



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}Rb und 28% ^{87}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

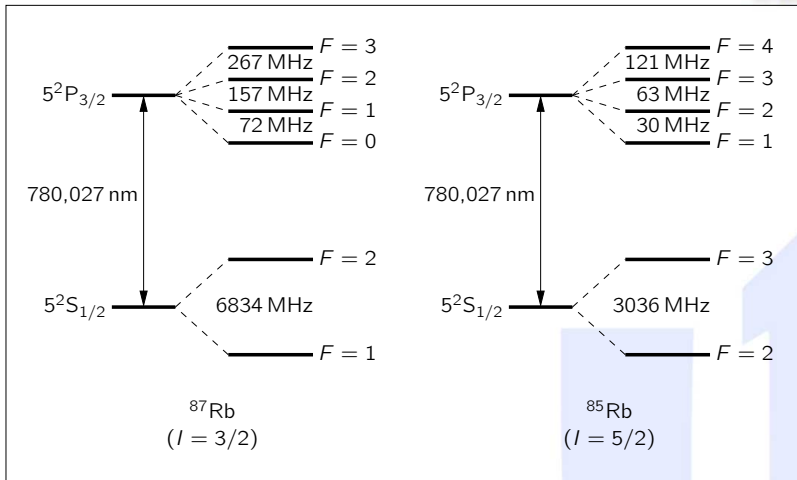
- ▶ Auswahlregeln (nicht alle Übergänge sind erlaubt!):

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

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

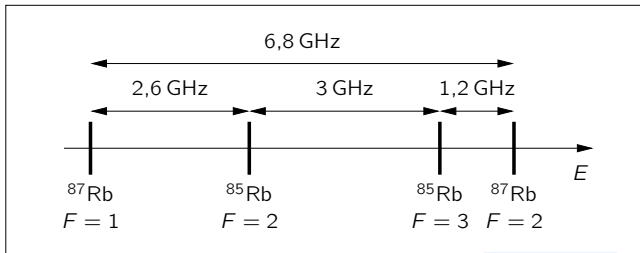


Termschemata der D2-Linie





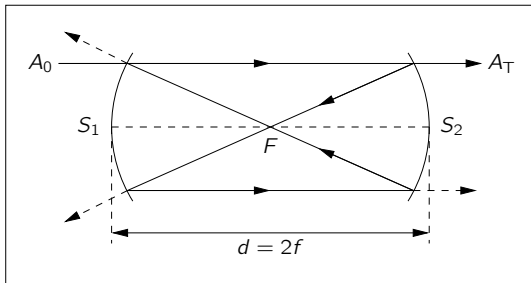
Isotopie-Verschiebung



Lage der Grundzustandsenergien



Konfokales Fabry-Pérot-Interferometer



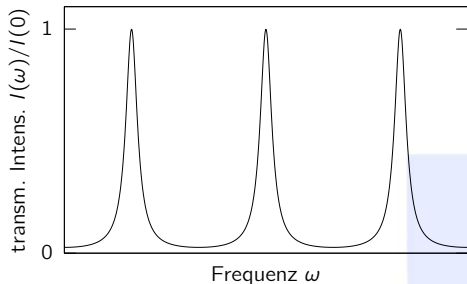
- ▶ sphärische Spiegel mit Krümmungsradien $r = 2f$ und Reflektivitäten R
- ▶ so justiert, dass ihre Brennpunkte F zusammenfallen



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):

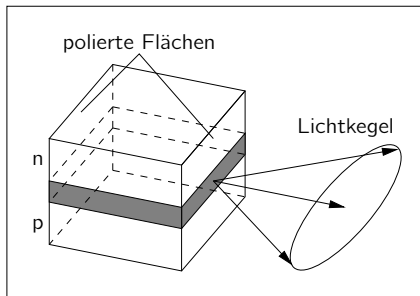
$$F = \frac{\omega_{\text{FSR}}}{\omega_{\text{FWHM}}} = \frac{\pi R}{1 - R^2}$$

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

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



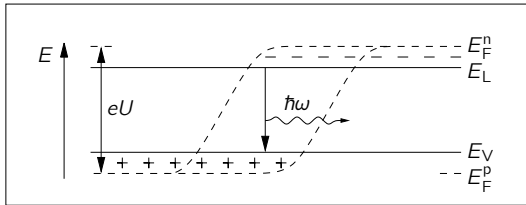
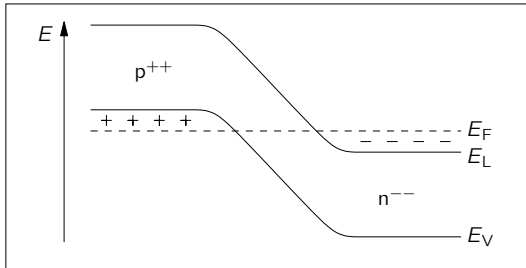
Laserdiode



- ▶ **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

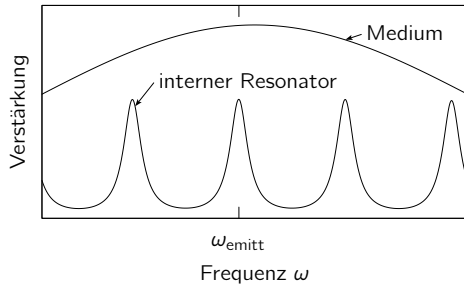


Bezeichnungen:

- ▶ 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



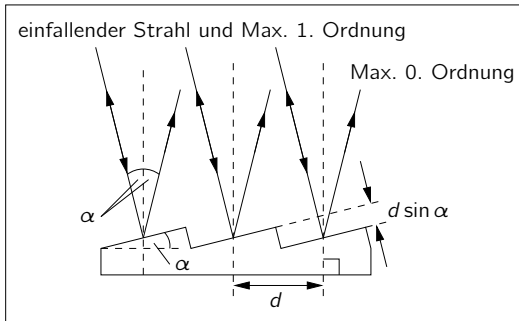
Frei-laufende Laserdiode



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



Littrow-Anordnung



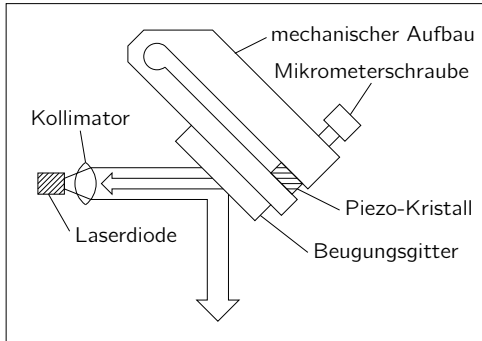
- ▶ gestuftes Reflexionsgitter
- ▶ Winkel ϑ_k des Beugungsmaximums k -ter Ordnung:

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

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



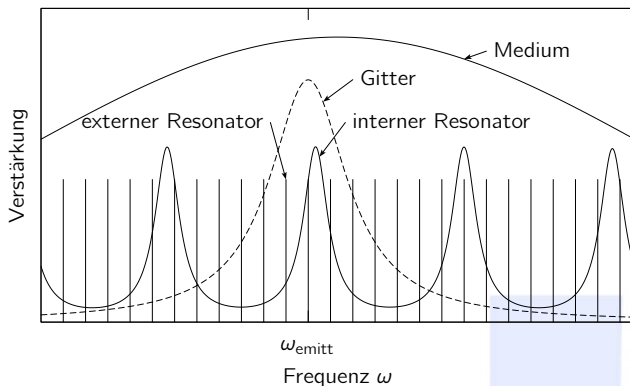
Diodelaser



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



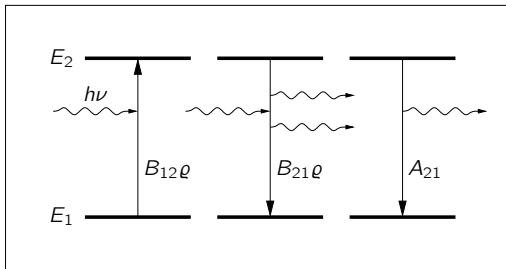
Diodenlaser (Fortsetzung)



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 $\gamma \ll \omega_0$:

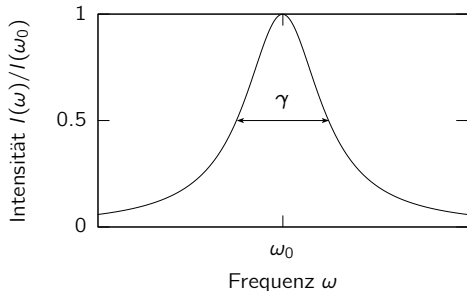
$$x(t) = x_0 e^{-(\gamma/2)t} \cos \omega_0 t \stackrel{!}{=} \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_0^\infty A(\omega) e^{i\omega t} d\omega$$

- ▶ 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 ($\delta\omega \ll v_w\omega_0/c$):

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

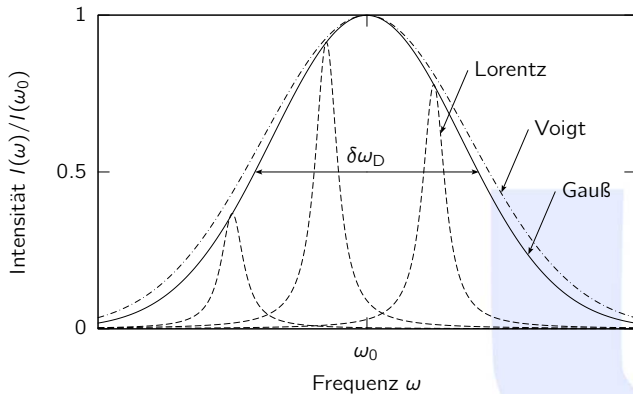


Doppler-Verbreiterung (Fortsetzung)

- ▶ 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):

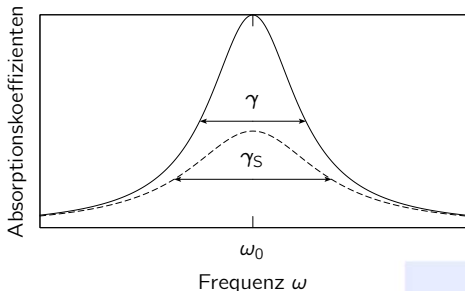
$$I^{(\text{hom})}(\omega) = I_0 \frac{\gamma/2\pi}{(\omega - \omega_0)^2 + (\gamma/2)^2(1 + S_0)}$$

- ▶ Halbwertsbreite der homogen Sättigungs-verbreiterten Linie:

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



Sättigungsverbreiterung (Fortsetzung)



Vergleich zwischen homogen verbreitertem und natürlichem Linienprofil

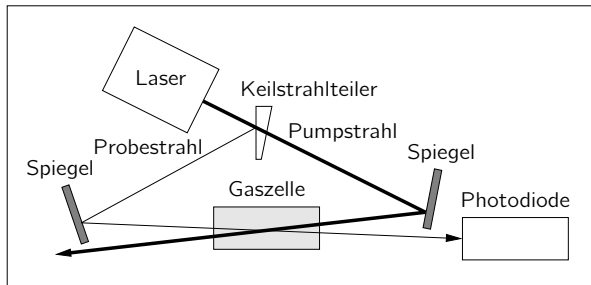


Absorptionsspektroskopie

- ▶ 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

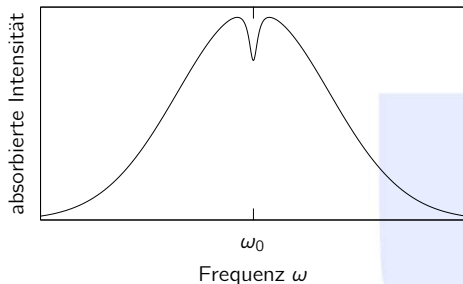
$$v_z = \frac{(\omega - \omega_0) c}{\omega}$$

- ▶ Pumpstrahl wechselwirkt mit Geschwindigkeitsklasse $-v_z$



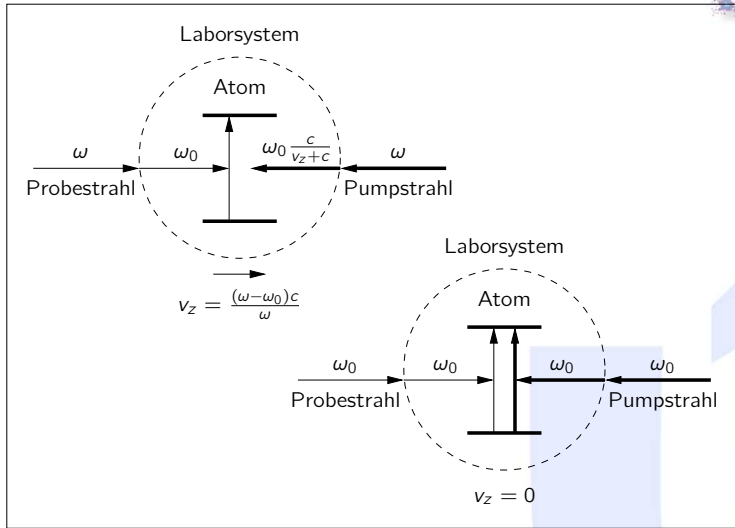
Sättigungsspitzen

- ▶ 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





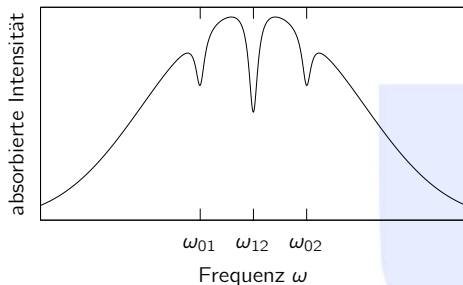
Sättigungsspitzen (Fortsetzung)





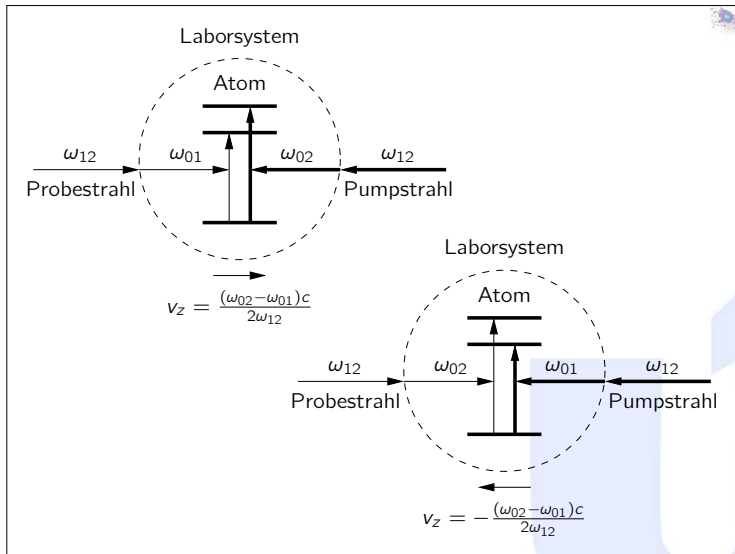
Überkreuzungssignale

- ▶ 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 ω_{01} und der Probestrahl über den Übergang ω_{02} (und umgekehrt) auch mit Atomen derselben Geschwindigkeitsklasse





Überkreuzungssignale (Fortsetzung)



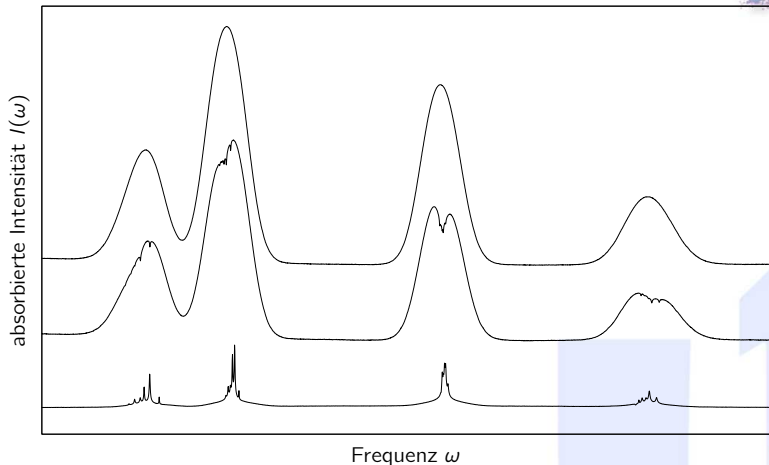
Sättigungsspektroskopie (Zusammenfassung)



- ▶ 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

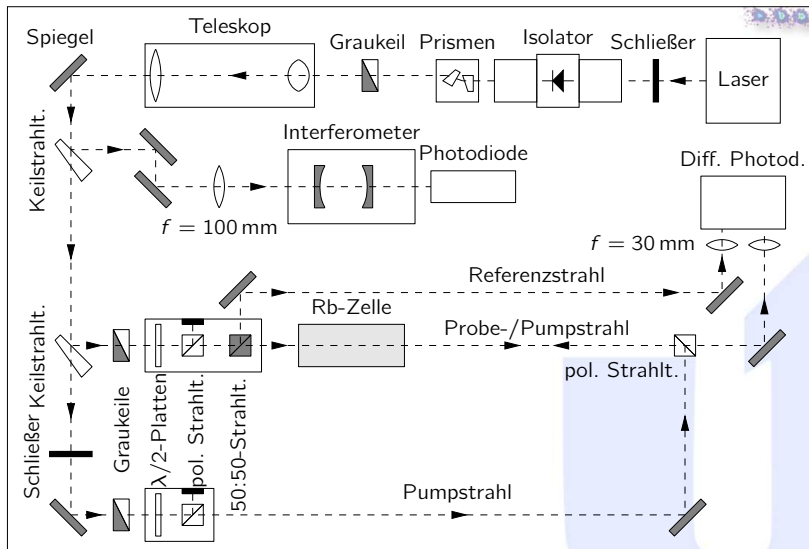


Spektren von Rubidium







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!