

# F-Praktikum

## Laserspektroskopie am Rubidium

### Gruppenseminar

Christian Schneider

Quantenoptik – Prof. Dr. Chr. Wunderlich  
Fachbereich 7 – Physik  
Universität Siegen

19. November 2006



# Gliederung

## Einleitung

Rubidium-Atom

Hyperfeinstruktur-Aufspaltung von Rubidium

## Laser und Optische Komponenten

Fabry-Pérot-Interferometer

Halbleiterlaser

## Etwas Theorie...

Absorption und Emission

Linienbreiten und Verbreiterungsmechanismen

Laserspektroskopie

## F-Praktikums-Versuch

Aufbau des Versuchs



# Allgemeines

- ▶ zwei natürlich vorkommende Isotope: 72%  $^{85}\text{Rb}$  und 28%  $^{87}\text{Rb}$
- ▶ Schmelztemperatur:  $39\text{ }^\circ\text{C}$ ; Siedetemperatur:  $688\text{ }^\circ\text{C}$   
⇒ kein Heizen der Gaszelle nötig
- ▶ Notation für (Hüllen-)Zustand:

$$N^{2S+1}L_J$$

$N$ : Hauptquantenzahl

$L$ : Bahndrehimpuls

$S$ : Elektronenspin

$J$ : Gesamtdrehimpuls



# Fein- und Hyperfeinstruktur

- ▶ Grundzustand des Rubidiums:  $5S$
- ▶ erste angeregte Zustand:  $5P$
- ▶ durch Spin-Bahn-Wechselwirkung aufgespalten in  $5P_{1/2}$  und  $5P_{3/2}$  (Feinstruktur)
  - ▶ D1-Linie ( $5S_{1/2} \leftrightarrow 5P_{1/2}$ ): Wellenlänge 795 nm
  - ▶ D2-Linie ( $5S_{1/2} \leftrightarrow 5P_{3/2}$ ): Wellenlänge 780 nm (wird gemessen!)
- ▶ Kopplung von Gesamtdrehimpuls der Hülle  $\vec{J}$  und Kernspin  $\vec{I}$

$$\vec{F} = \vec{J} + \vec{I} \implies |I - J| \leq F \leq I + J$$

ergibt Hyperfeinstrukturaufspaltung

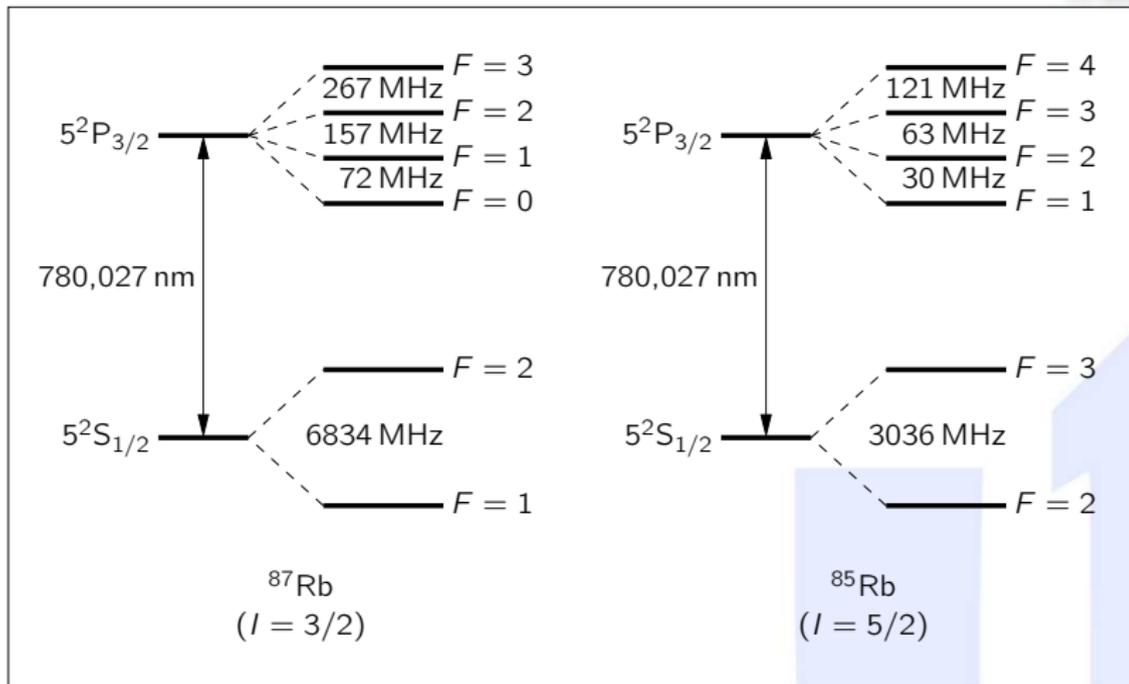
- ▶ Auswahlregeln (nicht alle Übergänge sind erlaubt!):

$$\Delta F = 0, \pm 1 \quad \text{kein } (F = 0) \rightarrow (F = 0)$$

$$\Delta M_F = 0, \pm 1 \quad \text{kein } (M_F = 0) \rightarrow (M_F = 0) \text{ für } \Delta F = 0$$

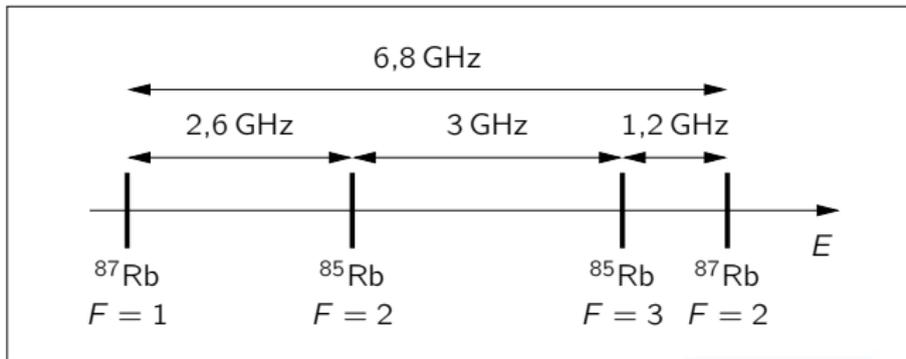


# Termschemata der D2-Linie





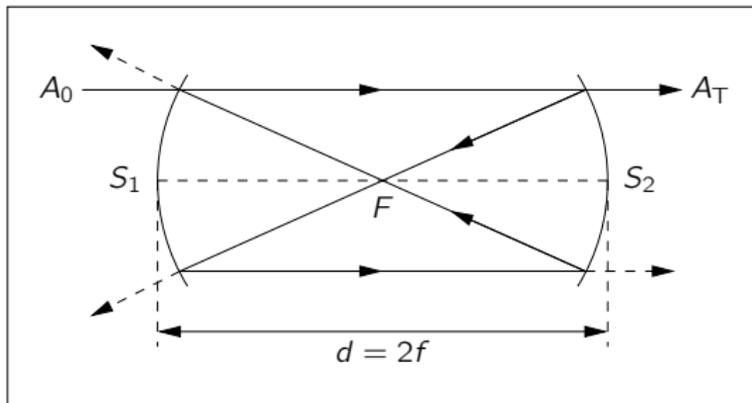
# Isotopie-Verschiebung



Lage der Grundzustandsenergien



# Konfokales Fabry-Pérot-Interferometer



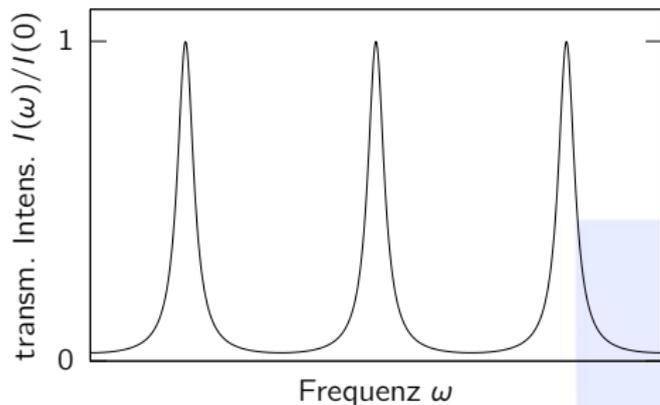
- ▶ sphärische Spiegel mit Krümmungsradien  $r = 2f$  und Reflektivitäten  $R$
- ▶ so justiert, dass ihre Brennpunkte  $F$  zusammenfallen



# Transmittierte Intensität

- ▶ transmittierte Intensität:

$$I(\omega) = I_0 \frac{(1 - R)^2}{1 - 2R^2 \cos(4d\omega/c) + R^4}$$





# Wichtige Größen

- ▶ freier Spektralbereich (Abstand zweier Transmissions-Maxima):

$$\omega_{\text{FSR}} = \frac{2\pi c}{4d} \implies \nu_{\text{FSR}} = \frac{c}{4d}$$

- ▶ Finesse (Quotient aus Abstand und Halbwertsbreite der Transmissions-Maxima):

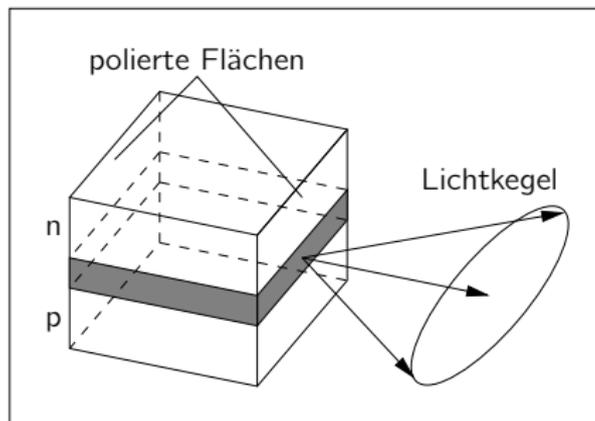
$$F = \frac{\omega_{\text{FSR}}}{\omega_{\text{FWHM}}} = \frac{\pi R}{1 - R^2}$$

- ▶ zum Vergleich: plan-paralleles Fabry-Pérot-Interferometer

$$\nu_{\text{FSR}}^{(\text{plan})} = \frac{c}{2d} \quad \text{bzw.} \quad F^{(\text{plan})} = \frac{\pi\sqrt{R}}{1 - R}$$



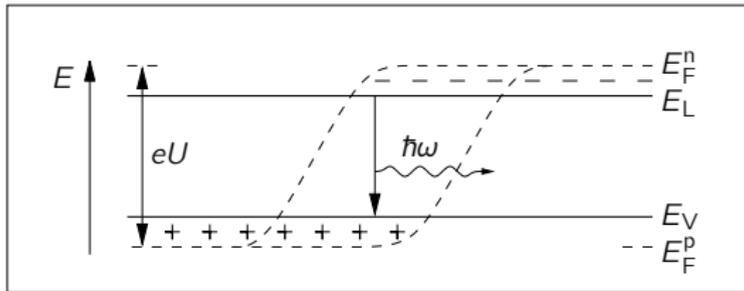
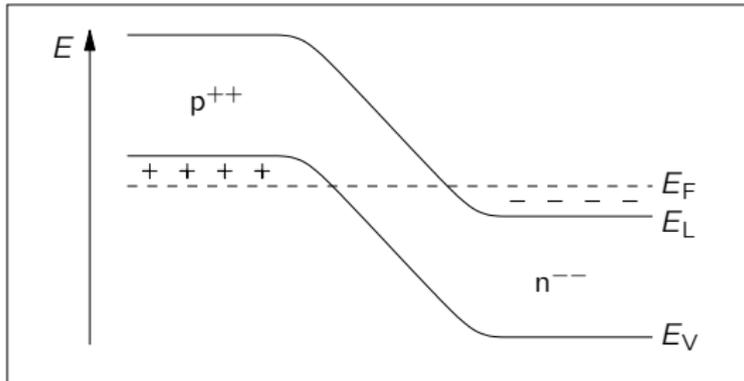
# Laserdiode



- ▶ **induzierte** Emission (bei LEDs: spontane Emission)
- ▶ Bedingung:  $E_F^n - E_F^p > E_L - E_V$  (Besetzungsinversion)
- ▶ hochdotierte p/n-Schichten
- ▶ polierte Endflächen als interner Resonator



# Bänderschema

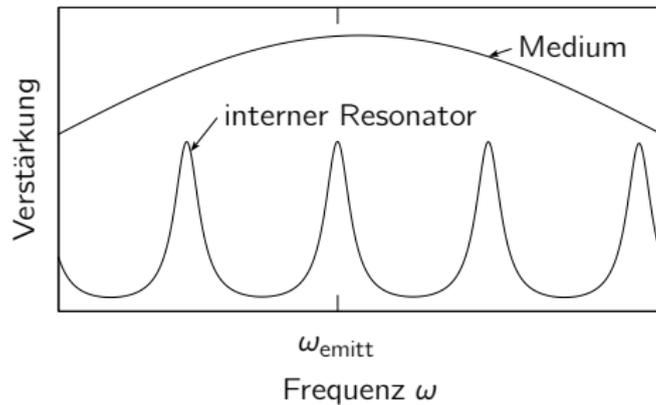


Bezeichnungen:

- ▶  $E_F^n/E_F^p$ : Quasi-Fermi-Energien im n-/p-Gebiet
- ▶  $E_L$ : Energie der Leitungsbandkante
- ▶  $E_V$ : Energie der Valenzbandkante
- ▶  $U$ : (maximale) Spannung in Flussrichtung



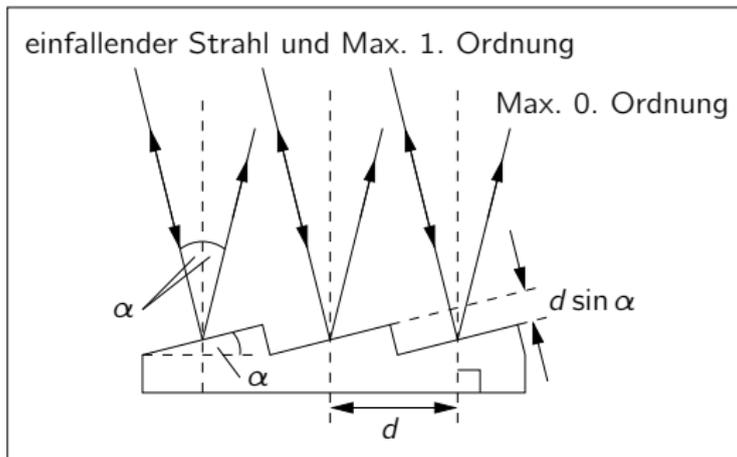
# Frei-laufende Laserdiode



- ▶ relativ breite Resonatormoden ( $\sim 100$  MHz)
- ▶ Ein-Moden-Betrieb: nur Frequenz einer Resonatormode wird emittiert
- ▶ Durchstimmen der Frequenz über Temperatur-/Stromänderung
- ▶ unterschiedliches Verschieben der Profile: **Modensprung**



# Littrow-Anordnung



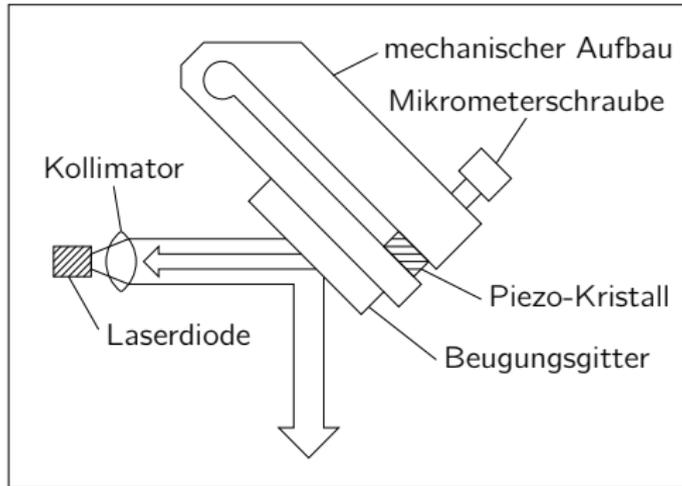
- ▶ gestuftes Reflexionsgitter
- ▶ Winkel  $\vartheta_k$  des Beugungsmaximums  $k$ -ter Ordnung:

$$2d \sin \vartheta_k = k\lambda$$

- ▶ Beugungsmaximum 1. Ordnung wird in einfallenden Strahl zurückreflektiert
- ▶ Beugungsmaximum 0. Ordnung wird ausgekoppelt



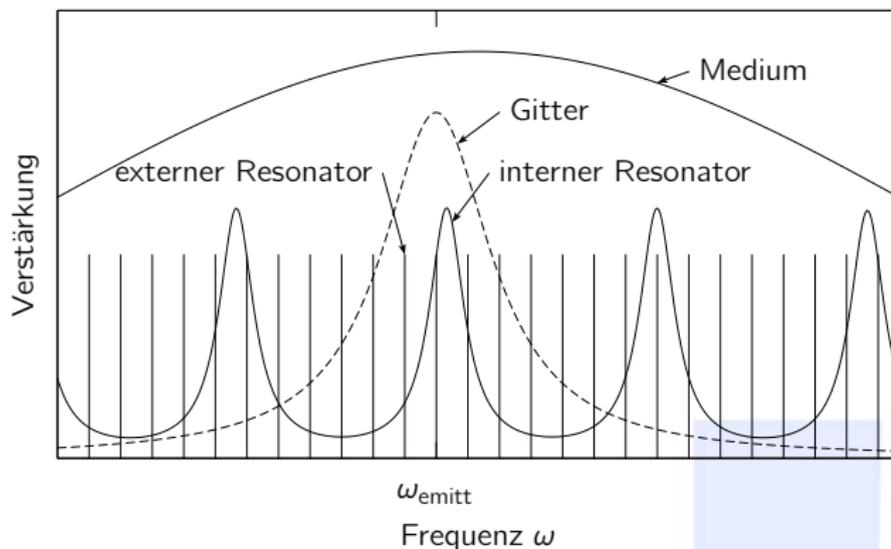
# Diodelaser



- ▶ zusätzlicher externer Resonator zwischen Littrow-Gitter und Diodenrückseite
- ▶ schmalere Resonatormoden und somit schmaleres Frequenzprofil im Ein-Moden-Betrieb ( $\sim 1$  MHz)
- ▶ Durchstimmen durch Ändern des Abstands zwischen Gitter und Diodenrückseite



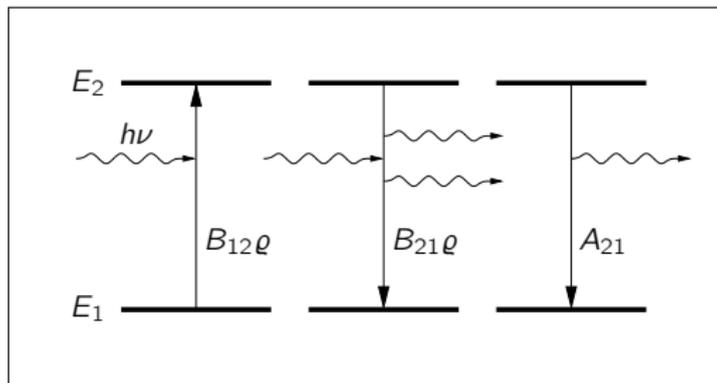
# Diodenlaser (Fortsetzung)



Verstärkungsprofil des Diodenlasers



# Absorption, spontane und induzierte Emission



- ▶ Wahrscheinlichkeit für Absorption und induzierte Emission: proportional zur Energiedichte  $\rho(\nu)$  des induzierenden Feldes
- ▶ Wahrscheinlichkeit für spontane Emission: nur abhängig von Eigenschaften des Atoms
- ▶ für die **Einstein-Koeffizienten** gilt ( $g_i$ : Entartung des  $i$ -ten Niveaus):

$$B_{12} = \frac{g_2}{g_1} B_{21} \quad \text{und} \quad A_{21} = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} B_{21}$$



# Natürliche Linienbreite

- ▶ Strahlung der spontanen Emission eines Ensembles ruhender Atome ist nicht streng monoenergetisch
- ▶ Elektron wird durch gedämpftes, harmonisches Potential an Atom gebunden angesehen (Oszillatormodell):

$$\ddot{x} + \gamma\dot{x} + \omega_0^2 x = 0$$

- ▶ Lösung entsprechend einem angeregten Atom für  $\gamma \ll \omega_0$ :

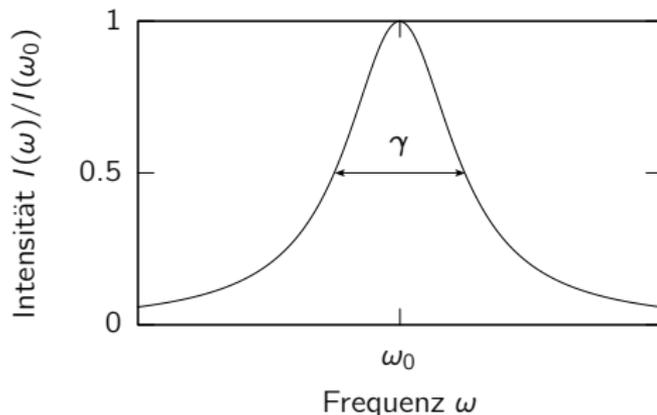
$$x(t) = x_0 e^{-(\gamma/2)t} \cos \omega_0 t \stackrel{!}{=} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty A(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

- ▶ aus Fourier-Transformation folgt  $A(\omega)$  und mit  $I(\omega) \propto |A(\omega)|^2$ :

$$I(\omega) = I_0 \frac{\gamma/2\pi}{(\omega - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2}$$



# Natürliche Linienbreite (Fortsetzung)



- ▶ emittierte und daher auch absorbierte spektrale Intensität  $I(\omega)$  haben ein **Lorentz-Profil**
- ▶ Halbwertsbreite (FWHM) des Intensitätsprofils:  $\delta\omega = \gamma$
- ▶ Definition (für später):

$$g(\omega) := \frac{\gamma/2\pi}{(\omega - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2} \implies \int_0^{\infty} g(\omega) d\omega = 1$$



# Doppler-Verbreiterung

- ▶ im Fall **nicht ruhender** Atome: Geschwindigkeit in z-Richtung gemäß Maxwell'scher Verteilung 

$$n(v_z)dv_z = \frac{N}{\sqrt{\pi}v_w} \exp\left(-\frac{v_z^2}{v_w^2}\right) dv_z$$

- ▶ Doppler-Verschiebung der absorbierten/emittierten Strahlung (in nicht-relativistischer Ordnung):

$$\omega(v_z) = \omega_0 \left(1 + \frac{v_z}{c}\right)$$

- ▶ beides zusammen: Linienprofil unter Vernachlässigung der natürlichen Linienbreite ( $\delta\omega \ll v_w\omega_0/c$ ):

$$I(\omega) \propto n(\omega(v_z)) = I(\omega_0) \exp\left[-\left(\frac{\omega - \omega_0}{v_w\omega_0/c}\right)^2\right]$$

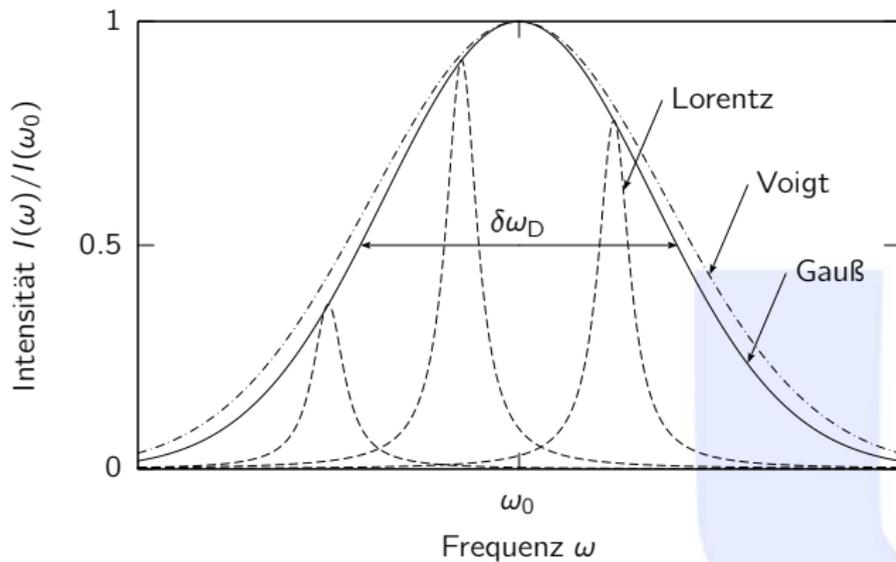


# Doppler-Verbreiterung (Fortsetzung)

- ▶ Halbwertsbreite der Doppler-verbreiterten Linie:

$$\delta\omega_D = 2\sqrt{\ln 2} \frac{v_w \omega_0}{c}$$

- ▶ unter Berücksichtigung der natürlichen Linienbreite: Voigt-Profil





# Sättigungsverbreiterung

- ▶ Einstrahlen von Licht hoher Intensität bewirkt Änderung der Besetzungszahlen der Niveaus
- ▶ zusätzliche **Sättigungsverbreiterung** (Rechnung: siehe Versuchsanleitung)
- ▶ für ruhende Atome (**homogen** verbreitertes Linienprofil;  $S_0$ : Sättigungsparameter):

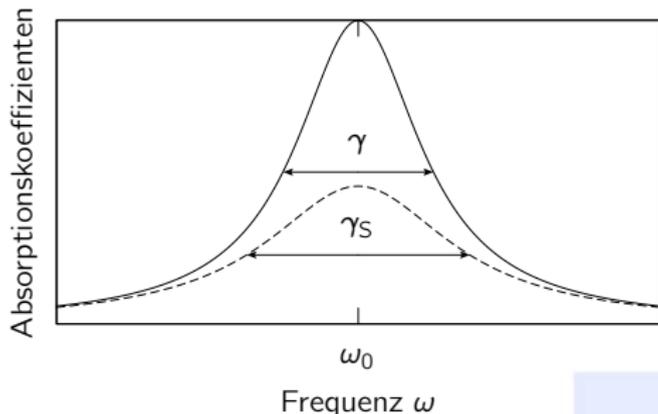
$$I^{(\text{hom})}(\omega) = I_0 \frac{\gamma/2\pi}{(\omega - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2(1 + S_0)}$$

- ▶ Halbwertsbreite der homogenen Sättigungs-verbreiterten Linie:

$$\gamma_S := \delta\omega_S = \sqrt{1 + S_0} \delta\omega$$



# Sättigungsverbreiterung (Fortsetzung)



Vergleich zwischen homogen verbreitertem und natürlichem Linienprofil

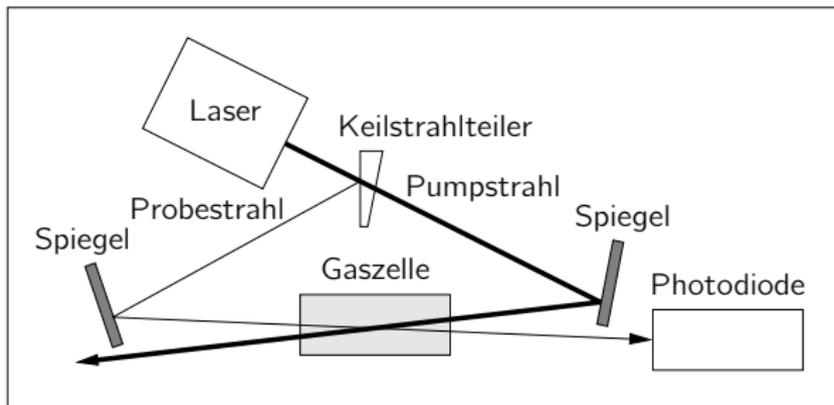


# Absorptionsspektroskopie

- ▶ Hauptkomponente: durchstimmbarer Diodenlaser im Ein-Moden-Betrieb
- ▶ Aufspaltung der Laserstrahls in zwei gleich intensive Teilstrahlen (Probe- und Referenzstrahl)
- ▶ Durchstrahlen der Rubidium-Gaszelle mit Probestrahl bei variabler Laserfrequenz
- ▶ Bestimmen der absorbierten Intensität in Abhängigkeit der Frequenz durch Vergleich der Intensitäten von Probe- und Referenzstrahl
- ▶ Ergebnis: Doppler-verbreitertes Linienprofil
- ▶ Problem: je drei Linien fallen durch große Doppler-Breite zusammen



# Sättigungsspektroskopie



- ▶ Teilen des Laserstrahls in intensiven Pumpstrahl und schwachen Probe- (und ggfs. Referenz-)Strahl
- ▶ Pump- und Probestrahl durchlaufen die Gaszelle gegenläufig
- ▶ Probestrahl wechselwirkt mit Atomen der Geschwindigkeitsklasse

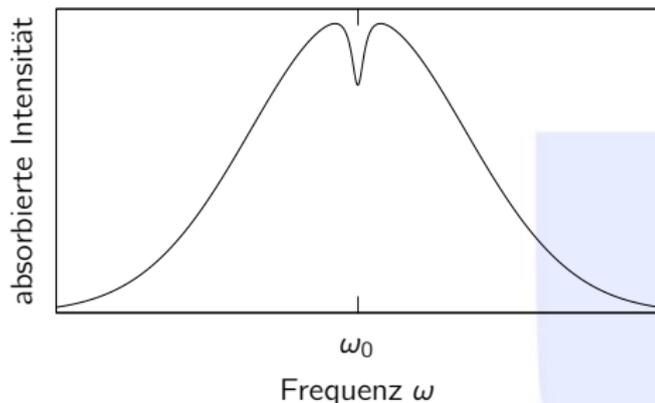
$$v_z = \frac{(\omega - \omega_0) c}{\omega}$$

- ▶ Pumpstrahl wechselwirkt mit Geschwindigkeitsklasse  $-v_z$



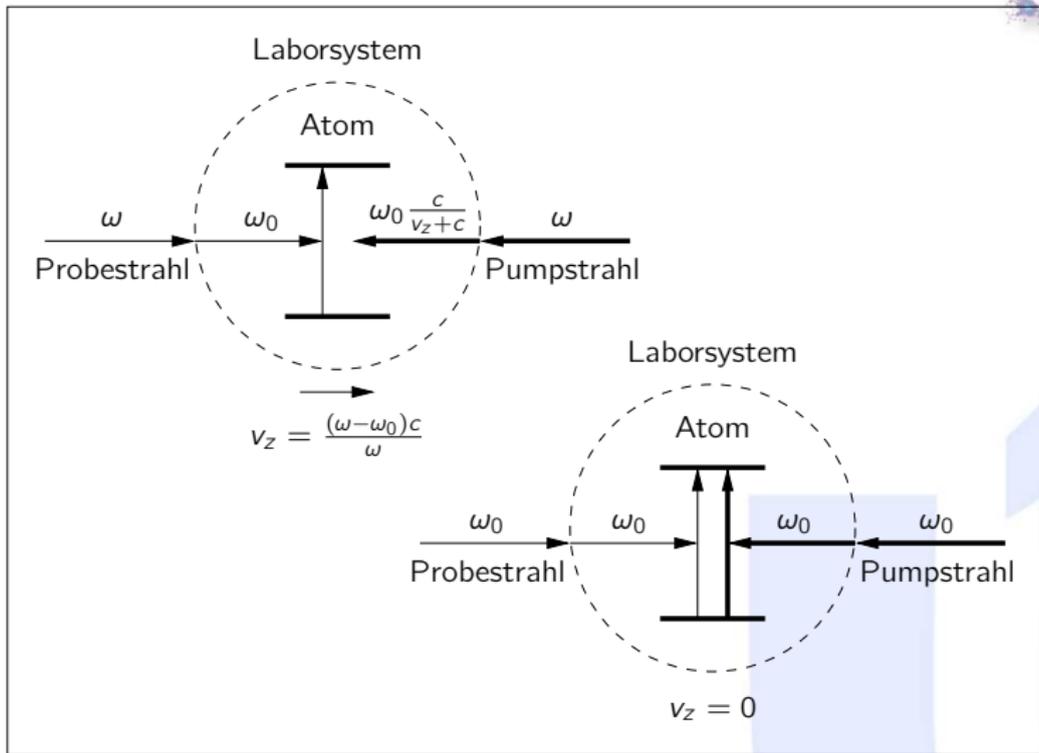
# Sättigungsspitzen

- ▶ Ergebnis: es wird ein Doppler-verbreitertes Profil mit kleinen Lorentz-förmigen Einbuchtungen gemessen
- ▶ 1. Grund für Einbuchtungen:
  - ▶ bei der Laserfrequenz  $\omega = \omega_0$  wechselwirken Pump- und Probestrahl mit Atomen derselben Geschwindigkeitsklasse  $v_z = 0$
  - ▶ Pumpstrahl führt zu teilweiser Sättigung, wodurch das Gas für den Probestrahl durchlässiger wird





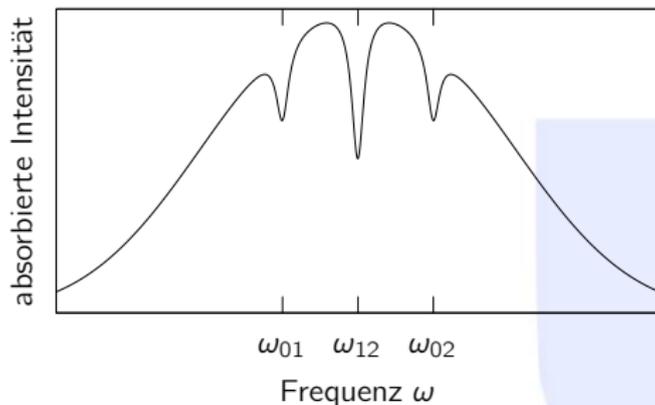
# Sättigungsspitzen (Fortsetzung)





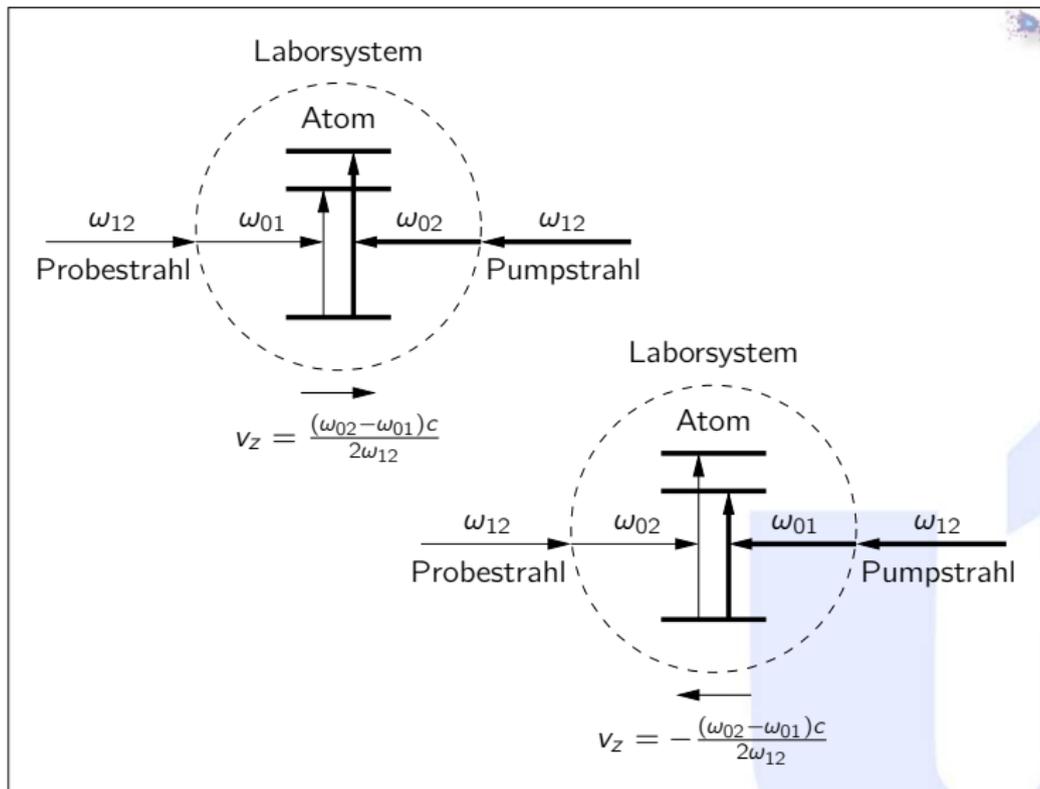
# Überkreuzungssignale

- ▶ 2. Grund für Einbuchtungen:
  - ▶ Voraussetzung: mehrere Übergänge mit gemeinsamem (Grundzustands)niveau fallen innerhalb ihrer Doppler-Breiten zusammen
  - ▶ bei der Laserfrequenz  $\omega = (\omega_{01} + \omega_{02})/2$  wechselwirken der Pumpstrahl über den Übergang  $\omega_{01}$  und der Probestrahl über den Übergang  $\omega_{02}$  (und umgekehrt) auch mit Atomen derselben Geschwindigkeitsklasse





# Überkreuzungssignale (Fortsetzung)



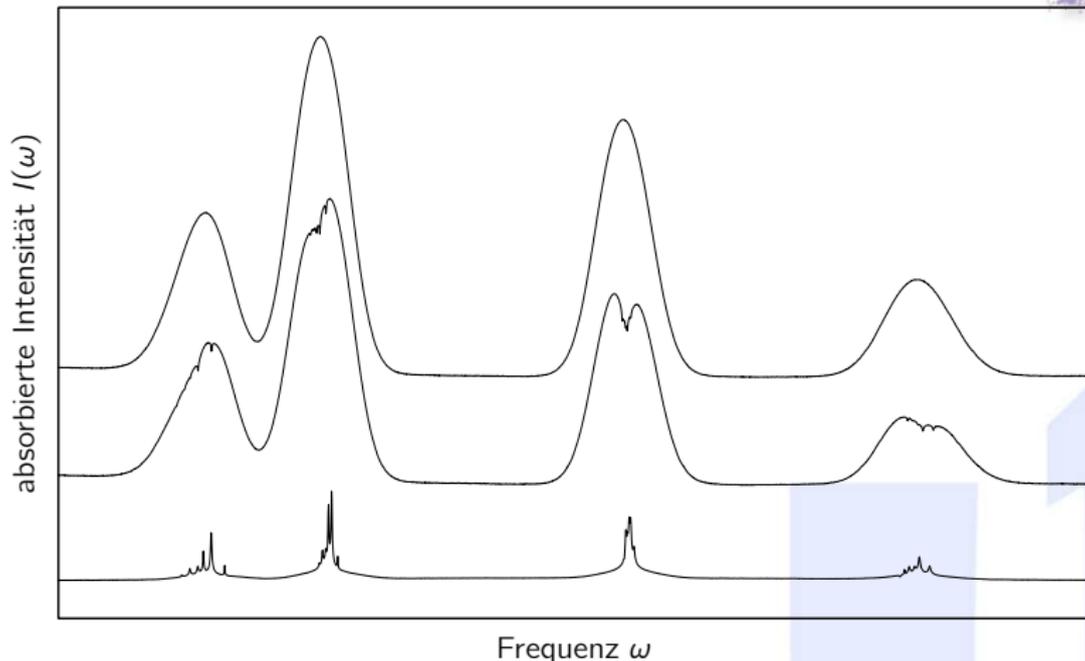
# Sättigungsspektroskopie (Zusammenfassung)



- ▶ Zusammengefasst:
  - ▶ es gibt für jeden Übergang eine Sättigungsspitze
  - ▶ für jedes Paar von Übergängen mit gemeinsamem Grundzustandsniveau gibt es ein Überkreuzungs-Signal genau in der Mitte zwischen den Sättigungsspitzen
  - ▶ bei Rubidium: jede der 4 Gauß(-ähnlichen)-Kurven hat 6 Einbuchtungen (3 Übergänge und 3 verschiedene Paarungen dieser Übergänge)
- ▶ Verbesserung: der Referenzstrahl wird durch einen nicht gesättigten Teil des Gases der Gaszelle geführt, wodurch der Doppler-Untergrund vom Sättigungsspektrum abgezogen wird

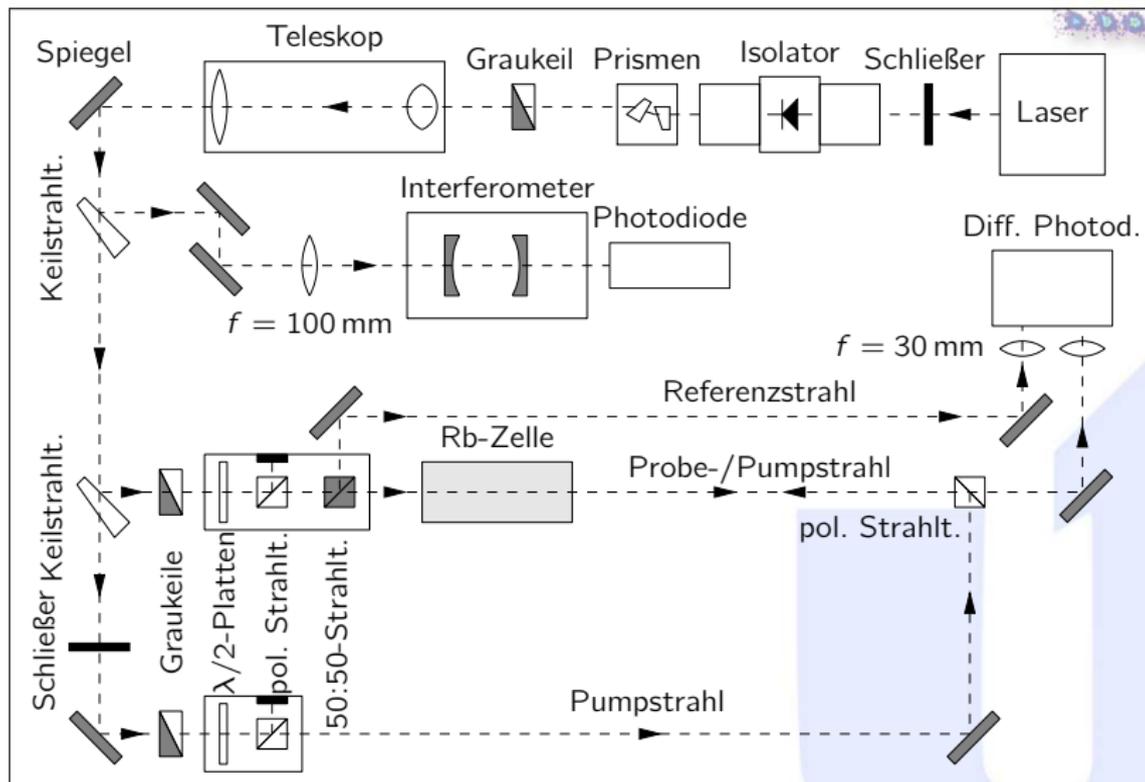


# Spektren von Rubidium



v.o.n.u.: Absorptionsspektroskopie, Sättigungsspektroskopie mit Doppler-Untergrund bzw. ohne Doppler-Untergrund (invertiert)

# Versuchsaufbau





# Literatur

-  Wolfgang Demtröder: Laserspektroskopie – Grundlagen und Techniken.  
Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg, New York; 4. Auflage 2000
-  Theo Mayer-Kuckuk: Atomphysik – Eine Einführung.  
Teubner; Stuttgart; 2., durchgesehene Auflage 1980
-  Harald Ibach, Hans Lüth: Festkörperphysik – Einführung in die Grundlagen.  
Springer-Verlag; Berlin, Heidelberg, New York; 5. Auflage 1999
-  Toptica Photonics AG: DL 100 Diode Laser System Manual.  
March 2005



Vielen Dank für die Aufmerksamkeit!