



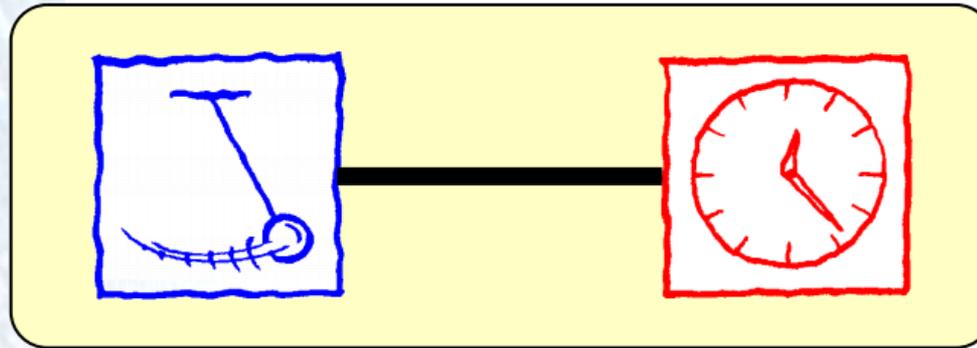
Atomuhren: Der Kernspin als Unruh

Ekkehard Peik
PTB Braunschweig

Kernspin Symposium
Bayerische Akademie der Wissenschaften
München, 5.4.2019



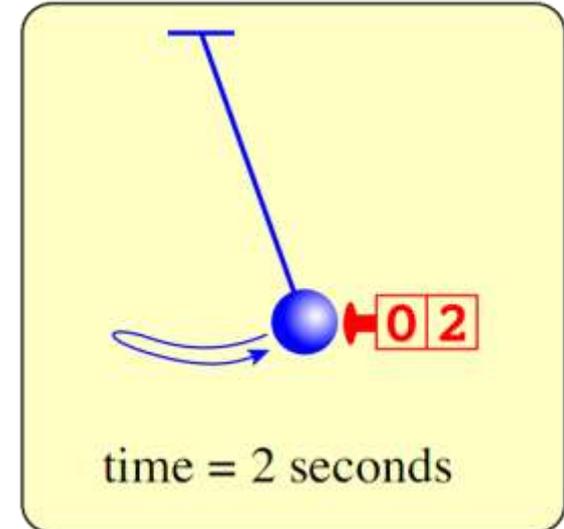
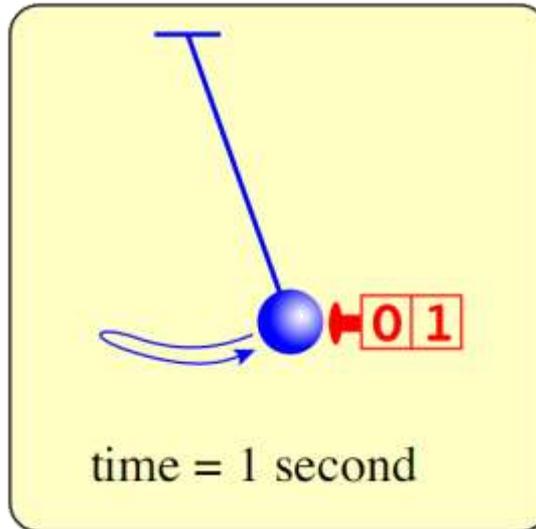
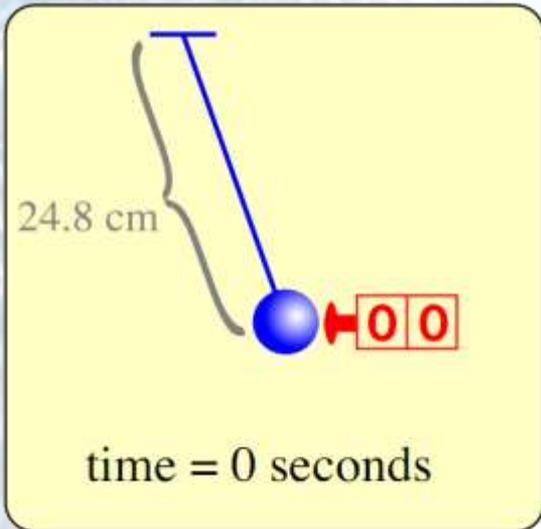
: Was ist eine Uhr ?



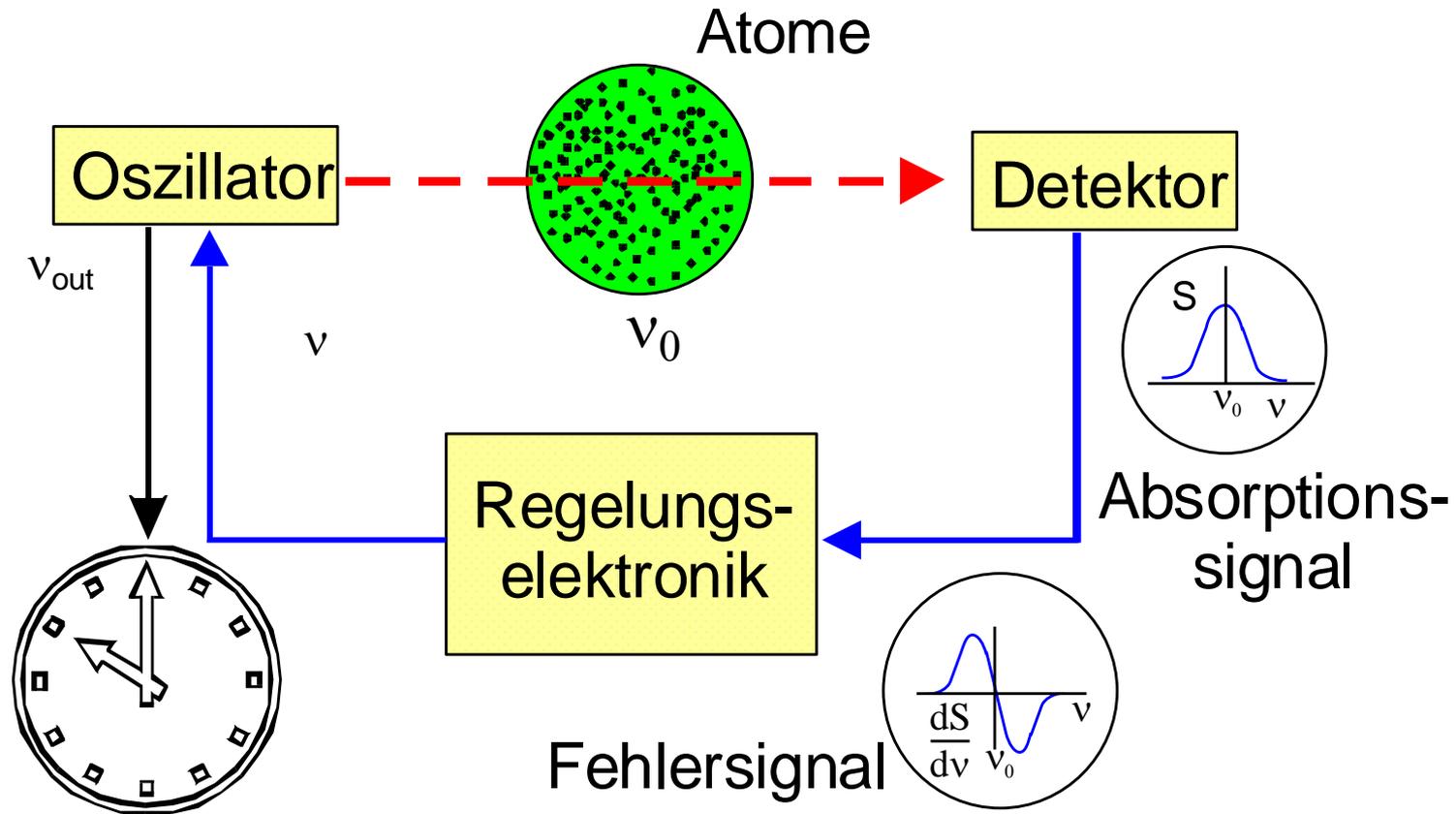
Taktgeber

+

Zähler



Prinzip einer Atomuhr



Taktgeber: atomare Resonanzfrequenz: $\nu_0 = \Delta E / h$

Taktgeber: atomare Resonanzfrequenz:

Kernspin im Magnetfeld

$$\nu_0 = \mu B / h$$

NMR:

Verwendet von außen angelegtes Magnetfeld

Atomuhr:

Verwendet **inneres** Magnetfeld

Z. B. im Cs-Atom:

6s Valenzelektron erzeugt am Kern: $B \approx 100$ T

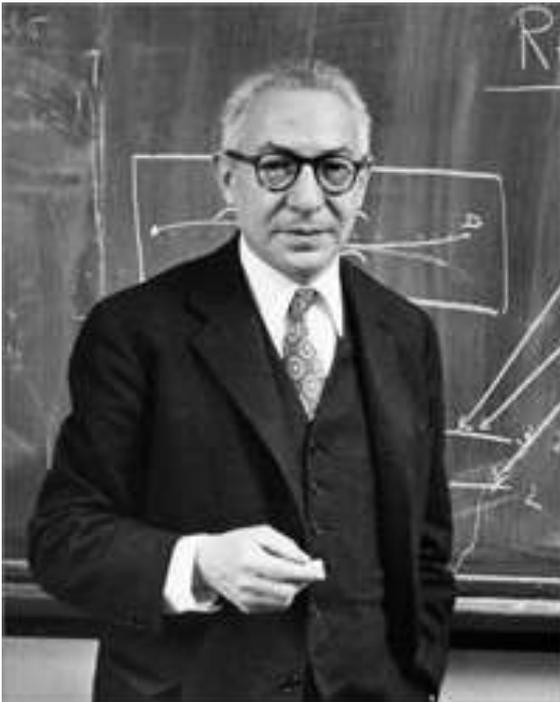
BAW

KERNSPIN SYMPOSIUM
5/4/19
13.30 UHR



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

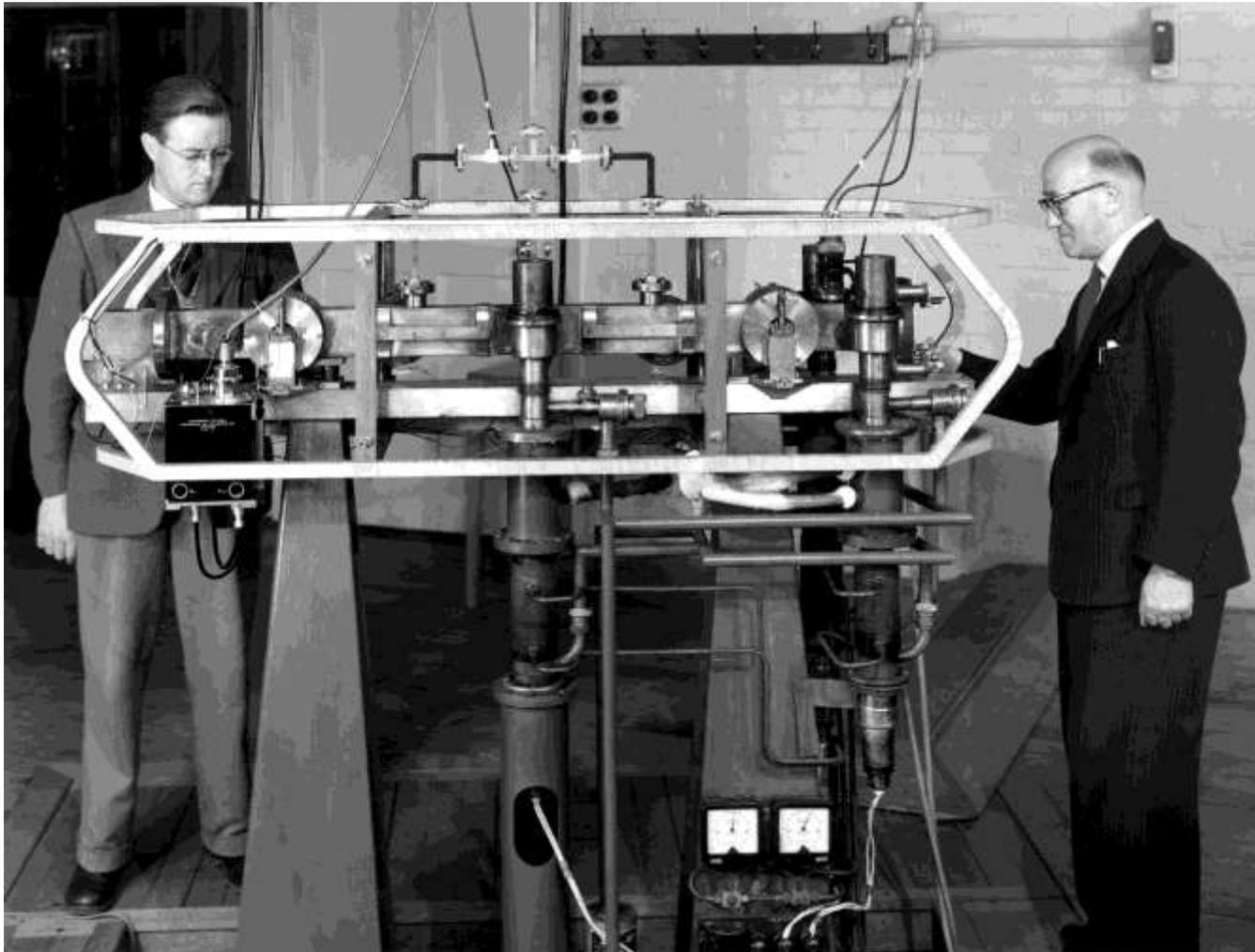
Warum Caesium?



Caesium (Cs):

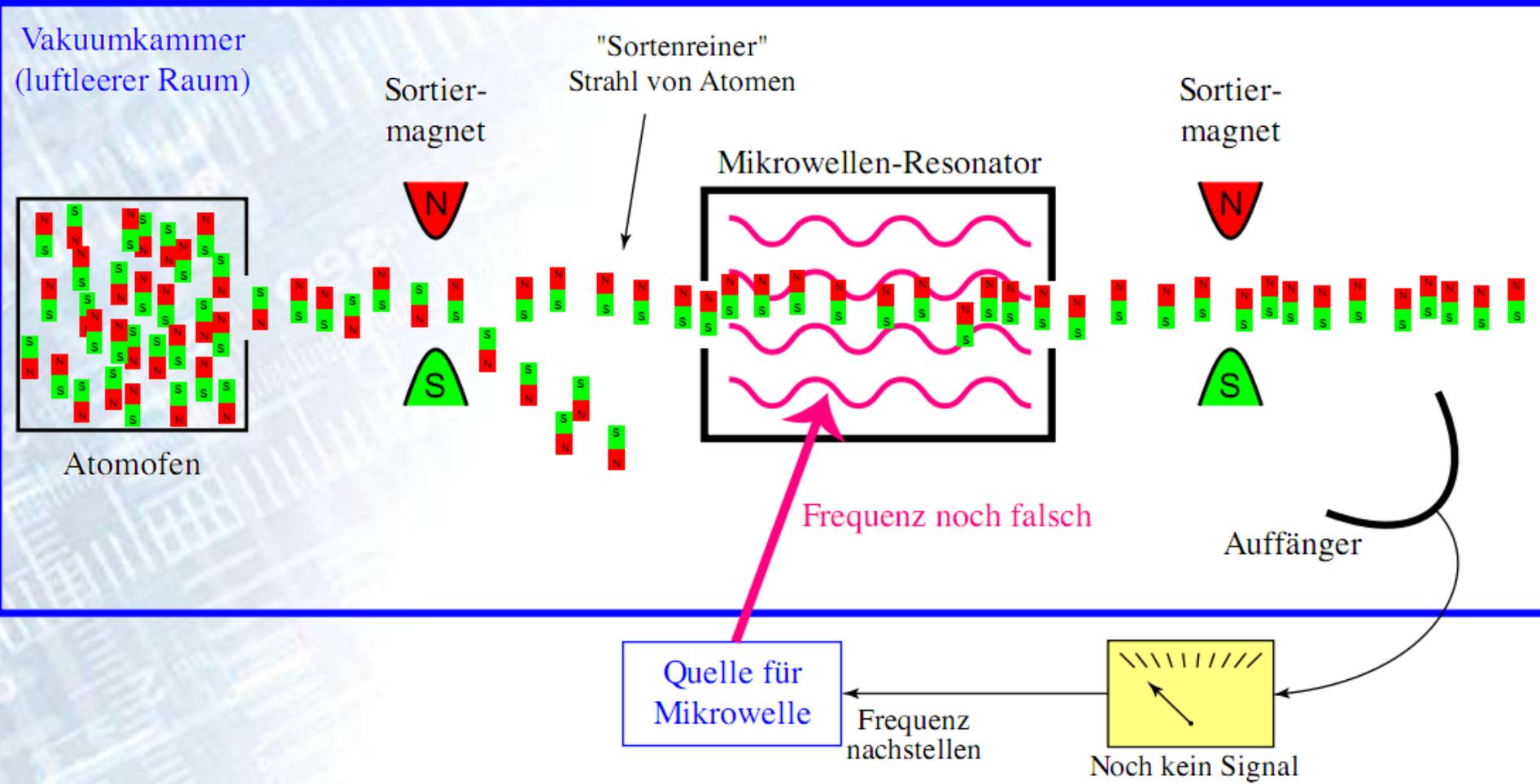
- metallisch, relativ häufig, ungiftig
- leicht zu verdampfen
- leicht nachzuweisen (als elektrischer Strom mit Heißdrahtdetektor)
- geeignete Resonanzfrequenz (möglichst hoch, aber realisierbar mit der Elektronik der 1950er Jahre): 9,2 GHz (Mikrowelle)
- nur ein stabiles Isotop (Cs-133) : alle natürlich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

Die erste Caesium-Atomuhr

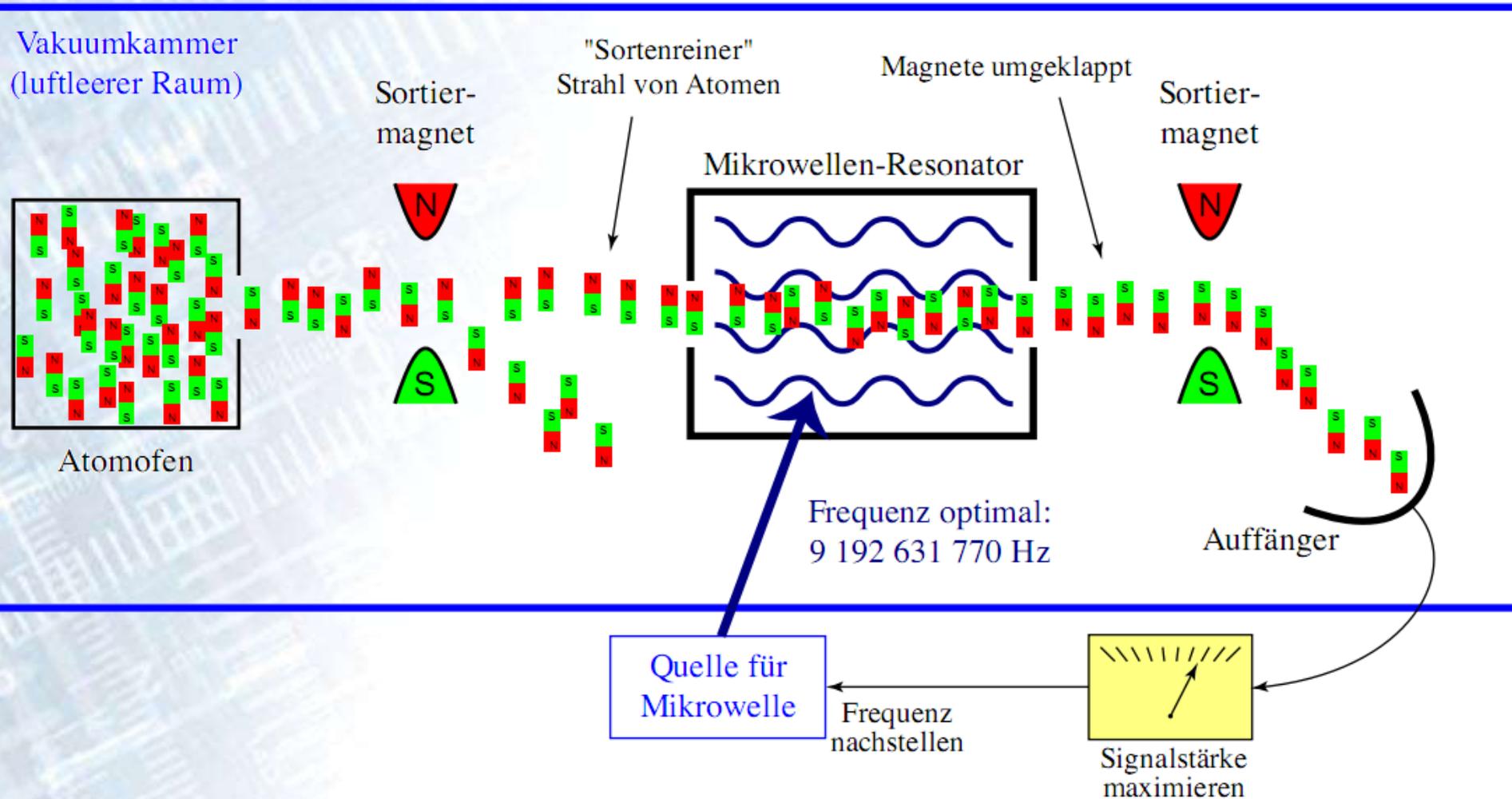


Essen und Parry, National Physical Laboratory, UK, 1955

: Aufbau einer Atomuhr



: Aufbau einer Atomuhr



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

Woher kommt der Wert 9 192 631 770 Hz?

Vergleich der astronomischen Ephemeriden-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

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

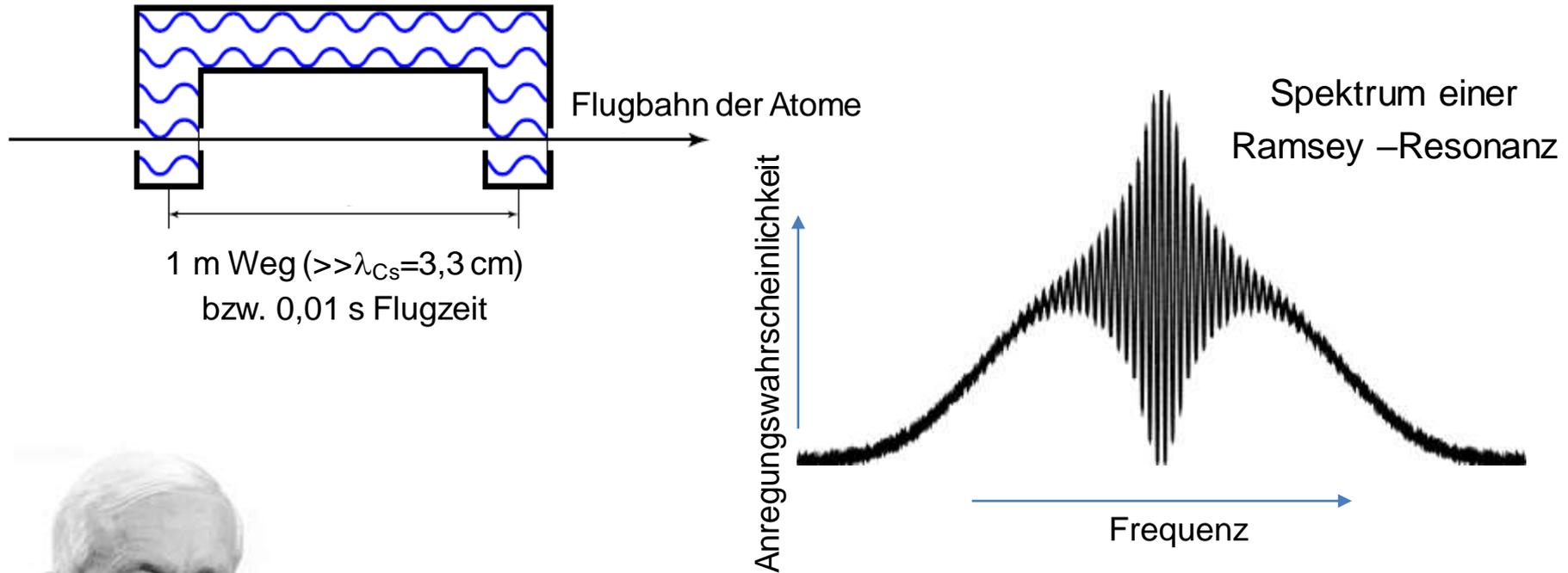


W. Markowitz mit der dual-rate moon camera zur Messung der Okkultation von Sternen durch den Mond. Foto: USNO

Unsicherheit etwa 0,1 s bei Messungen an einem Tag.

Mikrowellen-Resonator: Ramsey-Methode

Zwei getrennte Mikrowellenpulse, zu Beginn und zum Ende der Wechselwirkung.



Norman Ramsey
1915 – 2011
Nobelpreis 1989

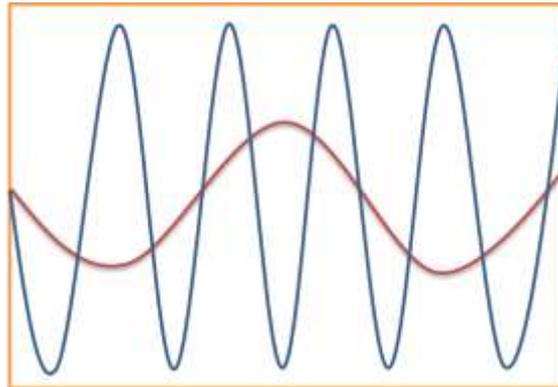
Erzielung kleiner Linienbreiten am günstigsten mit zwei Bestrahlungen mit dem Mikrowellenfeld, mit großem zeitlichen Abstand T

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

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

Genauere Uhren durch:

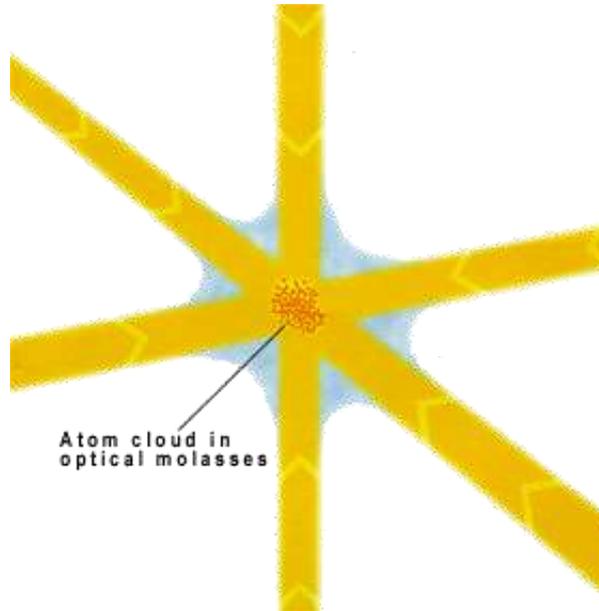
- Längere Beobachtungszeit : „kalte Atome“ in einer Fontäne oder Falle
→ es können mehr Schwingungsperioden der Atome verfolgt werden
- Höhere Frequenzen: „Optische Uhr“ mit Laserlicht statt Mikrowelle
→ die Zahl der Schwingungsperioden pro Sekunde ist höher



Laserkühlung von Atomen

Abbremsung durch den Strahlungsdruck eines Laserstrahls.

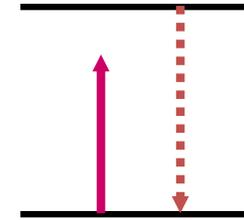
Kühlen und Speichern von Atomen aus dem Hintergrundgas



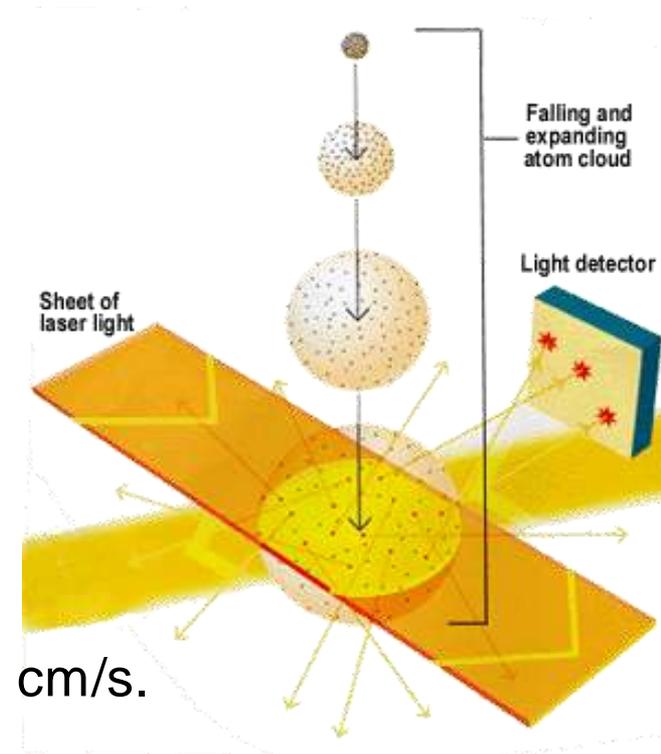
Optische Melasse

Wo sich die sechs Laserstrahlen überlagern, entsteht für die Atome ein „zähes“ Medium.

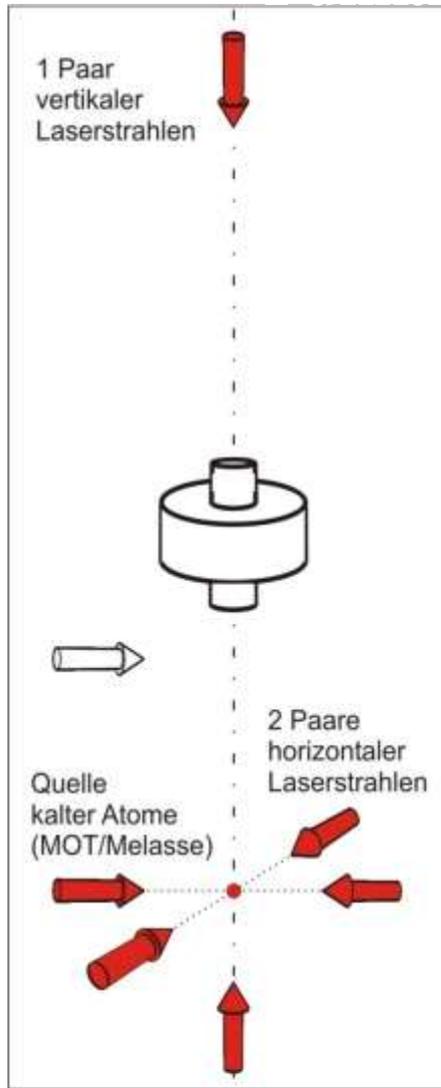
Cs-Atome erreichen dabei eine Temperatur von etwa $1 \mu\text{K}$, bzw. eine Geschwindigkeit von 1 cm/s .



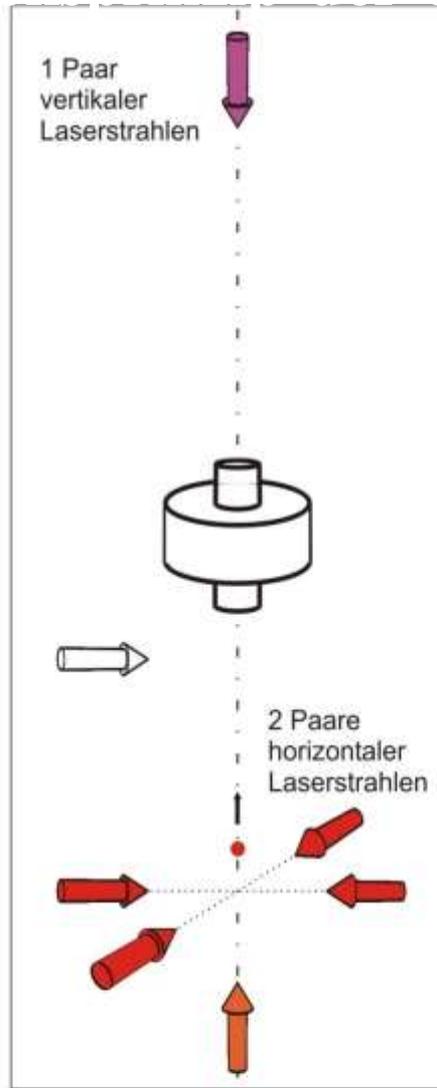
Nobelpreis 1997
S. Chu, C. Cohen-Tannoudji,
W. Phillips



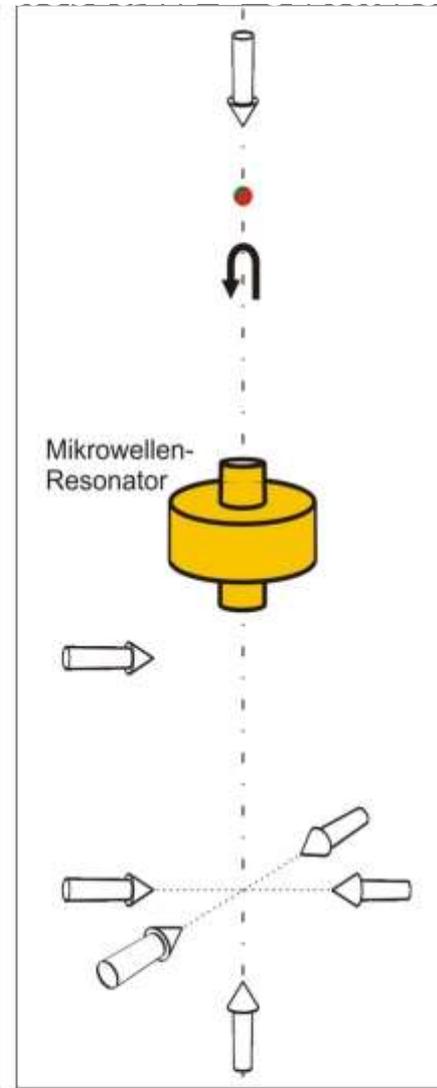
Der Ablauf in einer Caesium-Fontänenuhr



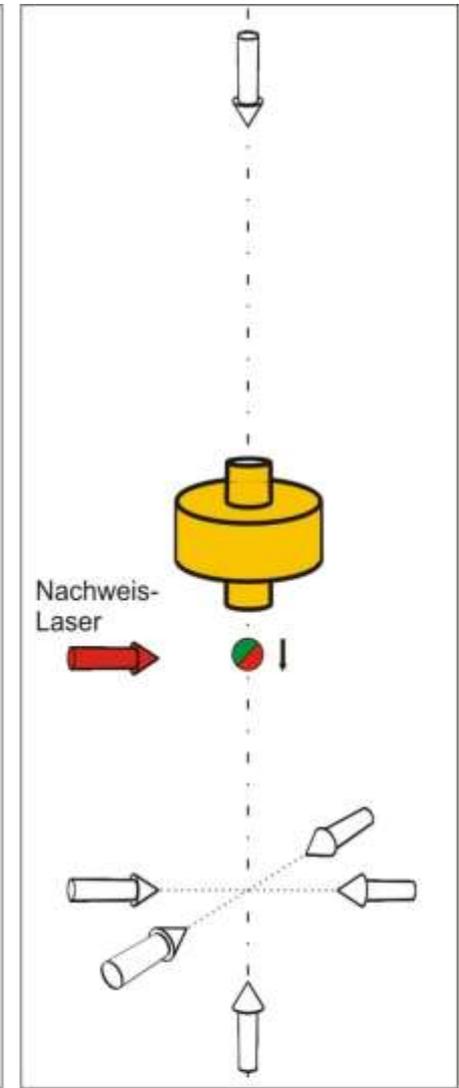
Laden einer Wolke von kalten Caesiumatomen



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

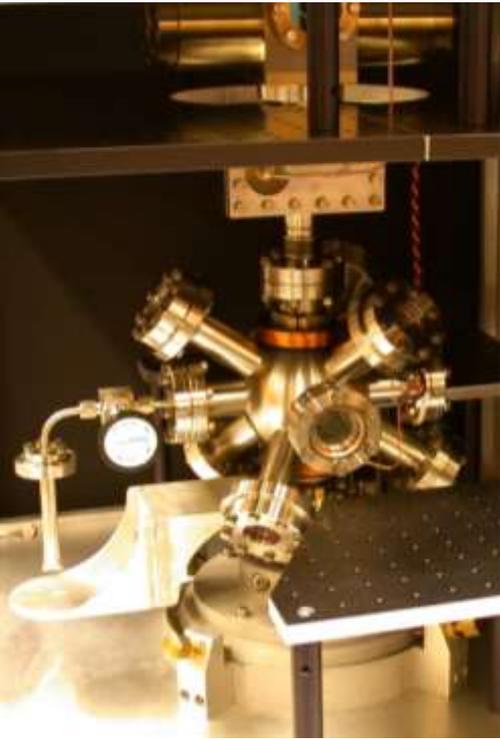


Wechselwirkung der Atome mit dem Mikrowellenfeld im Resonator beim Aufsteigen und Fallen



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

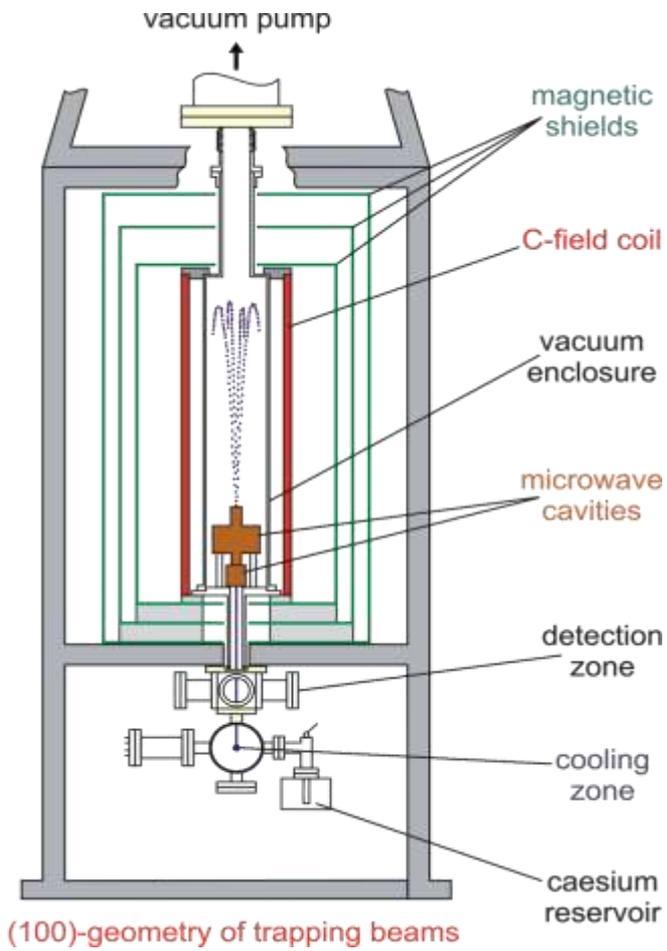
Die Caesium-Fontänenuhren der PTB



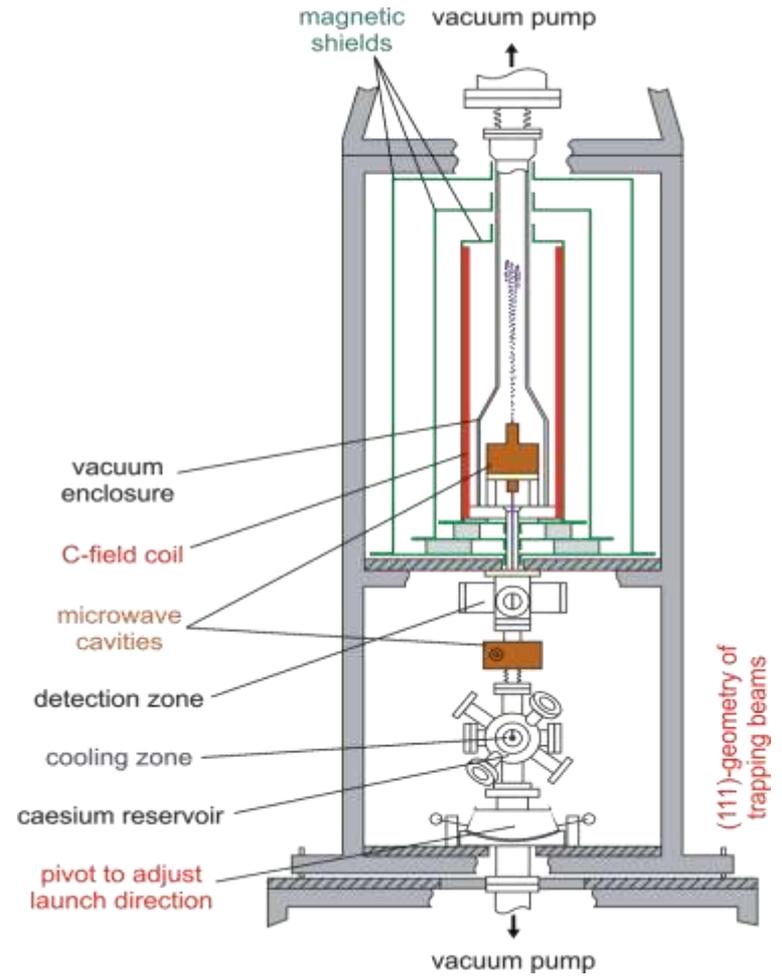
Deutschlands genaueste Uhren,
CSF1 und CSF2.

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

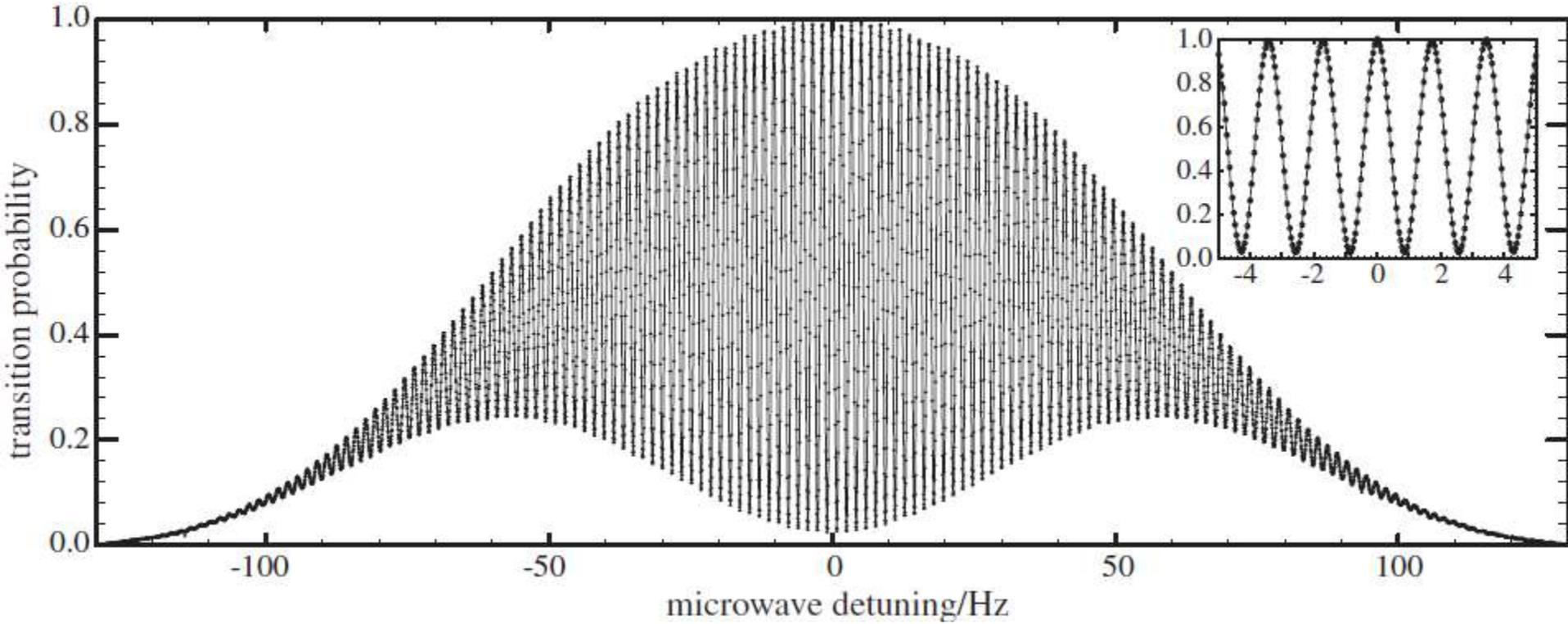
CSF1



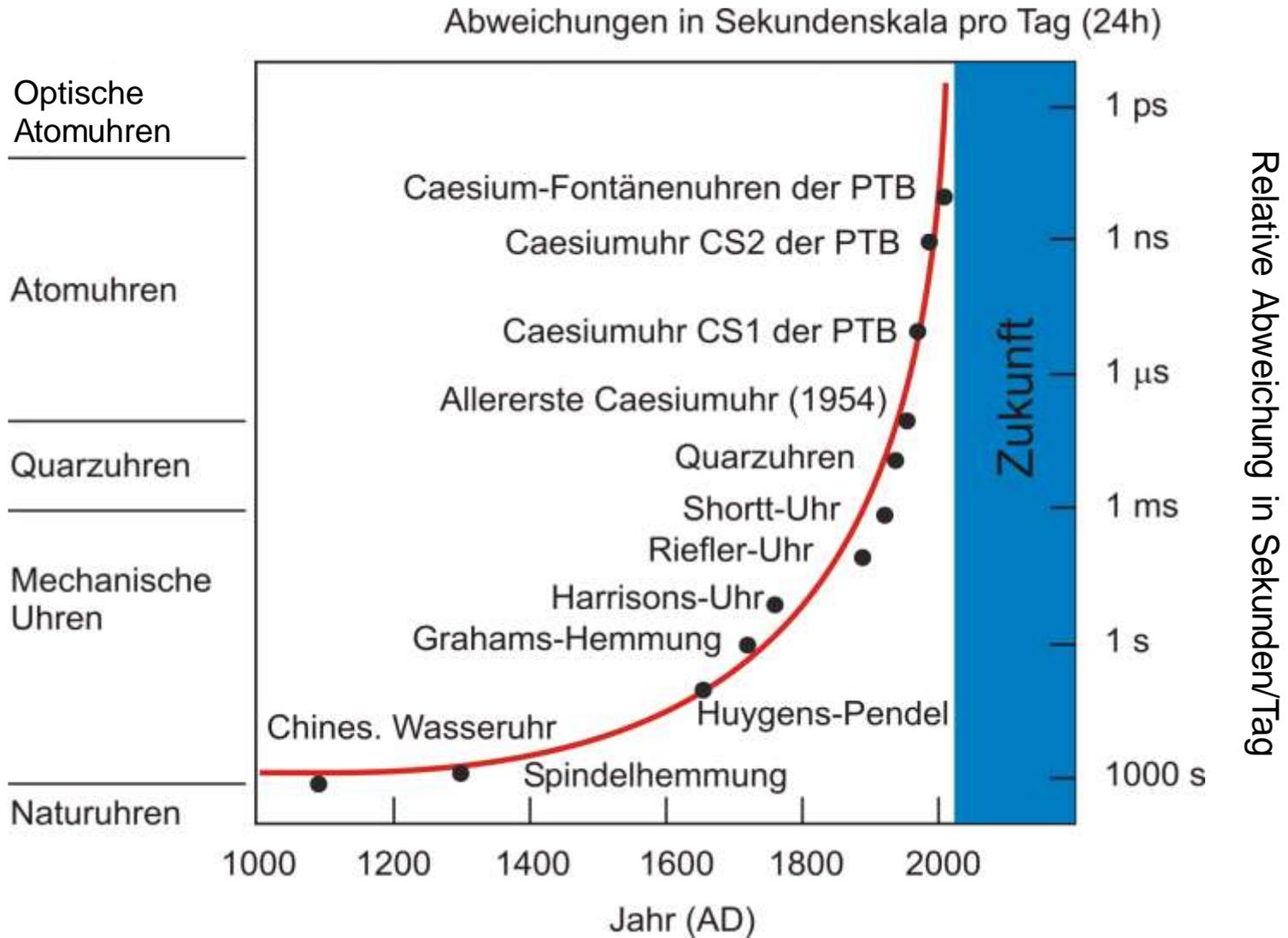
CSF2



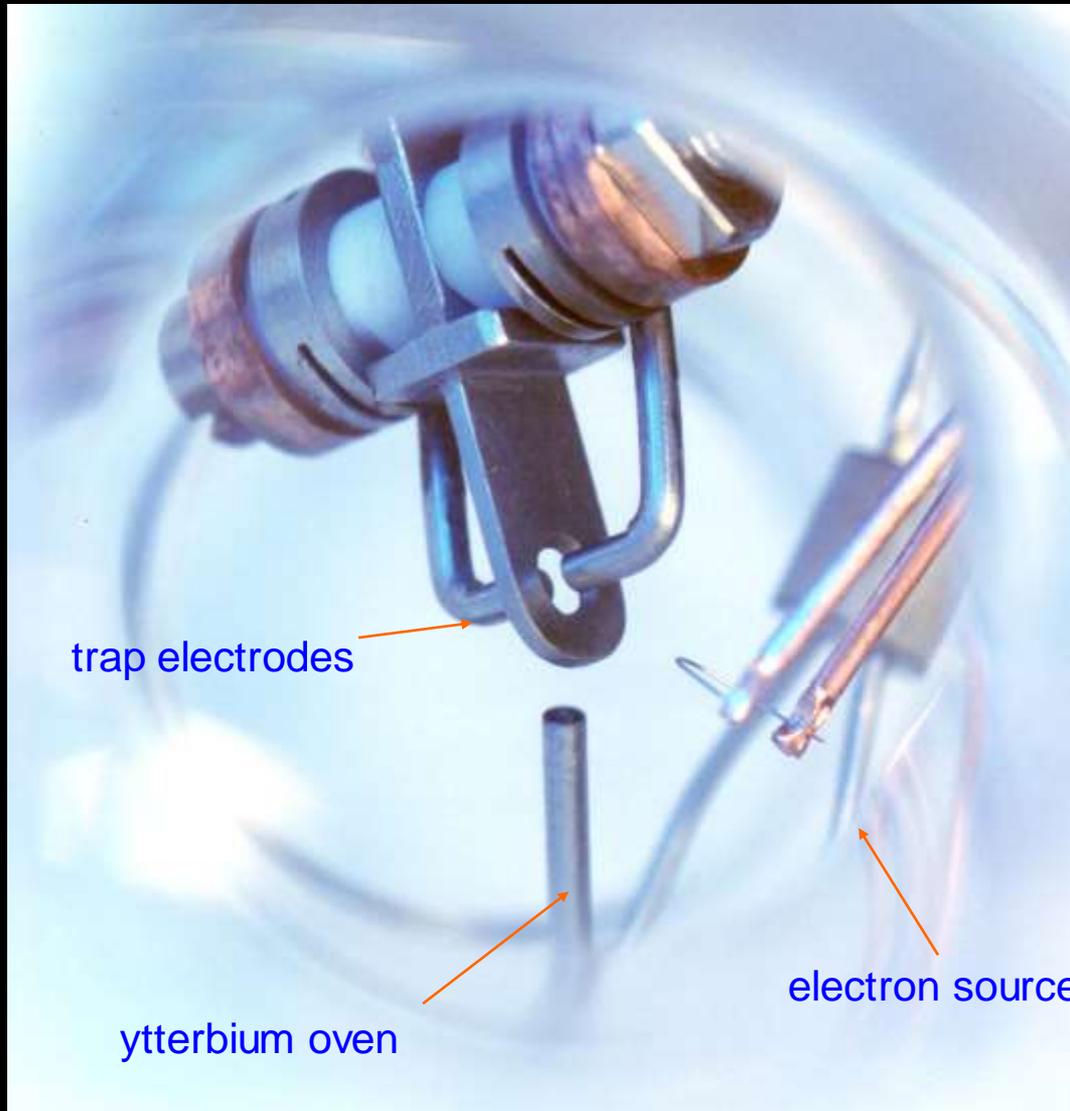
Ramsey-Signal einer Cs-Fontänenuhr



Entwicklung der Genauigkeit von Uhren

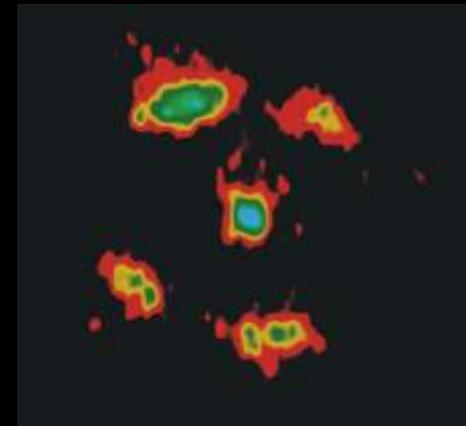


Optische Uhr mit gespeicherten Ionen



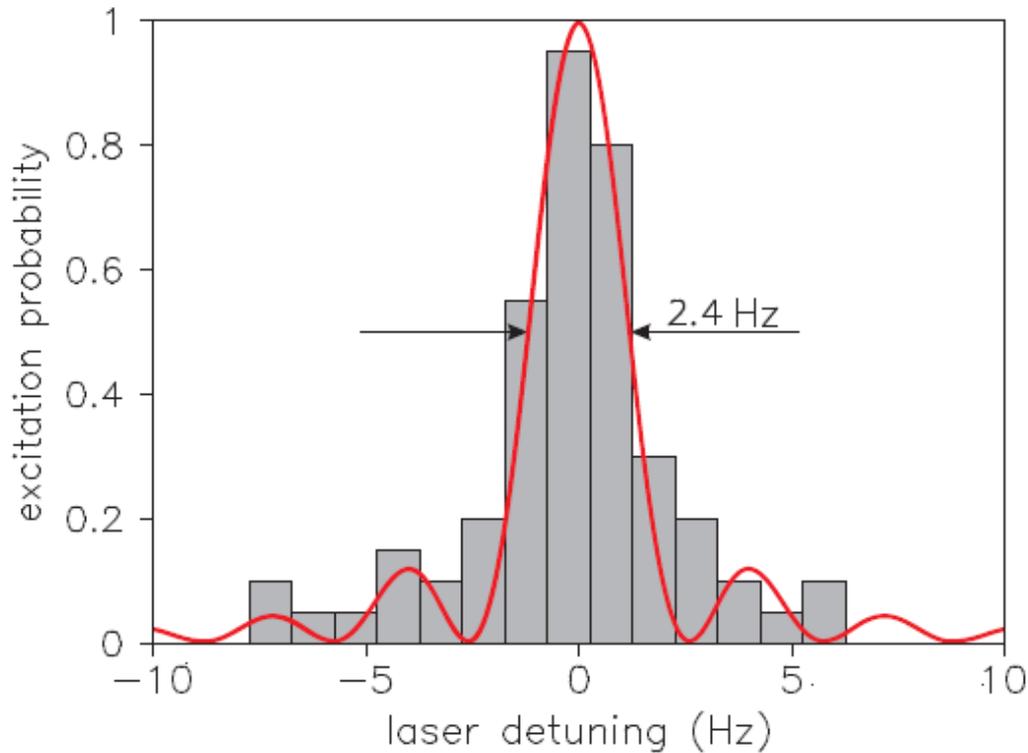
PTB
Ionenfalle
für Yb^+

$d=1,4 \text{ mm}$
 $U=600 \text{ V}$
bei 16 MHz



5 Yb^+ Ionen

Anregungsspektrum eines optischen Übergangs in Yb⁺



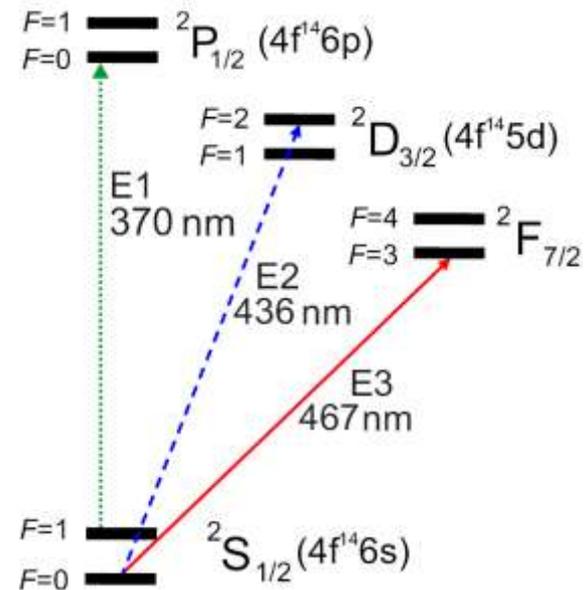
Frequenz:

$$f = 642\,121\,496\,772\,645,13 \text{ Hz}$$

Linienbreite: $b = 2,4 \text{ Hz}$

Güte: $f/b = 2,7 \times 10^{14}$

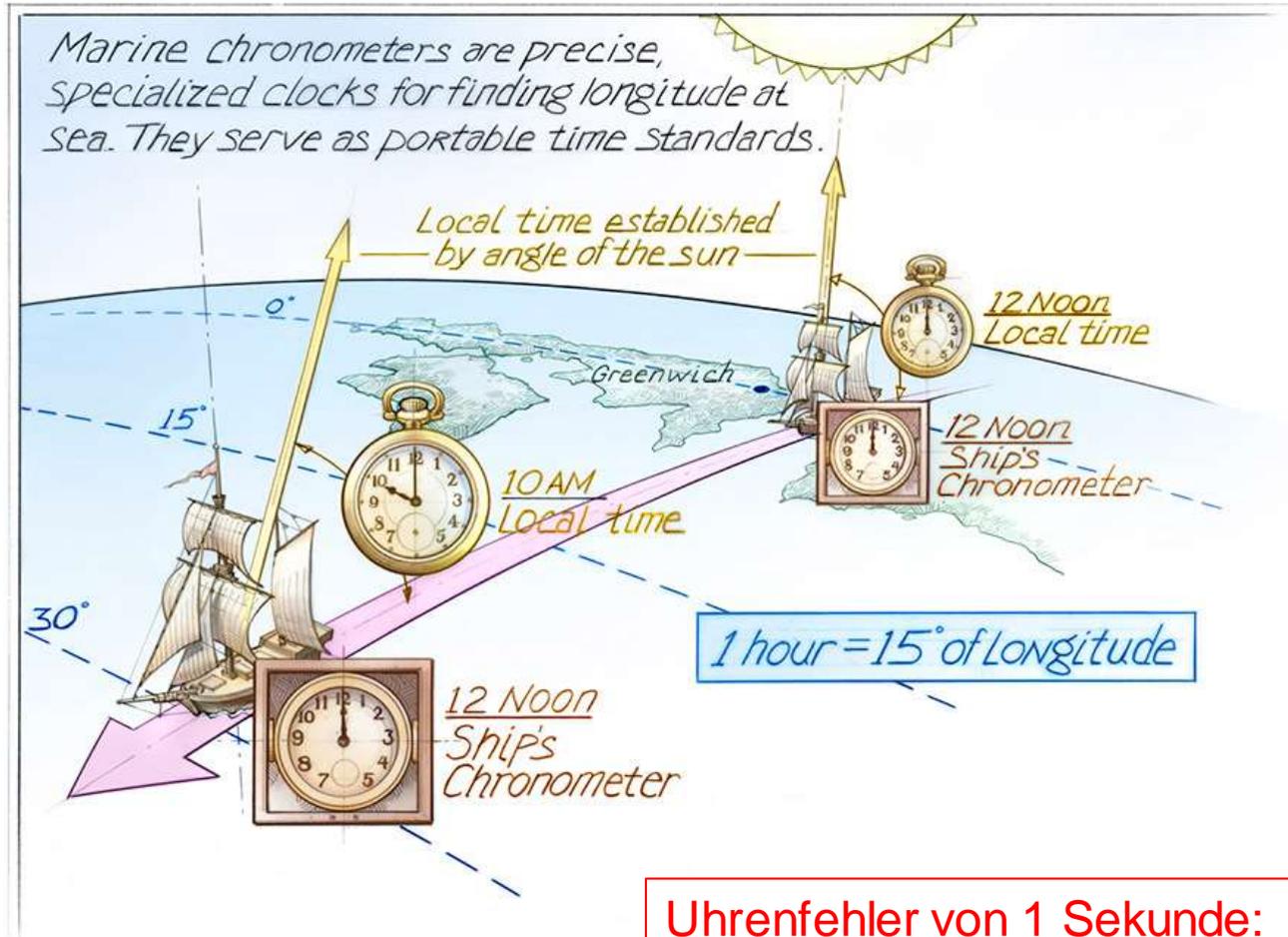
Unsicherheit: $3,2 \times 10^{-18}$



Navigation und Zeitmessung früher:

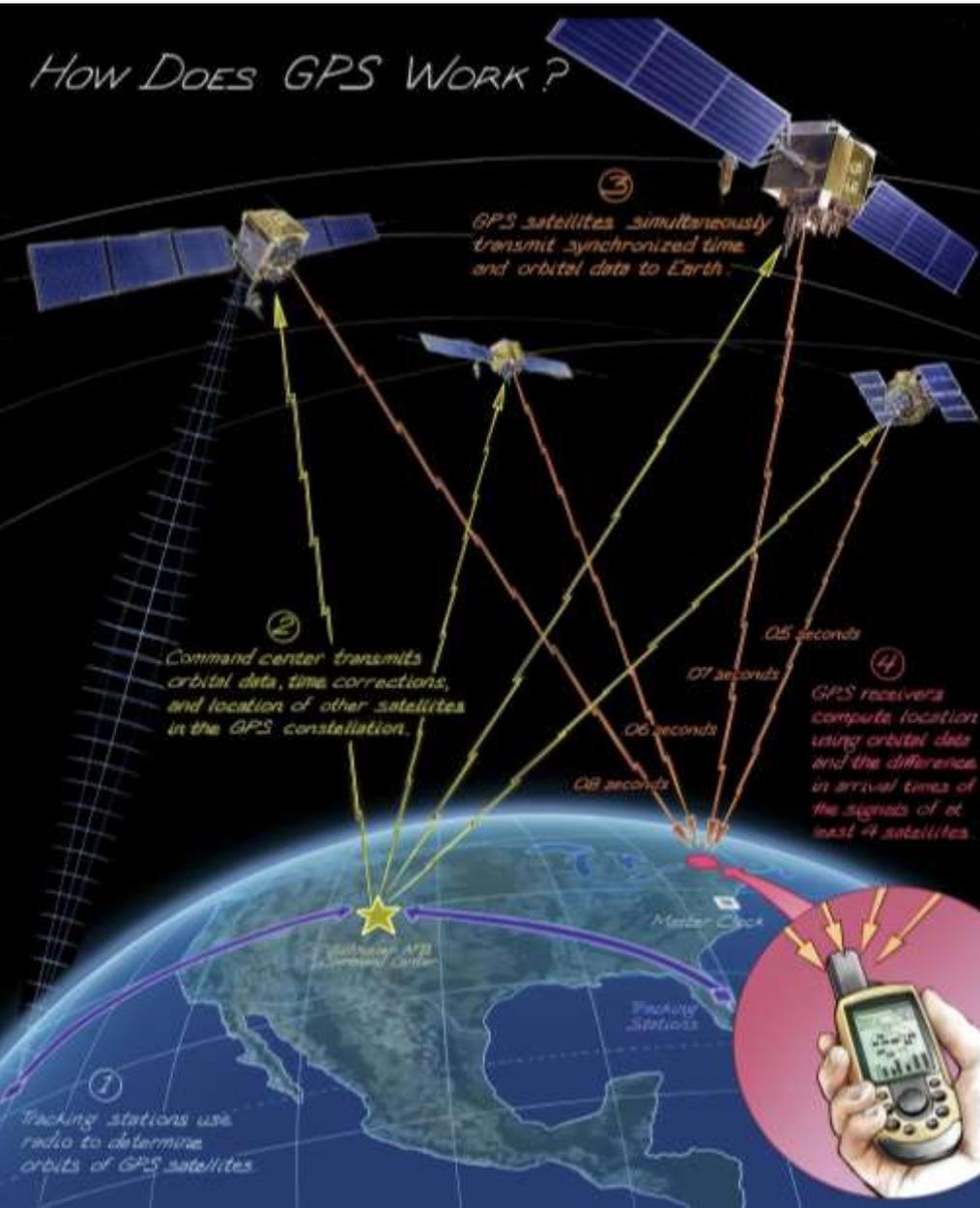
Bestimmung des Längengrades mit Uhr und Sextant

USING A MARINE CHRONOMETER



**Uhrenfehler von 1 Sekunde:
→ Positionsfehler von 460 m (am Äquator)**

Navigation und Zeitmessung heute: Globale Satellitennavigationssysteme (GPS, GLONASS, GALILEO)



Uhrenfehler von 1 Nanosekunde:
→ Positionsfehler von 0,3 m
(1 ns/Tag $\approx 1 \times 10^{-14}$)

Danke für Ihr
Interesse!

Zeit für Ihre
Fragen...

www.ptb.de/zeit
www.nuclock.eu



Horizon 2020
European Union funding
for Research & Innovation

