# F20: Magneto-Optische Falle

Martin Horbanski, Jan Krieger Betreuer: Dr. Alois Mair

- Motivation
- Theorie
  - Kühlen mit Laserlicht
  - Fangen der Atome
  - Rubidium
  - Dopplerfreie Spektroskopie
- Experiment
  - Aufbau des Experiments
  - Dopplerfreie Spektroskopie
  - Anzahl der Atome
  - Temperatur der Atome

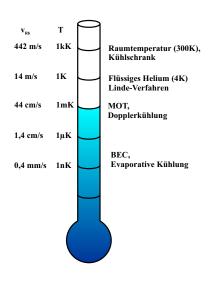
#### Motivation

- Theorie
  - Kühlen mit Laserlicht
  - Fangen der Atome
  - Rubidium
  - Dopplerfreie Spektroskopie
- Experiment
  - Aufbau des Experiments
  - Dopplerfreie Spektroskopie
  - Anzahl der Atome
  - Temperatur der Atome

- Motivation
- Theorie
  - Kühlen mit Laserlicht
  - Fangen der Atome
  - Rubidium
  - Dopplerfreie Spektroskopie
- Experiment
  - Aufbau des Experiments
  - Dopplerfreie Spektroskopie
  - Anzahl der Atome
  - Temperatur der Atome

- Motivation
- Theorie
  - Kühlen mit Laserlicht
  - Fangen der Atome
  - Rubidium
  - Dopplerfreie Spektroskopie
- Experiment
  - Aufbau des Experiments
  - Dopplerfreie Spektroskopie
  - Anzahl der Atome
  - Temperatur der Atome

#### Motivation



- Kühlen und Fangen neutraler Atome
- Heute Standardquelle f
  ür Kalte Atome
  - Vorstufe für BEC (Bose-Einstein-Kondensat)
  - für Atomuhren
  - für Quantencomputer

#### Kühlen mit Laserlicht

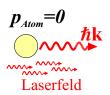
Reemissionsmechanismen

- Kühlen durch Abbremsen
- Dissipative Kraft nötig

# stimulierte Emission:



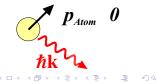




# spontane Emission:





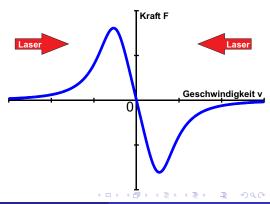


# Kühlen mit Laserlicht Dissipative Kraft

- nur Photonenabsorption entgegen der Bewegungsrichtung
- ⇒ nutze Doppler-Effekt (Geschwindigkeitsabhängig)

$$\omega_{Laser} = \omega_{transition} - \vec{k} \cdot \vec{v}$$

- ⇒ Rotverschiebung des Lasers
- ⇒ insgesamt ergibt sich bremsende Kraft



#### Kühlen mit Laserlicht

#### Grenzen der Dopplerkühlung

- Impulsübertrag durch spontane Emission:
   diskret und Richtung ist zufällig!
   ⇒ Atom führt im Impulsraum einen Random Walk aus.
- Doppler Limit (niedrigste erreichbare Temperatur):
   Kühlrate = Heizrate

$$T_{Doppler} = rac{\hbar\Gamma}{2k_B} \simeq 140~\mu\mathrm{K}$$

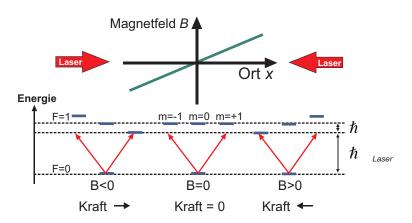
### Fangen der Atome

- Bis jetzt: Atome werden gekühlt ⇒ fangen im Impulsraum
- ABER: Atome können aus der Falle diffundieren.
- JETZT: Fangen im Ortsraum

Zusätzliche ortsabhängige Kraft, die Atome im Zentrum der MOT fixiert

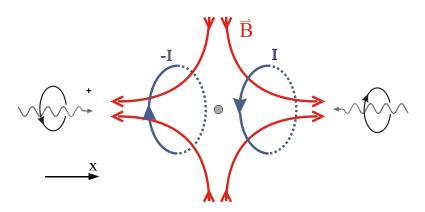
# Fangen der Atome Der Zeemann-Effekt

Magnetfeld spaltet Energieniveaus auf:



### Fangen der Atome

Anordnung der Laser und Spulen für 1-dimensionale MOT



- $\sigma^{\pm}$ : Helizitäten
- Anti-Helmholtz-Konfiguration



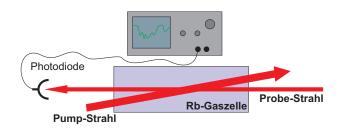
# 2. Teil: Experiment

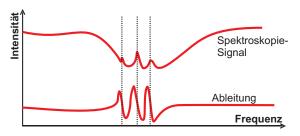
- Dopplerfreie Spektroskopie
- Aufbau des Experiments
- Anzahl der Atome
- Temperatur der Atome

# Dopplerfreie Sättigungsspektroskopie Motivation

- Laser-Lock auf bestimmte Feinstrukturlinien nötig (auf einige MHz genau, Laserfrequenz im THz-Bereich)
- Bei Raumtemperatur dominiert die Doppler-Verbreiterung der Linien:
  - $\Delta \nu_{\text{Doppler}} = 500 \text{ MHz}$
  - natürliche Linienbreite:  $\Delta \nu_{\mathsf{natur}} = \frac{\Gamma}{2\pi} \approx 6 \ \mathrm{MHz}$
- ⇒ hochauflösende, Doppler-freie Spektroskopie nötig

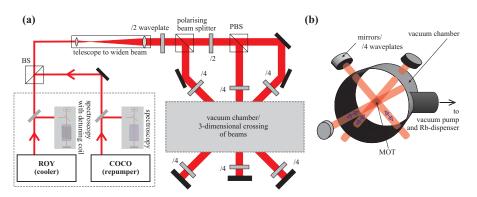
# Dopplerfreie Sättigungsspektroskopie Versuchsaufbau



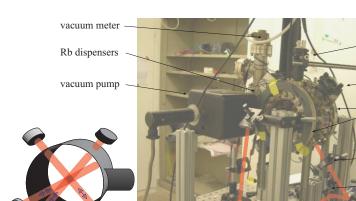


### Aufbau des Experiments

- Spektroskopie zur Stabilisierung der Laserwellenlänge auf einen atomaren Übergang
- Cooler und Repumper in einem Strahl kombiniert
- $\bullet$  Vakuumkammer (5  $\cdot$  10<sup>-9</sup> mbar) wird beständig gepumpt



## Aufbau des Experiments



photodiode to observe fluorescent light from MOT

mirror and /4 waveplate

-anti-Helmholtz coils

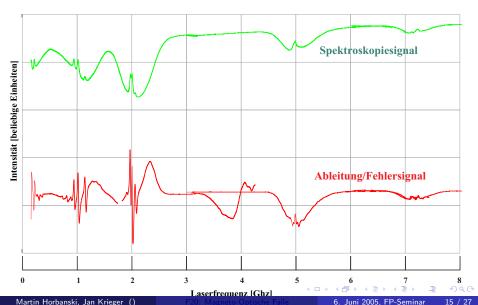
/4 waveplate

mirrors to align beams in chamber

entering laser beams

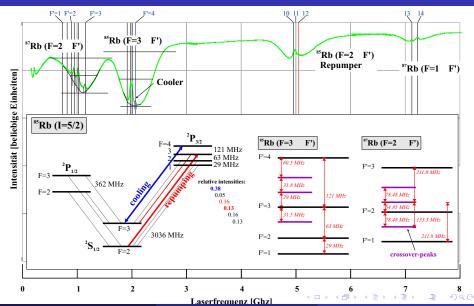
## Doppler-freie Spektroskopie

Ergebnisse: gemessenes Spektrum



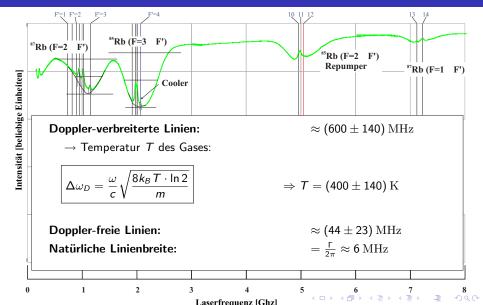
## Doppler-freie Spektroskopie

Ergebnisse: gemessenes Spektrum



## Doppler-freie Spektroskopie

Ergebnisse: Linienbreiten

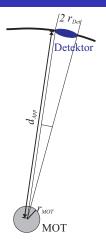


# Atome fangen









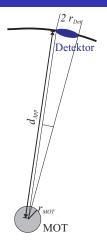
- N Atome in der Falle
- in jeder Lebenszeit  $\tau=2\pi/\Gamma$  des Übergangs wird je ein Photon  $h\nu$  von jedem zweiten Atom emittiert
- ullet insgesamt emittierte Leistung:  $P_{
  m all}=rac{N\cdot h
  u}{2 au}$
- detektierte Leistung:  $P_{\mathsf{Det}} = P_{\mathsf{all}} \cdot rac{A_{\mathsf{Detektor}}}{A_{\mathsf{gesamt}}}$

$$P_{\mathsf{Det}} = P_{\mathsf{all}} \cdot \frac{4\pi \cdot r_{\mathsf{Det}}^2}{\pi \cdot r_{\mathsf{App}}^2}$$

Atomzahl in MOT:

$$N = \frac{P_{\text{Det}} \cdot \tau}{h\nu} \cdot \frac{2 \cdot r_{App}^2}{r_{\text{Det}}^2}$$





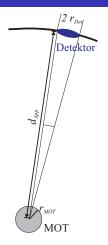
- N Atome in der Falle
- in jeder Lebenszeit  $\tau=2\pi/\Gamma$  des Übergangs wird je ein Photon  $h\nu$  von jedem zweiten Atom emittiert
- insgesamt emittierte Leistung:  $P_{\mathsf{all}} = \frac{\textit{N} \cdot \textit{h} \nu}{2\tau}$
- detektierte Leistung:  $P_{\mathsf{Det}} = P_{\mathsf{all}} \cdot \frac{A_{\mathsf{Detektor}}}{A_{\mathsf{gesamt}}}$

$$P_{\mathsf{Det}} = P_{\mathsf{all}} \cdot \frac{4\pi \cdot r_{\mathsf{Det}}^2}{\pi \cdot r_{\mathsf{App}}^2}$$

• Atomzahl in MOT:

$$N = \frac{P_{\text{Det}} \cdot \tau}{h\nu} \cdot \frac{2 \cdot r_{App}^2}{r_{\text{Det}}^2}$$





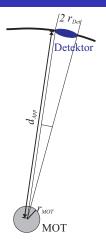
- N Atome in der Falle
- in jeder Lebenszeit  $\tau=2\pi/\Gamma$  des Übergangs wird je ein Photon  $h\nu$  von jedem zweiten Atom emittiert
- insgesamt emittierte Leistung:  $P_{\mathsf{all}} = \frac{\textit{N} \cdot \textit{h} \textit{v}}{2\tau}$
- ullet detektierte Leistung:  $P_{\mathsf{Det}} = P_{\mathsf{all}} \cdot rac{A_{\mathsf{Detektor}}}{A_{\mathsf{gesamt}}}$

$$P_{\mathsf{Det}} = P_{\mathsf{all}} \cdot \frac{4\pi \cdot r_{\mathsf{Det}}^2}{\pi \cdot r_{\mathsf{App}}^2}$$

• Atomzahl in MOT:

$$N = \frac{P_{\text{Det}} \cdot \tau}{h\nu} \cdot \frac{2 \cdot r_{App}^2}{r_{\text{Det}}^2}$$





- N Atome in der Falle
- in jeder Lebenszeit  $\tau=2\pi/\Gamma$  des Übergangs wird je ein Photon  $h\nu$  von jedem zweiten Atom emittiert
- insgesamt emittierte Leistung:  $P_{\mathsf{all}} = \frac{\textit{N} \cdot \textit{h} \textit{v}}{2\tau}$
- ullet detektierte Leistung:  $P_{\mathsf{Det}} = P_{\mathsf{all}} \cdot rac{A_{\mathsf{Detektor}}}{A_{\mathsf{gesamt}}}$

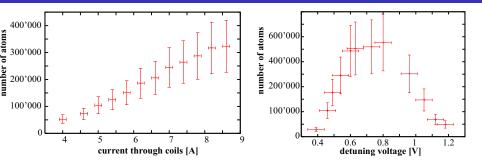
$$P_{\mathsf{Det}} = P_{\mathsf{all}} \cdot \frac{4\pi \cdot r_{\mathsf{Det}}^2}{\pi \cdot r_{\mathsf{App}}^2}$$

• Atomzahl in MOT:

$$N = rac{P_{ extsf{Det}} \cdot au}{h
u} \cdot rac{2 \cdot r_{App}^2}{r_{ extsf{Det}}^2}$$

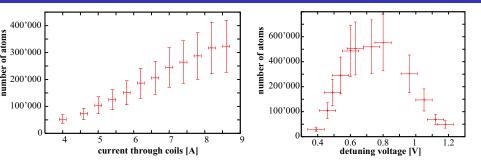


# Anzahl der Atome Ergebnisse



- **Strom** I<sub>Helmholtz</sub> bestimmt Potentialtiefe ⇒ je tiefer das Potential, desto mehr Atome
- niedriges Detuning: resonant auf zu kalte Atome hohes Detuning: resonant auf zu heiße Atome
  - ⇒ max. Anzahl an Atomen, wenn Detuning optimal auf Atome in Apparatur

# Anzahl der Atome Ergebnisse



- **Strom** I<sub>Helmholtz</sub> bestimmt Potentialtiefe ⇒ je tiefer das Potential, desto mehr Atome
- niedriges Detuning: resonant auf zu kalte Atome
   hohes Detuning: resonant auf zu heiße Atome
  - ⇒ max. Anzahl an Atomen, wenn Detuning optimal auf Atome in Apparatur

#### Laderate

Modellierung und Messung

#### Differentialgleichung:

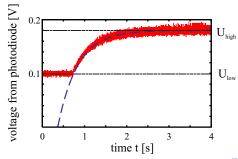
$$\frac{dN}{dt} = \gamma - \beta \cdot N$$

### Lösung:

$$N(t) = N_0 \cdot \left(1 - e^{-t/\tau}\right)$$

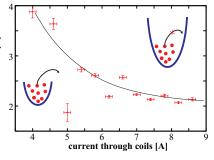
$$\mathsf{mit}\ \tau = \tfrac{1}{\beta}\ \mathsf{und}\ \gamma = \mathit{N}_0 \cdot \beta = \tfrac{\mathit{N}_0}{\tau}$$

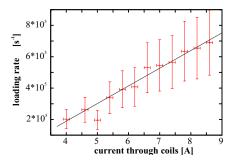
Ladevorgang kann direkt gemessen werden



#### Laderate

Messergebnisse: Magnetfeld

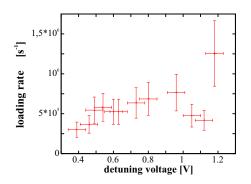




- Verlustrate  $\beta$ :
  - niedriges Potential: Atome können nach Stoß das Potential verlassen
  - großes Potential: kin. Energie nach Stoß reicht nicht mehr zum Verlassen
  - es bleibt ein konstanter Verlust an Teilchen
- Laderate  $\gamma$ :
  - ullet höheres Potential  $\Rightarrow$  mehr Geschwindigkeitsklassen fangbar

#### Laderate

Messergebnisse: Detuning



- es gibt ein optimales Detuning (Plateau):
  - Laser nahe bei Resonanz: wenige Atome mit richtiger Geschwindigkeit
  - Laser entfernt von Resonanz: langsame Atome sehen Laser nicht mehr

- MOT = Atomwolke mit Eigenschaften:
  - gleichverteilte Positionen im Raum (Kugel mit konstanter Anzahldichte)
  - alle Atome haben wahrscheinlichste Geschwindigkeit aus Boltzmann-Verteilung:  $v_w(T) = \sqrt{\frac{2k_BT}{m}}$
- ⇒ "Release and Recapture"-Methode
  - Anfangszustand  $n_0 = \frac{N_0}{V_0}$
  - unterbreche Laser für Zeit  $\Delta t$  (keine Falle)
  - bestimme das Verhältnis  $\frac{N_1}{N_0}$  der Atome, die nach  $\Delta t$  noch in der Falle sind (messbar)
  - Fallenradius dehnt sich mit  $v_w$  aus, also  $V_1 = \frac{4\pi}{3} (r_0 + v_w \cdot \Delta t)^3$
  - Endzustand:  $n_1 = \frac{N_0}{V_1}$ ,  $\Rightarrow N_1 = n_1 \cdot V_0 = N_0 \cdot \frac{V_0}{V_1}$
  - Daraus:

$$T = \frac{m}{2k_B} \cdot \left[ \frac{r_0}{\Delta t} \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{N_0}{N_1}} - 1 \right) \right]^2$$

- MOT = Atomwolke mit Eigenschaften:
  - gleichverteilte Positionen im Raum (Kugel mit konstanter Anzahldichte)
  - alle Atome haben wahrscheinlichste Geschwindigkeit aus Boltzmann-Verteilung:  $v_w(T) = \sqrt{\frac{2k_BT}{m}}$
- $\Rightarrow$  "Release and Recapture"-Methode
  - Anfangszustand  $n_0 = \frac{N_0}{V_0}$
  - unterbreche Laser für Zeit  $\Delta t$  (keine Falle)
  - bestimme das Verhältnis  $\frac{N_1}{N_0}$  der Atome, die nach  $\Delta t$  noch in der Falle sind (messbar)
  - Fallenradius dehnt sich mit  $v_w$  aus, also  $V_1 = \frac{4\pi}{3} (r_0 + v_w \cdot \Delta t)^3$
  - Endzustand:  $n_1 = \frac{N_0}{V_1}$ ,  $\Rightarrow N_1 = n_1 \cdot V_0 = N_0 \cdot \frac{V_0}{V_1}$
  - Daraus:

$$T = \frac{m}{2k_B} \cdot \left[ \frac{r_0}{\Delta t} \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{N_0}{N_1}} - 1 \right) \right]^2$$

- MOT = Atomwolke mit Eigenschaften:
  - gleichverteilte Positionen im Raum (Kugel mit konstanter Anzahldichte)
  - alle Atome haben wahrscheinlichste Geschwindigkeit aus Boltzmann-Verteilung:  $v_w(T) = \sqrt{\frac{2k_BT}{m}}$
- $\Rightarrow$  "Release and Recapture"-Methode
  - Anfangszustand  $n_0 = \frac{N_0}{V_0}$
  - unterbreche Laser für Zeit  $\Delta t$  (keine Falle)
  - bestimme das Verhältnis  $\frac{N_1}{N_0}$  der Atome, die nach  $\Delta t$  noch in der Falle sind (messbar)
  - Fallenradius dehnt sich mit  $v_w$  aus, also  $V_1 = \frac{4\pi}{3}(r_0 + v_w \cdot \Delta t)^3$
  - Endzustand:  $n_1 = \frac{N_0}{V_1}$ ,  $\Rightarrow N_1 = n_1 \cdot V_0 = N_0 \cdot \frac{V_0}{V_1}$
  - Daraus:

$$T = \frac{m}{2k_B} \cdot \left[ \frac{r_0}{\Delta t} \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{N_0}{N_1}} - 1 \right) \right]^2$$

- MOT = Atomwolke mit Eigenschaften:
  - gleichverteilte Positionen im Raum (Kugel mit konstanter Anzahldichte)
  - alle Atome haben wahrscheinlichste Geschwindigkeit aus Boltzmann-Verteilung:  $v_w(T) = \sqrt{\frac{2k_BT}{m}}$
- $\Rightarrow$  "Release and Recapture"-Methode
  - Anfangszustand  $n_0 = \frac{N_0}{V_0}$
  - unterbreche Laser für Zeit  $\Delta t$  (keine Falle)
  - bestimme das Verhältnis  $\frac{N_1}{N_0}$  der Atome, die nach  $\Delta t$  noch in der Falle sind (messbar)
  - Fallenradius dehnt sich mit  $v_w$  aus, also  $V_1 = {4\pi\over 3} (r_0 + v_w \cdot \Delta t)^3$
  - Endzustand:  $n_1 = \frac{N_0}{V_1}$ ,  $\Rightarrow N_1 = n_1 \cdot V_0 = N_0 \cdot \frac{V_0}{V_1}$
  - Daraus:

$$T = \frac{m}{2k_B} \cdot \left[ \frac{r_0}{\Delta t} \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{N_0}{N_1}} - 1 \right) \right]^2$$

- MOT = Atomwolke mit Eigenschaften:
  - gleichverteilte Positionen im Raum (Kugel mit konstanter Anzahldichte)
  - alle Atome haben wahrscheinlichste Geschwindigkeit aus Boltzmann-Verteilung:  $v_w(T) = \sqrt{\frac{2k_BT}{m}}$
- ⇒ "Release and Recapture"-Methode
  - Anfangszustand  $n_0 = \frac{N_0}{V_0}$
  - unterbreche Laser für Zeit  $\Delta t$  (keine Falle)
  - bestimme das Verhältnis  $\frac{N_1}{N_0}$  der Atome, die nach  $\Delta t$  noch in der Falle sind (messbar)
  - Fallenradius dehnt sich mit  $v_w$  aus, also  $V_1 = \frac{4\pi}{3} (r_0 + v_w \cdot \Delta t)^3$
  - Endzustand:  $n_1 = \frac{N_0}{V_1}$ ,  $\Rightarrow N_1 = n_1 \cdot V_0 = N_0 \cdot \frac{V_0}{V_1}$
  - Daraus:

$$T = \frac{m}{2k_B} \cdot \left[ \frac{r_0}{\Delta t} \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{N_0}{N_1}} - 1 \right) \right]^2$$

- MOT = Atomwolke mit Eigenschaften:
  - gleichverteilte Positionen im Raum (Kugel mit konstanter Anzahldichte)
  - alle Atome haben wahrscheinlichste Geschwindigkeit aus Boltzmann-Verteilung:  $v_w(T) = \sqrt{\frac{2k_BT}{m}}$
- ⇒ "Release and Recapture"-Methode
  - Anfangszustand  $n_0 = \frac{N_0}{V_0}$
  - unterbreche Laser für Zeit  $\Delta t$  (keine Falle)
  - bestimme das Verhältnis  $\frac{N_1}{N_0}$  der Atome, die nach  $\Delta t$  noch in der Falle sind (messbar)
  - Fallenradius dehnt sich mit  $v_w$  aus, also  $V_1 = \frac{4\pi}{3} (r_0 + v_w \cdot \Delta t)^3$
  - Endzustand:  $n_1 = \frac{N_0}{V_1}$ ,  $\Rightarrow N_1 = n_1 \cdot V_0 = N_0 \cdot \frac{V_0}{V_1}$
  - Daraus:

$$T = \frac{m}{2k_B} \cdot \left[ \frac{r_0}{\Delta t} \cdot \left( \sqrt[3]{\frac{N_0}{N_1}} - 1 \right) \right]^2$$

#### Temperaturmessung Gauß-Verteilung der Orte

- Verbesserung:
  - Atome sind im Raum Gauß-verteilt (ergibt sich theoretisch für harmonische Potential):

$$n(\vec{x}, \sigma) = n_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma)^3}} \cdot \exp\left\{-\frac{\vec{x}^2}{2\sigma^2}\right\}$$

• Standardabweichung des Verteilung dehnt sich mit  $v_w$  aus:

$$\sigma(T) = \sigma_0 + v_w(T) \cdot \Delta t$$

⇒ "Release and Recapture"-Methode wie vorher

$$\frac{N_1}{N_0}(\Delta t, T) = \frac{\int\limits_0^{\sigma_0} n(\vec{x}, \sigma(T)) d^3 \vec{x}}{\int\limits_0^{\sigma_0} n(\vec{x}, \sigma_0) d^3 \vec{x}}$$

# Temperaturmessung Gauß-Verteilung der Orte

- Verbesserung:
  - Atome sind im Raum Gauß-verteilt (ergibt sich theoretisch für harmonische Potential):

$$n(\vec{x}, \sigma) = n_0 \cdot \frac{1}{\sqrt{(2\pi\sigma)^3}} \cdot \exp\left\{-\frac{\vec{x}^2}{2\sigma^2}\right\}$$

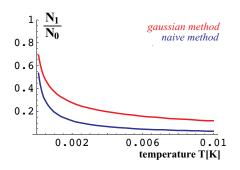
• Standardabweichung des Verteilung dehnt sich mit  $v_w$  aus:

$$\sigma(T) = \sigma_0 + v_w(T) \cdot \Delta t$$

⇒ "Release and Recapture"-Methode wie vorher

$$\boxed{\frac{N_1}{N_0}(\Delta t, T) = \frac{\int\limits_0^{\sigma_0} n(\vec{x}, \sigma(T)) \ d^3\vec{x}}{\int\limits_0^{\sigma_0} n(\vec{x}, \sigma_0) \ d^3\vec{x}}}$$

# Temperaturmessung Vergleich



- aus naivem Modell ergibt sich bei Berücksichtigung aller unserer Messungen:  $T = (613 \pm 394) \, \mu \text{K}$   $(U_{\text{detuning}} = 0.7 \, \text{V}, I_{\text{magn}} = 8.6 \, \text{A})$
- gemessene Temperaturen (Fehler jeweils mind. 50%, Werte für  $N_1/N_0=0.3$  und  $\Delta t=10~{\rm ms}$ ):

$$T_{\mathsf{naive}} = 500 \ \mu \mathrm{K}; \qquad \qquad T_{\mathsf{gauss}} = 1.7 \ \mathrm{mK};$$



#### Literatur



Demtröder, Wolfgang (2002): Experimentalphysik 3. Atome, Moleküle und Festkörper, 2. Auflage, New York - Berlin - Heidelberg: Springer Verlag.



Haken, Herrman Wolf, Hans Christoph: "Atom- und Quantenphysik", 7. Auflage, Berlin - Heidelberg - New York: Springer Verlag.



Kemmann, Mark (2001): Laserinduzierte und spontane Molekülbildung in einer magneto-optischen Atomfalle. Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau: diploma thesis. [http://frhewww.physik.uni-freiburg.de/photoa/dipl.pdf]



Versuchsanleitung F20, Magnetooptische Falle



Phllips, W.D.: "Laser cooling and trapping of neutral atoms", in Laser Manipulation of Atoms and Ions, Proc. Enrico Fermi Summer School, Course CXVIII, Varenna, Italy, July, 1991, edited by E. Arimondo, W.D. Phillips, and F. Strumia (North-Holland, Amsterdam, 1992)



Steck, Daniel (2005): Alkali D Line Data. accessed: 20.04.2005 (URL: http://george.ph.utexas.edu/~dsteck/alkalidata/)



Stuhler, Jürgen (2001): Kontinuierliches Laden einer Magnetfalle mit lasergekühlten Chromatomen. univerity of Konstanz: PhD thesis.

[http://www.ub.uni-konstanz.de/v13/volltexte/2001/726//pdf/stuhler.pdf]