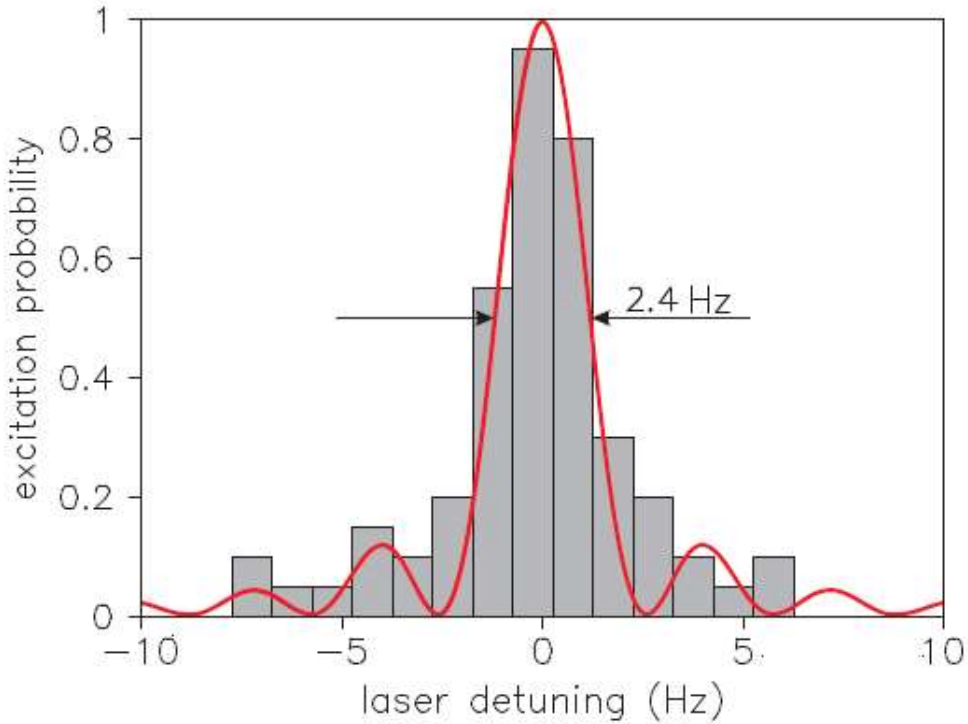
Varianz für eine Messung mit N Atomen

$$\sigma^2 = N p_B (1 - p_B).$$

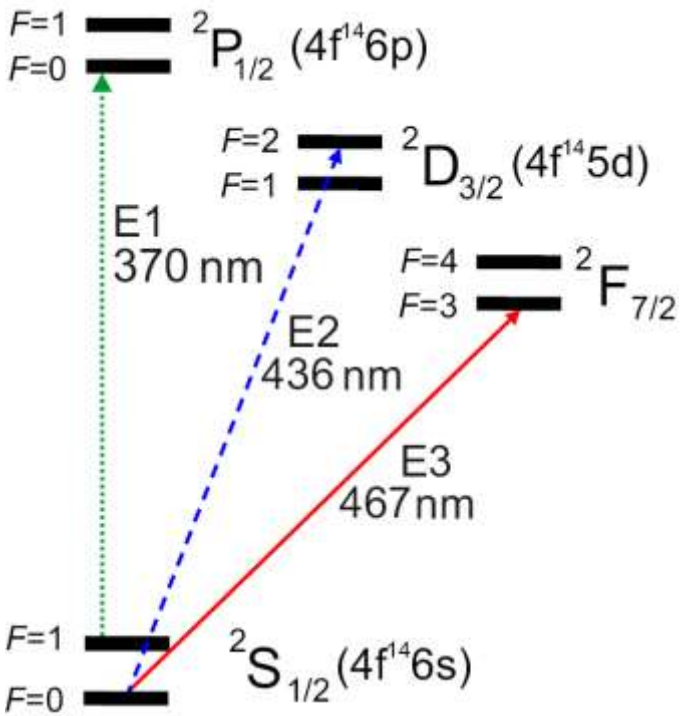
If the signal-to-noise ratio of a state measurement with a single atom is estimated as $\mathrm{SNR} = p/\sqrt{p(1-p)}$, it can be seen that for $p = 0.5$, $\mathrm{SNR} = 1$ only.

Quanten-Projektionsrauschen limitiert die erreichbare Stabilität der Uhr, insbesondere bei Einzel-Ionen Uhren.

Anregungsspektrum des Oktupol-Übergangs in Yb^+



- 335 ms pulse duration
- 50 μW laser power
- Fourier-limited linewidth
- $Q = 2.7 \times 10^{14}$
- Light shift $\approx$ 4 Hz



Uncertainty budget of the PTB $^{171}Yb^{+}$ E3 single-ion clock

TABLE I. Fractional frequency shifts $\delta\nu/\nu_0(10^{-18})$ and related relative uncertainties $u/\nu_0(10^{-18})$ in the realization of the unperturbed $^2S_{1/2}(F=0) \rightarrow {}^2F_{7/2}(F=3)$ transition frequency ν_0 of a single trapped $^{171}Yb^{+}$ ion.

Effect	$\delta\nu/\nu_0$ (10^{-18})	u/ν_0 (10^{-18})
Second-order Doppler shift	−3.7	2.1
Blackbody radiation shift	−70.5	1.8
Probe light related shift	0	1.1
Second-order Zeeman shift	−40.4	0.6
Quadratic dc Stark shift	−1.2	0.6
Background gas collisions	0	0.5
Servo error	0	0.5
Quadrupole shift	0	0.3
Total	−115.8	3.2

Nearly 100 times lower than for the most precise Cs-clocks

N. Huntemann, C. Sanner, B. Lipphardt, Chr. Tamm, E. Peik,
Phys. Rev. Lett. **116,** 063001 (2016)

Search for new physics with clocks:
Search for violations of present theories, or experimental hints for new theories

Quantum Theory

General Relativity

Clock-based precision experiments:

Transition frequencies (H, He, He^+ …)
Lamb shift (QED)
Magnetic moments (QED)

Ephemerides of planets, spacecraft
Millisecond pulsars
Red shift, Shapiro delay

Search for new physics with clocks:
Search for violations of present theories, or experimental hints for new theories

Quantum Theory

General Relativity

Einstein Equivalence Principle

Local Position Invariance: *The outcome of any local non-gravitational test experiment is independent of where and when in the universe it is performed.*

This makes gravitation "universal" and allows it to be described as a geometrical phenomenon, but it also separates gravitation from the other fundamental interactions.

We search for violations of the Equivalence Principle with different atomic clocks:

- Searching for a time dependence of fundamental constants
- Testing universality of the gravitational red shift
- Looking for a violation of Lorentz invariance in the electron sector
- Searching for ultralight scalar dark matter