



Zeit- und Frequenzstandards

Nick Rothbart

Gliederung



- Einleitung
- Klassische Cäsium-Atomuhr
- Cäsium-Fontäne

Einleitung



- Was ist Zeit?
„Zeit ist, was verhindert, dass alles auf einmal passiert!“
John A. Wheeler
- Was ist eine Sekunde?
„Die Sekunde ist das 9 192 631 770-fache der Periodendauer der dem Übergang zwischen den beiden Hyperfeinstrukturniveaus des Grundzustandes von Atomen des Nuklids Cs-133 entsprechenden Strahlung.“

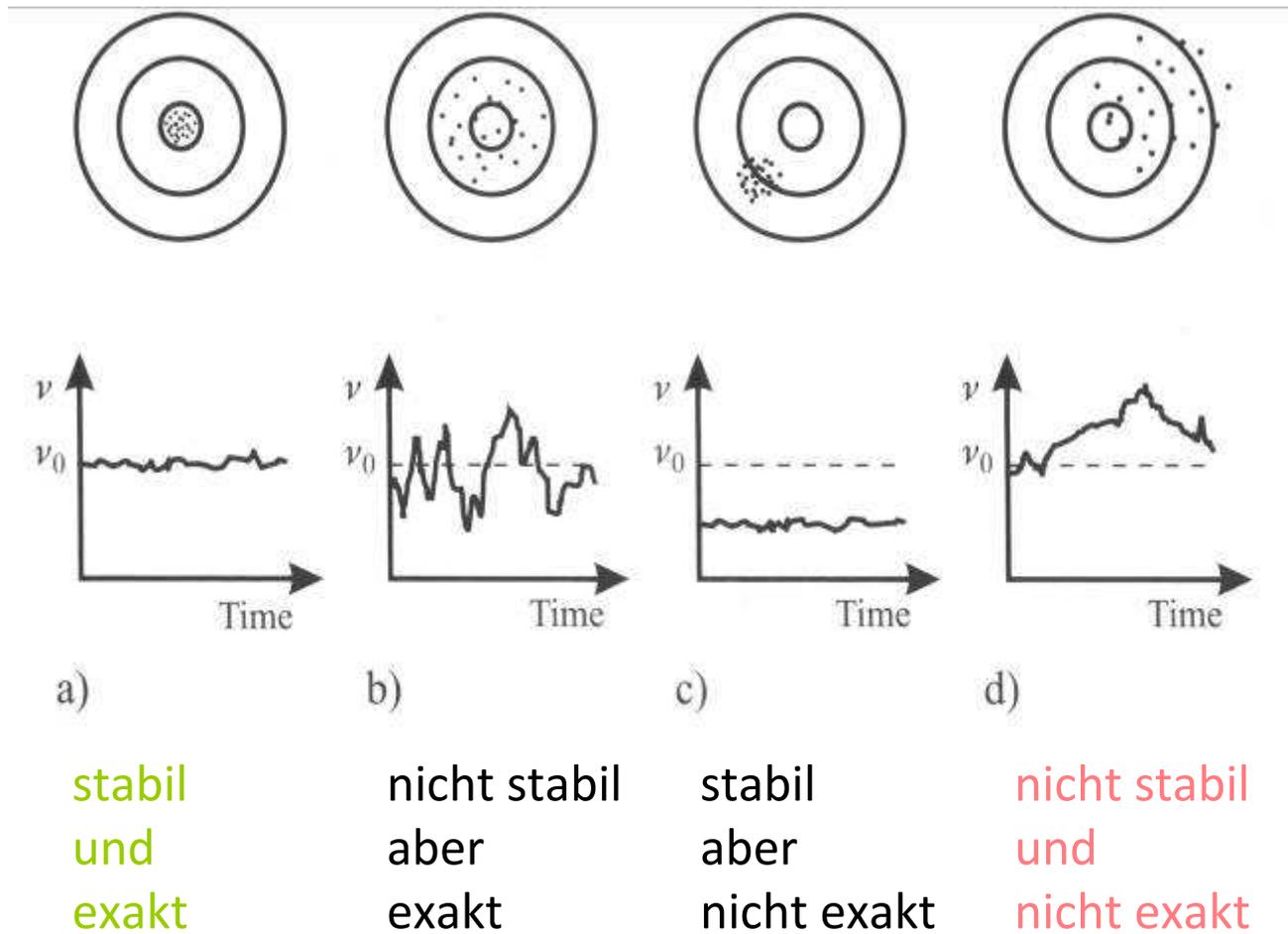
Motivation für genaue Zeitmessung



- Hochpräzisionsexperimente z.B. zur Relativitätstheorie
- Messung anderer physikalischer Größen z.B. der Länge
- Anwendungen wie z.B. GPS
- Gesetzlicher Zeitstandard



Voraussetzungen für einen Frequenzstandard



stabil
und
exakt

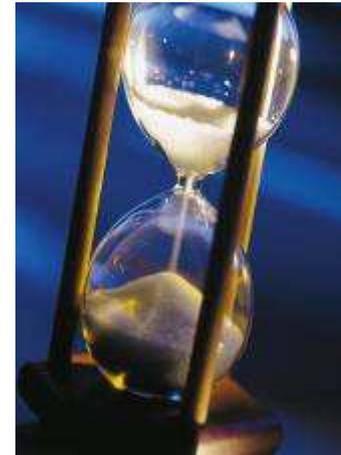
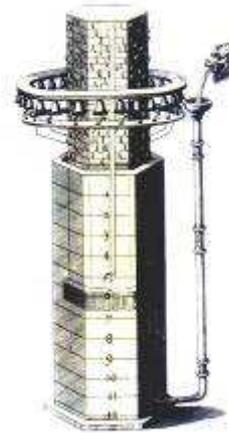
nicht stabil
aber
exakt

stabil
aber
nicht exakt

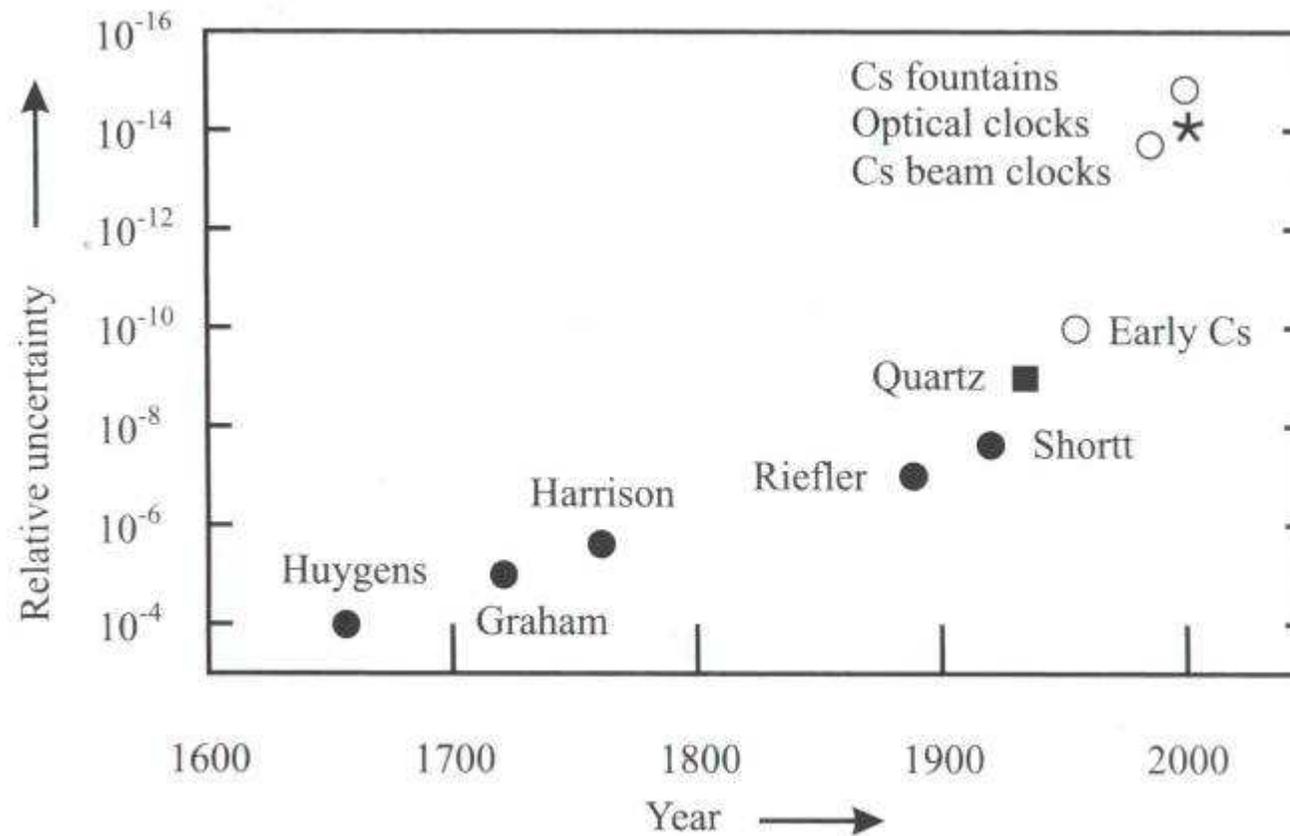
nicht stabil
und
nicht exakt

Quelle: Fritz Riehle, Frequency Standards

Wie kann man Zeit messen?

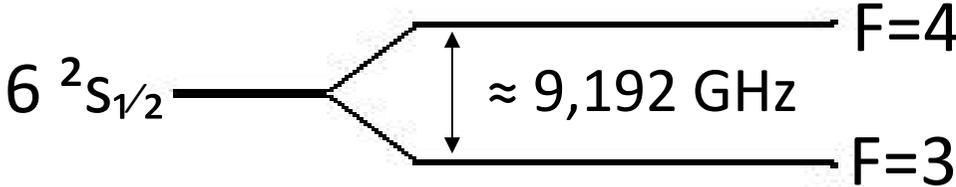


Relative Unsicherheit

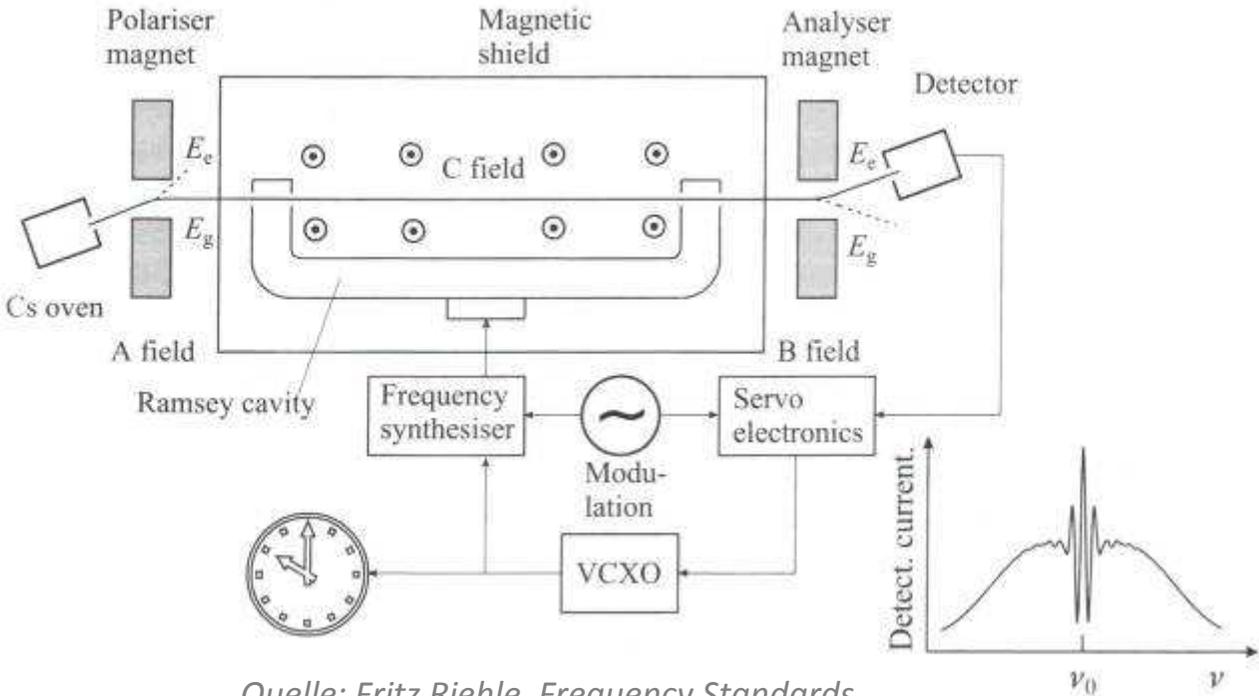


Quelle: Fritz Riehle, *Frequency Standards*

Cäsium-Atomuhr



Prinzip:

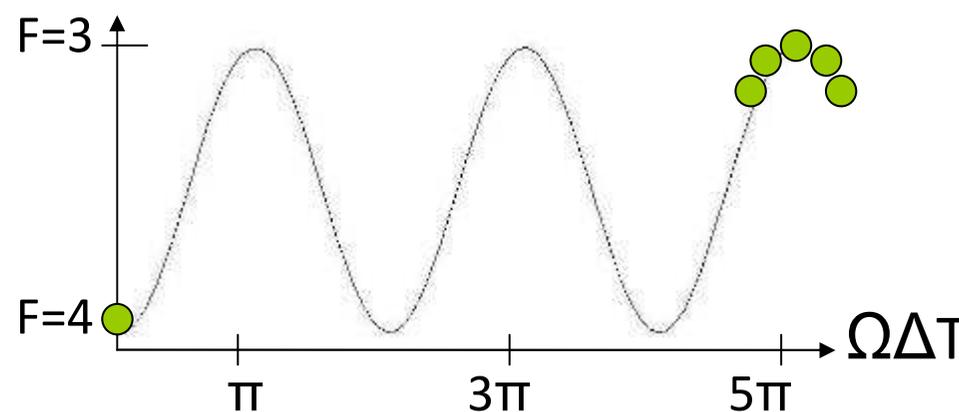
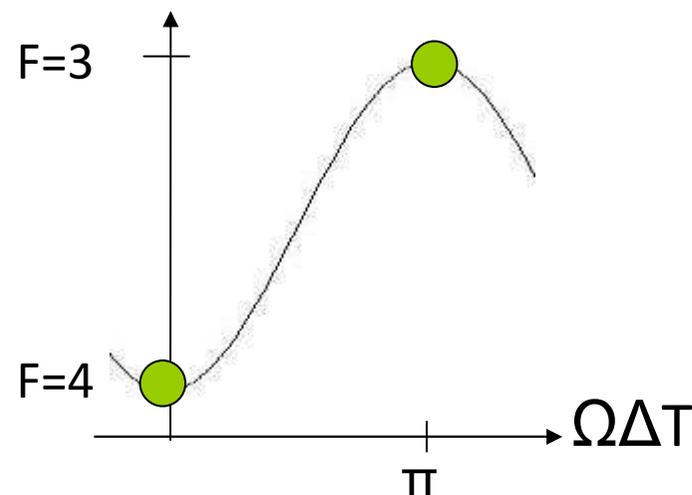


Quelle: Fritz Riehle, Frequency Standards

Resonator



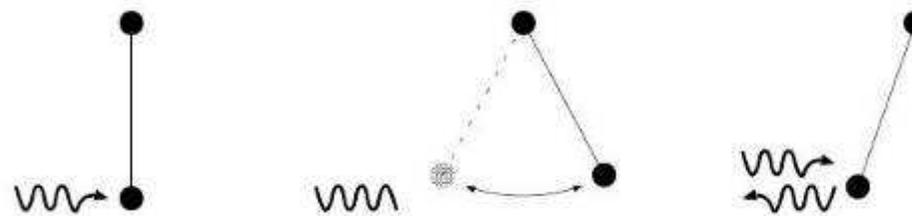
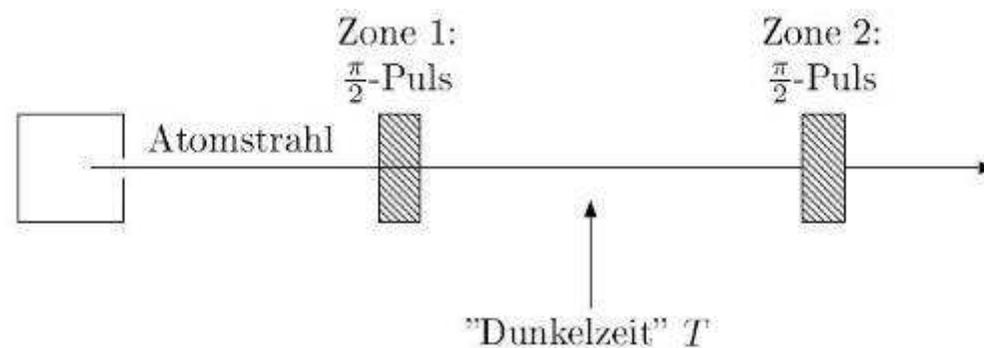
- Einfachste Möglichkeit:
 π -Puls
 $\Omega_{\text{Rabi}} \Delta T = \pi$
- Wegen $\Delta\omega \Delta T \geq 1$ möglichst lange WWdauer
- $\Omega_{\text{Rabi}} \Delta T = \pi + n2\pi$
- $\Delta T = L/v$,
Geschwindigkeitsverteilung
→ schlechtes Signal



Resonator



- Idee: 2 Wechselwirkungszone: Schwingungsanregung und Phasenabgleich (Ramsey-Methode, 1989)



Quelle: <http://www.physnet.uni-hamburg.de/ilp/de/qoptik/quantenoptik.pdf>

Ramsey Methode

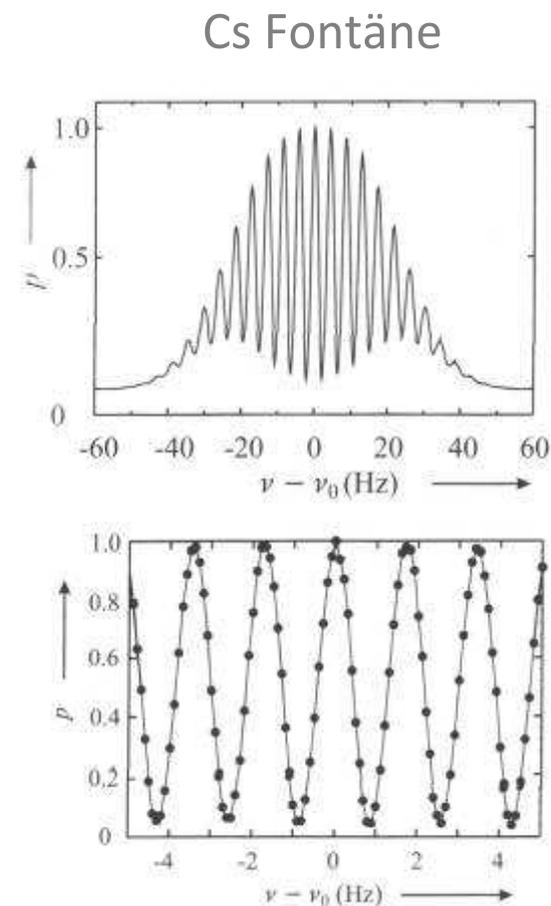
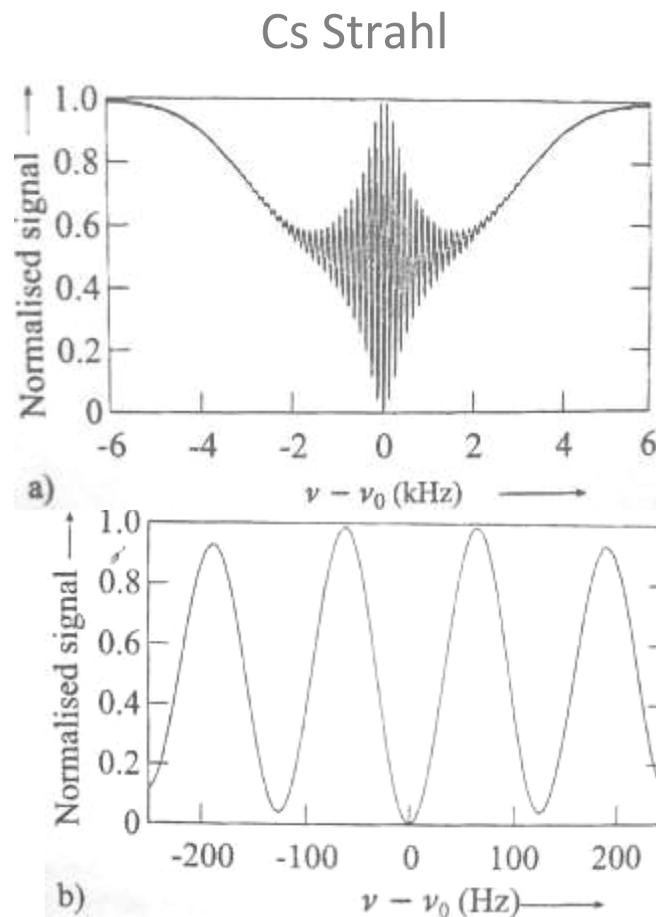


- Resonanzfall: $\Delta=0$
 - $\pi/2$ Puls \rightarrow Atom im Mischzustand 50/50
 - Dunkelzeit T: Atom und Feld schwingen in Phase, v-unabh.
 - $\pi/2$ Puls \rightarrow Atom geht in F=3 Zustand über
 - \rightarrow Übergang in F=3, unabh. von Geschwindigkeit, T beliebig
- Minimale Verstimmung: $\Delta \cdot T = \pi$
 - $\pi/2$ Puls \rightarrow Atom im Mischzustand 50/50
 - Dunkelzeit T: Phasenverschiebung π
 - $\pi/2$ Puls \rightarrow Atom geht in F=4 Zustand über
 - \rightarrow Übergang in F=4
- $P_{F=3} \approx \cos(\Delta \cdot T)$

Ramsey Methode



- $P_{F=3} \approx \cos(\Delta \cdot T) \rightarrow$ Ramsey fringes

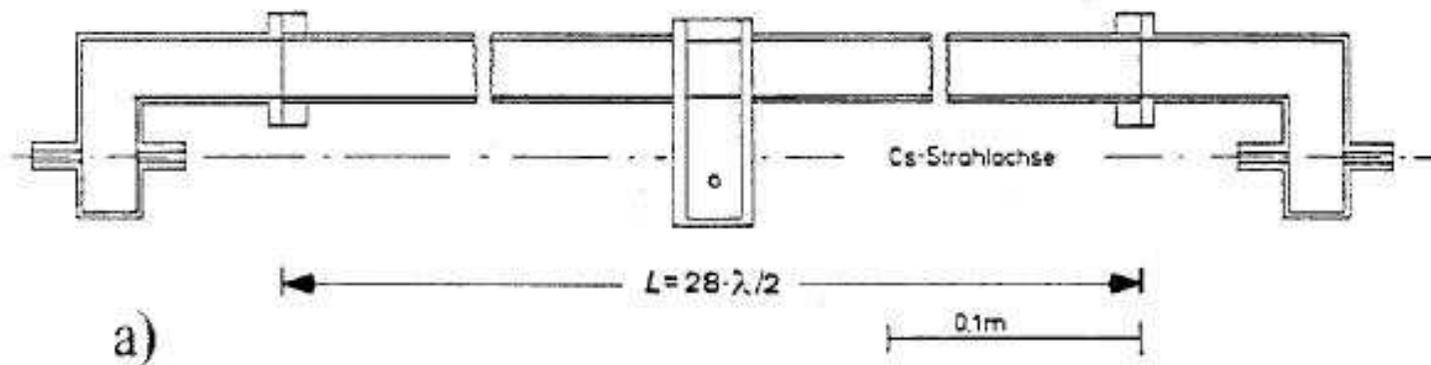


Quelle: Fritz Riehle, Frequency Standards

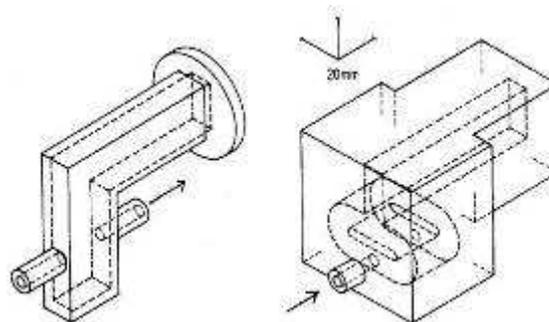
Umsetzung



- Ramsey Resonator erzeugt stehendes Wellenfeld



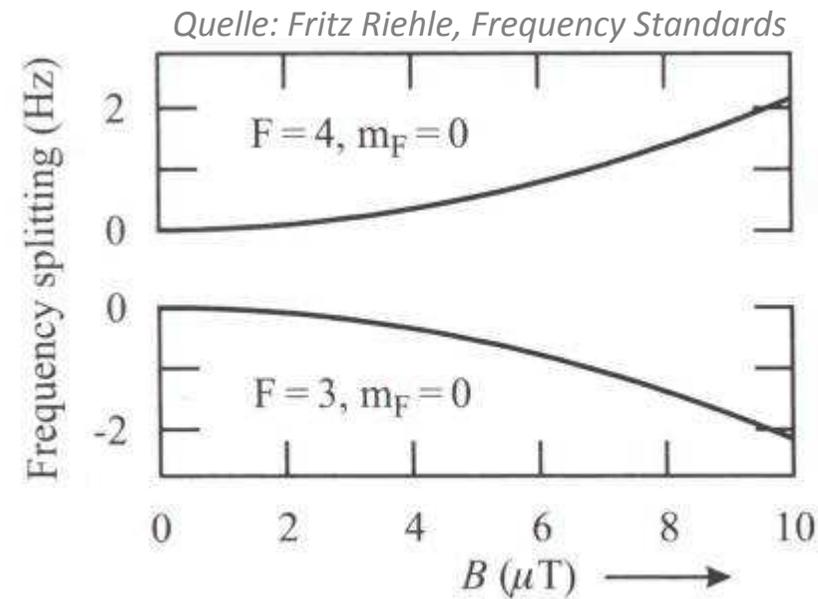
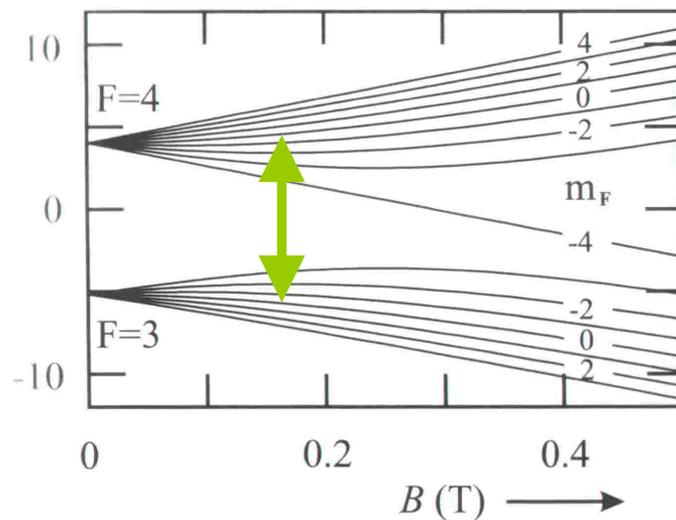
- Endstücken mit Ringresonatoren für verbesserte Phasenkohärenz



C-Feld



- 2 Effekte: Separation der $m \neq 0$ Niveaus \leftrightarrow Verschiebung der $m=0$ Niveaus



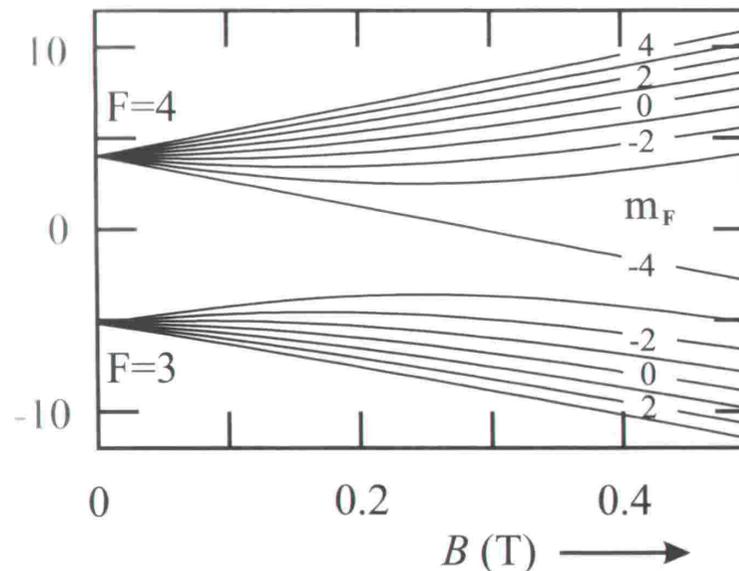
- $B \approx 8,2 \mu\text{T}$ in CS1
- Anforderungen: homogen, gute Abschirmung

Polarisator / Analysator



- Starkes, inhomogenes Magnetfeld, $B \approx 0,4\text{T}$
- $F = -\partial E / \partial z = -(\partial E / \partial B)(\partial B / \partial z)$

Quelle: Fritz Riehle, Frequency Standards



- \rightarrow Vorzeichen der Kraft verschieden für $(F=4, M=0)$ und $(F=3, M=0)$

Beispiele



„CS2“ in der PTB, Stabilität $1,5 \cdot 10^{-14}$



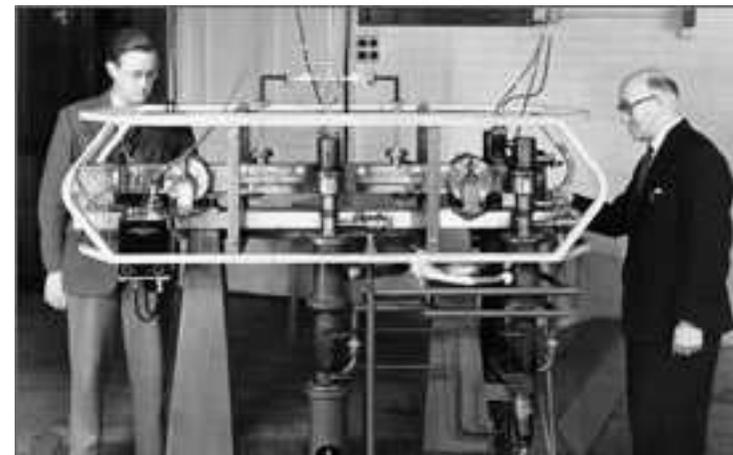
Quelle: www.ptb.de

Cäsium Atomuhr
von L. Essen und J.V.L. Parry von 1955

Kommerzielle Cs Uhr von hp,
Stabilität $5 \cdot 10^{-14}$



Quelle: www.symmetricom.de



Quelle: www.wikipedia.de

Cäsium-Armbanduhr

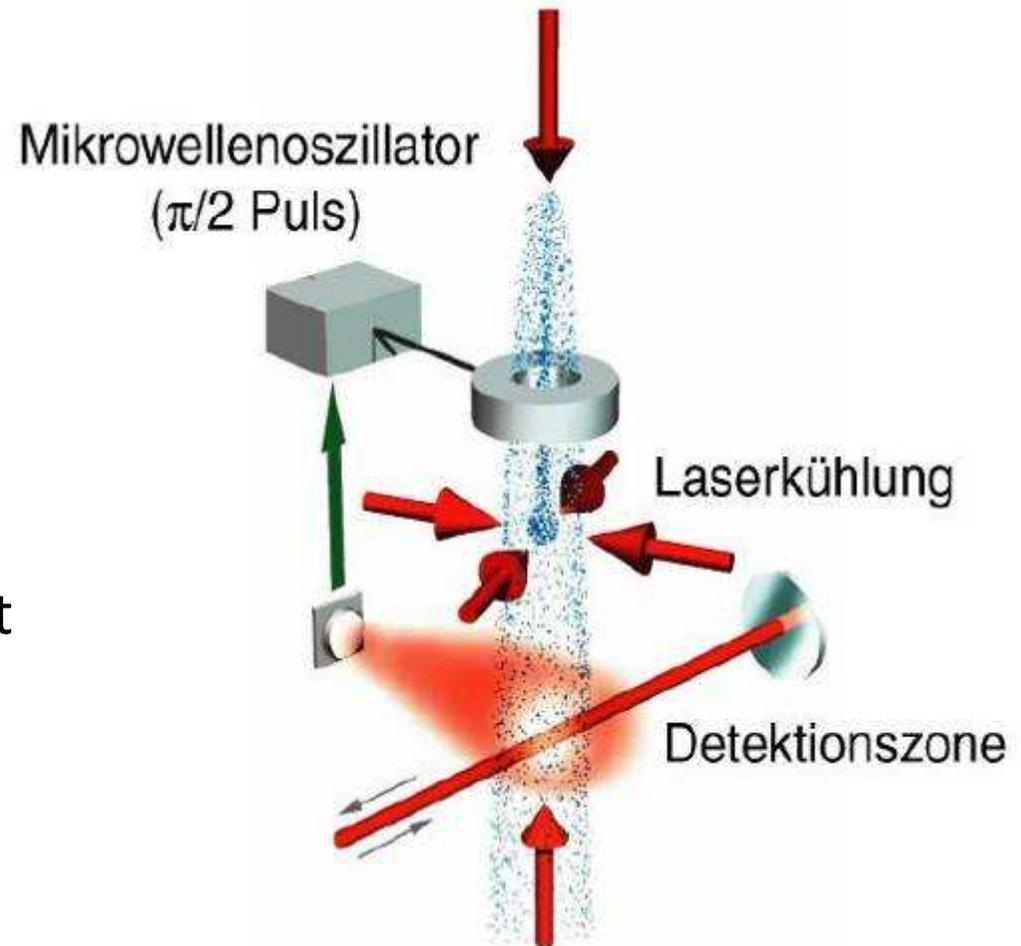


Quelle: www.leapsecond.de

Cäsium-Fontäne



- Idee: ballistische Flugbahn für längere WWdauer T
- \rightarrow niedrige Temperatur notwendig, um Drift zu vermeiden
- $H \approx 1\text{m}$, $T \approx 1\text{s}$, $T \approx 2\mu\text{K} \rightarrow 40\%$ der Atome gelangen erneut in Resonator
- $\Delta T/T < 10^{-15}$ möglich



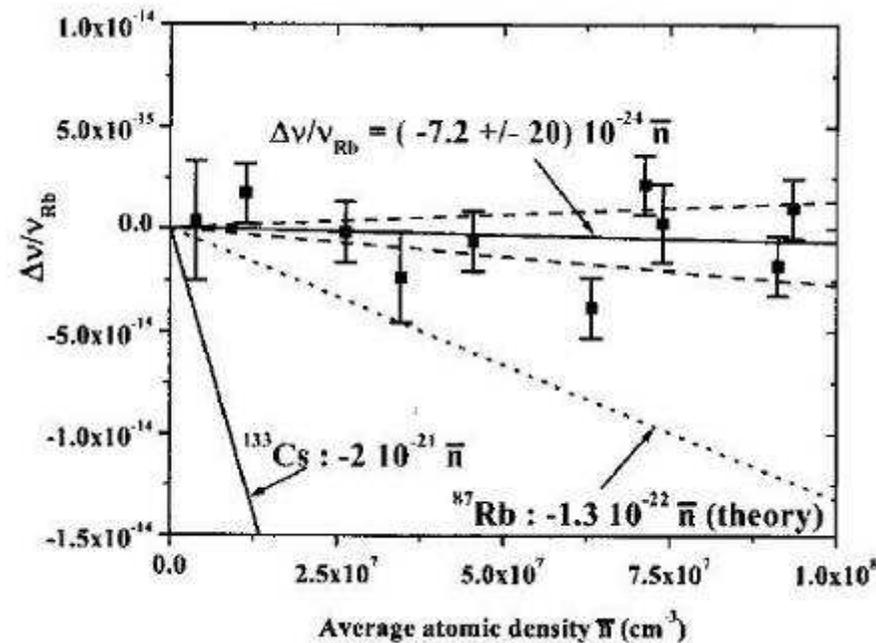
Quelle: Skript Atomphysik, Prof. Immanuel Bloch,
Johannes-Gutenberg-Universität

Cold Collision



- Frequenzverschiebung durch Stöße
- Cäsium sehr ungünstig

$\Delta\nu/\nu \approx -1,7 \cdot 10^{-12}$ bei Teilchendichte von $\approx 10^9 \text{cm}^{-3}$



Beispiele



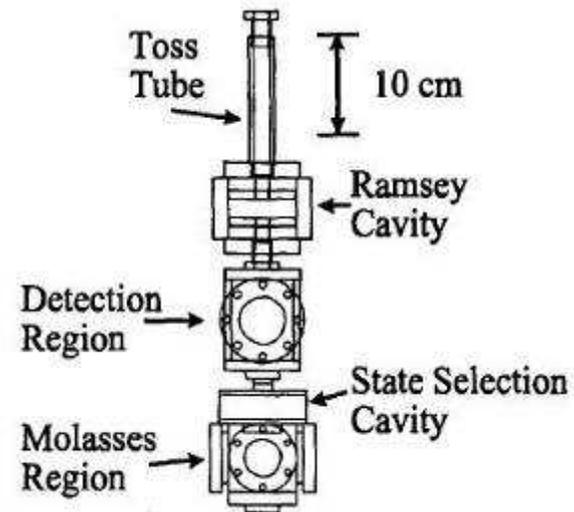
Quelle: www.ptb.de



CSF1 und CSF2 in der PTB,
Stabilität $\approx 1 \cdot 10^{-15}$

Quelle:

<http://tf.nist.gov/timefreq/general/pdf/1374.pdf>



Transportable Cäsium-Fontäne
vom NIST, USA

Literatur



- Fritz Riehle, Frequency Standards: Basics and Applications, Wiley-VCH
- Major, The Quantum Beat. The Physical Principles of Atomic Clocks, Springer
- Norman F. Ramsey, Molecular Beams, Oxford University Press
- <http://www.physnet.uni-hamburg.de/ilp/de/qoptik/quantenoptik.pdf>
- <http://www.physik.uni-bielefeld.de/~msacher/scripte/csuhr.pdf>
- Skript Atomphysik, Prof. Immanuel Bloch, Johannes-Gutenberg-Universität
- <http://tf.nist.gov/timefreq/general/pdf/1374.pdf>
- <http://www.ptb.de>
- <http://www.lkb.ens.fr/recherche/atfroids/images/87.pdf>

Vielen Dank für Ihre
Aufmerksamkeit.

Ramsey Methode



- Bloch Vektor Modell:

Opt.

Blochgleichungen:

$$\dot{\vec{B}}_{(t)} = \vec{\Omega}^{\text{Feld}} \times \vec{B}_{(t)}$$

B rotiert um Ω

Blochvektor:

$$\text{mit } \vec{B}_{(t)} := \begin{pmatrix} u(t) \\ v(t) \\ w(t) \end{pmatrix}$$

In-/Gegenphase

Besetzungsinversion w

Pseudo-

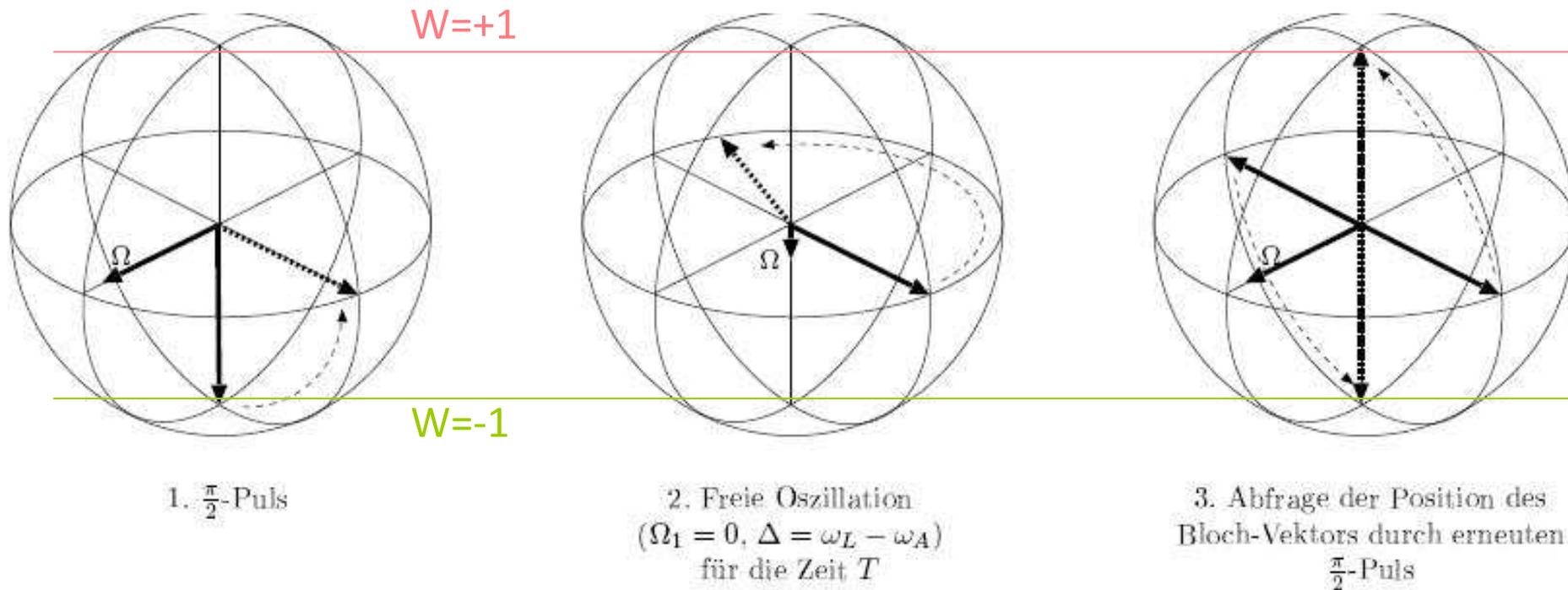
Feldvektor:

$$\vec{\Omega}_{(t)}^{\text{Feld}} = \begin{pmatrix} -K\varepsilon_0(t) \\ 0 \\ \Delta \end{pmatrix}$$

Feldamplitude

Verstimmung

Ramsey Methode



Optisches Pumpen

