

# Zeitmessungen

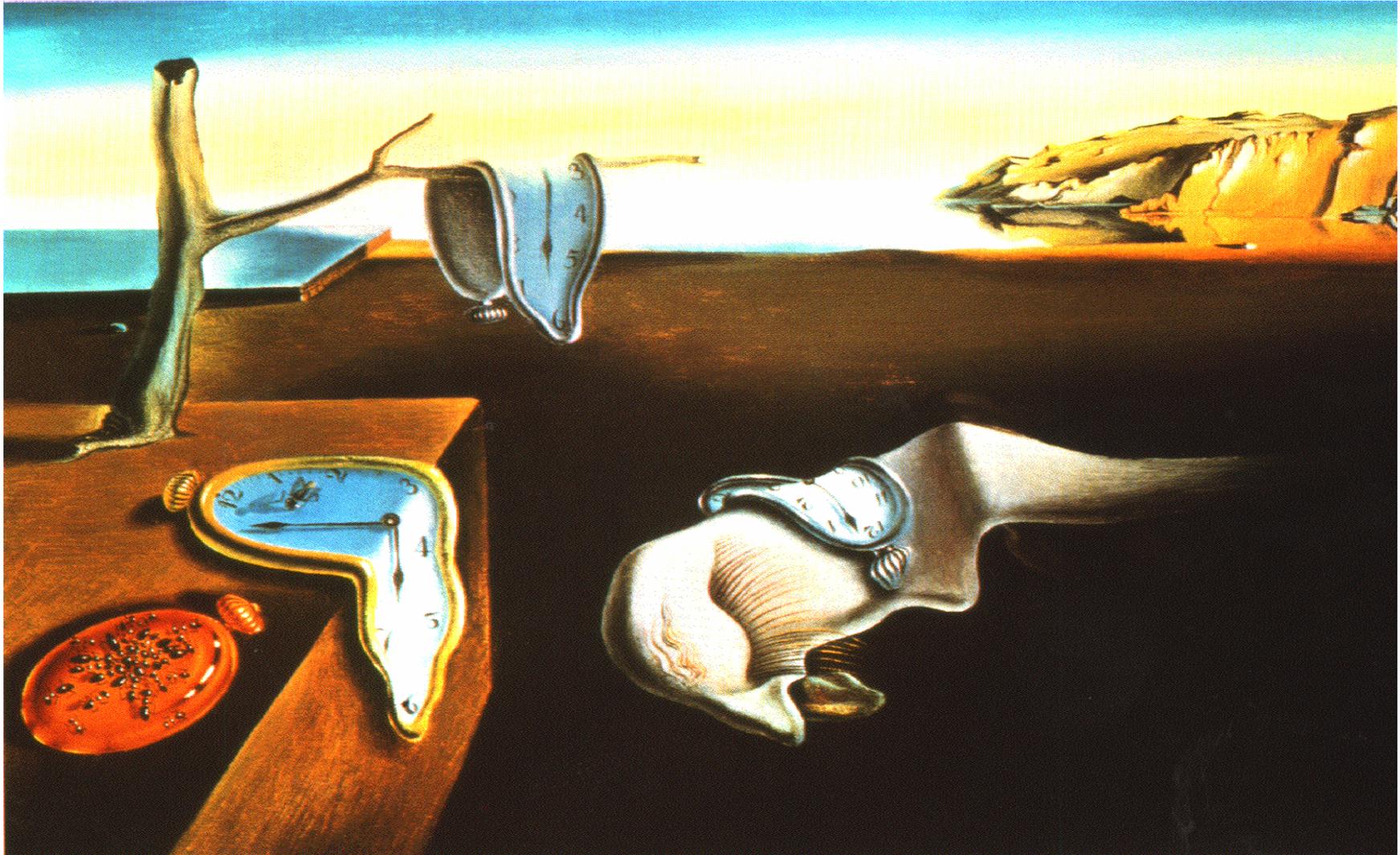
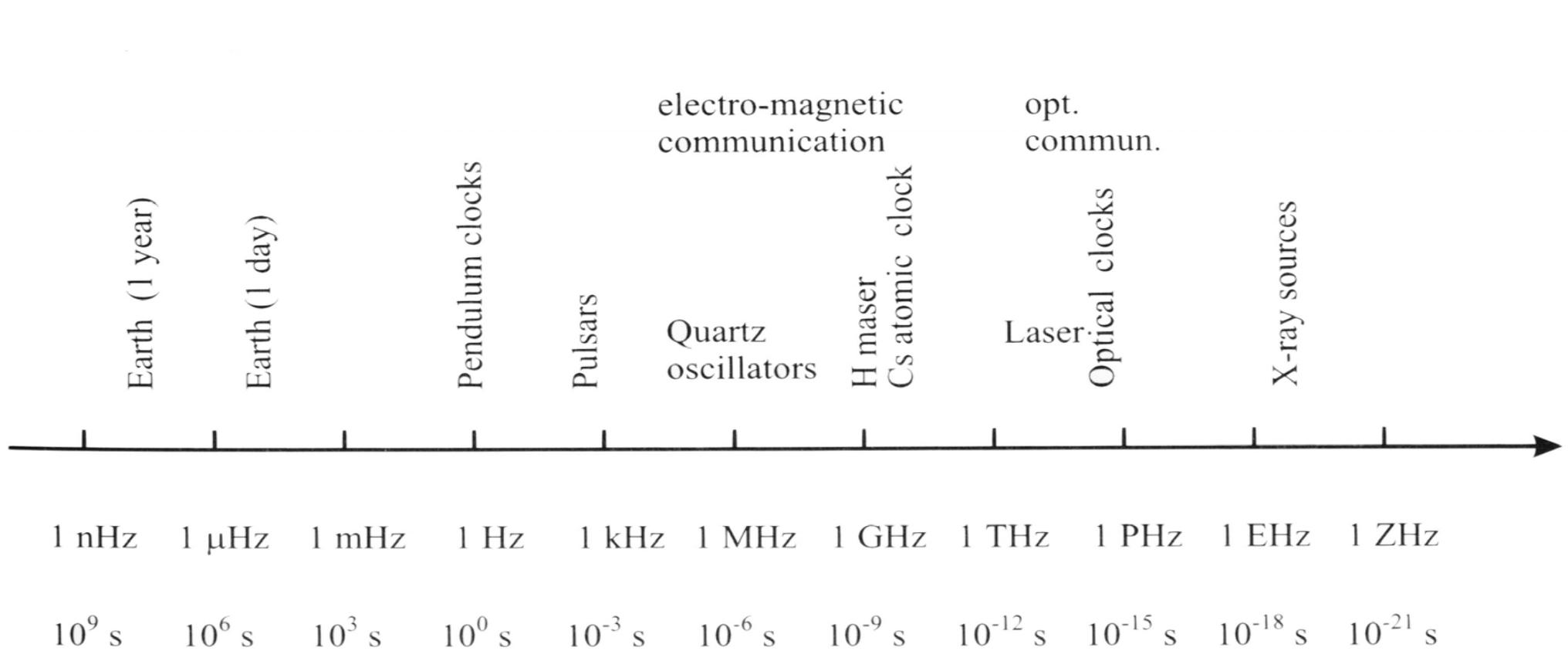


Bild:Dali : Zerfliessende Uhren

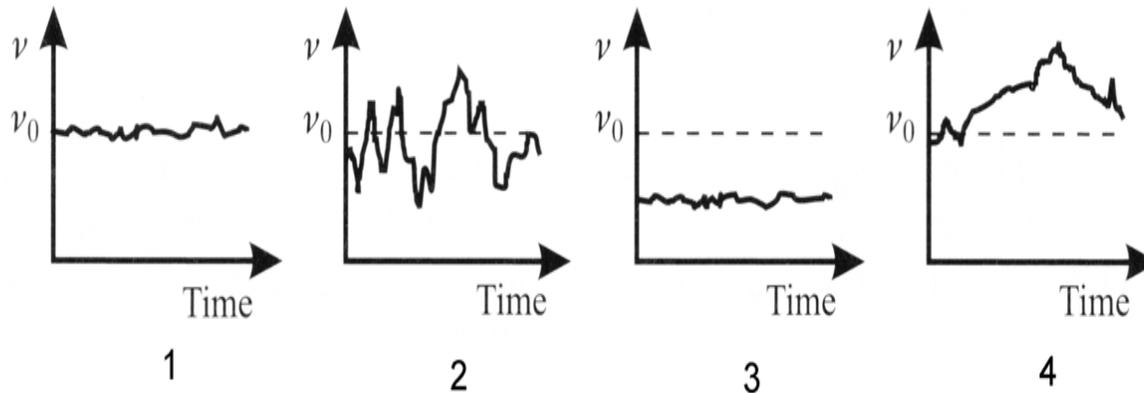
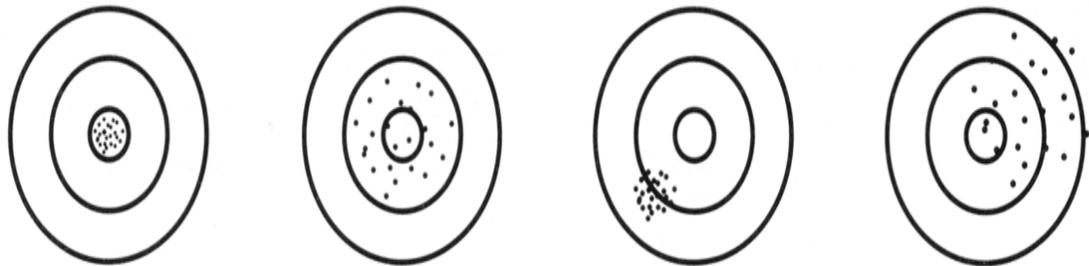
# Gliederung

- Einleitung Zeitmessung
- Theorie
- Experimentelle Realisierung

# Möglichkeiten der Zeitbestimmung

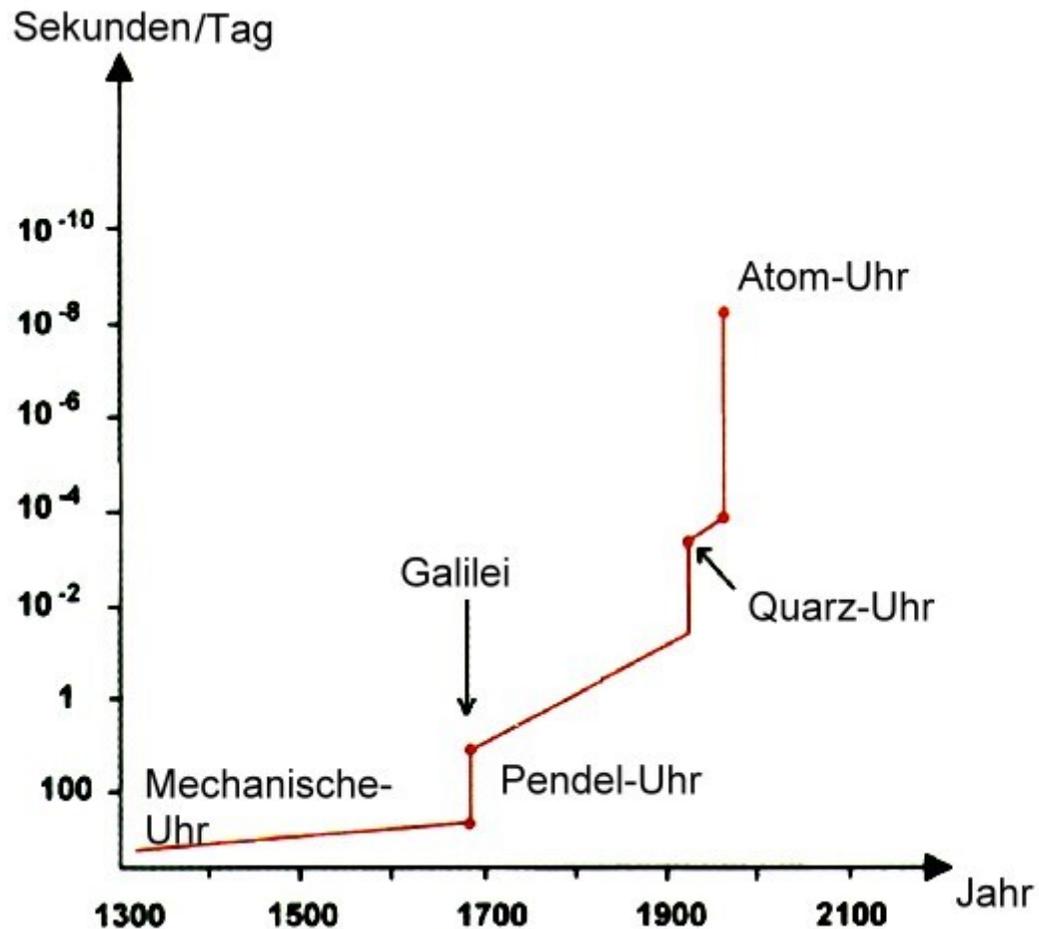


# Eigenschaften der guten Uhr



- Präzession
- Akurat

# Etappen der Zeitmessung



Riehle 'Frequency standards'

- Jahreszeiten
- Tageszeiten
- Mechanische Uhren (Wasser-, Sanduhr)
- Pendel-Uhr
- Quarz-Uhr
- Atom-Uhr

# Definition der Sekunde

- |            |   |
|------------|---|
| 1880 -1955 | Eine Sekunde ist der 86400 Teil eines mittleren Sonnentages.  |
| 1955 -1967 | Eine Sekunde ist der 31556925,9747 Teil eines Sonnenjahres  |
| Ab 1967    | Eine Sekunde dauert 9 192 631 770 Strahlungsperioden<br>(Hyperfeinstrukturübergang von $^{133}\text{Cs}$ -Atomen) |

# Die Atomuhr



CS2-Atomuhr

Zeitgeber für Deutschland  
und Umgebung

# Die Atomuhr

Allgemeine Funktionsweise

Wir brauchen einen Frequenzgeber!

# Die Atomuhr

Allgemeine Funktionsweise

Wir brauchen eine Referenzquelle!



Frequenzgeber

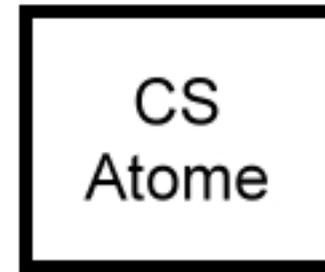
# Die Atomuhr

Allgemeine Funktionsweise

Wir brauchen eine Abfrage!



Frequenzgeber

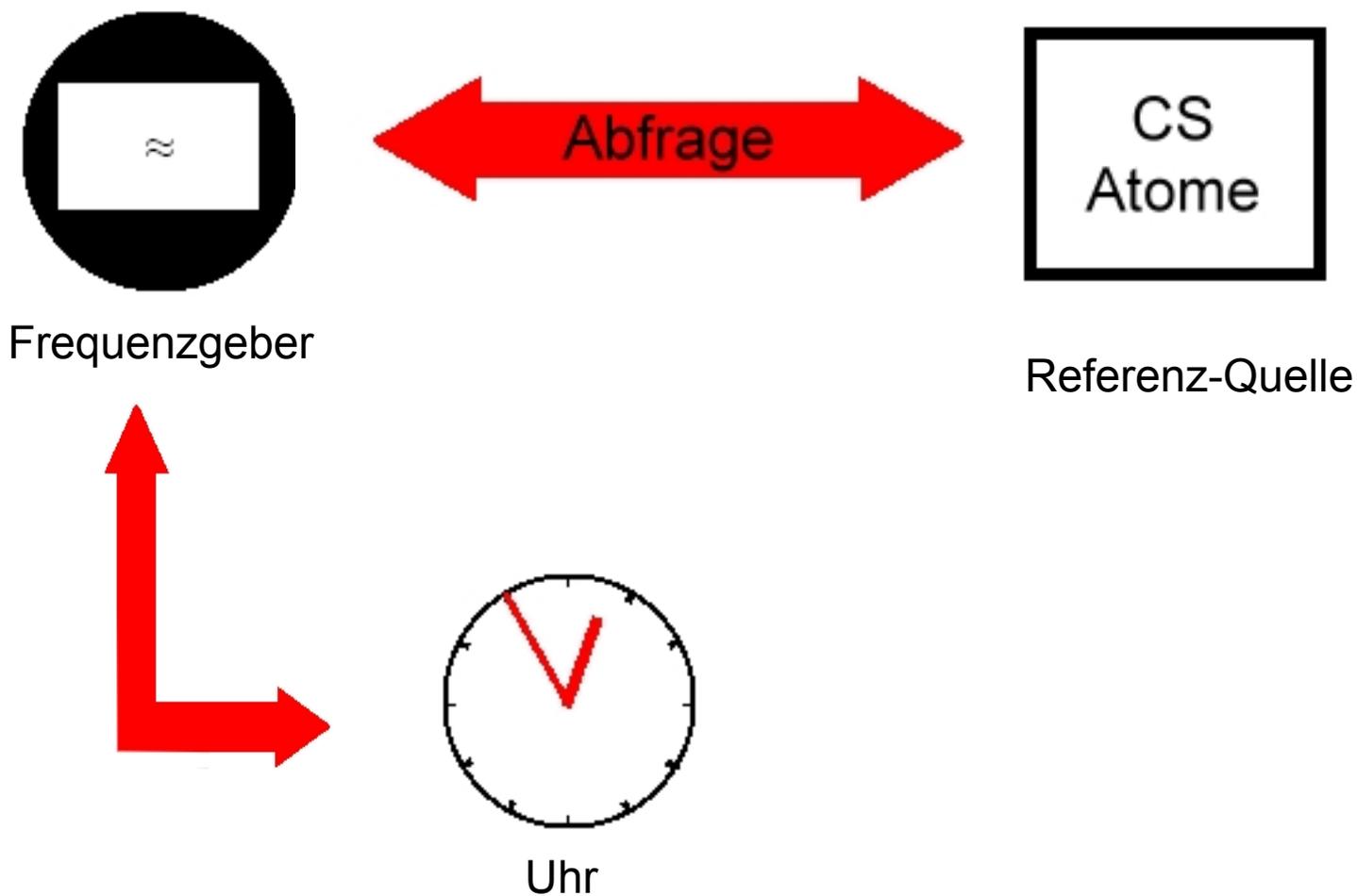


Referenz-Quelle

# Die Atomuhr

Allgemeine Funktionsweise

Fertig ist die Uhr!



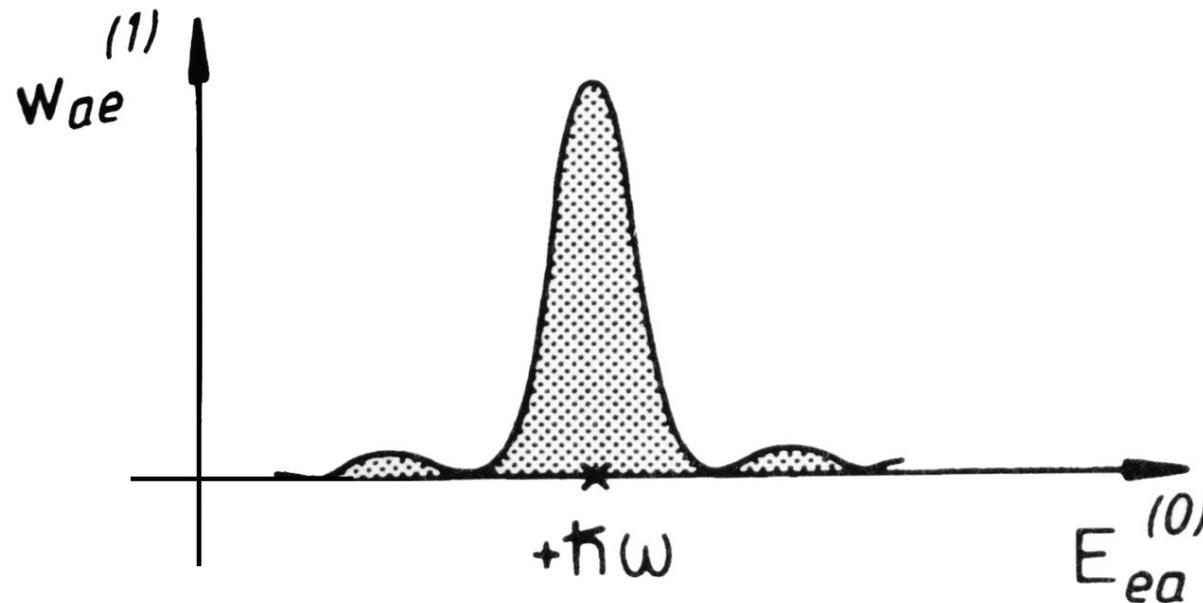
# Gliederung

- Einleitung Zeitmessung
- Theorie
- Experimentelle Realisierung

# Theorie

## Übergangswahrscheinlichkeiten

**Einstein:** Jeder spontan ablaufende Prozess kann stimuliert werden.



$$\Delta E = \hbar \cdot \omega$$

# Theorie

Beispiel: 2-Niveau-System

**Resonator**



Anfangsbedingung

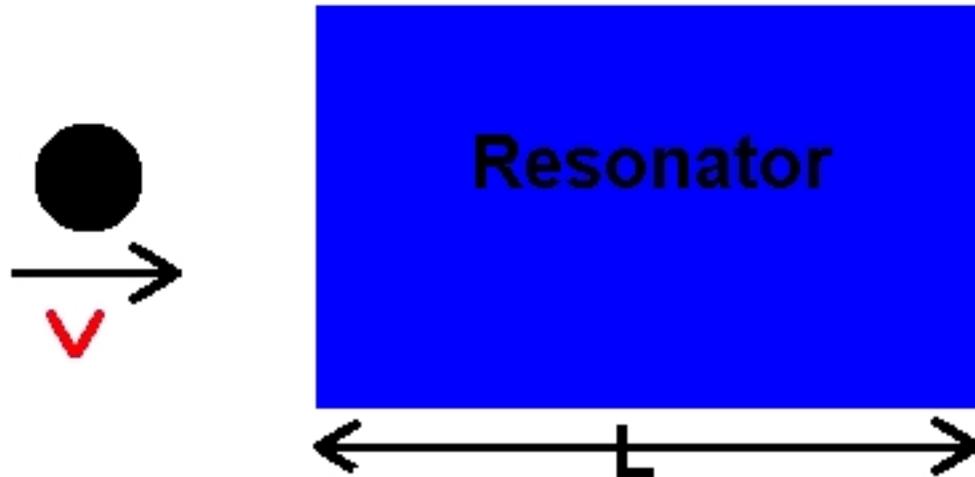
Zustand „ $|1\rangle$ “

Endbedingung

Zustand „ $|2\rangle$ “

# Theorie

## Was geschieht im Resonator?



## Das Teilchen

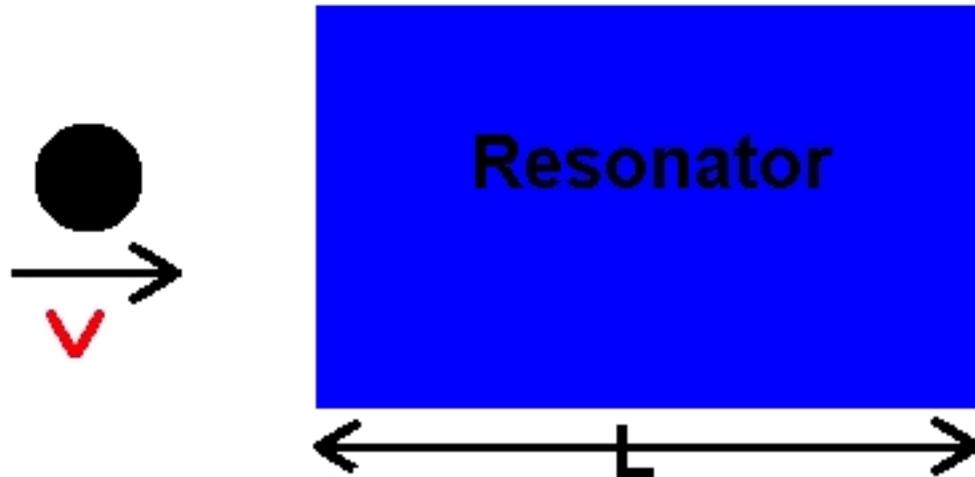
- reinen Zustand  $|1\rangle$
- feste Geschwindigkeit

## Der Resonator

- feste Länge  $L$
- Konstantes E-Feld

# Theorie

## Was geschieht im Resonator?



### Das Teilchen

- reinen Zustand  $|1\rangle$
- feste Geschwindigkeit

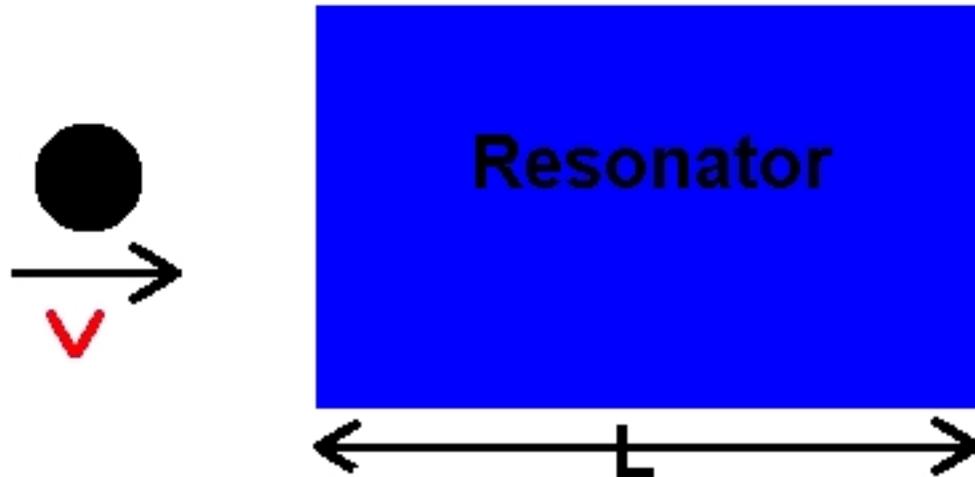
### Der Resonator

- feste Länge  $L$
- Konstantes E-Feld

→ Verweildauer im Resonator:  $\Delta t = L/v$

# Theorie

## Was geschieht im Resonator?



### Das Teilchen

- reinen Zustand  $|1\rangle$
- feste Geschwindigkeit

### Der Resonator

- feste Länge  $L$
- Konstantes E-Feld

→ Verweildauer im Resonator:  $\Delta t = L/v$

→ Rabi-Frequenz:  $\Omega = 2\mu^* |E| / \hbar$

# Theorie

## Schrödingergleichung

Spezialfall: Jaynes-Cummings-Modell

$$H_{JC} = \frac{1}{2}\hbar\omega_0\sigma_z + \hbar\omega a^\dagger a + \hbar g(a\sigma^+ + a^\dagger\sigma^-)$$

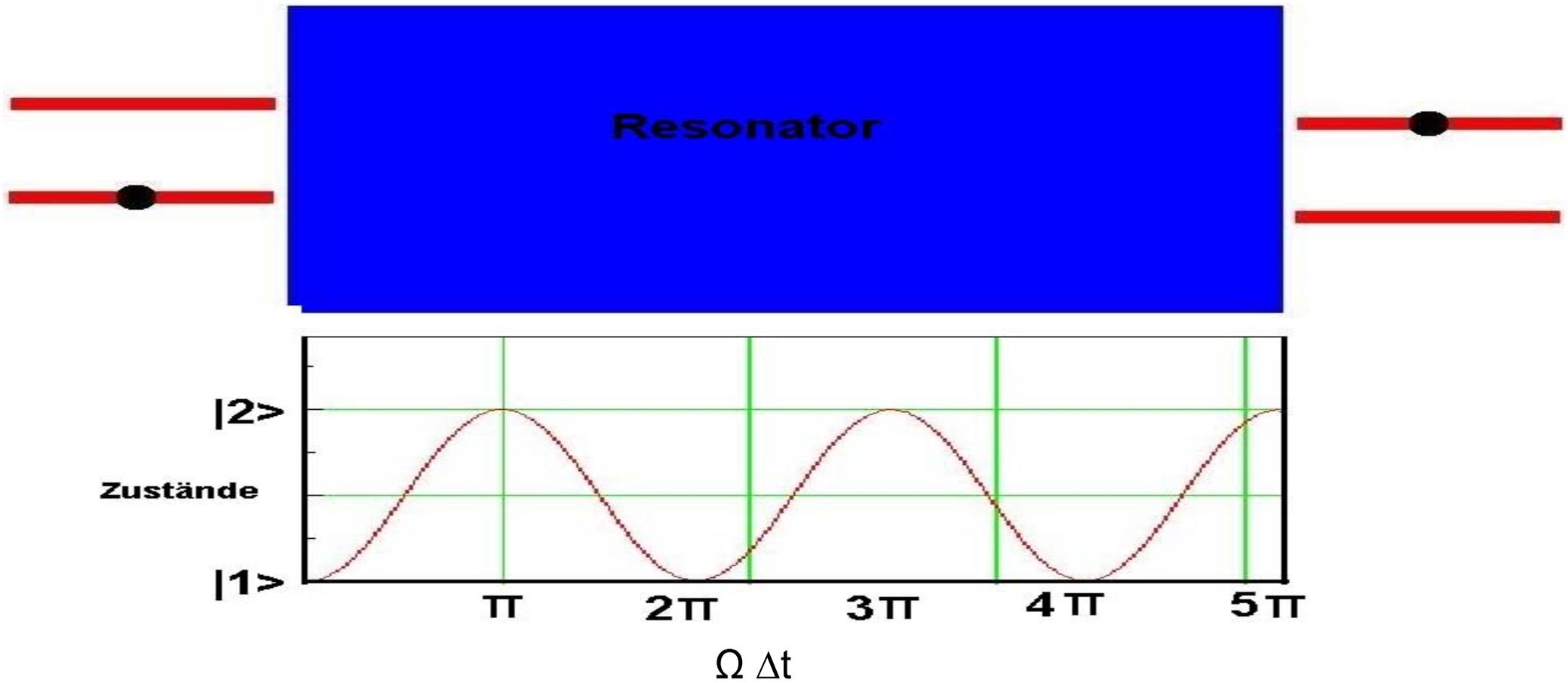
$$|\psi(t)\rangle = c_1(t)|1\rangle + c_2(t)|2\rangle$$

$$\begin{pmatrix} c_1(t) \\ c_2(t) \end{pmatrix} := \begin{pmatrix} \text{Exp}(i\Omega t) & 0 \\ 0 & \text{Exp}(-i\Omega t) \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} c_1(0) \\ c_2(0) \end{pmatrix}$$

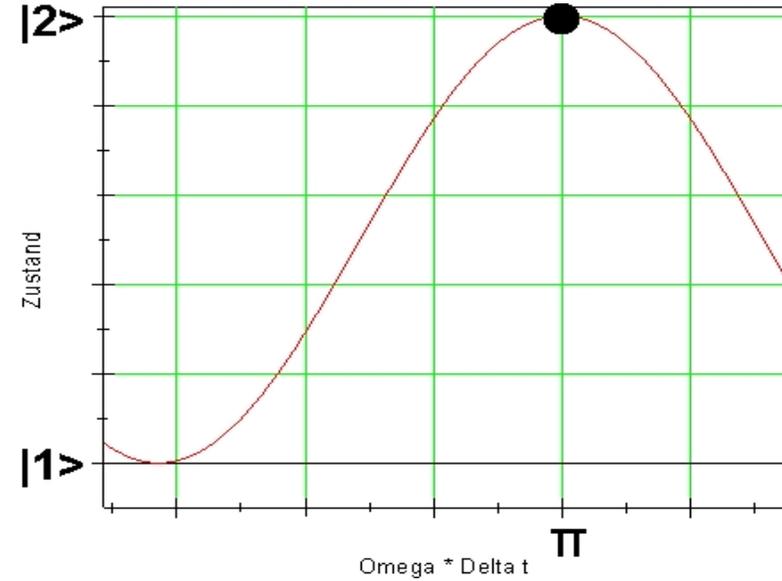
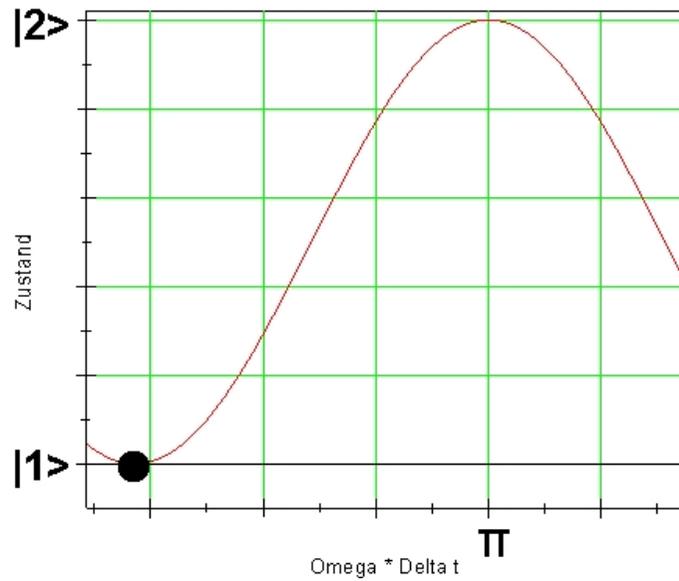
*Oszillatorisches Verhalten der Zustände - Schwebung*

# Theorie

Das geschieht im Resonator!



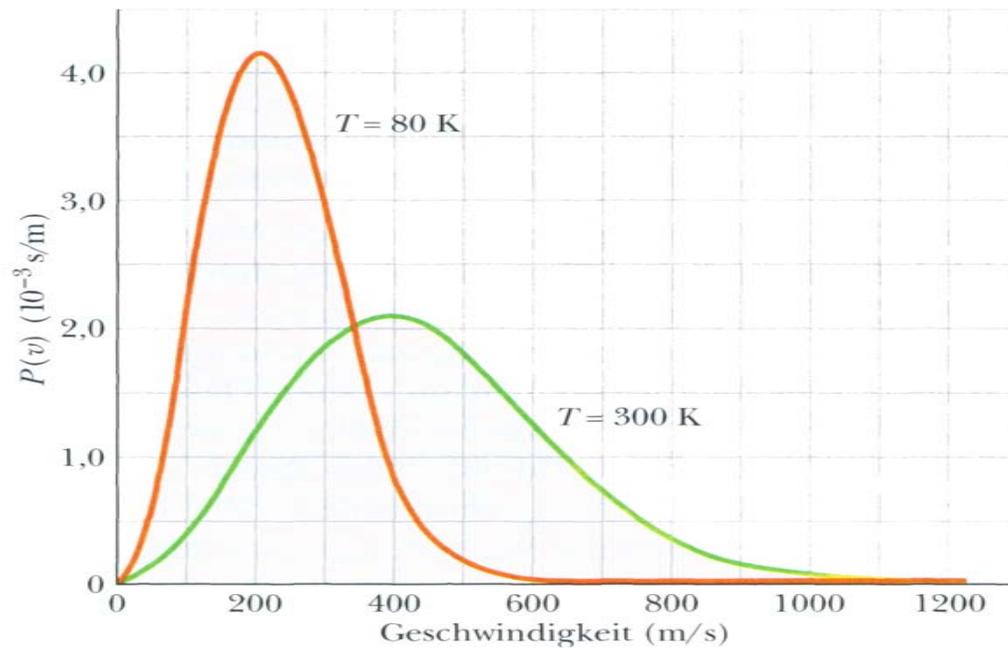
# Theorie



# Theorie

## Was geschieht in der Realität?

Es gibt eine Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen.

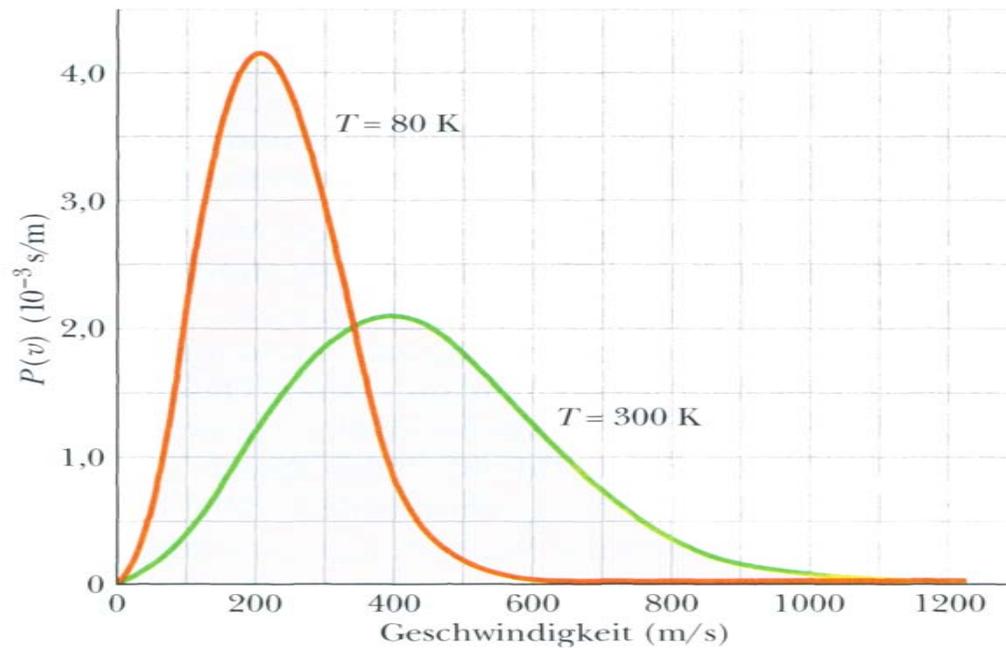


Halliday, Resnick, Walker - Physik

# Theorie

## Was geschieht in der Realität?

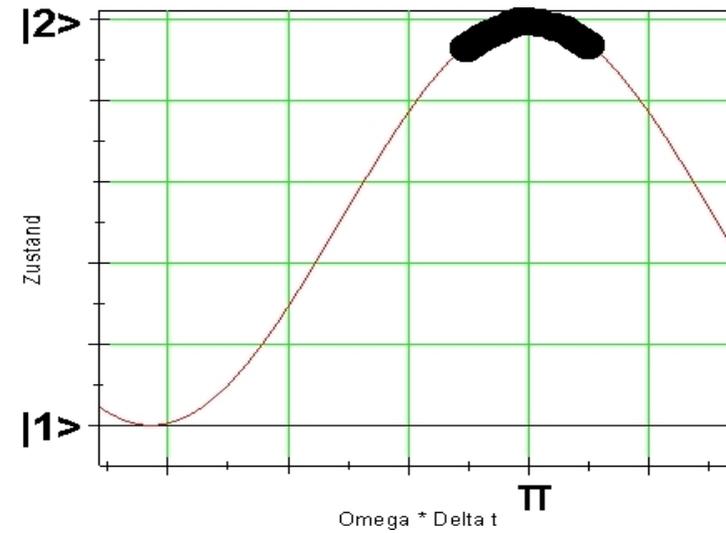
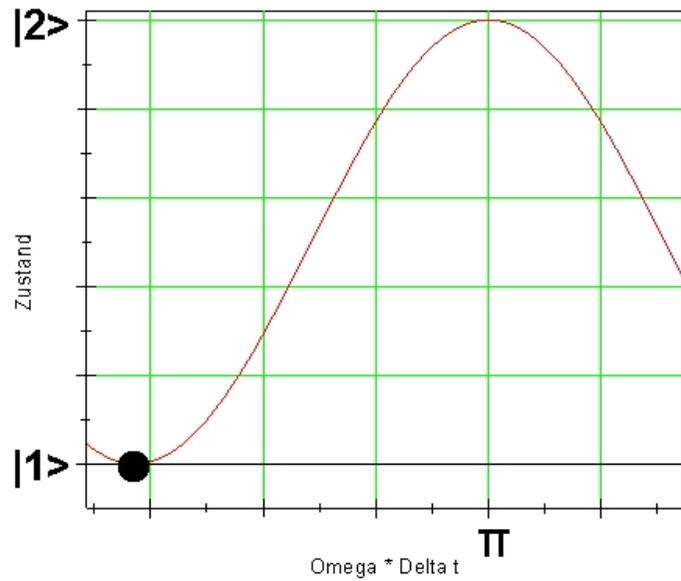
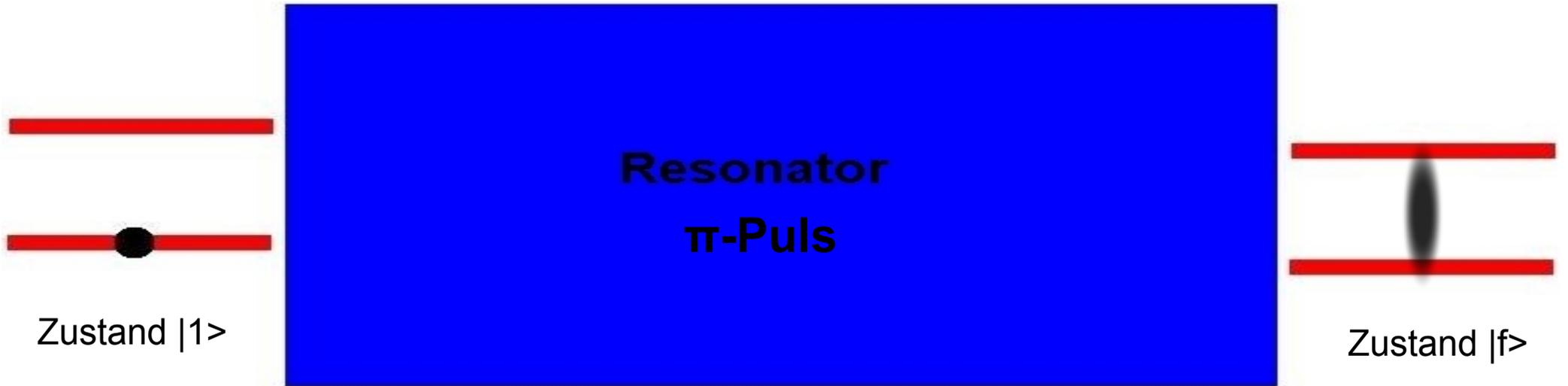
Es gibt eine Geschwindigkeitsverteilung der Teilchen.



Halliday, Resnick, Walker - Physik

**=>  $\Delta t$  variiert**

# Theorie



# Theorie

Lösung des Problems?

# Theorie

## Ramsey

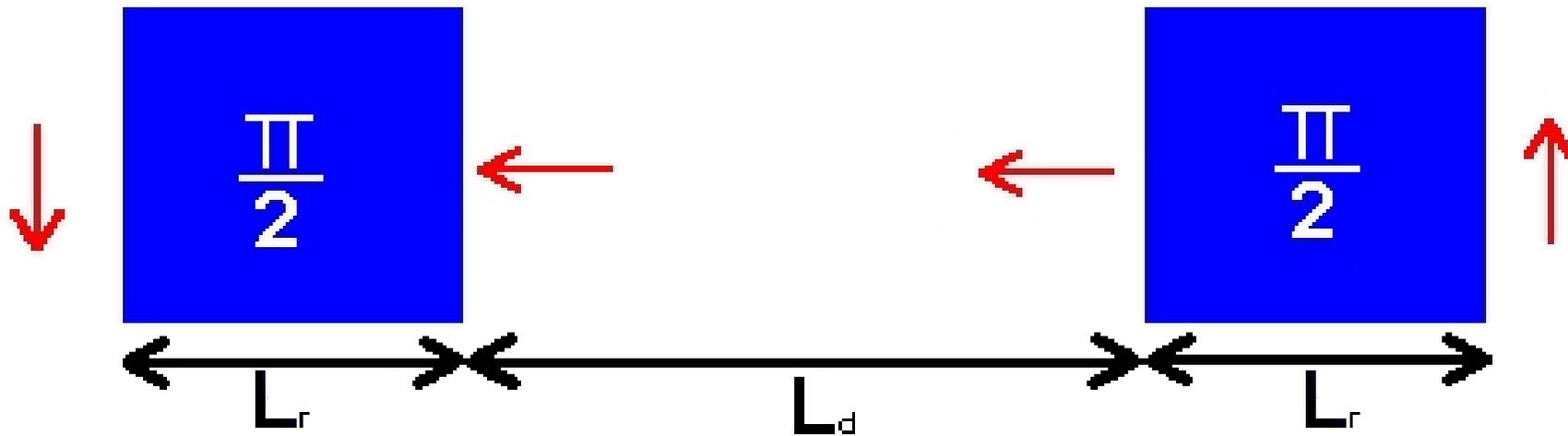
A diagram illustrating the decomposition of the Greek letter pi into two pi/2 terms. On the left, a blue rectangle contains the symbol  $\pi$ . An arrow points to the right, where two blue squares, each containing  $\frac{\pi}{2}$ , are separated by a plus sign.

$$\pi \rightarrow \frac{\pi}{2} + \frac{\pi}{2}$$

# Theorie

Ramsey:

1. Fall genauer  $\pi$ -Puls



$|1\rangle$

$$|i'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle \pm |2\rangle)$$

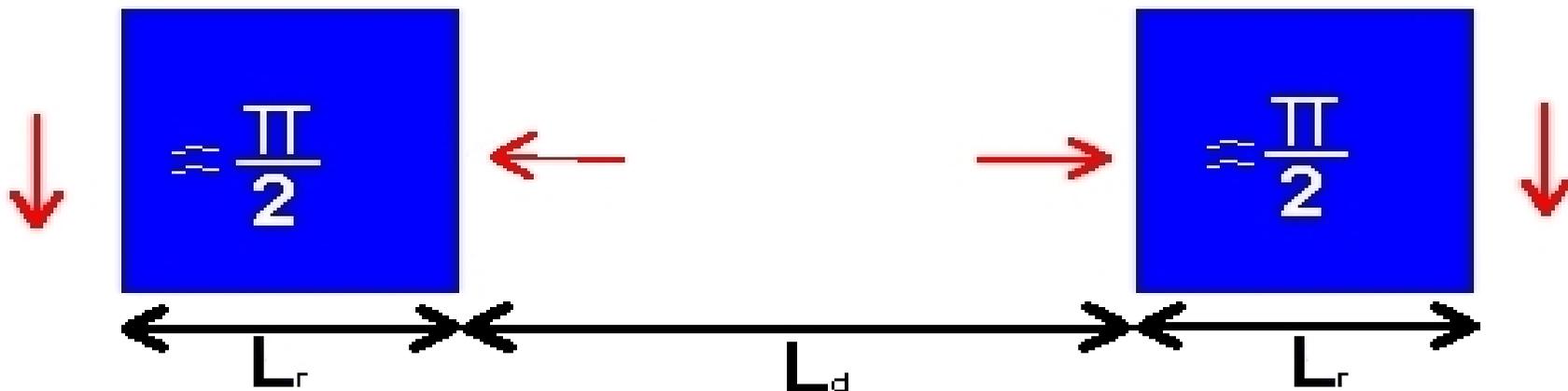
$|2\rangle$

Zeitunabhängiger Eigenzustand

# Theorie

Ramsey:

2. Fall ungenauer  $\pi$ -Puls (extrem Fall)



$|1\rangle$

$$|i\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle + e^{i\phi}|2\rangle) \quad |i'\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|1\rangle + e^{i\phi'}|2\rangle)$$

$|1\rangle$

Phasenentwicklungszeit:  $T = L_d/v$

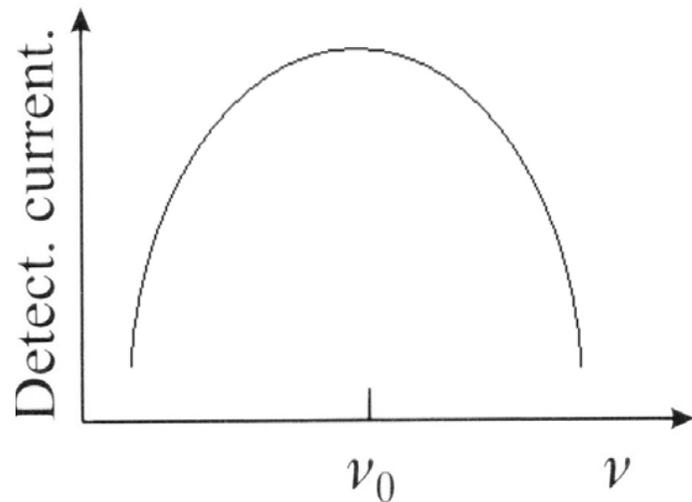
# Theorie

Wie sieht das im Detektor aus?

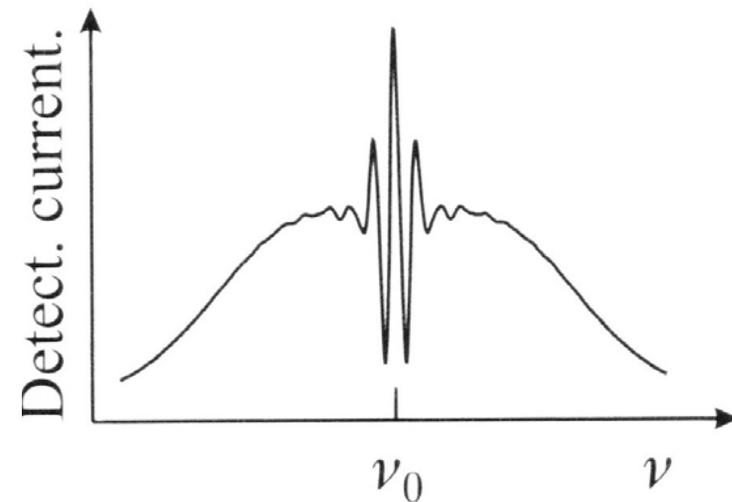
# Theorie

Wie sieht das im Detektor aus?

Normaler Pi-Resonator



Ramsey-Resonator



Major, Fouad 'The quantum beat'

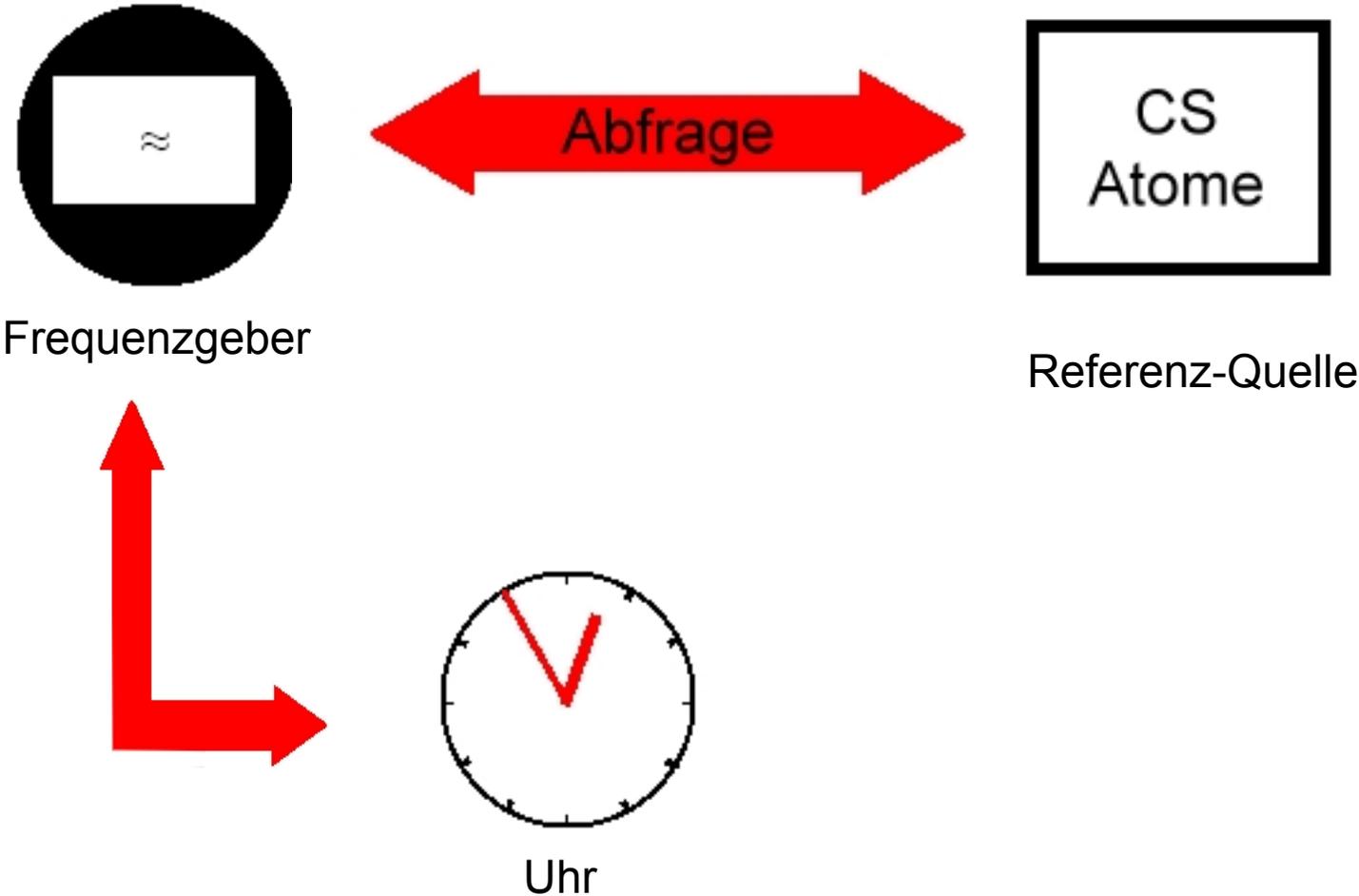
**Theorie ENDE**

**Start: Technische Realisierung**

# Die Atomuhr

Allgemeine Funktionsweise

Wiederholung



# Technische Realisierung

Referenzquelle

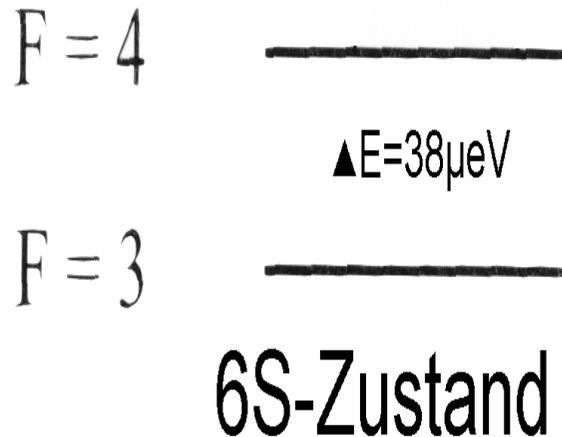
## **$^{133}\text{Cs}$ -Atome im Grundzustand**

Voraussetzung: alle Cs-Atome sind  
identisch aufgebaut

# Technische Realisierung

Referenzquelle

**$^{133}\text{Cs}$ -Atome im Grundzustand**



# Technische Realisierung

Referenzquelle

**$^{133}\text{Cs}$ -Atome im Grundzustand**

$F = 4$  —————

$\Delta E = 38 \mu\text{eV}$

$F = 3$  —————

**6S-Zustand**

$$\Delta E \sim \omega$$

# Technische Realisierung

Referenzquelle

**$^{133}\text{Cs}$ -Atome im Grundzustand**

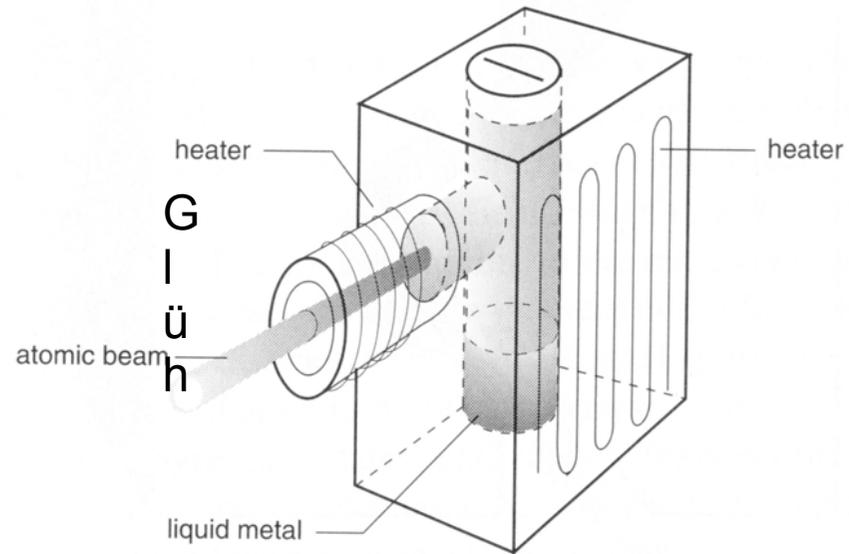
$F = 4$       \_\_\_\_\_  
9 192 631 770 Hz  
 $F = 3$       \_\_\_\_\_

**6S-Zustand**

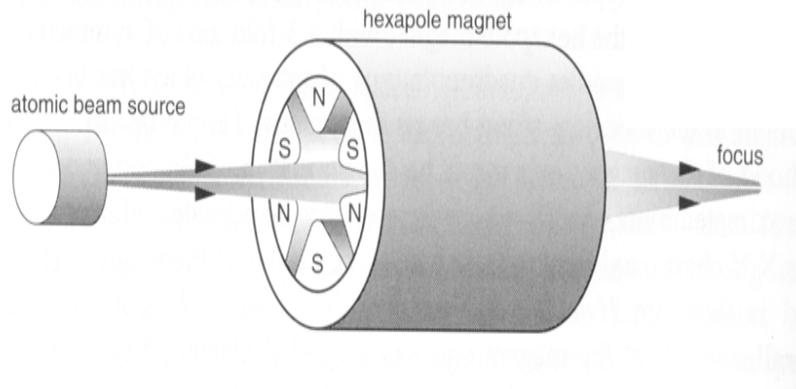
# Technische Realisierung

## Teilchenstrahl

### Atom-Ofen



The basic design of an atomic beam oven  
Riehle 'Frequency standards'



Riehle 'Frequency standards'

### Kollimator

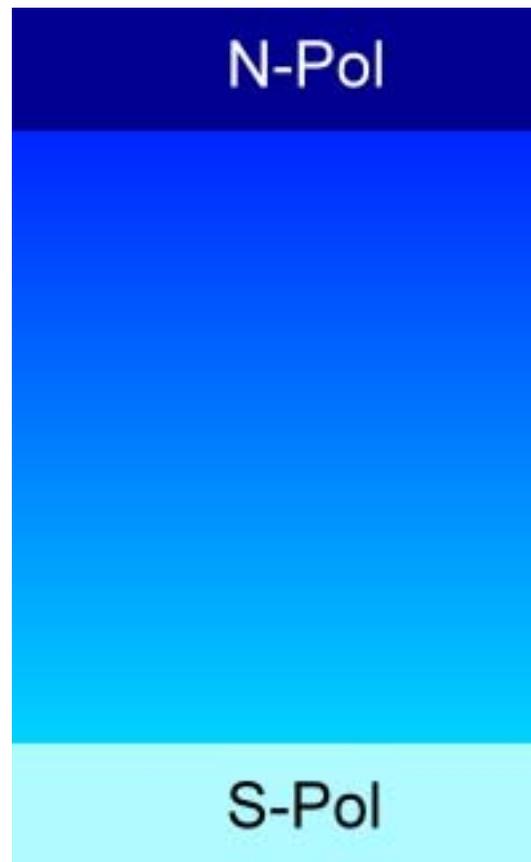
# Technische Realisierung

Präparation eines reinen Zustands (z.B.  $|1\rangle$ )

# Technische Realisierung

Präparation eines reinen Zustands (z.B.  $|1\rangle$ )

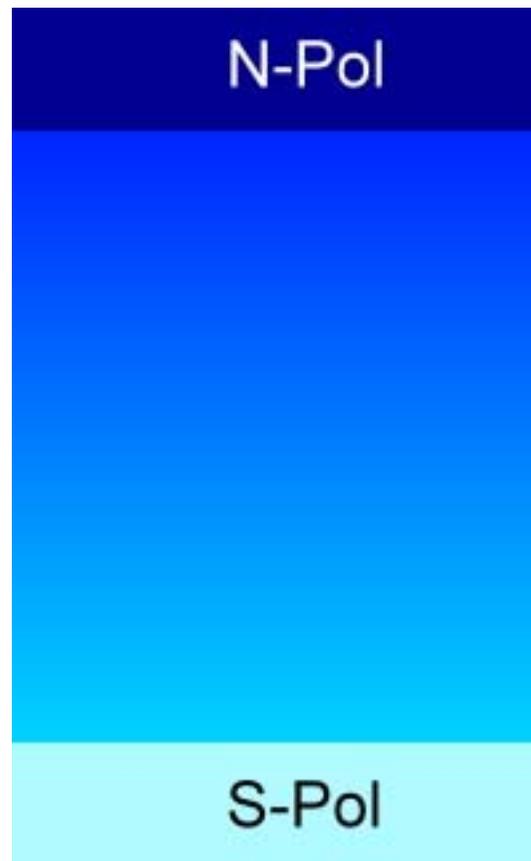
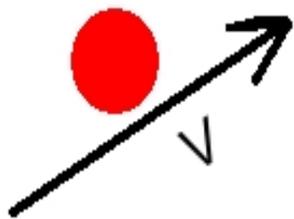
**1. Magnetfeld**



# Technische Realisierung

Präparation eines reinen Zustands (z.B.  $|1\rangle$ )

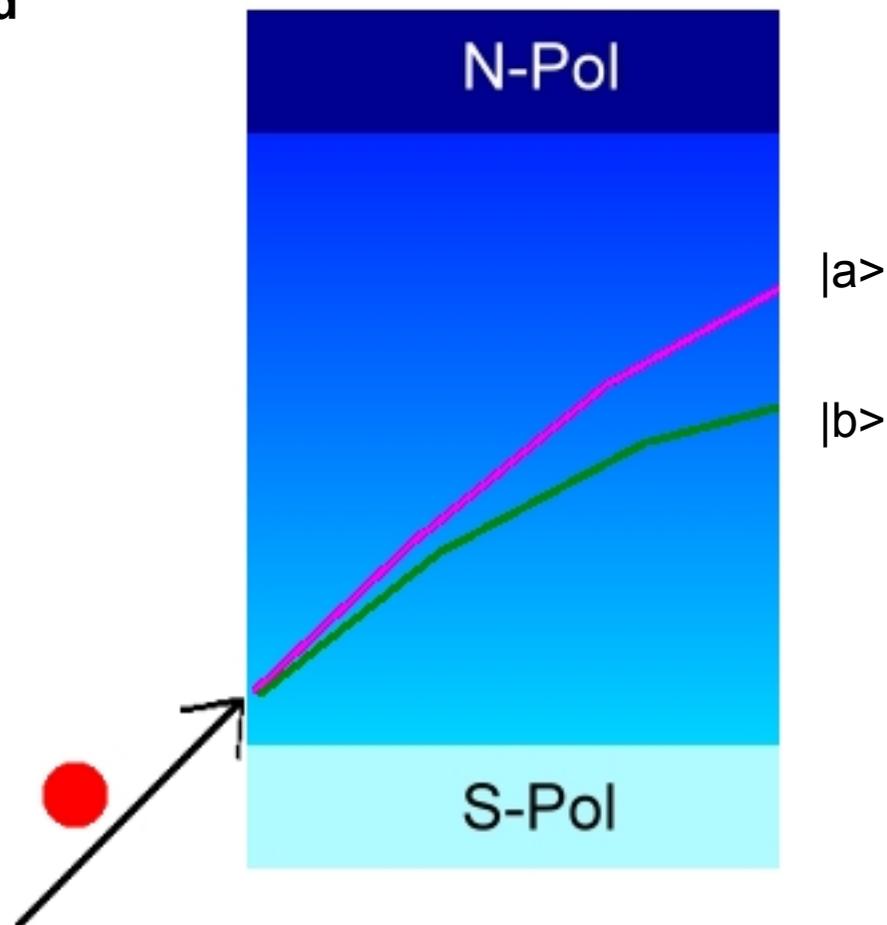
1. Magnetfeld



# Technische Realisierung

Präparation eines reinen Zustands (z.B.  $|1\rangle$ )

1. Magnetfeld



# Technische Realisierung

## Präparation eines reinen Zustands (z.B. $|1\rangle$ )

### 1. Magnetfeld

#### Probleme:

- .Endpunkt ist Fkt. der Geschwindigkeit
- .Magnetfelder schlecht messbar
- .Justierung problematisch
- .Dimensionen groß und schwer

# Technische Realisierung

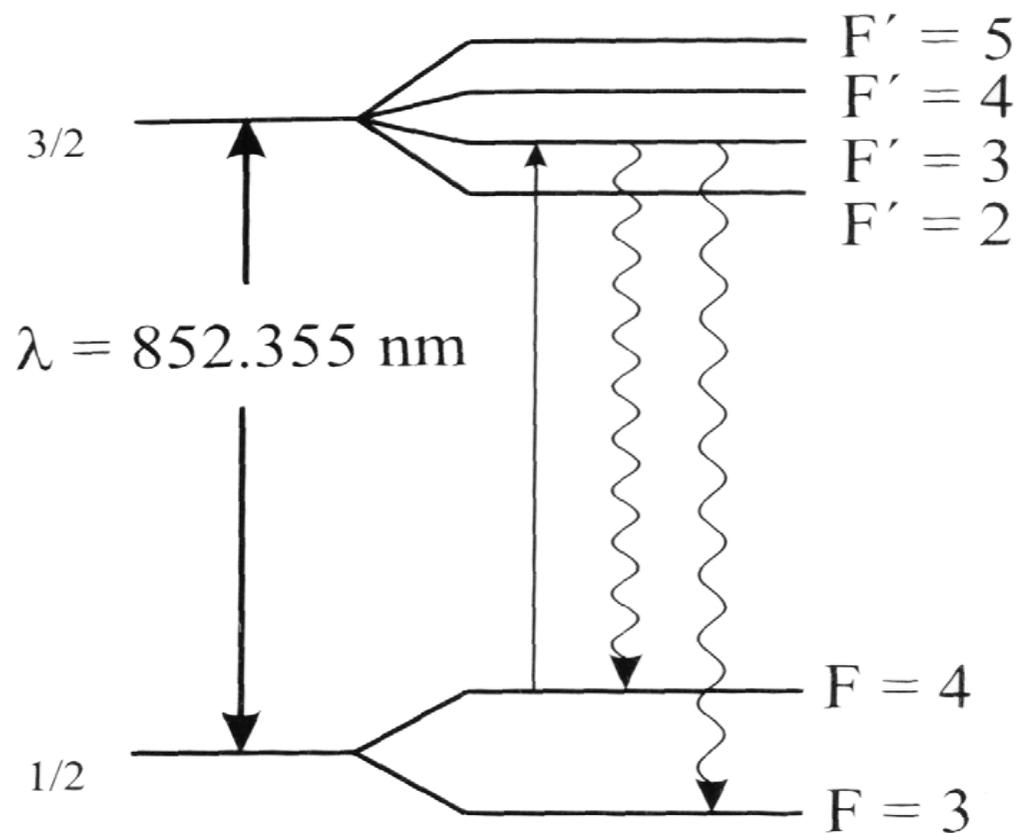
Präparation eines reinen Zustands (z.B.  $|1\rangle$ )

**2.Laser**

# Technische Realisierung

## Präparation eines reinen Zustands (z.B. $|1\rangle$ )

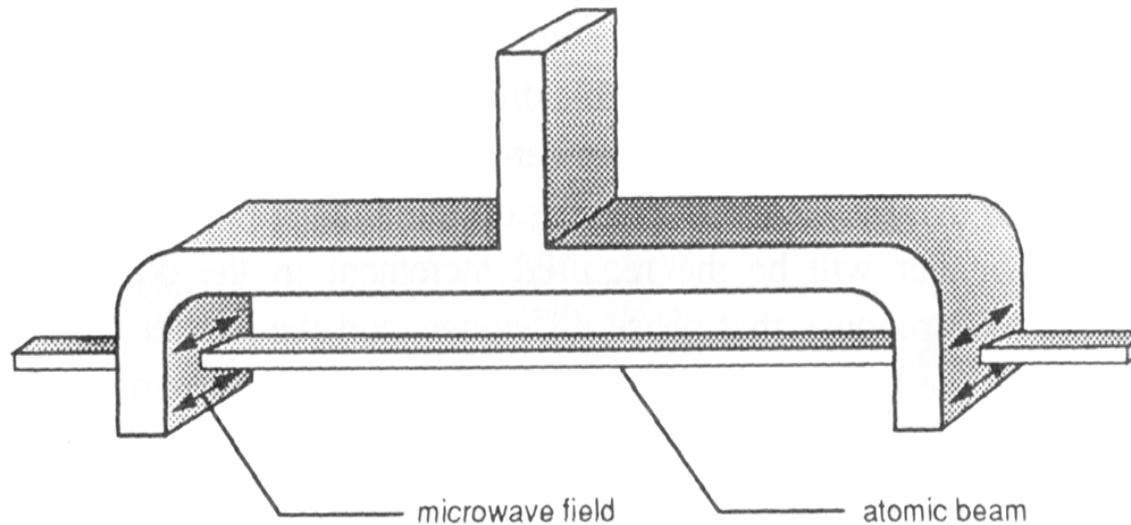
### 2.Laser



Riehle 'Frequency standards'

# Technische Realisierung

## Ramsey-Resonator:



Riehle 'Frequency standards'

# Technische Realisierung

## Ramsey-Resonator:

### Probleme:

Das Durchstimmen der Frequenzen im Resonator wird 'wandernden' Wellen auf den Statischen/Stehenden Wellen erzeugen.

# Technische Realisierung

## Ramsey-Resonator:

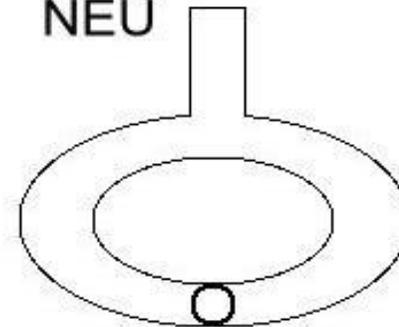
Lösung:

**NEUE Endstücke**

ALT



NEU

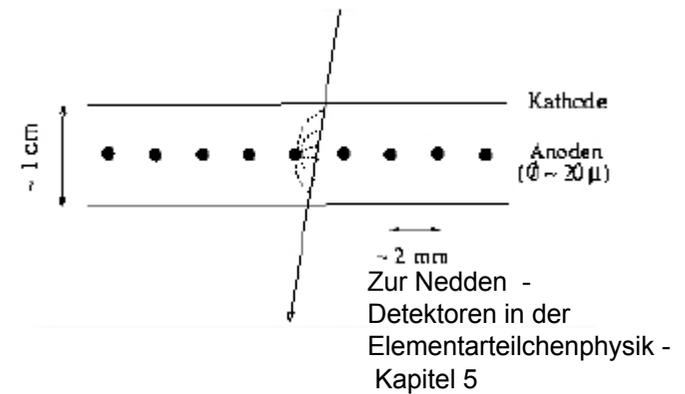


Konstante Intensität am Wechselwirkungspunkt

# Technische Realisierung

Detektor:

## Klassik



“HOT WIRE“ - Detektor

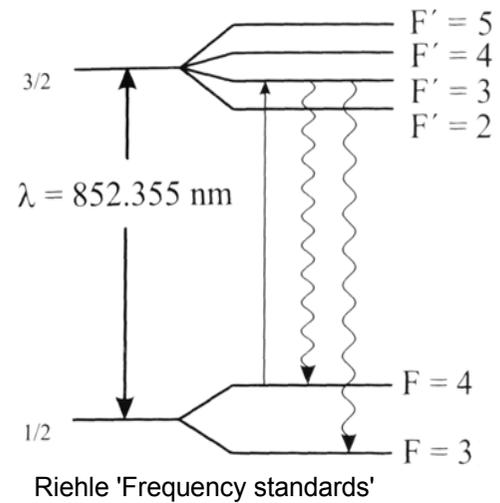
# Technische Realisierung

Detektor:

## Optik

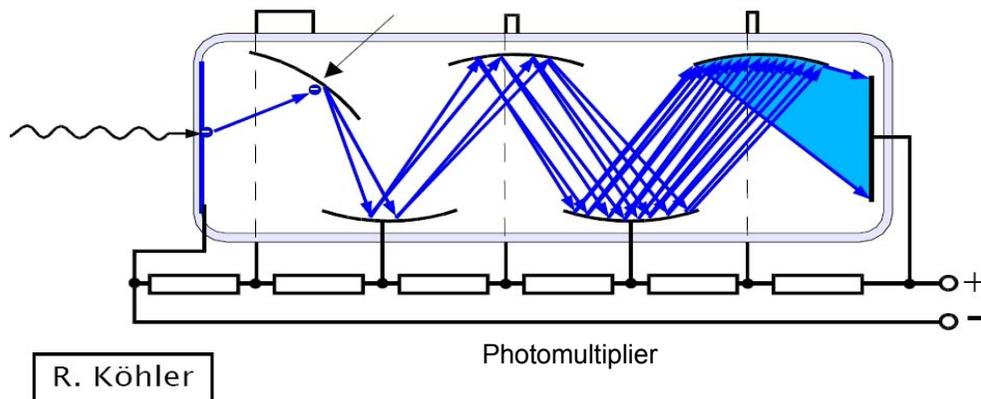


Thomas Braun



$$\Delta l = \pm 1$$

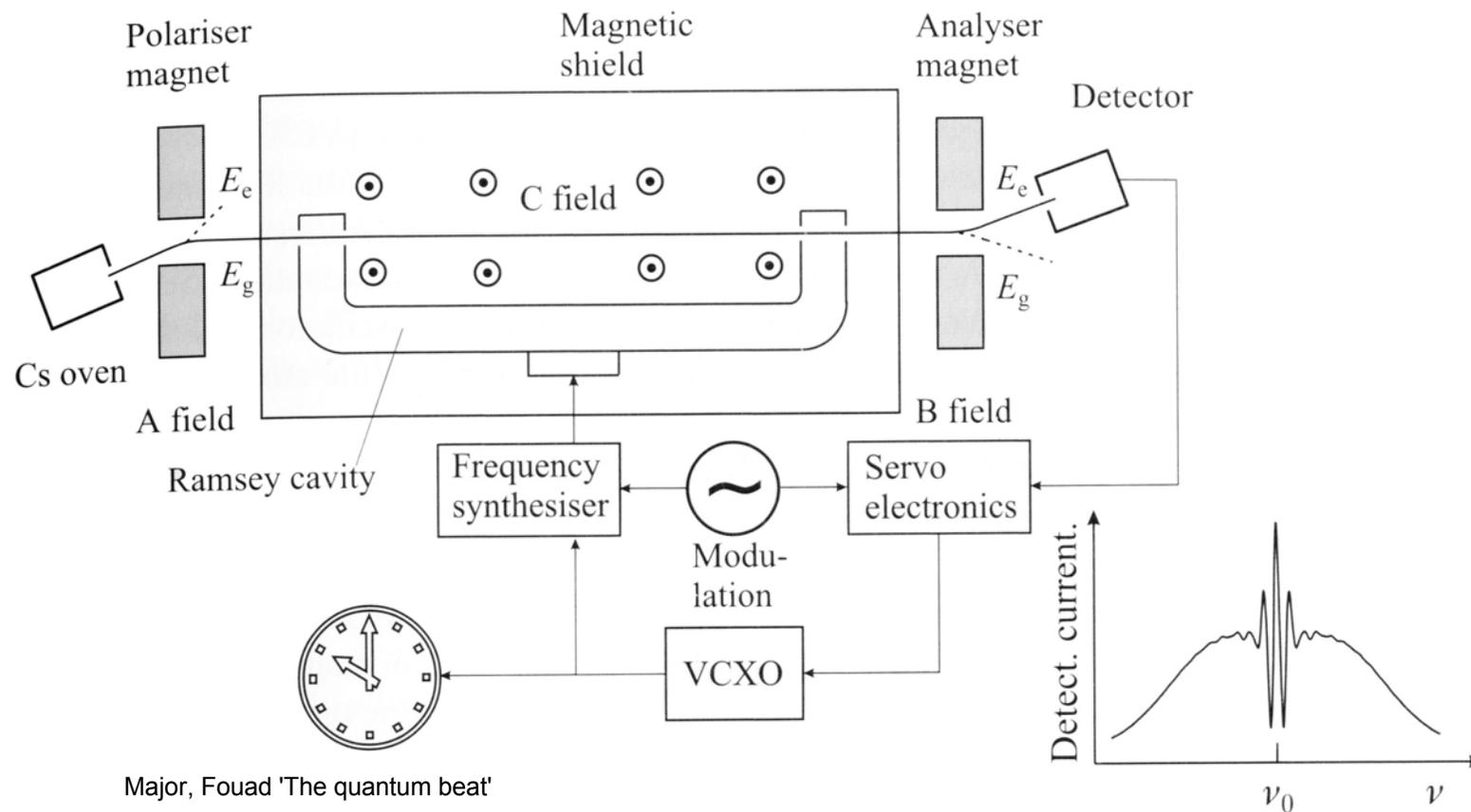
Fluoreszenz - Lichtanregung



# Technische Realisierung

## Gesamtpaket-Atomuhr

### Klassik



Major, Fouad 'The quantum beat'

# Technische Realisierung

## Gesamtpaket-Atomuhr

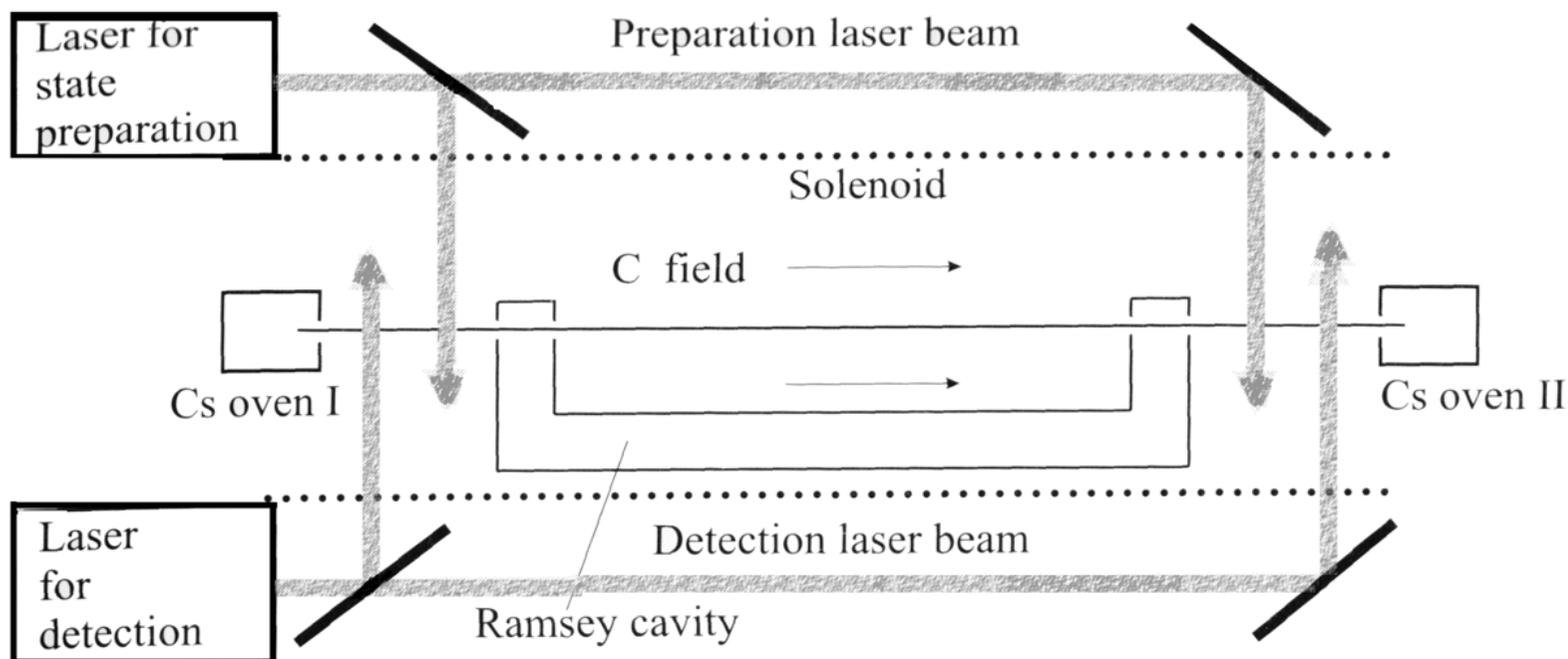
Optimierung:

.Mehr wartungsfreie Teile

# Technische Realisierung

## Gesamtpaket-Atomuhr

### Modern



Riehle 'Frequency standards'

# Technische Realisierung

## Gesamtpaket-Atomuhr

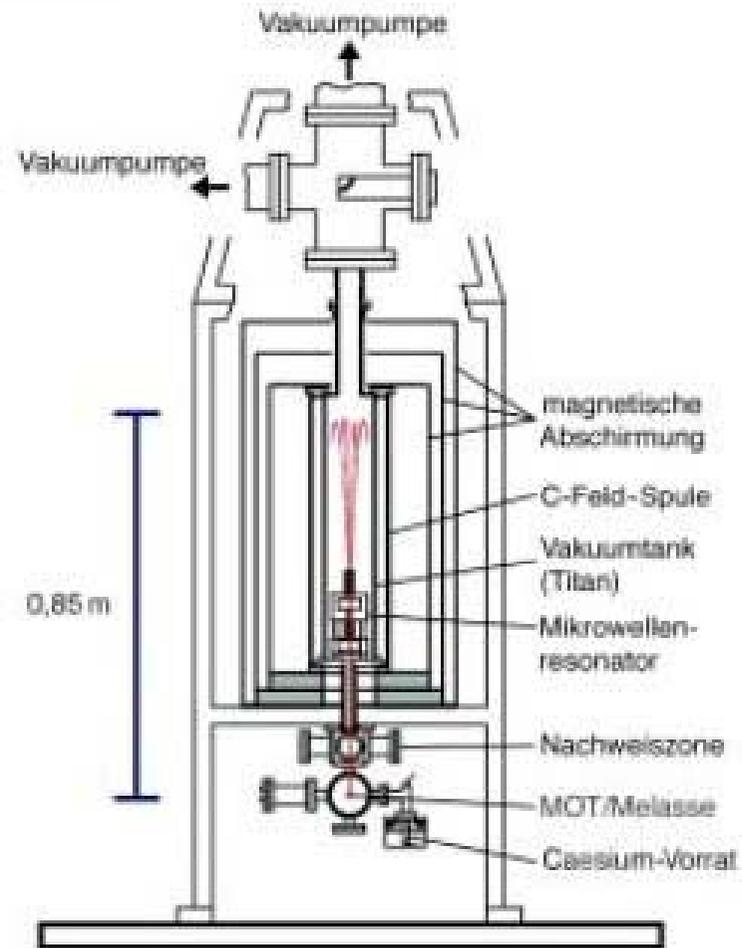
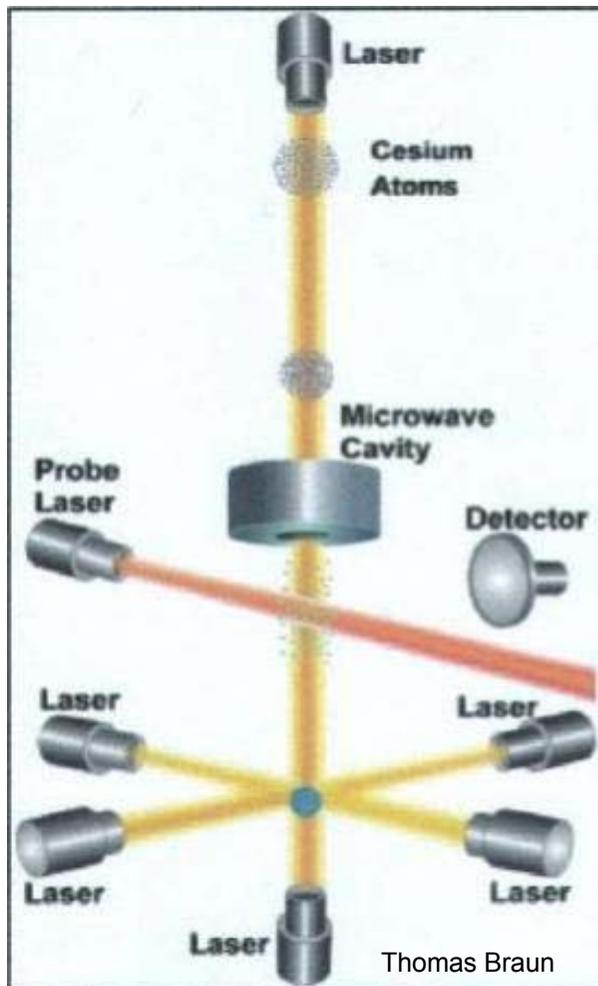
Optimierung:

- .Mehr wartungsfreie Teile
- .Besseres Signal-Rauschverhältnis
- .Längere WW-Zeit

# Technische Realisierung

## Gesamtpaket-Atomuhr

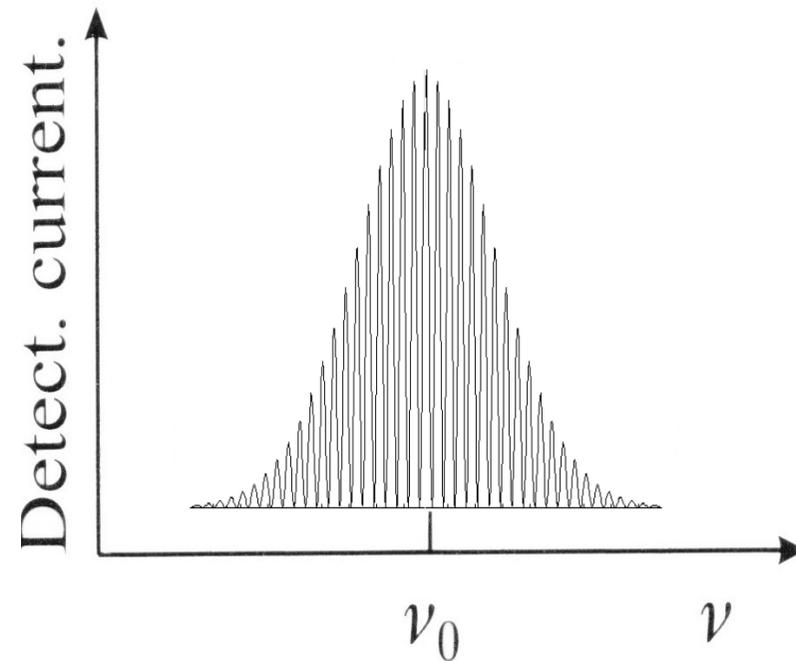
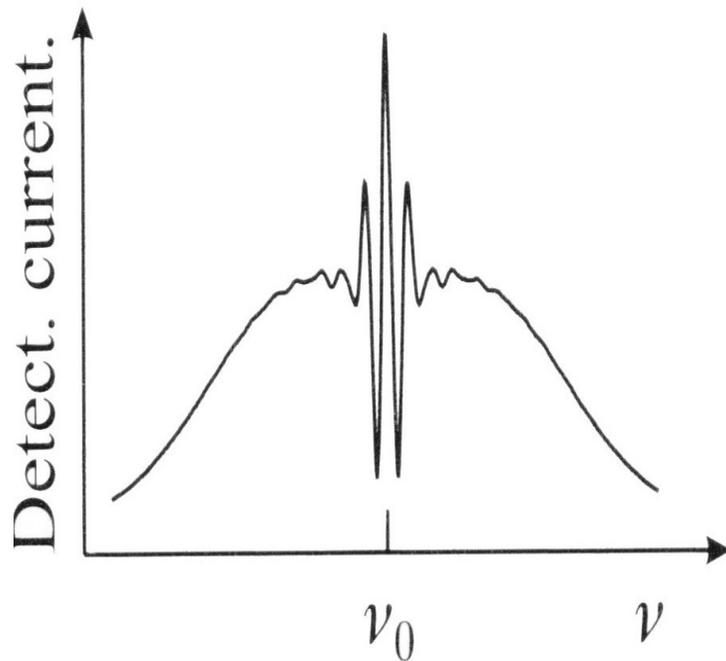
## CS-Fontäne



# Technische Realisierung

## Gesamtpaket-Atomuhr

### Cs-Standard vs. CS-Fontäne



Major, Fouad 'The quantum beat'

# Technische Realisierung

## Gesamtpaket-Atomuhr

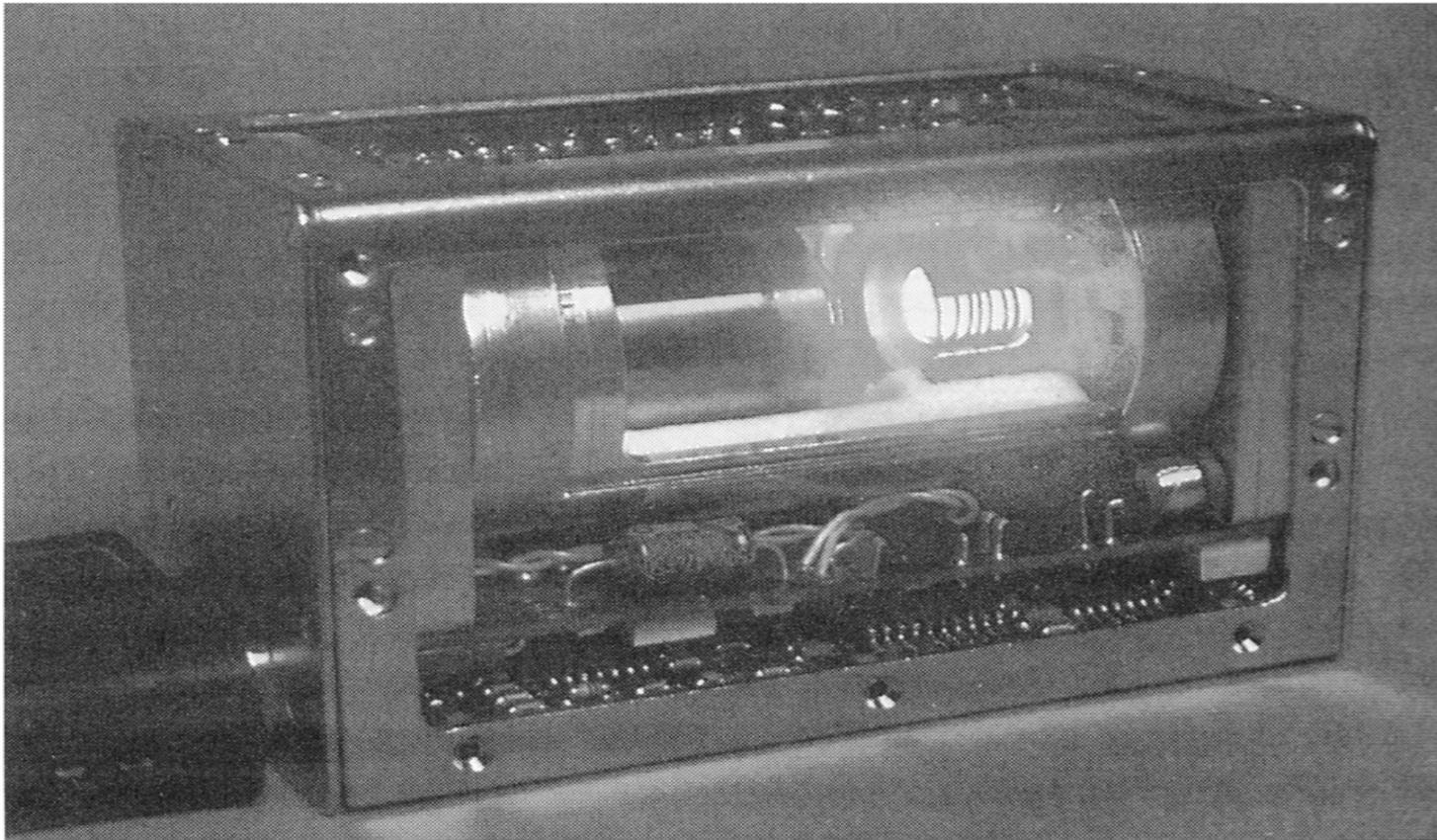
Optimierung:

- .Mehr wartungsfreie Teile
- .Besseres Signal-Rauschverhältnis
- .Längere WW-Zeit
- .Transportabel

# Technische Realisierung

Gesamtpaket-Atomuhr

## Rb-Atomuhr



Major, Fouad 'The quantum beat'

# Zukunft - Ausblick

- Höhere Frequenzen (Optisch – Röntgen)
- Resistenter gegen ext. Einflüsse
- Kleinere Dimensionen (Armbanduhr)

# ENDE

Vielen Dank für die Aufmerksamkeit