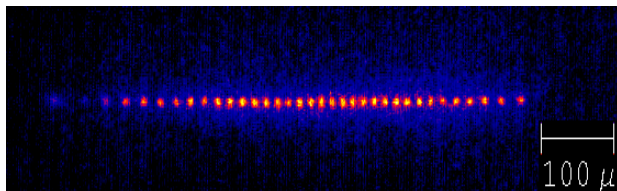
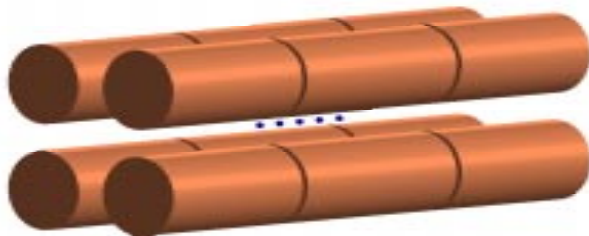


## Einzelne Atome sichtbar gemacht - Ionen in Fallen

Lehrerfortbildung zur Quantenmechanik



- Motivation
- Theorie
- Das  $^{40}\text{Ca}^+$ -Ion
- Experimenteller Aufbau
- Meßmethode
- Praktikumsblock

# Motivation

---

- ☺ Messung atomarer Größen ermöglichen Test der theoretischen Modelle
- ☺ Verwendung einfacher Systeme, da diese einfach zu rechnen

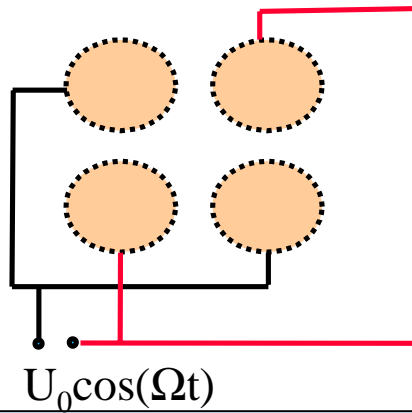
## Schwierigkeiten:

- ☹ Teilchen stehen nur kurze Zeit für Messung zur Verfügung
- ☹ Verbreiterung von Resonanzkurven wegen des Dopplereffektes
- ☹ Teilchen sind nicht frei von äußeren Störeinflüssen

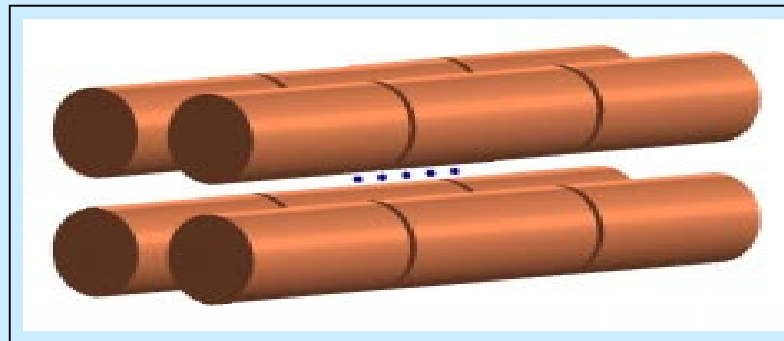
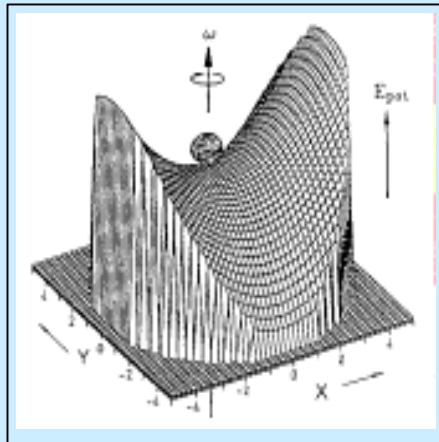
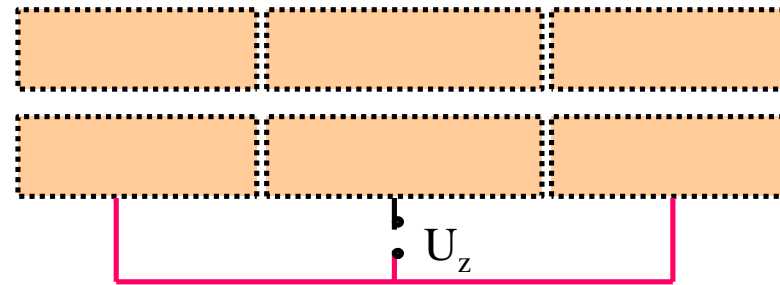
➡ Durch Speicherung und Kühlung lassen sich diese Schwierigkeiten lösen

# Speicherung der Ionen in einer linearen Paulfalle

Radiale Speicherung



Axiale Speicherung



# Die Ionenspeicherung - eine etwas detailliertere Betrachtung

Speicherspannungen:

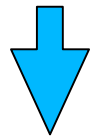
radial:  $U_{dc} + U_{ac} \cos(\Omega t)$

axial:  $U_z$



Radiales Potential:

$$\Phi = U_{dc} + U_{ac} \cos(\Omega t) \frac{x^2 - y^2}{2r_0^2}$$

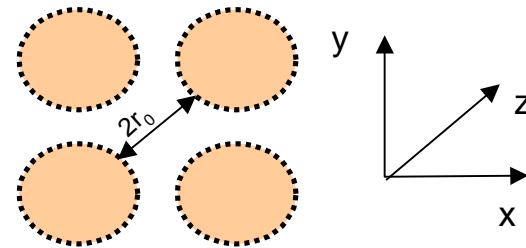


Bewegungsgleichungen:

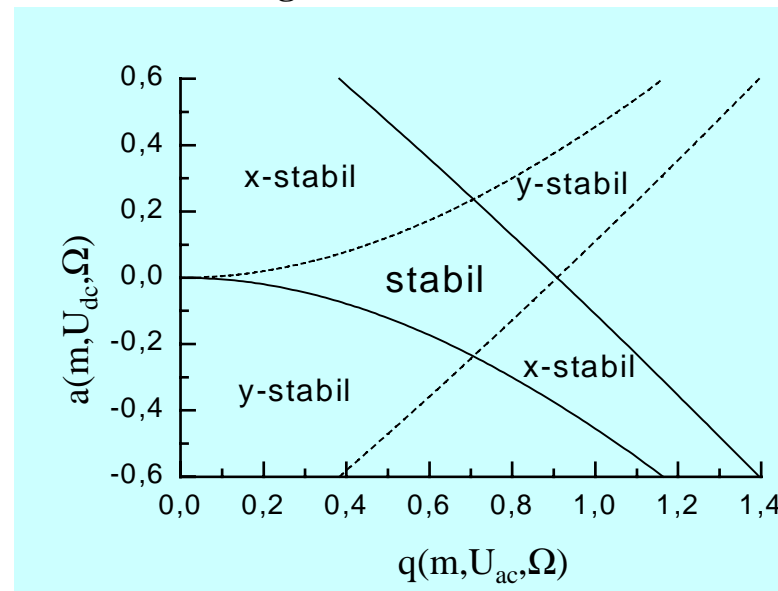
$$m\ddot{x} = -2e(U_{dc} + U_{ac} \cos(\Omega t)) \frac{x}{2r_0^2}$$

$$m\ddot{y} = +2e(U_{dc} + U_{ac} \cos(\Omega t)) \frac{y}{2r_0^2}$$

$F \propto -r$



Stabilitätsdiagramm einer linearen Paulfalle



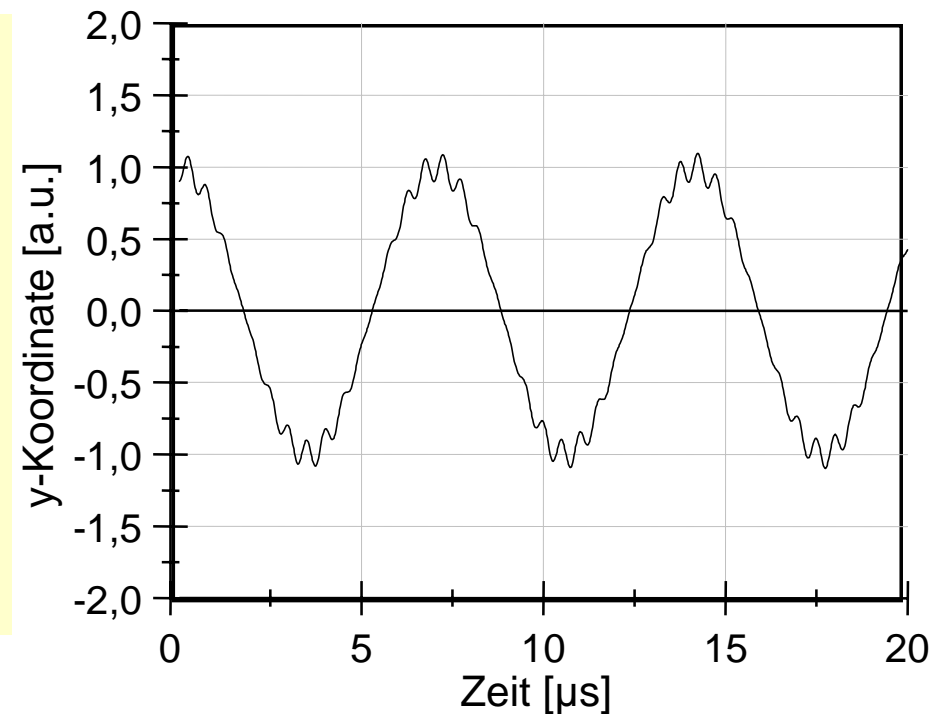
# Bewegung der Ionen in der linearen Paulfalle

Anschauliches Modell der Bewegungen (ohne Herleitung):  
(in der sogenannten adiabatischen Näherung  $a, q \ll 1$ )

## Ansatz:

Aufteilung der Bewegung in:

- gemittelte langsame Bewegung im statischen Pseudopotential  
-> **Makrobewegung**
- schnelle Bewegung erzwungen durch Speicherfeld  
-> **Mikrobewegung**



# Laserkühlen an einem 2-Niveau-System

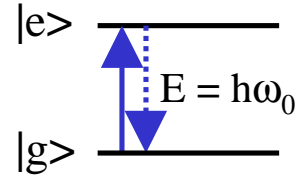
Energie des Photons:

$$E = h\nu$$

Impuls des Photons:

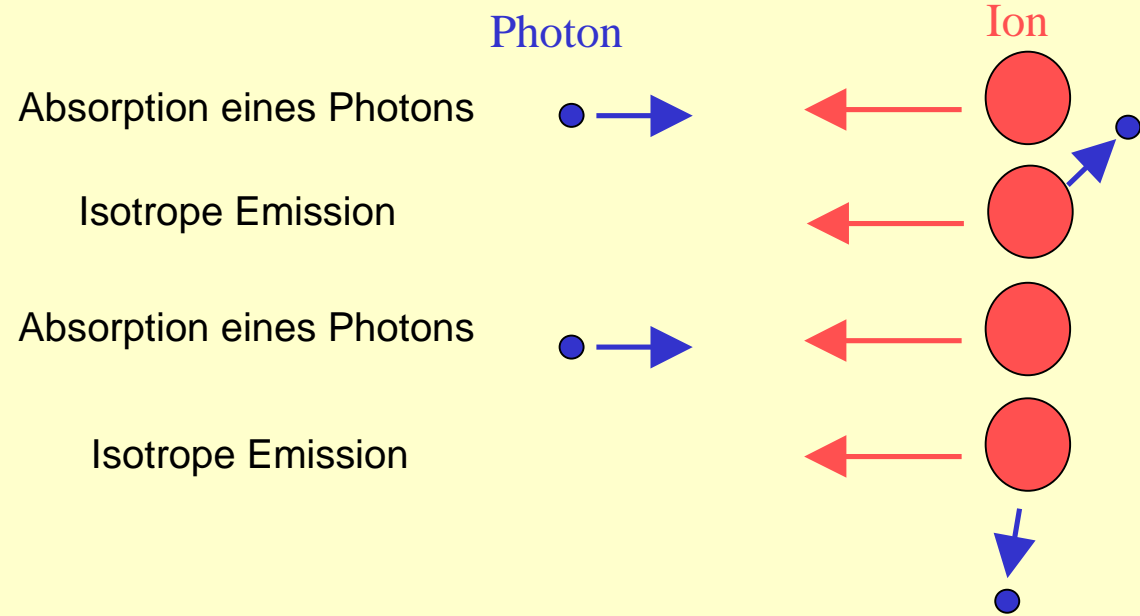
$$p = h\nu / c = h / \lambda = \hbar k$$

Übergang im Ruhesystem  
des Ions



## Schematischer Ablauf des Kühlprozesses

Laser *rotverstimmt*, wegen Dopplereffekt :  $\omega_L = \omega_0 - kv_{\text{Ion}}$



Fazit: Im Mittel über viele Absorptions-/Emissionsprozesse erfährt das Ion einen Impulsübertrag entgegen seiner Bewegungsrichtung - es wird also abgebremst

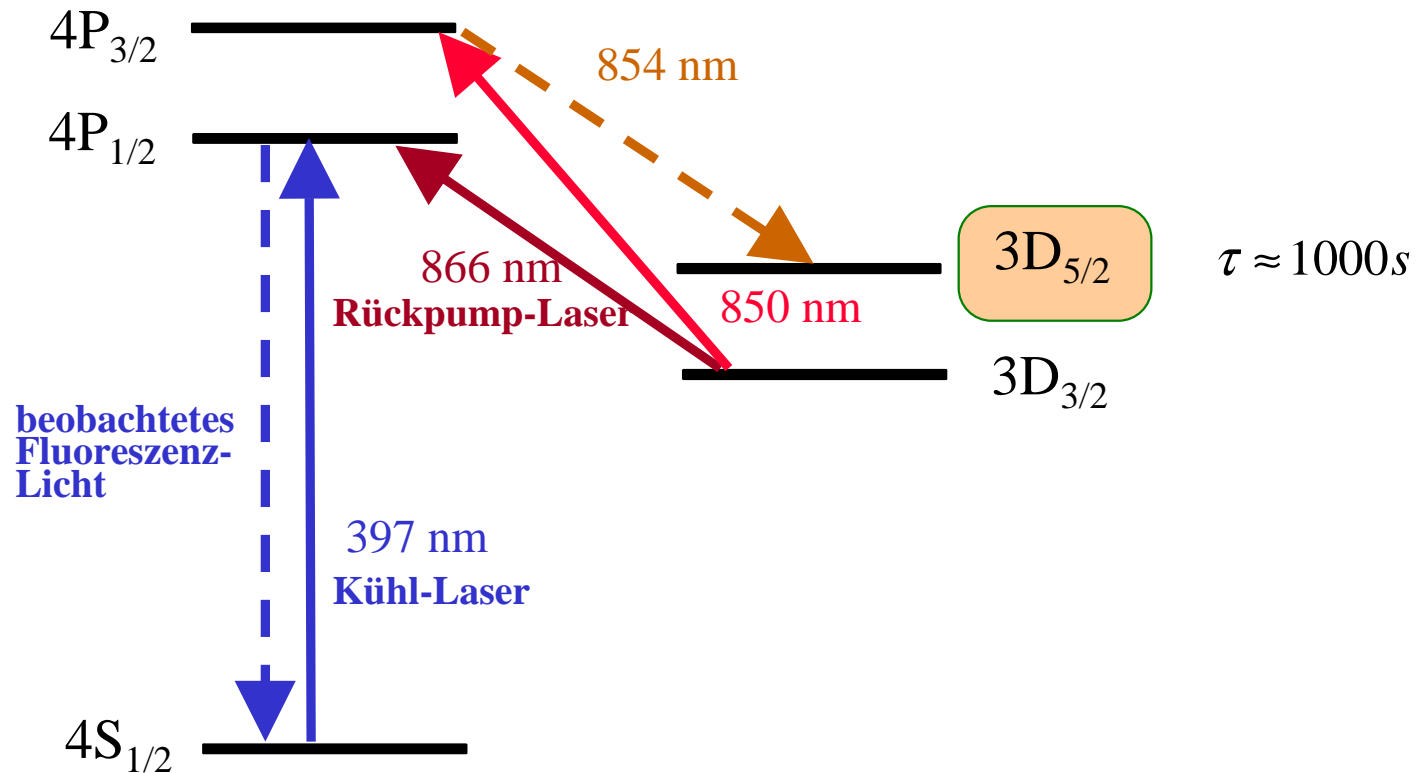
## Erreichte Vorteile

---

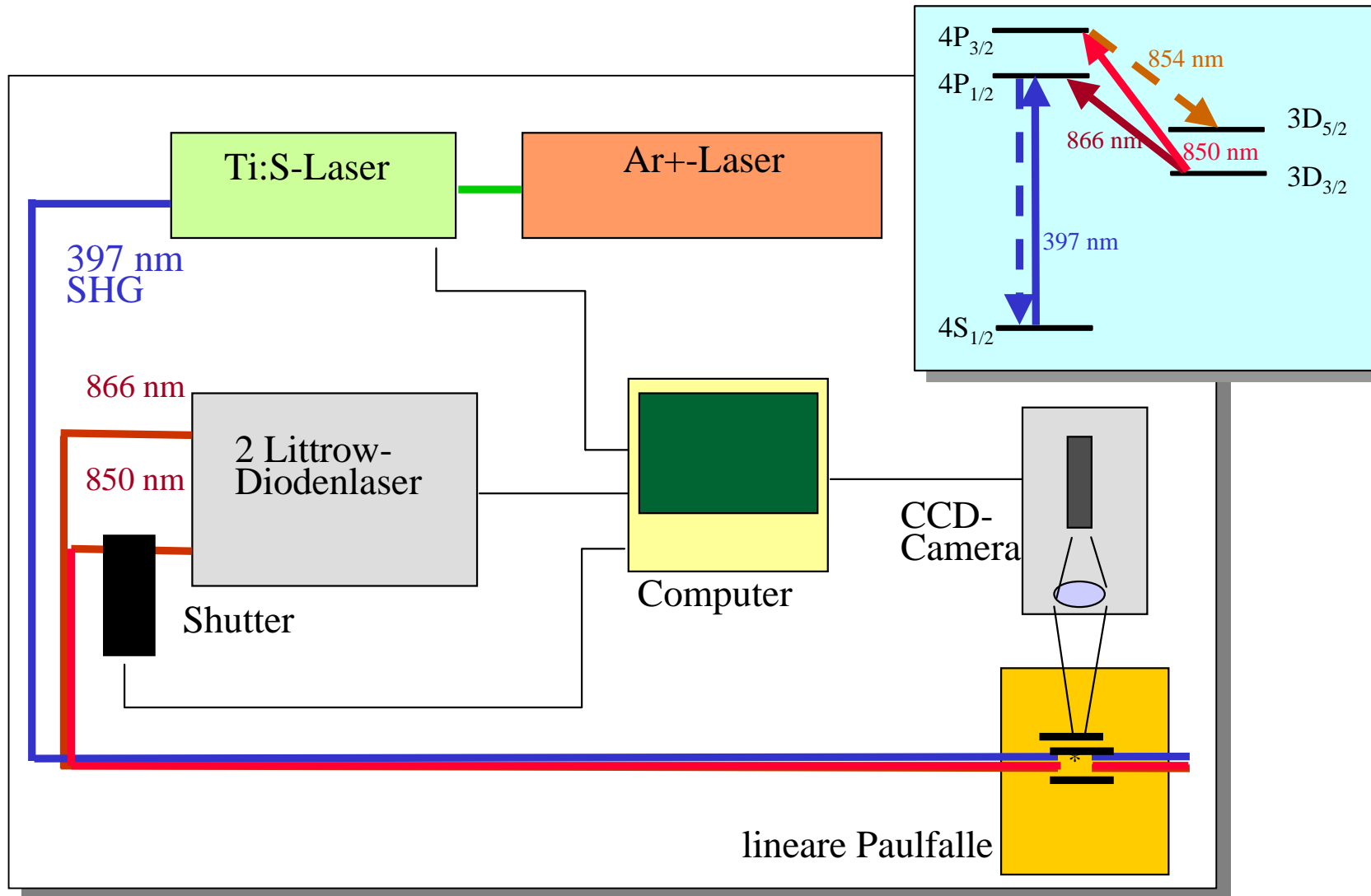
- ☺ Ionen lassen sich in Paulfalle „beliebig“ lange speichern
  - Ionen auf kleinem Volumen lokalisiert
  - lange Wechselwirkungszeiten => Limitierung der Linienbreiten
  - mehrere Messungen an den gleichen Ionen möglich
  
- ☺ Laserkühlung ermöglicht Reduktion der Ionenbewegung in der Falle
  - Minimierung der Einflüsse durch die elektrischen Speicherfelder
  - weitere Limitierung der Linienbreiten (Reduktion des Dopplereffektes)
  - Übergang von Ionenwolken zu Ionenkristallen
  
- ☺ Durch die Kombination von in Paulfallen gespeicherten und lasergekühlten Ionen ergeben sich neue Möglichkeiten in der Hochpräzisionsspektroskopie und der Quantenoptik

# Niveauschema des $^{40}\text{Ca}^+$

Elektronenkonfiguration  $\text{Ca}^+$  :  $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^6 4s^1$   
[Ar]  $4s^1$

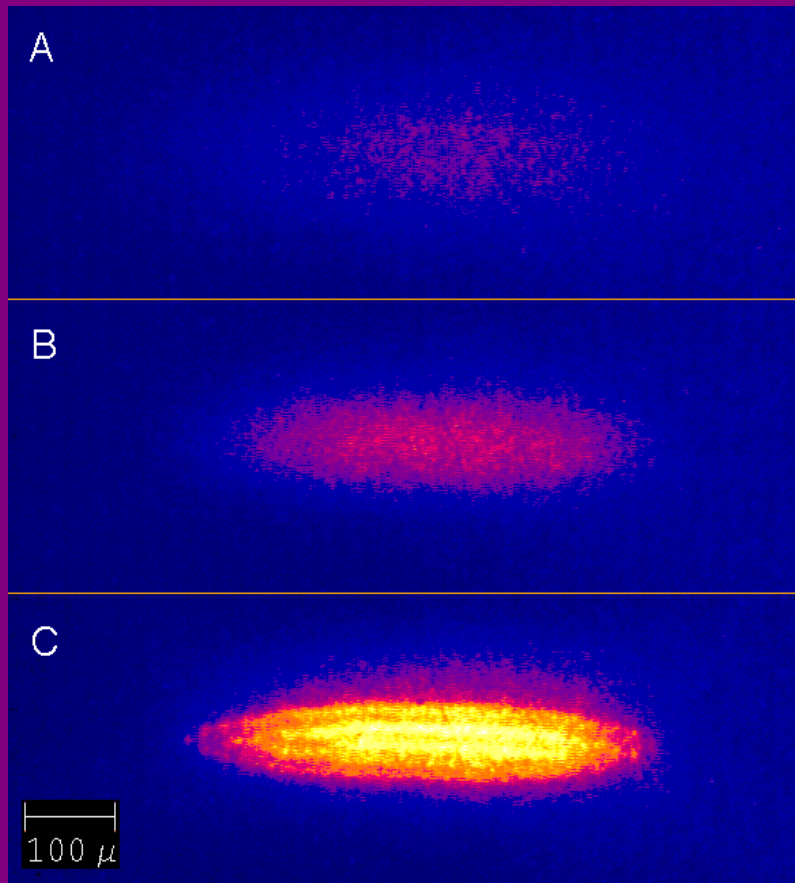


# Experimenteller Aufbau

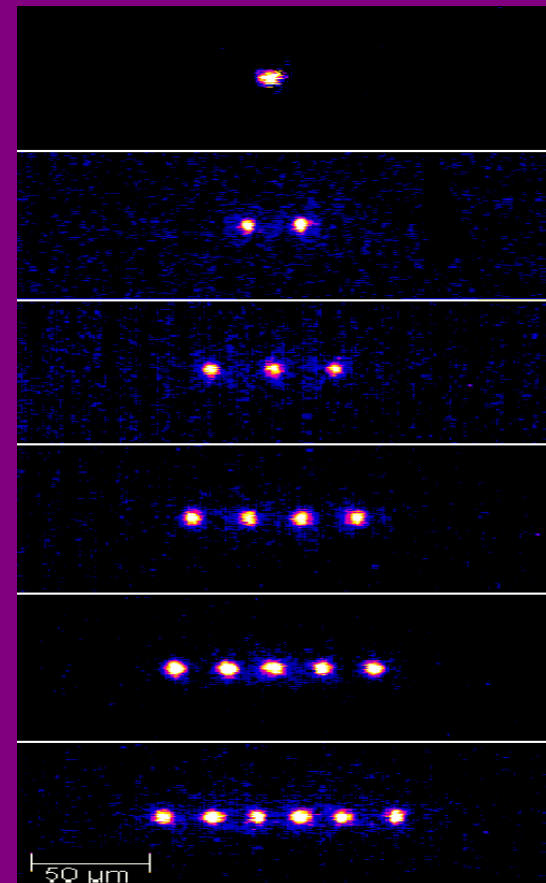


# Gespeicherte Ionen in der linearen Paulfalle

Von der Wolke zum Kristall



Einzelne Ionen



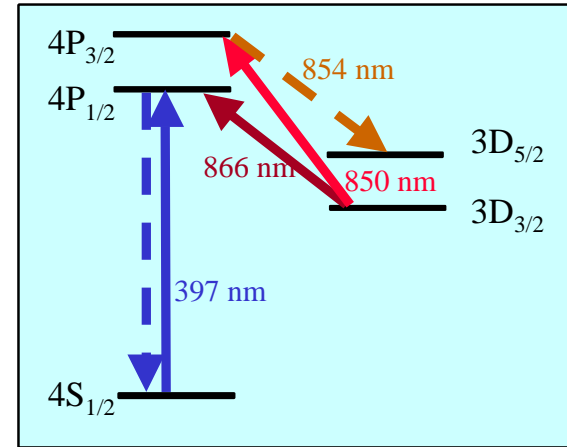
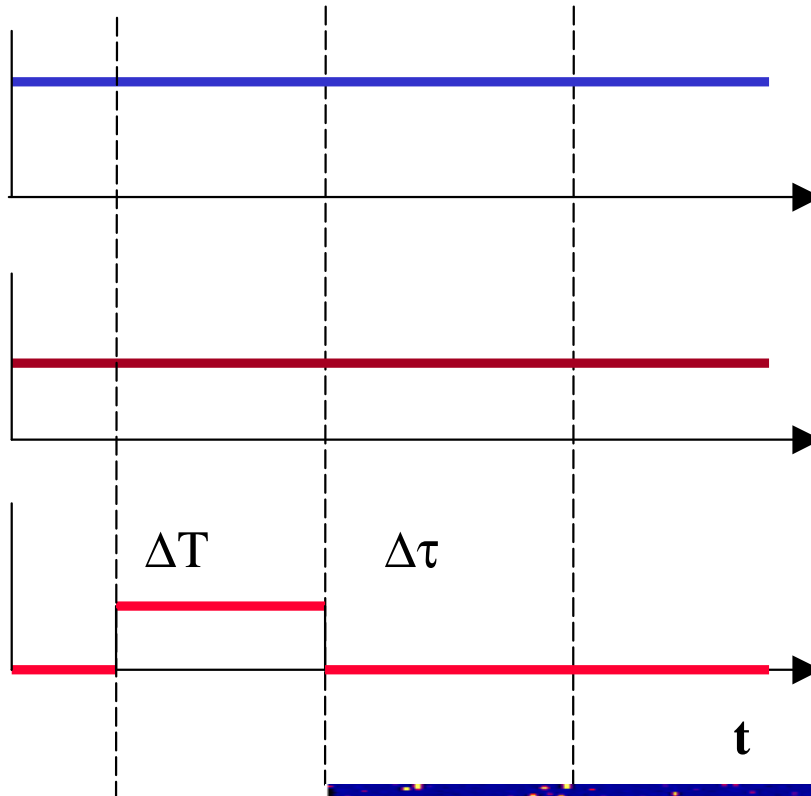
# Zeitlicher Ablauf der Lebensdauerermessung

Kühl  
Laser  
397nm

Rückpump  
Laser  
866nm

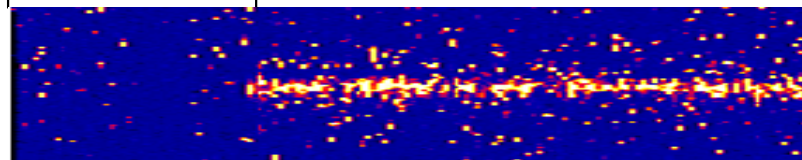
Shelving  
Laser  
850nm

Aufgenommenes Meßbild:



$\Delta T$  : Wartezeit bis das Ion  
im  $3D_{5/2}$  Niveau ist

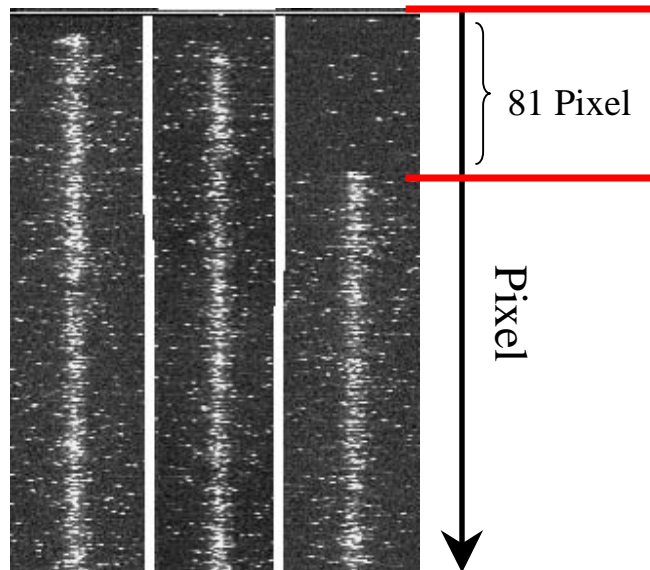
$\Delta \tau$  : Meßzeit bis das Ion wieder  
am Kühlzyklus teilnimmt



↑ Quantensprung

# Praktikum - Lebensdauer-Messung an einem einzelnen Ion

- **Auswertung der Ionenbilder**

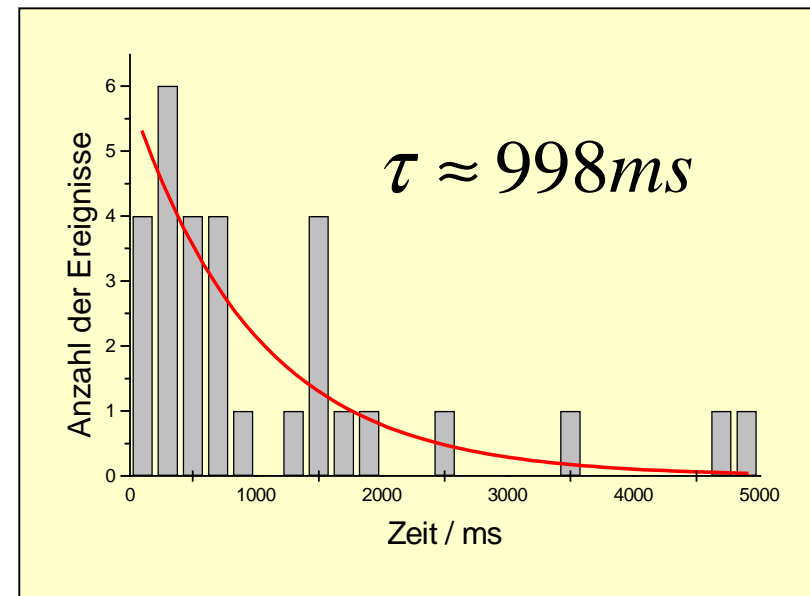


- **Zeit bis zum Quantensprung:**  
 $t = \text{Anzahl Pixel} * 20\text{ms}$

- **Histogramm erstellen**

Häufigkeiten in vorgegebenen Zeitintervallen (z.B. 200ms) zählen

- **Anpassen einer exponentiellen Zerfallskurve**



# Praktikum - Speicherung von Teilchen in einer Paulfalle

- Falle
  - Unterlegscheibe
  - zwei Schrauben oder Nägel
- Speicherfeld:
  - Schiebepotentiometer
  - Transformator
  - 10 MOhm Widerstand
- Teilchen
  - Kakaopulver
  - Kreide
- Laser zur Beleuchtung der Teilchen

