Die Sekunde

Seminar zu den neuen SI Einheiten

Universität Heidelberg

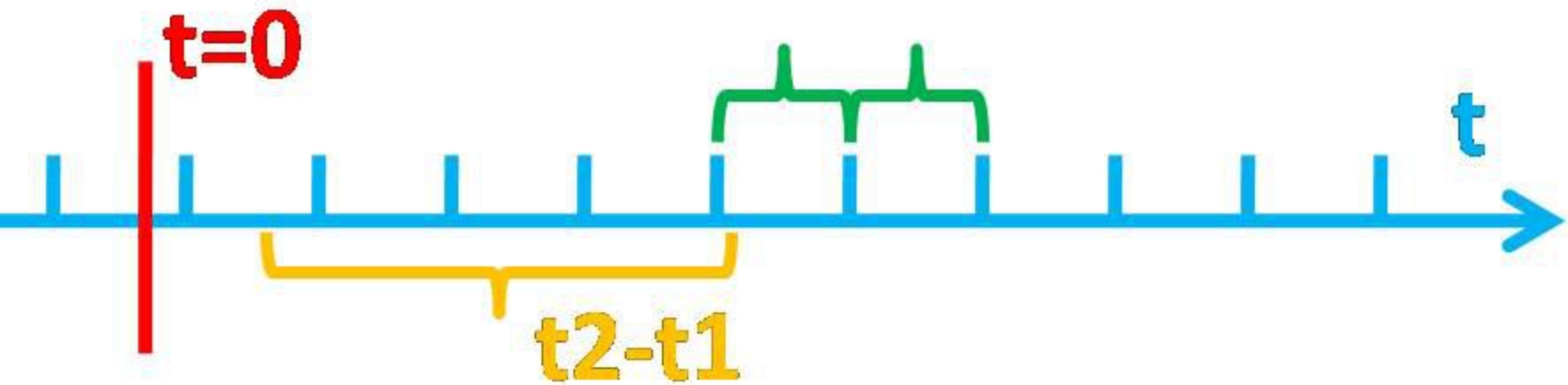
Tutor: Professor Ulrich Uwer

22.11.2019

Max Ackermann

Prinzip der Zeitmessung

- Zeitskala
  - Die gleichmäßigste: Zeitreferenz
  - willkürlicher Anfangspunkt
- Zeitmessung = Messung von Zeitintervallen
- Zeiteinheit = Vergleichs-Zeitintervall



Vorgehensweise

- Finde natürliches, periodisches Phänomen
- Definiere Zeiteinheit als Vielfaches von dessen Periodendauer
- Baue Gerät (Uhr = Resonator), welches dieses Zeitintervall ununterbrochen reproduzieren kann

Stabilität des Zeitmaßes

$$T = \frac{1}{f}$$

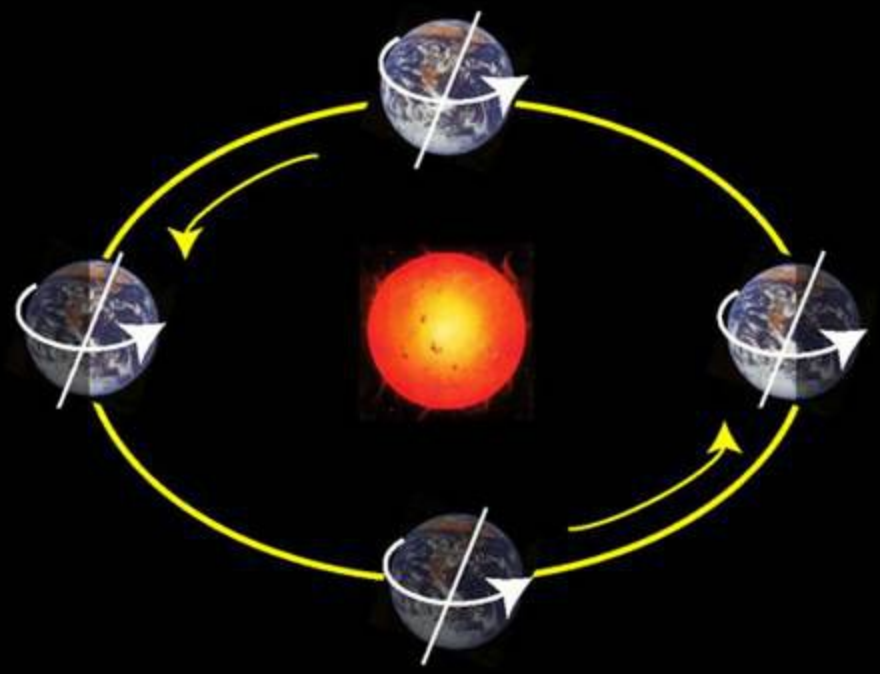
$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{\Delta\left(f^{-1}\right)}{f^{-1}} = \frac{\Delta f \cdot f^{-2}}{f^{-1}} = \frac{\Delta f}{f}$$

- Nutze hohe Schwingfrequenz
- Verringere Unschärfe durch geschickten Aufbau

Astronomische Sekunde

1s = 1/86400 x Periode der Erdrotation

- Sonnensekunde
- Verwende über ein Jahr gemittelte Tageslänge



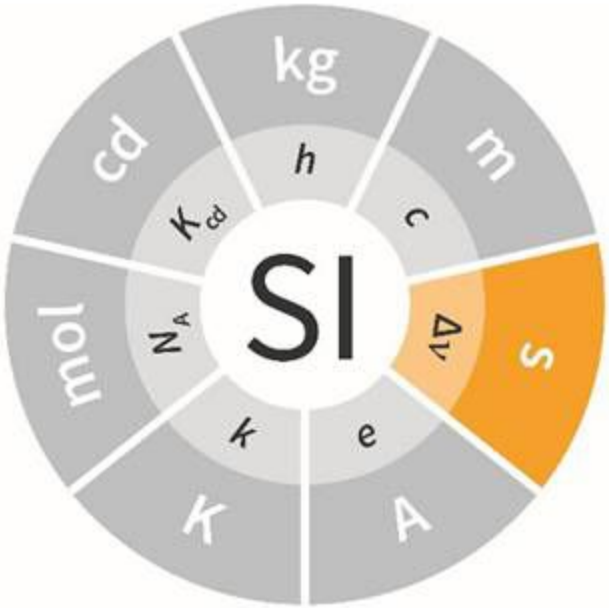
$$\frac{\Delta T}{T} \approx 5 \cdot 10^{-8}$$

Ephemeriden-Sekunde

1s = 1/31.556.925,9747 des vergangenen Jahres

- Messe Zeit an der Mondbewegung
- Genauer als Sonne da Mond besser beobachtbar
- Verbesserung der Mondbewegungsgleichungen führt zu Neudefinition der Sekunde

$$\frac{\Delta T}{T} \approx 3 \cdot 10^{-9}$$



SI Sekunde

$$\Delta\nu = f_{^{133}\mathrm{Cs}}^{|F=3,\, m_F=0\rangle \rightarrow |F=4,\, m_F=0\rangle}$$

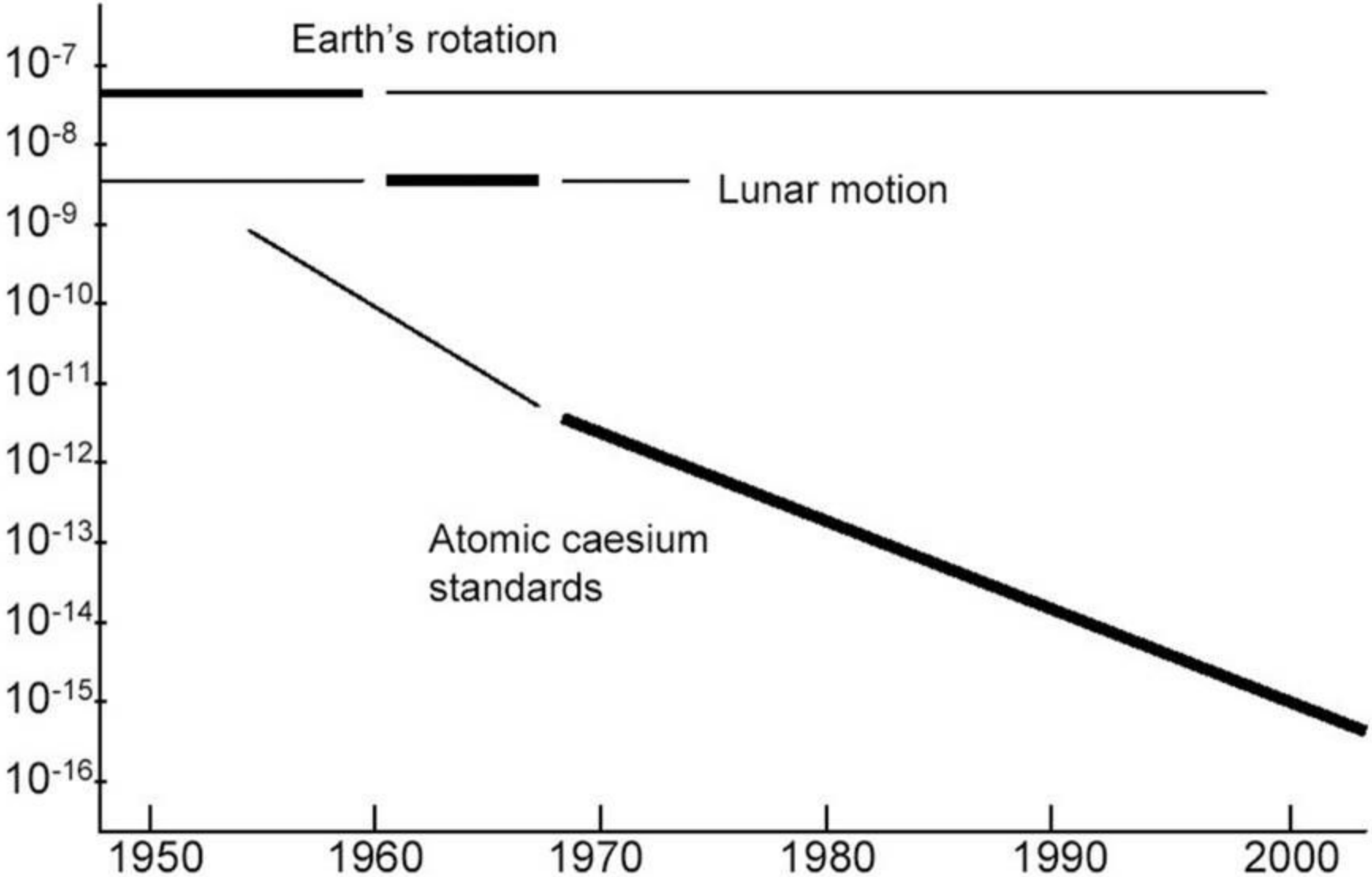
Basis Konstante:

$$\Delta\nu \equiv 9\,192\,631\,770 \ \mathrm{Hz}$$

Einheit:

$$1\,\mathrm{s} \equiv \frac{9\,192\,631\,770}{\Delta\nu}$$

Genauigkeit der Definitionen



RESONATOREN

Pendeluhr

- Riefler Uhr (Normales Pendel), 1904
- Shortt: Doppelpendeluhr, 1921
  - Master Pendel, schwingt in Vakuumkammer
  - Slave Uhr wird alle 30s synchronisiert
    - →Sehr geringe Interaktion mit Master

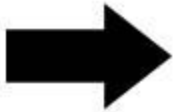
$$\frac{\Delta T}{T} \approx 1.2 \cdot 10^{-7}$$

Quarzoszillatoren

- Schwingquarz zwischen Elektroden
- Anregung mit Wechselfeld
- Rückkopplung → Finde Eigenfrequenz 100kHz

$$\frac{\Delta \nu}{\nu} \approx 10^{-9}$$

9722T
XO-105BAC
•1.000000MHz

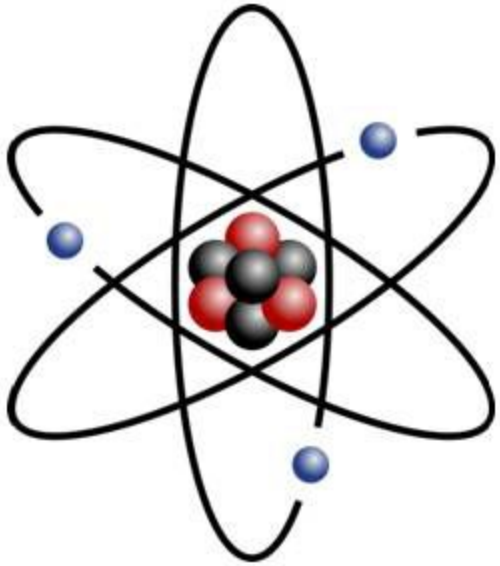


Atome als Oszillatoren

- Im Prinzip ideale Oszillatoren
- Quantisierte Energielevels

→ Exakte Frequenz

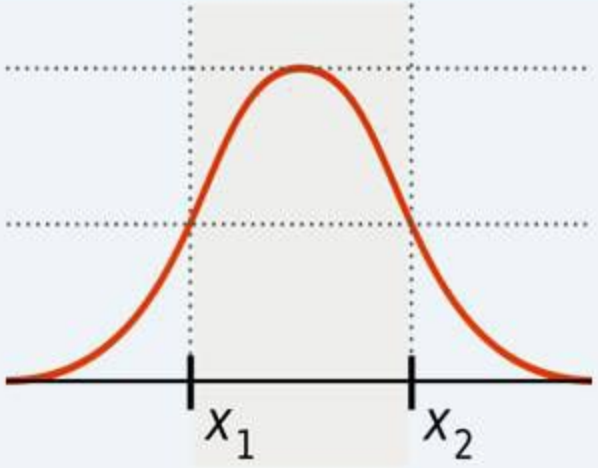
$$f_0 = \frac{E_2 - E_1}{h}$$



- h – Planck Konstante

Limitierende Faktoren

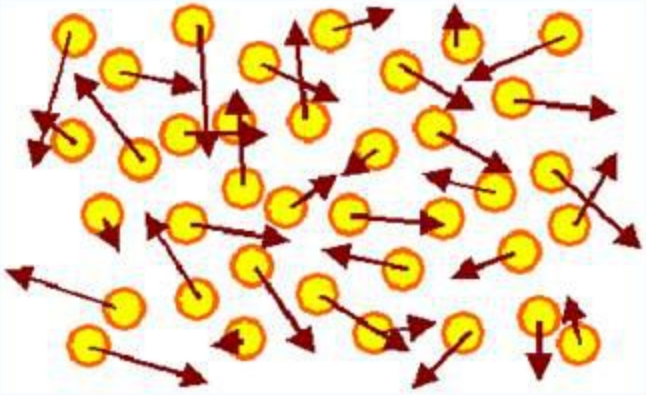
- Resonanzbreite df/f
  - Verwendet Atome mit geringer rb
  - Möglichst hohe Frequenz
  - Es gilt $\Delta f \propto \tau^{-1}$ mit der Beobachtungszeit τ



- Bewegung der Atome

→ Dopplerverschiebung

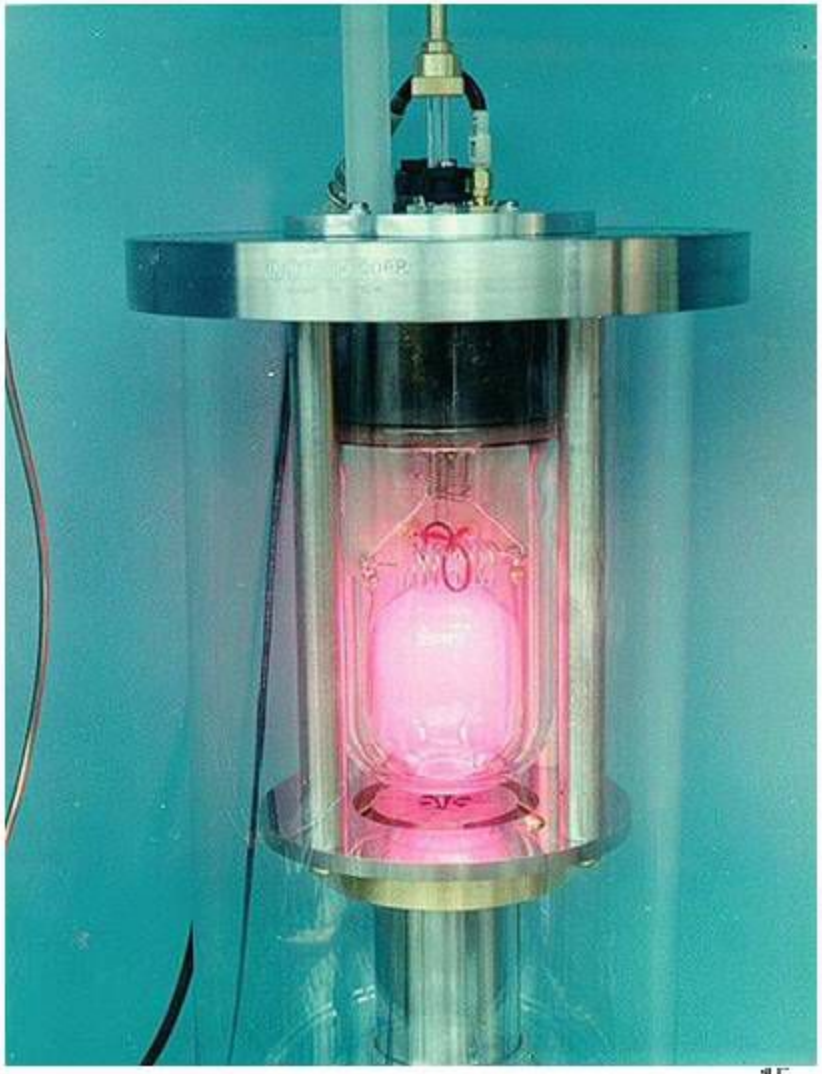
- Kollisionen zwischen Atomen wegen thermischer Bewegung →Frequenzverschiebung, Resonanzverbreiterung



Wasserstoff Maser

- Basiert auf Spin-Umkehr im H Atom
  - > 1.4 GHz

$$\frac{\Delta T}{T} \approx 10^{-15}$$



Warum Caesium 133?

- Weiches Metall, Fest bis 28.4°C
- Schwere Atome (133u) → Langsame Bewegung (130 m/s bei Raumtemperatur)
- Relativ hohe Hyperfeinstrukturfrequenz im Grundzustand mit 9.2 GHz → hohes Q
- Nur ein stabiles Isotop, Halbwertszeit des häufigsten radioaktiven Isotops Cs 132: 6.5 d

Hyperfeinstruktur

I: Kernspin

J: Gesamtdrehimpuls der Elektronenhülle

F: Gesamtdrehimpuls des Atoms

$$\vec{F} = \vec{I} + \vec{J} \qquad \left|\vec{F}\right| = \hbar\sqrt{J(J+1)}$$

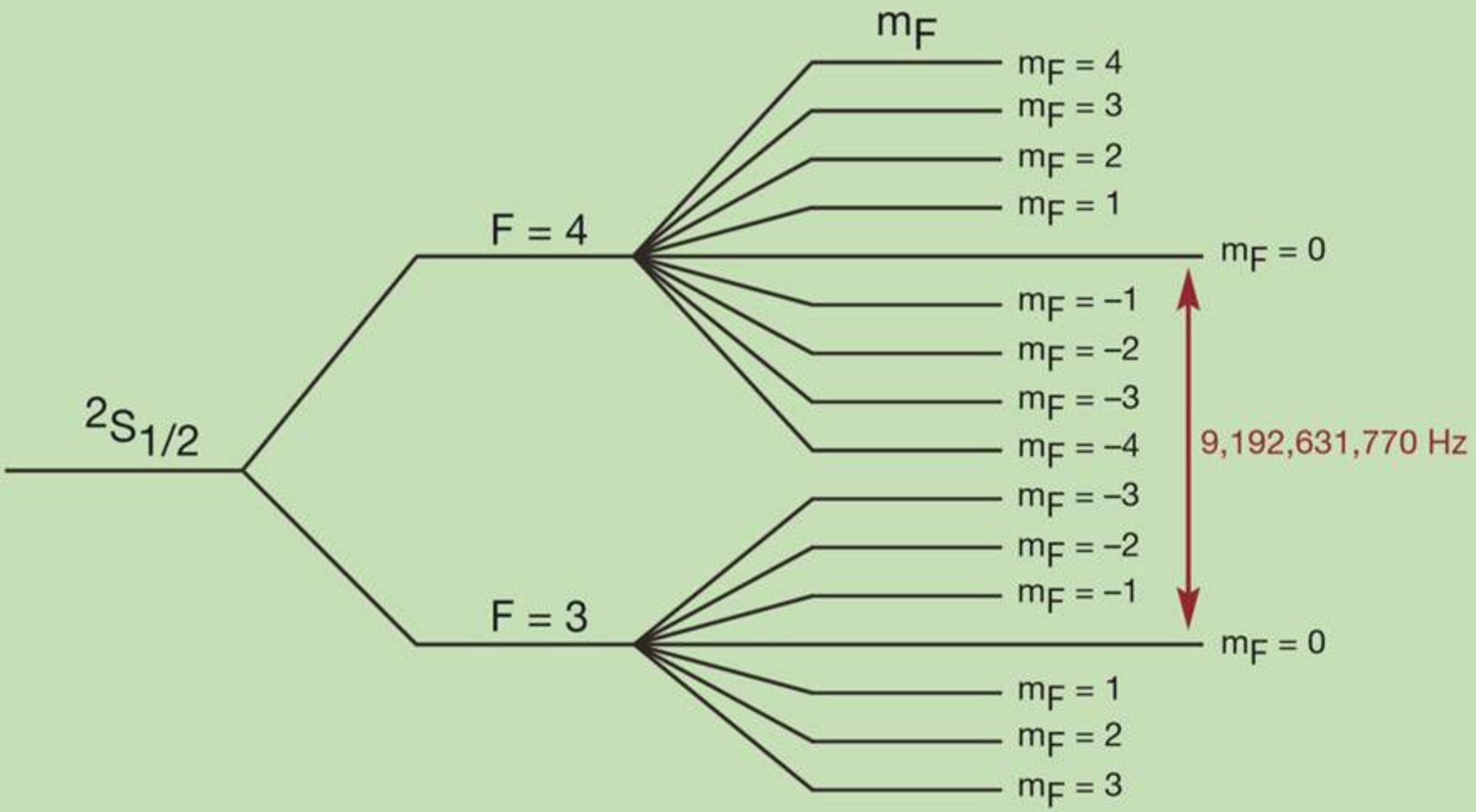
Energielevels:

$$E_{HFS} = \vec{\mu}_I \cdot \vec{B}_J \quad \propto F(F+1) - (J(J+1) + I(I+1)$$

Äußeres B Feld → Aufspaltung in Feinstrukturlevels mit Magnetquantenzahl m_F

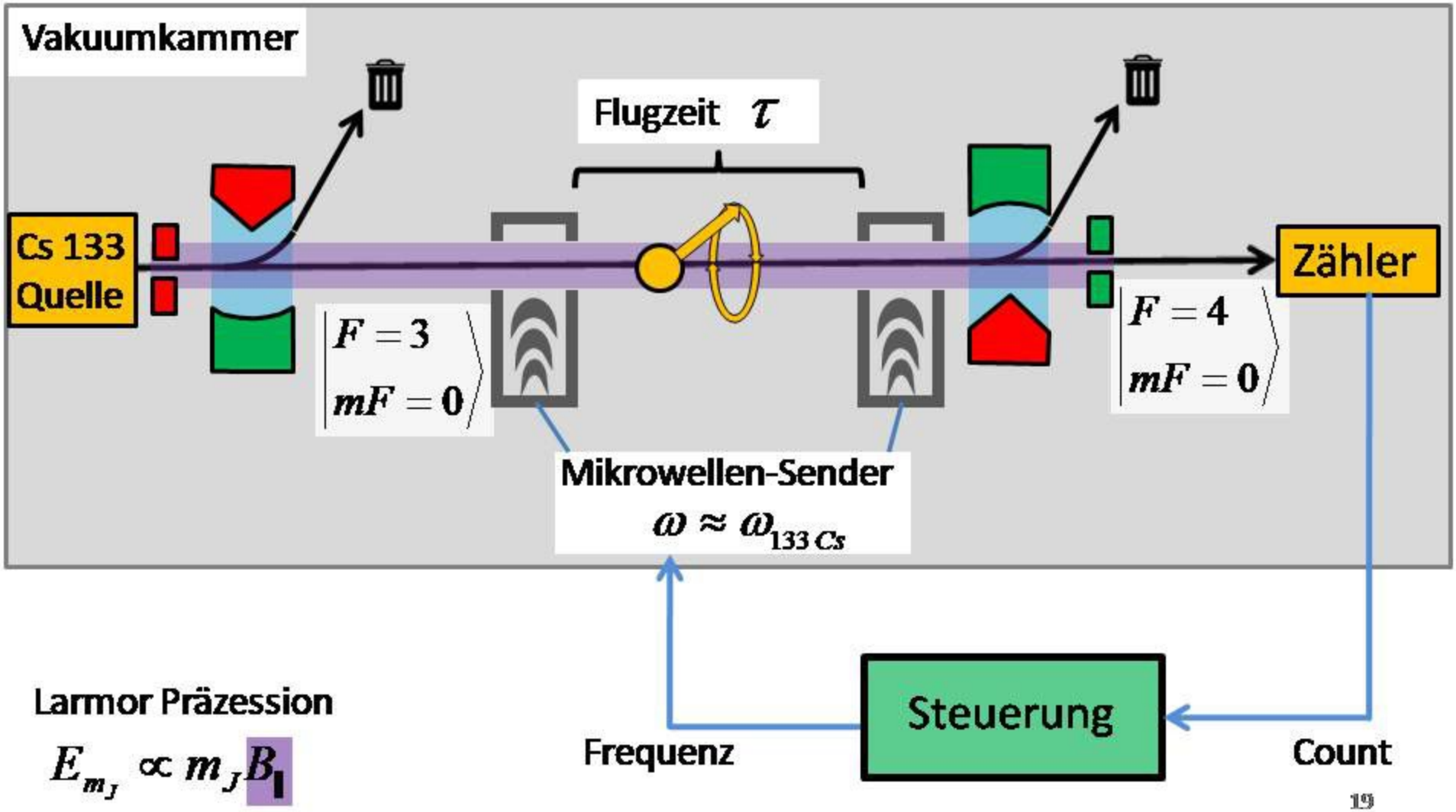
$$-F < m_F < F$$

Energieebenen Grundzustand 133 Cs



Caesium Atomstrahl

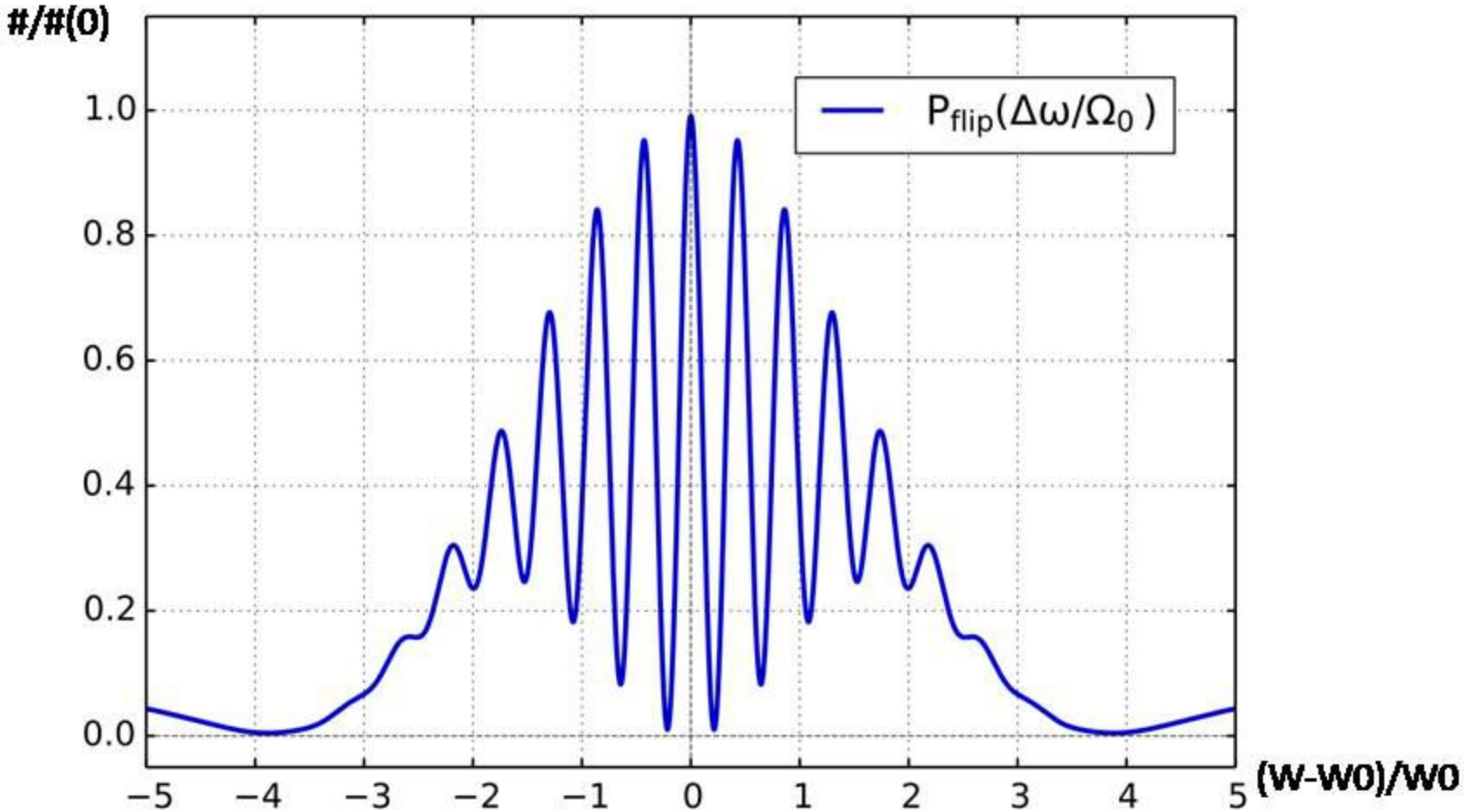
(Ramsey Interferometrie)



Larmor Präzession

$$E_{m_J} \propto m_J B_{\parallel}$$

Ausgangssignal



„Ramsey Fransen“