

---

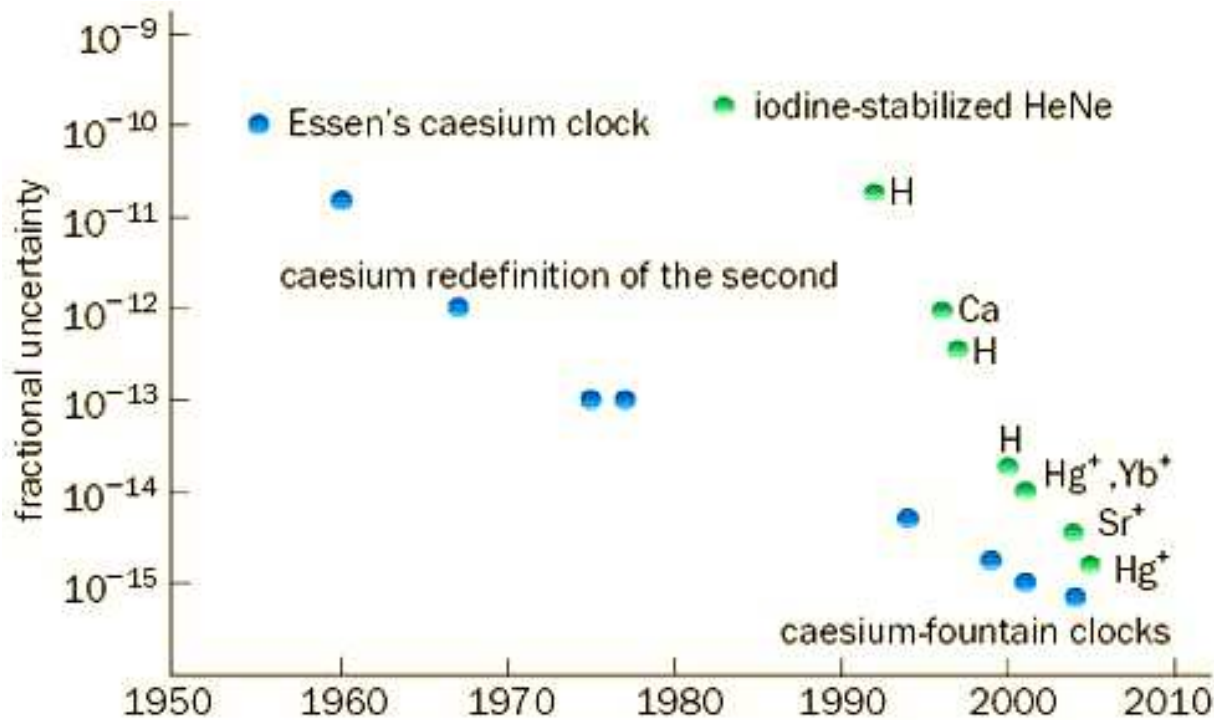
# Atomuhren und optische Frequenzstandards: optische Frequenzstandards

---

Johannes Schlegel

- **Einführung**
- **Hg+ Frequenzstandard**
  - Fangen von Ionen
  - Auslesen des Anregungszustandes
- **Der Frequenzkamm**
  - Modenspektrum
  - Verwendung als Uhrwerk
- **Ausblick**
  - optische Gitteruhr
- **Anwendungsmöglichkeiten**

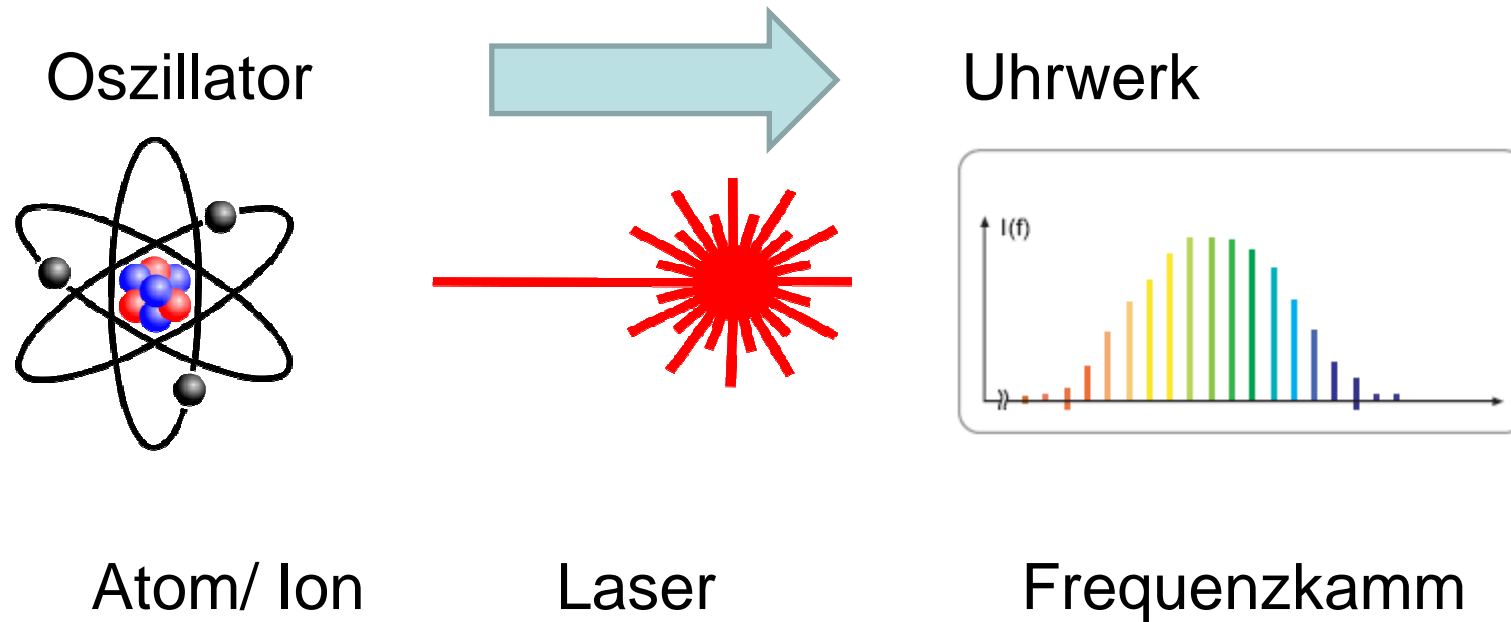
# Einleitung



[http://physicsworld.com/cws/article/print/22097/1/PWopt6\\_05-05](http://physicsworld.com/cws/article/print/22097/1/PWopt6_05-05)

- **Höhere Stabilität durch höhere Frequenz ( Faktor  $10^5$ )**
- **Durch hohe Frequenzen kein einfaches elektronische Zählwerk möglich**

## Bestandteile einer Uhr



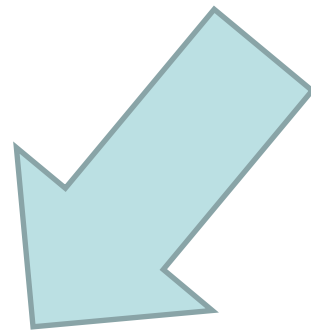
## Einzelionen

- **Ww stark mit der Umgebung**
- **Verschiebung der Atomniveaus durch Ww, aber gut berechenbar**
- **Schlechtes S/N-Verhältnis**

## Atomares Ensemble

- **Ww weniger stark mit Umgebung**
- **Aber Ww führt zu schlecht berechenbaren Verschiebungen (Stöße)**
- **Gutes S/N-Verhältnis**

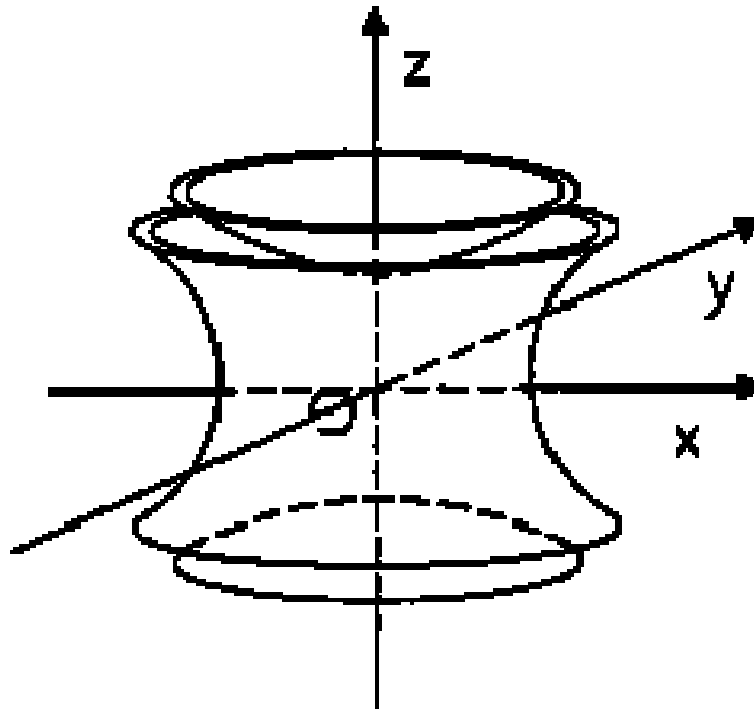
## Auswahlregeln für Uhrübergänge



- **wenig Beeinflussung durch das äußere Einflüsse (bzw. theoretisch bestimmbar)**
- **geringe Linienbreite**

**Übergänge zu metastabilen Atomniveaus  
z.B. Quadrupol- Oktopolübergänge,  
oder Mehrphotonanregungen**

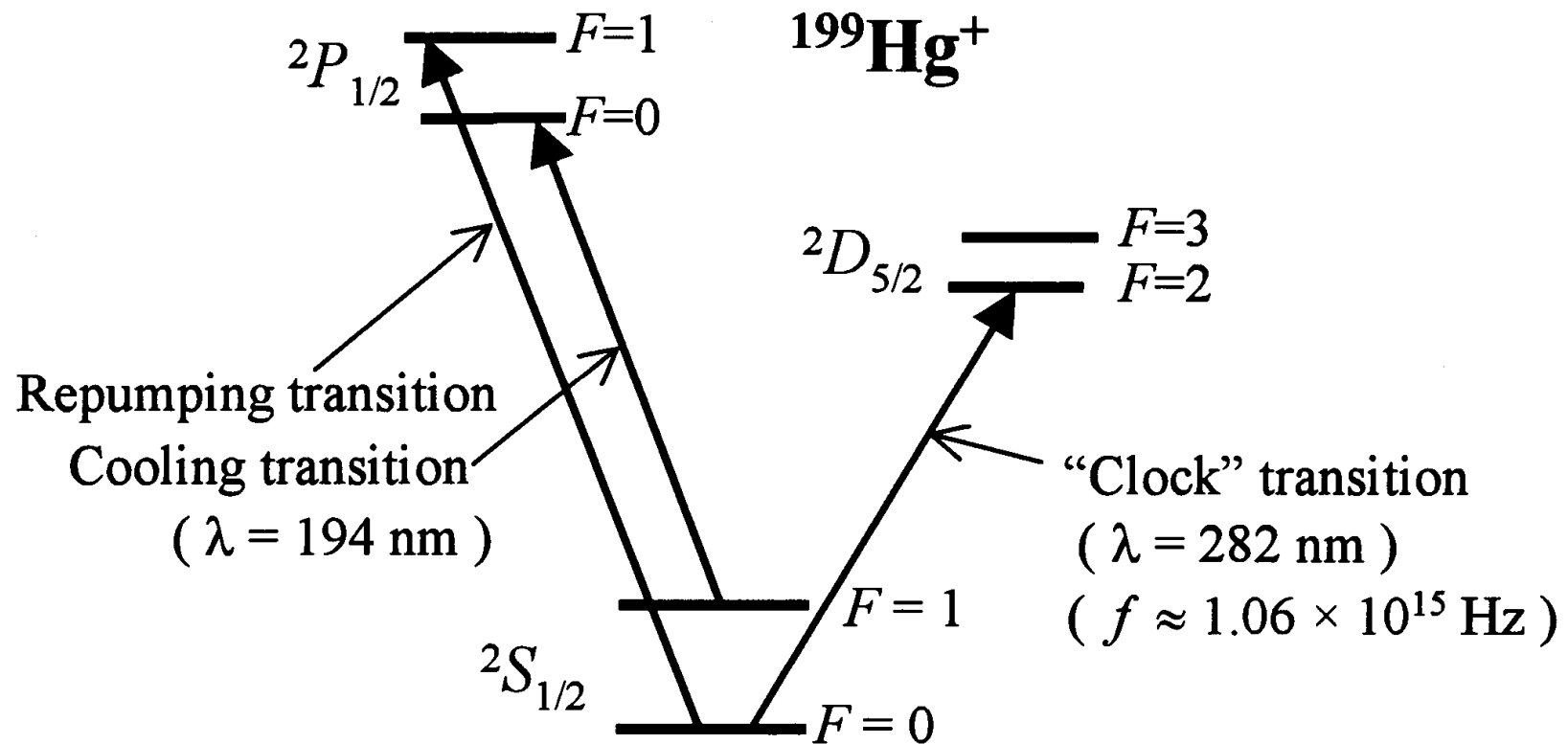
## Fangen von Ionen



- Ion wird in einer Penning- oder Paulfalle gespeichert
- statisches E & B Feld bzw. hochfrequentes E Feld
- Ww mit Feld theoretisch gut berechenbar ( Stark- & Zeeman-Effekt)

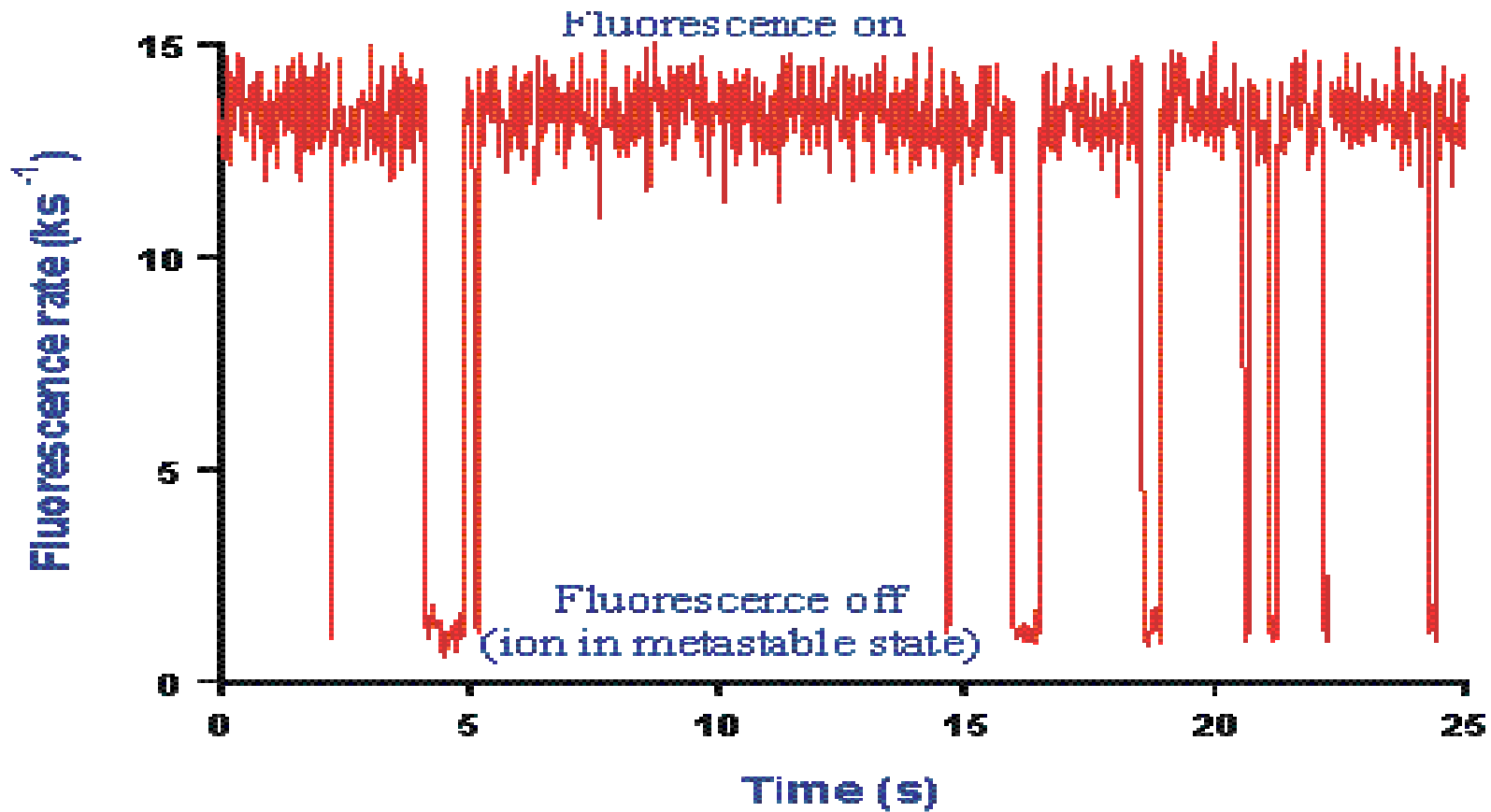
[http://www.physik.uni-mainz.de/werth/calcium/bilder/Paul\\_elektodes.gif](http://www.physik.uni-mainz.de/werth/calcium/bilder/Paul_elektodes.gif)

## Termschema

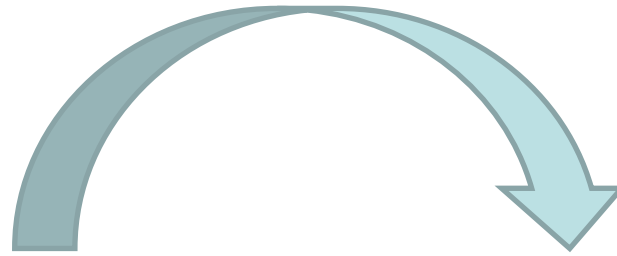




## Auslesen des Anregungszustandes

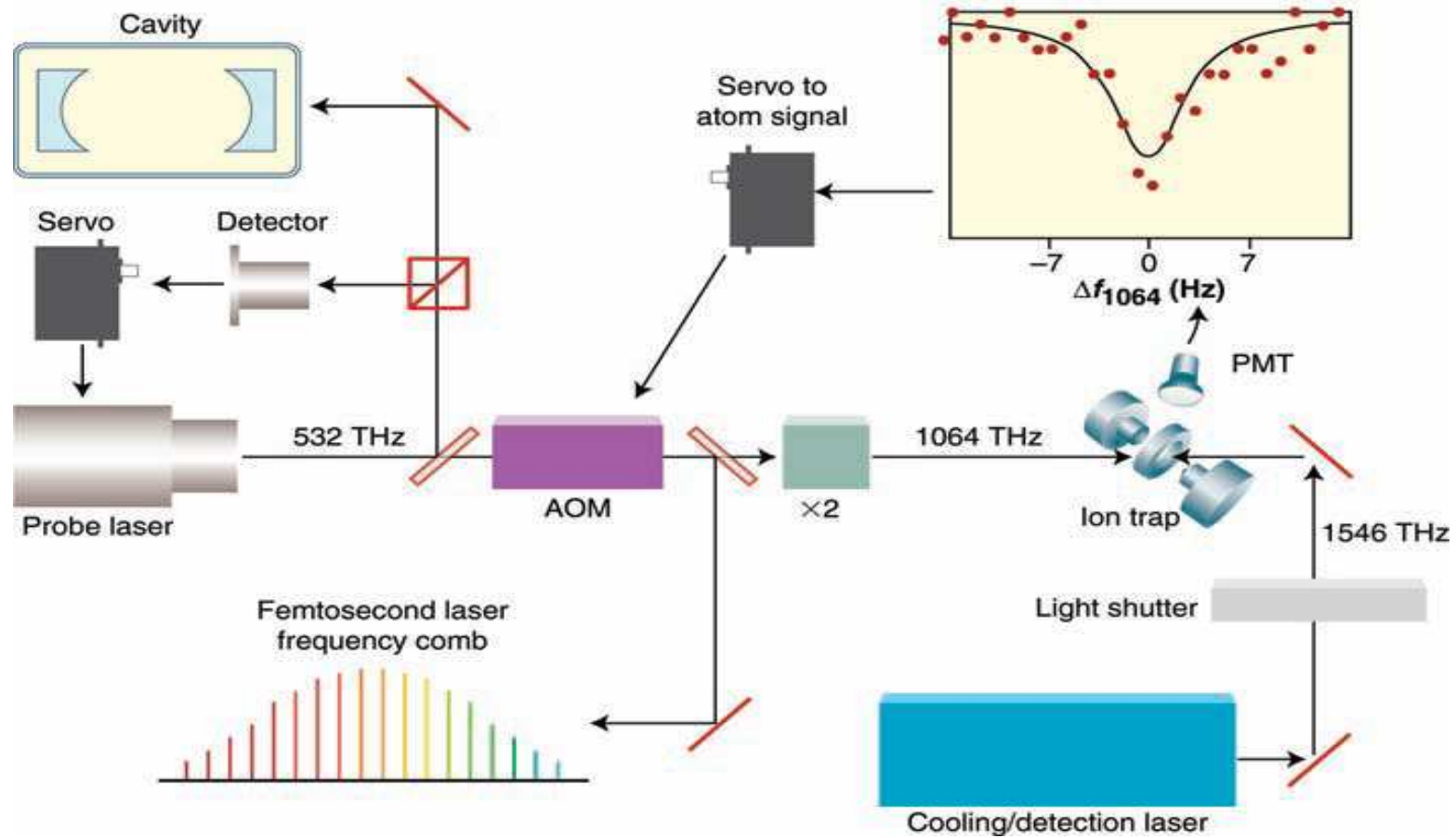


## Anforderungen an den Laser



- Resonanzen haben FWHM von wenigen Hz
- Das Scannen der Resonanz dauert ca. 20 s
- Linienbreite von unter 1Hz
- Laser muss innerhalb dieses Zeitraums auf 1Hz stabil sein

# Frequenzstandards mit Ionen



S. A. Diddams *et al.*, *Science* 306, 1318 (2004)

**Derzeitige Genauigkeit:**  
 $6,5 \cdot 10^{-16}$

<http://tf.nist.gov/timefreq/general/pdf/2256.pdf> (2007)

**angestrebte Genauigkeit:**  
 $10^{-18}$

**Haben jetzt sehr stabile Frequenz im PHz-Regime  
Müssen dieses  
in ein elektronisch verarbeitbares Signal übersetzt**

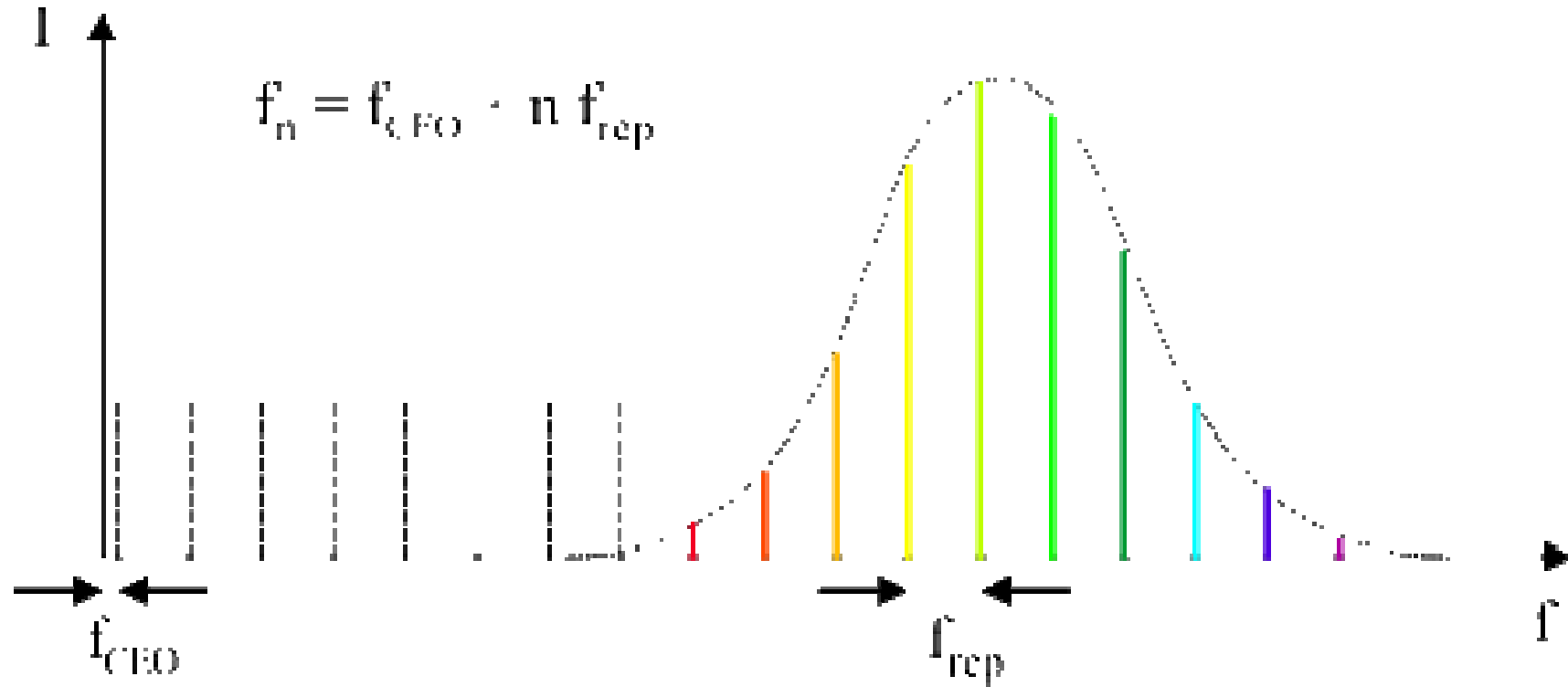


## **Der Frequenzkamm**

- **gepulster Laser**
- **Pulsdauer wenige Femtosekunden**
- **Pulsfrequenz im GHz-Bereich**
- **z.B. Ti:Sapph Ringlaser**

# Der Frequenzkamm

## Modenspektrum des Frequenzkammes

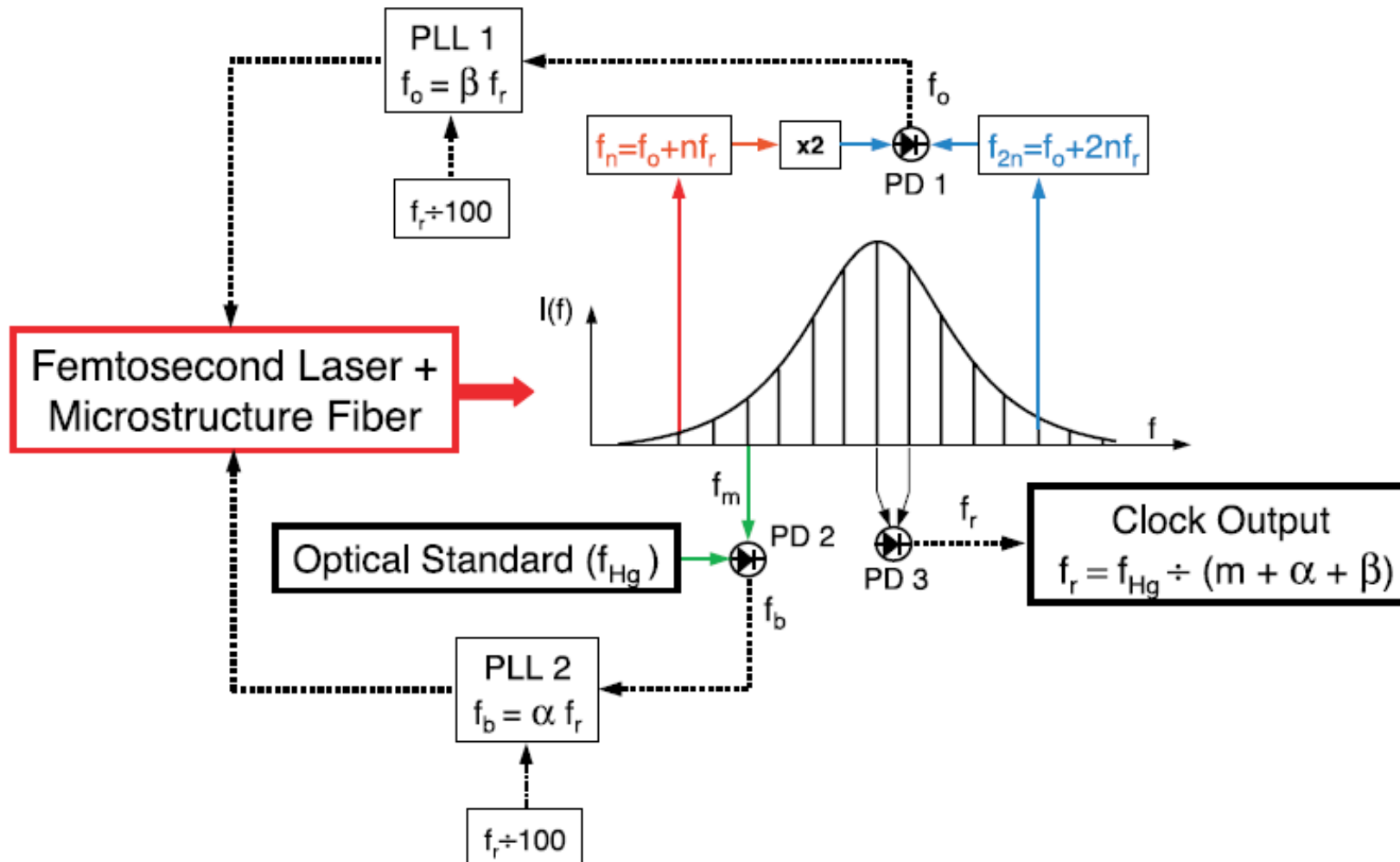


$f_{\text{rep}} = c/2L$   
**Messbar durch die  
 Repitionsrate des Lasers  
 oder Vergleich zweier Moden**

$f_{\text{ceo}} = f_{2n} - 2 f_n$   
**Messbar durch Überlagerung  
 zwei spezieller Moden**

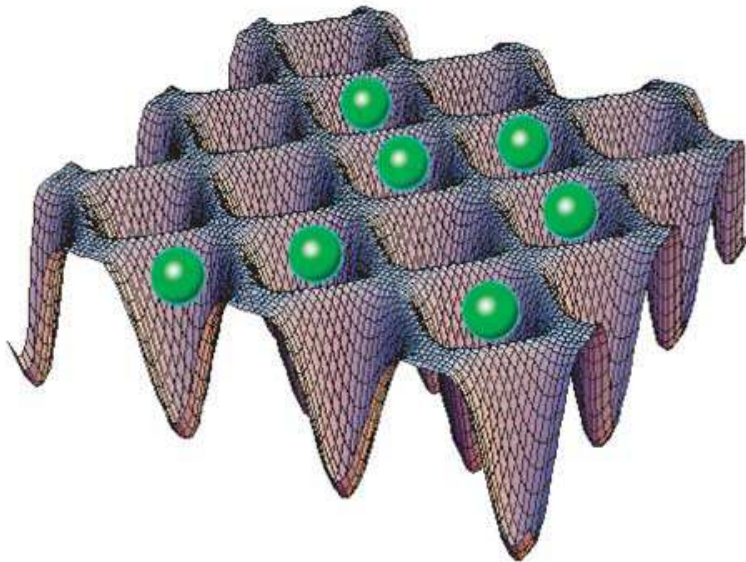
# Der Frequenzkamm

## Verwendung als Uhrwerk



## Optisches Gitter

Potentialgitter welches  
aus optischen Stehwellen  
erzeugt wird



- Nutzen ein atomares Ensemble ( $10^6$  Atome) um einen höheren Photonenfluss zu erreichen
- Ausschalten der Ww untereinander durch halten in einem optischen Gitter (Stark-Effekt)

**Problem:**

**Ww mit Lichtfeld führt zu intensitätsabhängiger  
Verschiebung der Atomniveaus**

**Lösung:**

**Einstrahlen von Licht bei einer magischen Wellenlänge,  
Bei der  $\Delta f_i = \Delta f_f$**

**Derzeitige Genauigkeit:**

$$2 \cdot 10^{-15}$$

**angestrebte Genauigkeit:**

$$10^{-18}$$



- **Messen vom Zeitverhalten von Naturkonstanten**
- **z.B. die Feinstrukturkonstante ( $\dot{\alpha} / \alpha \leq 7 \cdot 10^{-15} \text{ yr}^{-1}$ )**
- **GPS**
- **Kommunikation, Verbesserung der Übertragungseigenschaften**

Ich bedanke mich für Ihre Aufmerksamkeit

- F. Riehle, Frequency Standards: Basics and Applications, Wiley-VCH
- Major, The Quantum Beat: the physical principles of atomic clocks, Springer
- Eur. Phys. J. Special Topics 163, 19–35 (2008)
- A. D. Ludlow *et al.*, *Science* 319, 1805 (2008)
- Phys. Rev. Lett. vol. 57 nr. 14 (1986)
- Nature Vol 435 (2005)
- T. Rosenband *et al.*, *Science* 319, 1808 (2008)
- Long-Sheng Ma *et al.*, *Science* 303, 1843 (2004)
- Proc. of SPIE Vol. 6673, 667303, (2007)
- Appl. Phys. B (2007)
- S. A. Diddams *et al.*, *Science* 306, 1318 (2004)

