

VL 18

VL16. Hyperfeinstruktur

16.1. Hyperfeinstruktur

16.2. Kernspinresonanz

VL 17

17.1. Elektronenspinresonanz

17.2. Kernspintomographie

VL 18

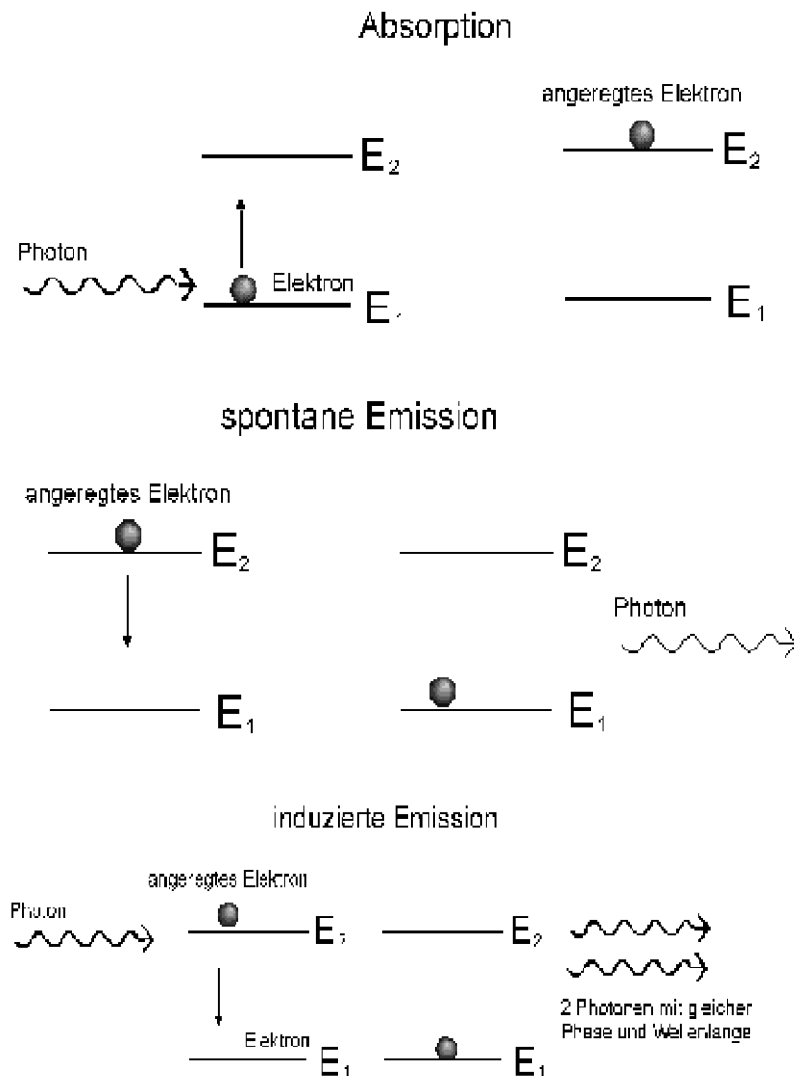
18.1. Laser

(Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Maser = Laser im Mikrowellenbereich, d.h.

Microwave Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

Prinzip eines Lasers



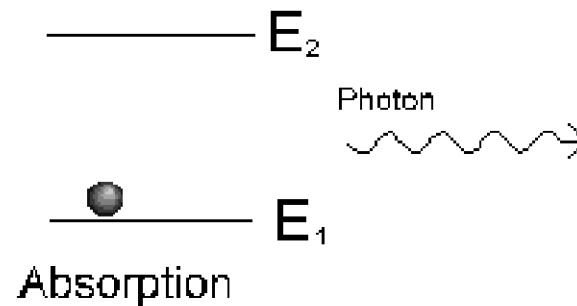
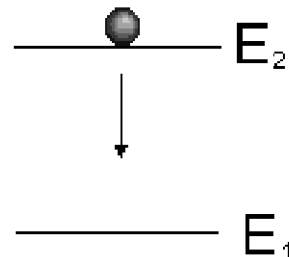
Für den Laser spielen drei Wechselwirkungen zwischen Atomen und Photonen eine Rolle:

- 1) Absorption,
- 2) spontane Emission und
- 3) induzierte Emission

Übergangswahrscheinlichkeiten

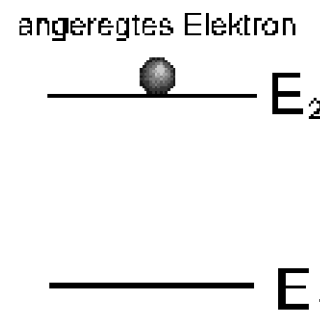
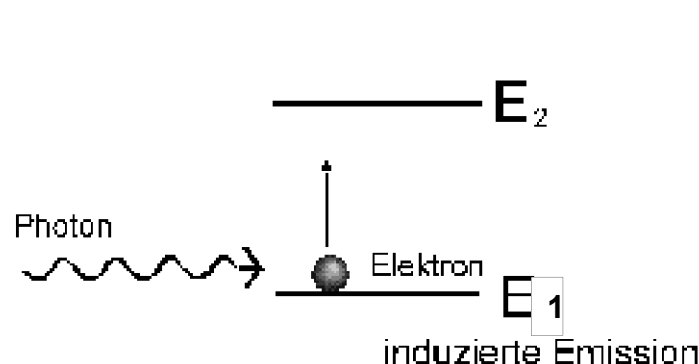
spontane Emission

angeregtes Elektron



$$dN_{21} = A_{21} N_2 dt$$

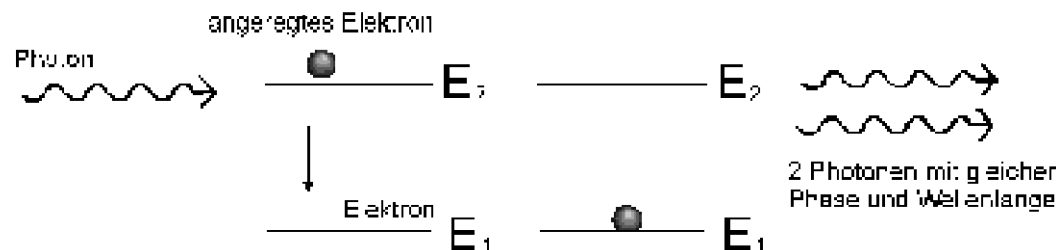
N_1, N_2 sind die
Besetzungszahlen



$$dN_{12} = B_{12} u(\nu) N_1 dt,$$

$u(\nu)$ = Dichte der Photonen;

A_{21}, B_{21}, B_{12} sind die
Einsteinkoeffizienten



$$dN_{21} = B_{21} u(\nu) N_2 dt$$

Im Mikrowellenbereich überwiegt induzierte Emission

$$dN_{21} = A_{21}N_2dt = \text{spontane Emission} = P_s$$

$$dN_{21} = B_{21} u(\nu) N_2 dt = \text{induzierte Emission} = P_i$$

$$P_s/P_i = A_{21}/B_{21}u(\nu) = \exp(\hbar\omega/kT) - 1 \quad (\text{siehe VL 4})$$

Bei Hohlraumstrahlung

$\hbar\omega/kT$ meistens $\gg 1$, so $P_s/P_i \gg 1$

Bei Zimmertemperatur und Mikrowellenbereich

(1000 MHz) $\hbar\omega/kT \approx 10^{-4}$, so

spontane Emission $\ll$ induzierte Emission

Wie kriegt man stimulierte Emission größer als spontane Emission und Absorption?

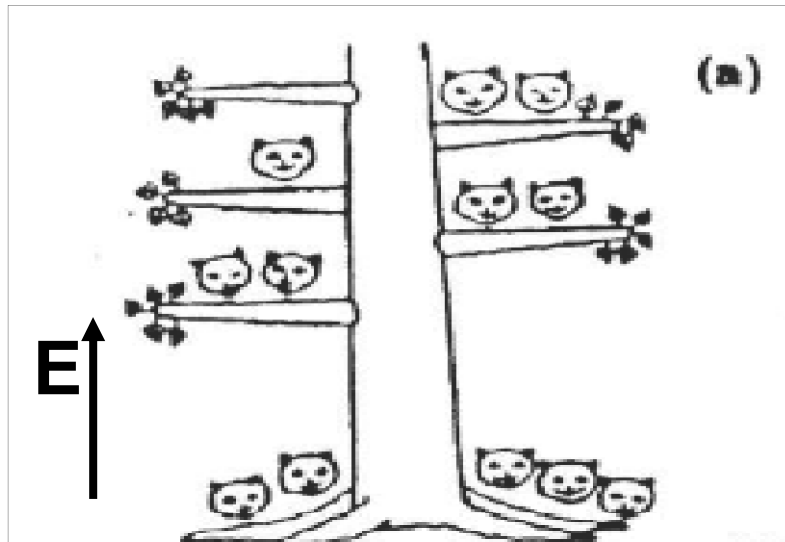
Stimulierte Emission $\gg$ spontane Emission, wenn $\hbar\omega/kT \ll 1$

Stimulierte Emission $\gg$ Absorption, wenn
 $N_2 \gg N_1$ (Besetzungsinversion (BI))
Nicht möglich im thermischen Gleichgewicht.

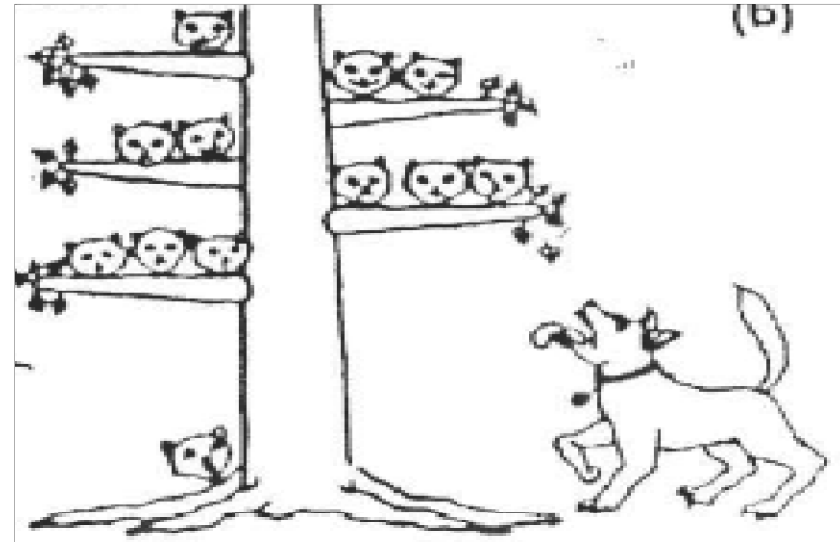
Dann $N_2/N_1 = \exp(-(E_2 - E_1)/kT)$ (Boltzmann)
Hohe Temp. $N_2/N_1 \rightarrow 1$ Tiefe Temp. $N_2/N_1 \rightarrow 0$. Nie $\gg 1$.

Trick: brauche langlebiges Niveau, dass durch Einstrahlung besetzt wird und wegen langer Lebensdauer nicht sofort in den Grundzustand zurückgeht.
Dann kohärente induzierte Emission möglich, die sogar bei den sehr hohen Frequenz des sichtbaren Lichts zu sehr intensen Laserstrahlung führt.

Besetzungsinversion



Besetzung gegeben durch Boltzmannverteilung:
 $N(E) \propto \exp(-E/kT)$
 k =Boltzmannkonstante



Durch externe Kräfte ("Pumpen") kann thermisches Gleichgewicht gestört werden und Besetzungsinversion erzeugt werden.

Laser: Ast bricht und alle Katzen fallen in den Grundzustand.

Bei Atomen: kohärenter Lichtblitz -> sehr intensive Strahlung (nächste Folie)

Voraussetzung für Lasermaterial: angeregte Niveaus mit

1) langer Lebensdauer (damit Pumpen effektiv wird)

2) geringer Energie-Unschärfe (damit Energie nicht über viele λ verteilt wird)

Kohärente und Inkohärente Strahlung

Hohlraumstrahlung: inkohärent, weil Atome unabhängig strahlen, d.h. Phasen willkürlich.

**$I \propto \text{Anzahl Photonen} \propto \text{Energie des elektrischen Feldes } E^2$
(wie Energie eines Kondensators $\propto E^2$)**

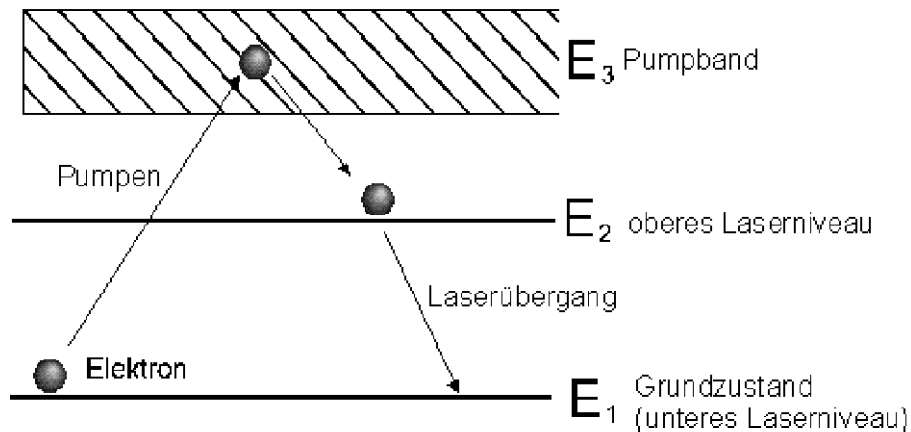
**Kohärente Strahlung: Alle Photonen in Phase,
E-Felder addieren sich zu $N E$,
 $I \propto (N E)^2 \propto (\text{Anzahl Photonen})^2$**

Stimulierte Emission IST kohärent !! QM Effekt.

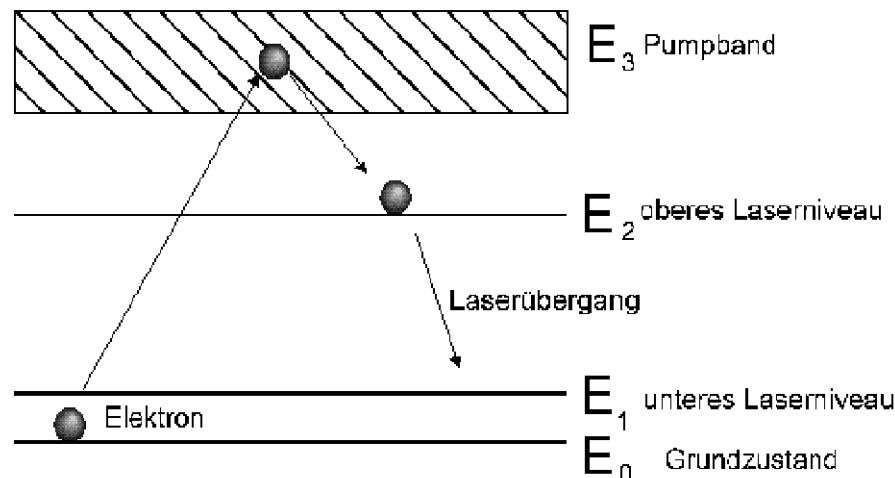
Klassisch: Photon stimuliert maximal, wenn E-Feld max. ist, d.h. bei fester Phase.

Pumpen eines Lasers

Pumpen eines 3-Niveau-Lasers



Pumpen eines 4-Niveau-Lasers



Um die Elektronen in einen angeregten Zustand zu bringen, muß der Laser "gepumpt" werden. Dies kann z.B. durch Gasentladung, Licht oder anderen Laser geschehen.

Bei einem 3-Niveau-Laser wird dabei ein Elektron in ein noch höheres Energieniveau gebracht und fällt dann wieder auf das Energieniveau E_2 zurück (siehe Skizze). Die dabei entstehende Energie wird als Wärme abgegeben.

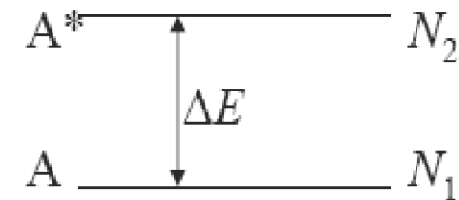
Wichtig: das Laserniveau ist langlebig ("metastabil"), weil Übergang zum Grundzustand verboten ist.

Freq. des Lasers:

$$\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$$

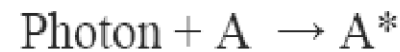
Laser

Atom mit Grundzustand A, angeregtem Zustand A*,
im starken Lichtfeld mit $\hbar\omega = \Delta E$:

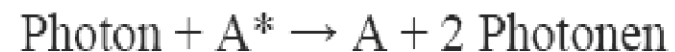


Wenn spontane Emission vernachlässigt:

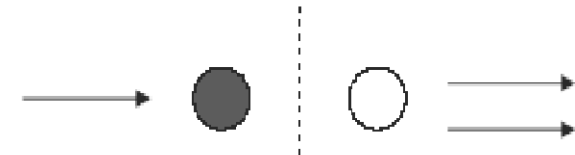
Anregung durch stimulierte Absorption:



Abregung durch stimulierte Emission:



Bei Abregung wird Photonenzahl verdoppelt,
und zwar jeweils in Vorwärtsrichtung



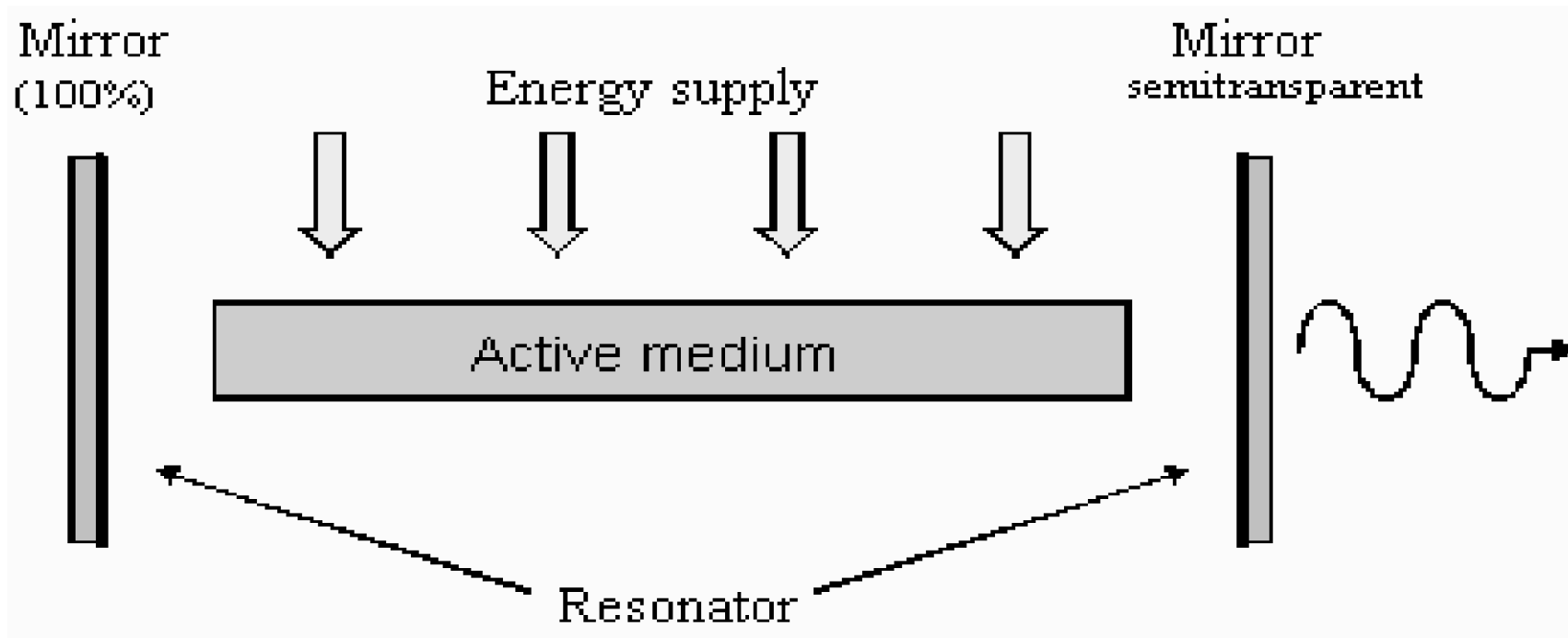
Wenn anfangs alle Atome im angeregten Zustand sind,
dann ist im Prinzip eine "**Kettenreaktion**" möglich

$$1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow \dots \rightarrow 2^n \text{ Photonen}$$

LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

(vgl. Kernreaktor: $1 \rightarrow 2 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow \dots \rightarrow 2^n$ Neutronen)

Aufbau eines Lasers



- 3 Komponenten: Medium mit metastabilen Energieniveaus**
- Resonator mit Spiegeln**
- Energiequelle zum Pumpen**

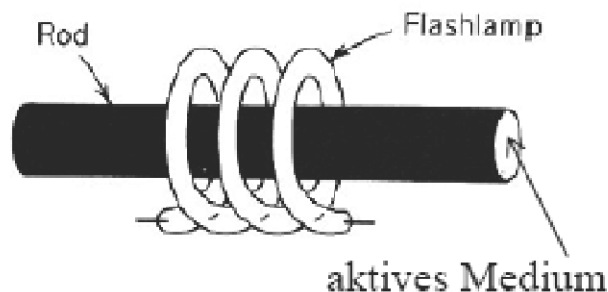
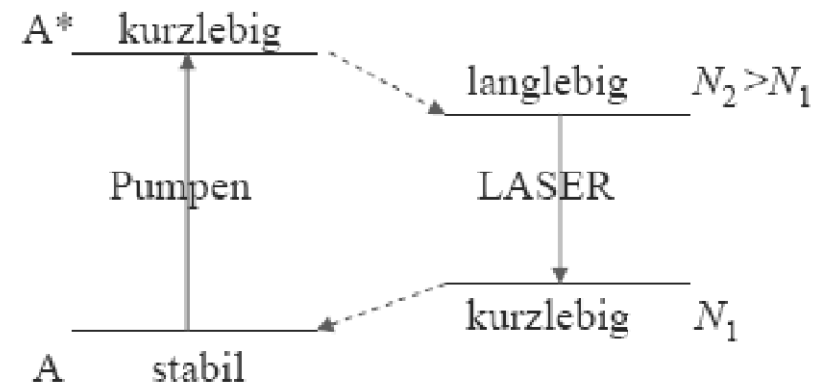
Pumpen eines Mehr-Niveau Lasers

aber: im Boltzmann-Gleichgewicht ist immer

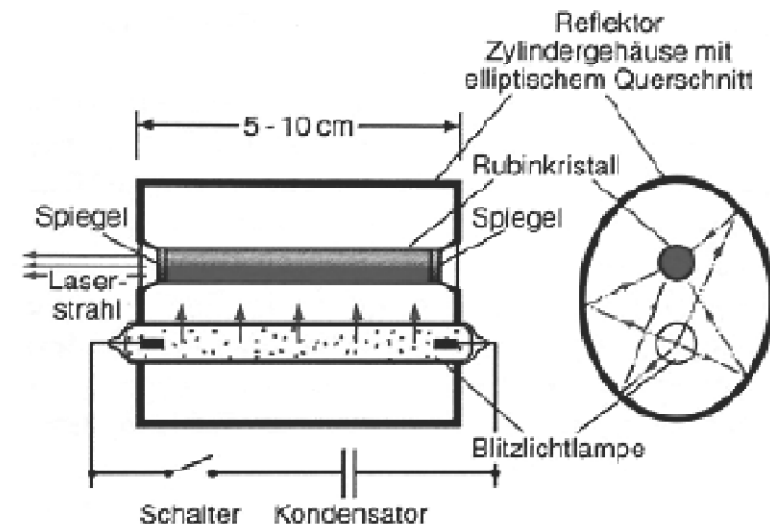
$$N_2 = N_1 \exp(-\Delta E/kT) \leq N_1$$

Abhilfe **Mehr-Niveau Laser:**

Besetzungsumkehr wird aufrecht
erhalten durch **Pumpprozess**,
z.B. mit starker Lampe:



oder:



Zusammenfassung des Laserprinzips

In einem Laser werden zunächst durch das sogenannte "Pumpen" Elektronen in einem Medium auf ein höheres Energieniveau gebracht. Es müssen sich mehr Elektronen im angeregten Zustand befinden als im unangeregten. Diesen Zustand nennt man Besetzungsinversion.

Wird nun durch die spontane Emission ein Photon frei, löst dieses durch die induzierte Emission eine "Kettenreaktion" aus. Die erzeugten Photonen besitzen günstigerweise alle die gleiche Wellenlänge und Phase. Um den Effekt zu verstärken werden normalerweise Spiegel auf beiden Seiten des Mediums platziert. Einer von ihnen ist nicht vollständig verspiegelt und lässt einen geringen Teil des Lichts passieren. Das Licht wird nun zwischen beiden Spiegeln hin- und her reflektiert und erzeugt weitere induzierte Emissionen. Der erzeugte Laserstrahl tritt durch den Halbspiegel aus.

Eigenschaften des Laserlichts

1. hohe Monochromie : $\frac{\Delta\nu}{\nu} \ll 10^{-15}$ ($\Delta\nu \approx 1 \text{ Hz}$)
2. Räumliche und zeitliche Kohärenz, d.h. alle Photonen haben **am** jeden Ort und zu jedem Zeitpunkt die *gleiche* Phase → Lichtwellezug mit einer Länge l , der nicht begrenzt ist durch stehende Wellen im Laser, sondern
$$l = \frac{c}{\Delta\nu} \approx 3 \times 10^8 \text{ m}$$
für : $\Delta\nu \approx 1 \text{ Hz}$, d.h. Abschwächung der Intensität durch Interferenzen erst nach $3 \times 10^8 \text{ m}$!
3. Starke Bündelung (begrenzt durch Beugung am Fenster)
4. Ultrakurze Pulse (10^{-13} s) und hohe Intensität → hohe Leistung (MW!)

Warum hat Laserlicht diese ungewöhnliche Eigenschaften?

1. Monochromasie bedingt durch die Energieunschärfe der Laserniveaus : wenn die Lebensdauer τ sehr groß ist, dann gilt nach der Unschärferelation:
$$\Delta E = \frac{h}{\Delta t} = \frac{h}{\tau} \text{ sehr klein.}$$
2. Die Kohärenz ist eine quantenmechanische Eigenschaft: die stimulierte Emission ist maximal, wenn die Wellenfunktion des Photons und des Elektrons in Phasen sind.

Durch Kohärenz des Lichts werden die AMPLITUDEN der Photonen addiert $\rightarrow$

Bei N Photonen $\rightarrow$ Amplitude NA_0

Intensität $\propto N^2 A_0^2 = N^2 I_0$.

Bei inkohärenten Quellen (Glühbirne) : $\propto NI_0$ ($\propto$ Anzahl der Photonen)

Lebensdauer und Linienbreite

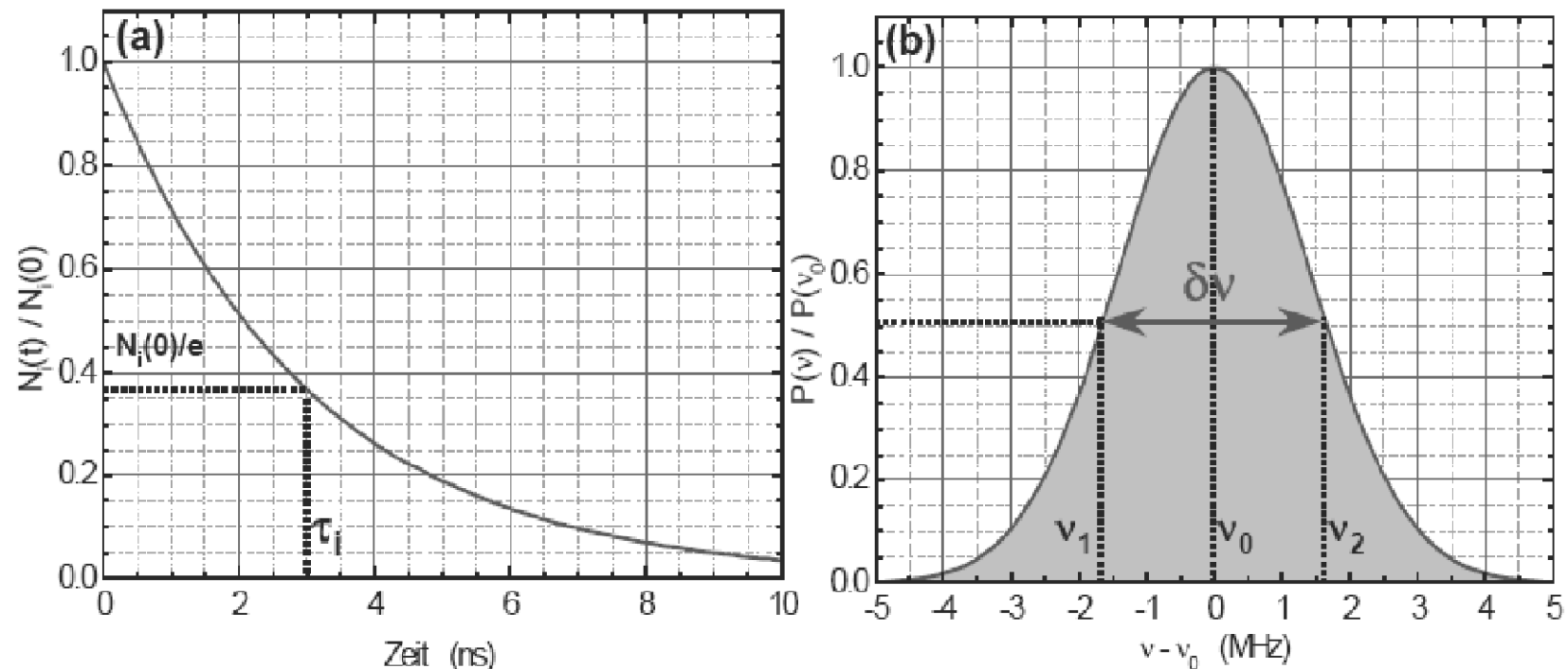


Abbildung 6.4: (a) Zeitliche Änderung der Besetzungszahl $N_i(t)$ eines angeregten Zustands bei zeitlich konstanter Zerfallswahrscheinlichkeit. (b) Linienprofil einer Spektrallinie.

Natürliche Linienbreite aus Unschärferelation: $\Delta E = \hbar/\tau$

Linienverbreiterung durch Dopplereffekt und Stoßverbreiterung

Linienform

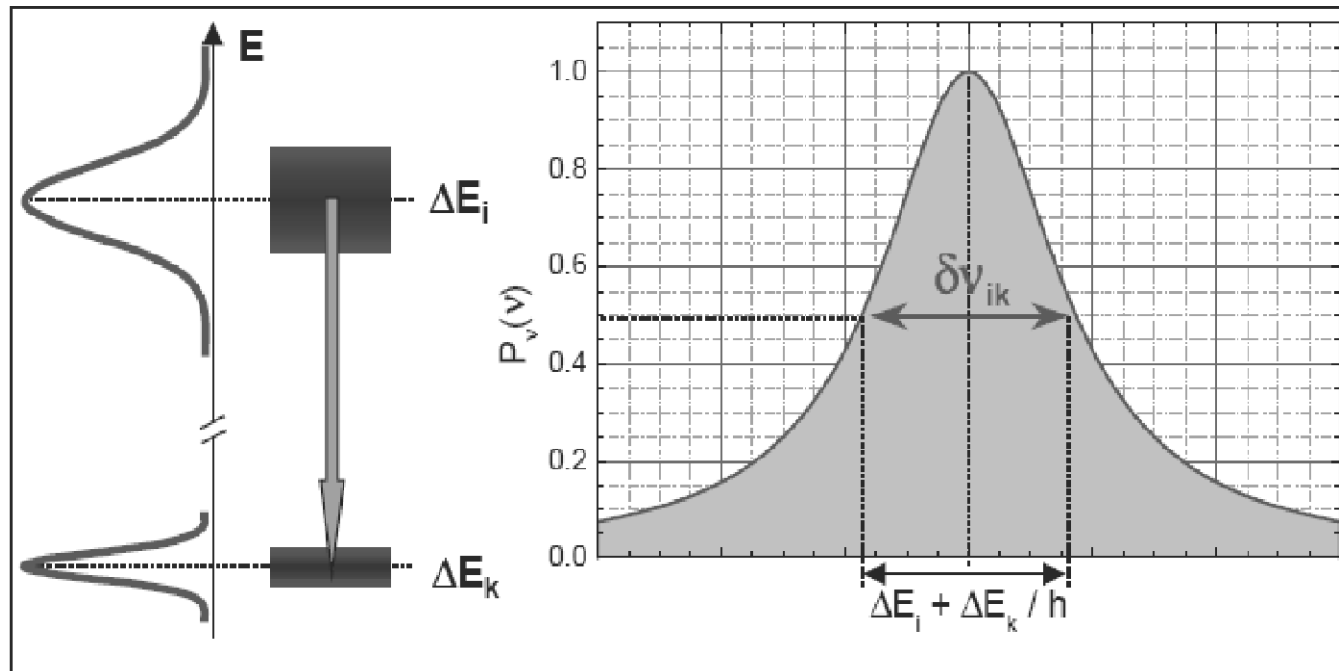


Abbildung 6.5: Schematische Darstellung der natürlichen Linienbreite als Folge der Energieunschärfe der am Übergang beteiligten Niveaus.

Natürliche Linienbreite ergibt Lorentzkurve:

$$P_{\omega}(\omega) = P_0 \frac{\Gamma/2\pi}{(\omega - \omega_0)^2 + (\Gamma/2)^2}$$

Dopplerverbreiterung durch thermische Bewegung der Atome

Molekülgeschwindigkeiten in Gas Gauss-verteilt:

$$n_i(v_x)dv_x = C \exp\left(\frac{-mv_x^2}{2k_B T}\right) dv_x$$

Daraus ergibt sich eine Dopplerverbreiterung:

$$\delta\omega_{\text{Doppler}} = \frac{\omega_0}{c} \sqrt{\frac{8k_B T \ln 2}{m}}$$

Die Bewegung der Atome führt zu einer Dopplerverbreiterung der Spektrallinien, die linear mit der Frequenz und proportional zu $\sqrt{T}$ ansteigt, mit zunehmender Masse der Atome aber proportional zu $1/\sqrt{m}$ abnimmt. Typischerweise ist die Dopplerverbreiterung im sichtbaren Spektralbereich bei Raumtemperatur um etwa 2 Größenordnungen größer als die natürliche Linienbreite.

Hohe spektrale Auflösung nur bei tiefen Temp.

Stoßverbreiterung

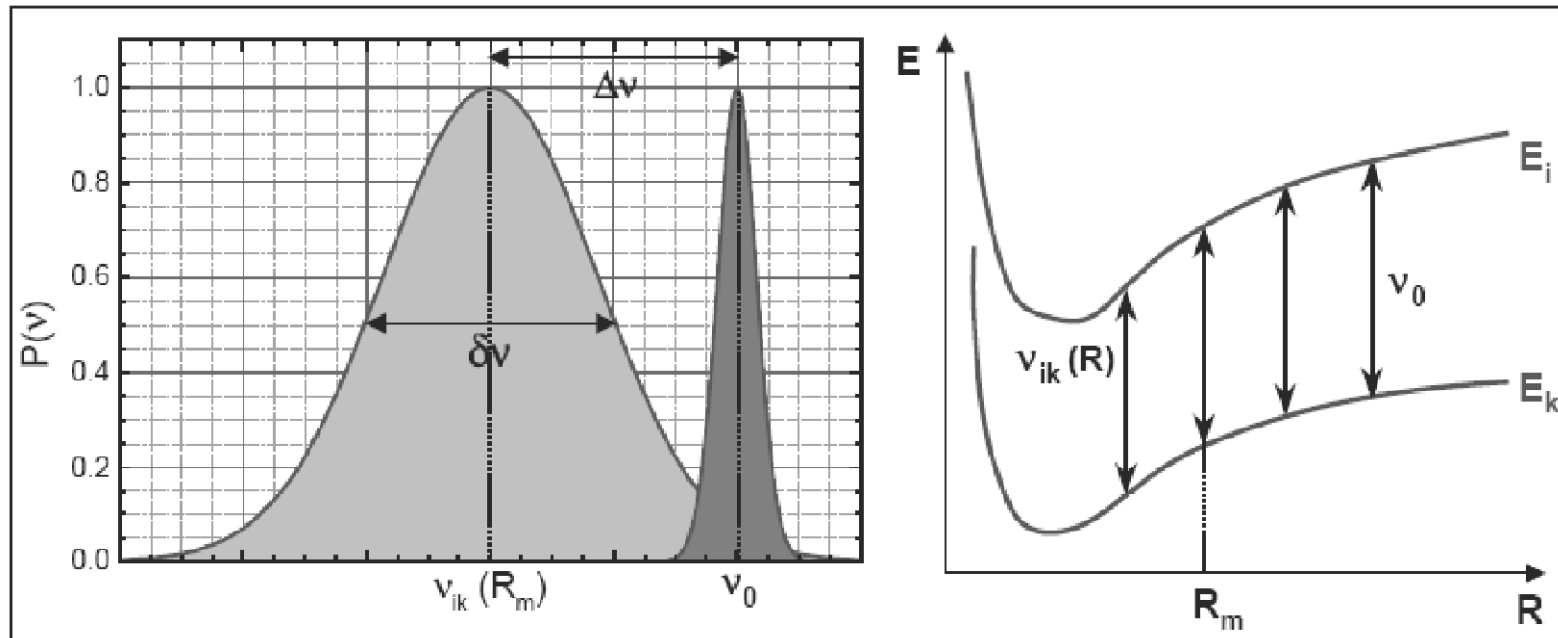


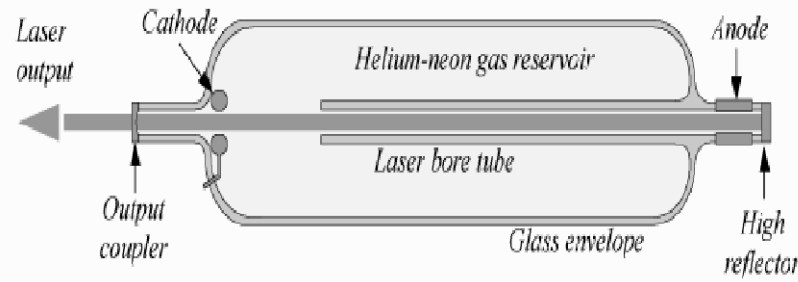
Abbildung 6.7: Zur Veranschaulichung der Stoßverbreiterung und Verschiebung von Spektrallinien durch elastische Stöße. Gezeigt sind die Potenzialkurven der Stoßpartner sowie die Linienform ohne Stöße und die um Δv verschobene, verbreiterte Linie.

Hohe spektrale Auflösung nur bei geringen Druck

R_m =mittlere Abstand = $F(T)$.

**Bei Stoß verringert sich R und daher
potentielle Energie $\rightarrow$ Energieverschiebung**

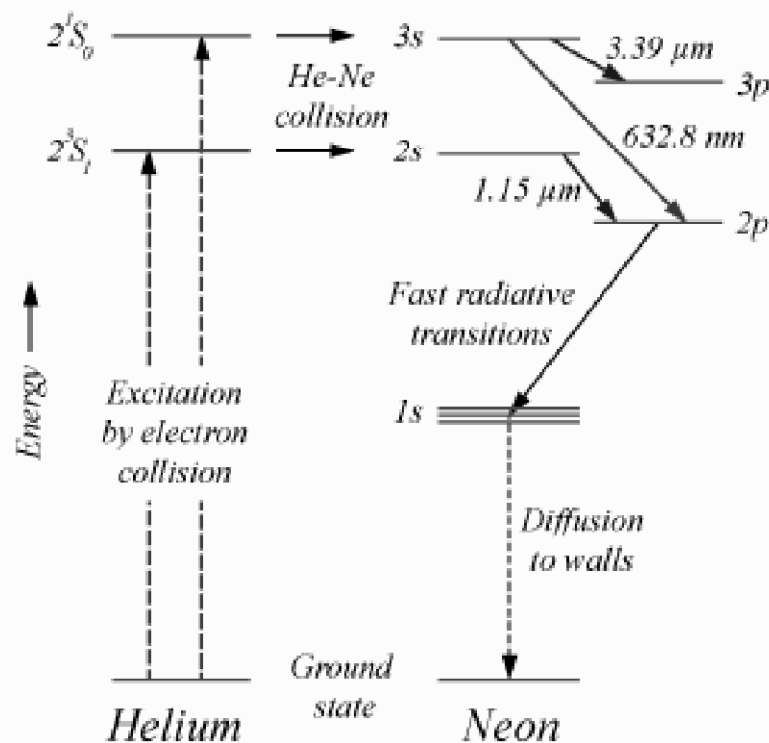
Konkretes Beispiel: He-Neon Laser



Lasermedium:
1 mbar He+Ne (1:7)

Angeregte metastabile
He 2^3S_1 Niveaus hat fast
gleiche Energie wie Ne*.

Daher können He Atome
abregen durch Stöße mit
Ne und dadurch Ne anregen!



Lasern durch induzierte
Emission nach mehreren
niedrigeren Energieniveaus
möglich.

Laserbedingung

— Die Anzahl der Photonen ändert sich durch

- Stimulierte Emission $\rightarrow \dot{n} = +W N_2 n$
- Absorption $\rightarrow \dot{n} = -W N_1 n$
- spontane Emission $\rightarrow \dot{n} = W^1 N_2$
(unkorrelierte Emission = “Rauschen” des Lasers)
- Verluste durch Austritt : $\dot{n} = -\frac{n}{t_0}$, wobei t_0 die Lebensdauer der Photonen im Laser ist

Ohne Rauschen :

$$\frac{dn}{dt} = W(N_2 - N_1)n - \frac{n}{t_0}$$

$$W = \frac{1}{V D(\nu) \Delta \nu \tau},$$

wobei :

$D(\nu) \Delta \nu$ = Anzahl der stehenden Wellen im Laservolumen V

τ = Lebensdauer des oberen Laserniveaus

$$D(\nu) = 8\pi \frac{\nu^2}{c^3} \text{ (Jeans)}$$

$\dot{n} > 0$, wenn

$$\frac{N_2 - N_1}{V} > \frac{8\pi \nu^2 \Delta \nu \tau}{c^3 t_0} \text{ notwendige Inversion pro Volumen}$$

Bei guten Lasermaterialien wird die rechte Seite recht klein.

Schwellwert

Wenn die Photonen-Verluste vor dem nächsten Verdopplungsschritt $< 50\%$ sind, dann kann 'Kettenreaktion' aufrecht erhalten werden.

(mittlere Weglänge ξ für Verluste $>$ Weglänge ζ für stimulierte Emission)

Photonen-Verlustrate sei $\gamma = 1/\xi$,

d.h. **ohne** Laserwirkung:

$$dn/dz = -\gamma n$$

$$n(z) = n(0) \exp(-\gamma z)$$

mit Laserwirkung, und $z=ct$:

$$dn/dz = dn/c \cdot dt = (\alpha/c - \gamma) n,$$

$$\text{mit } \alpha = 2(N_2 - N_1)g(\omega)B_{12} (= c/\zeta)$$

$n(z) = n(0) \exp((\alpha/c - \gamma)z)$ wächst an, wenn

Schwellwert-Bedingung erfüllt: $\alpha > \gamma c$ (d.h. $\xi > \zeta$), oder

$$N_2 - N_1 > \frac{\gamma c}{2B_1 g(\omega)} \quad \sim \text{Kritikalität beim Kernreaktor}$$

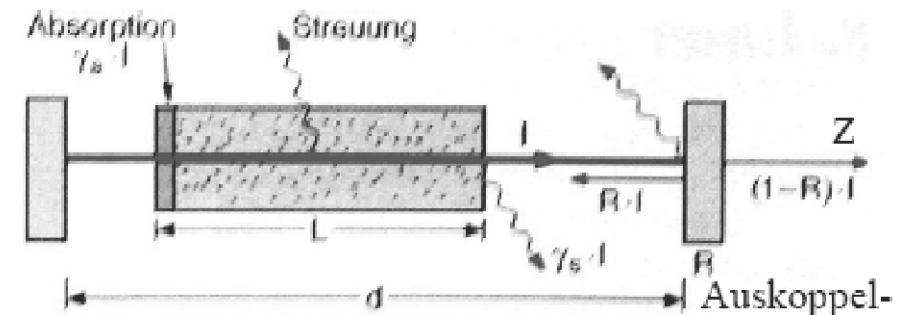


Abb. 8.4. Zur Illustration der Verluste eines Lasers plus Beugungsverluste

Resonator

Resonator

Schwellwert-Bedingung ist nur zu erfüllen mit **optischem Resonator**. Dieser ist sehr effektiv wegen stimulierter Emission in Vorwärtsrichtung (entlang Resonatorachse z)

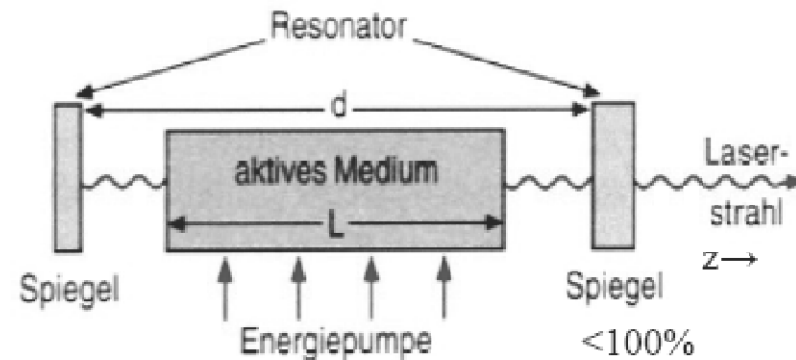
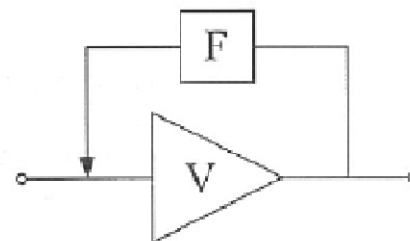
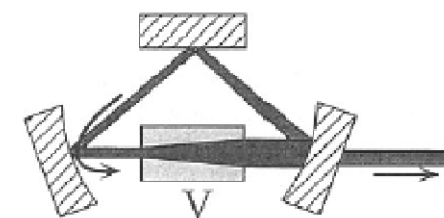


Abb. 8.1. Aufbauprinzip eines Lasers

Laser =
Amplifier



elektronischer Oszillator



Laser-Oszillator

Halbleiter

Metalle: Elektronen ist es energetisch erlaubt von einem Atom zum anderen Atom zu springen oder in der Sprache der Festkörperphysik: die Energiewerte der gebundenen Atome sind verbreitert zu einem Valenzband (VB), das überlappt mit dem Leitungsband (LB) (Bändermodell).

Bei Isolatoren sind VB und LB getrennt durch eine Energielücke und die elektrische Leitfähigkeit ist Null.

Beim Halbleiter ist die Energielücke der Größenordnung kT und Elektronen können thermisch vom VB zum LB angeregt werden. Daher ist die elektrische Leitfähigkeit stark abhängig von der Temperatur.

Laserdiode

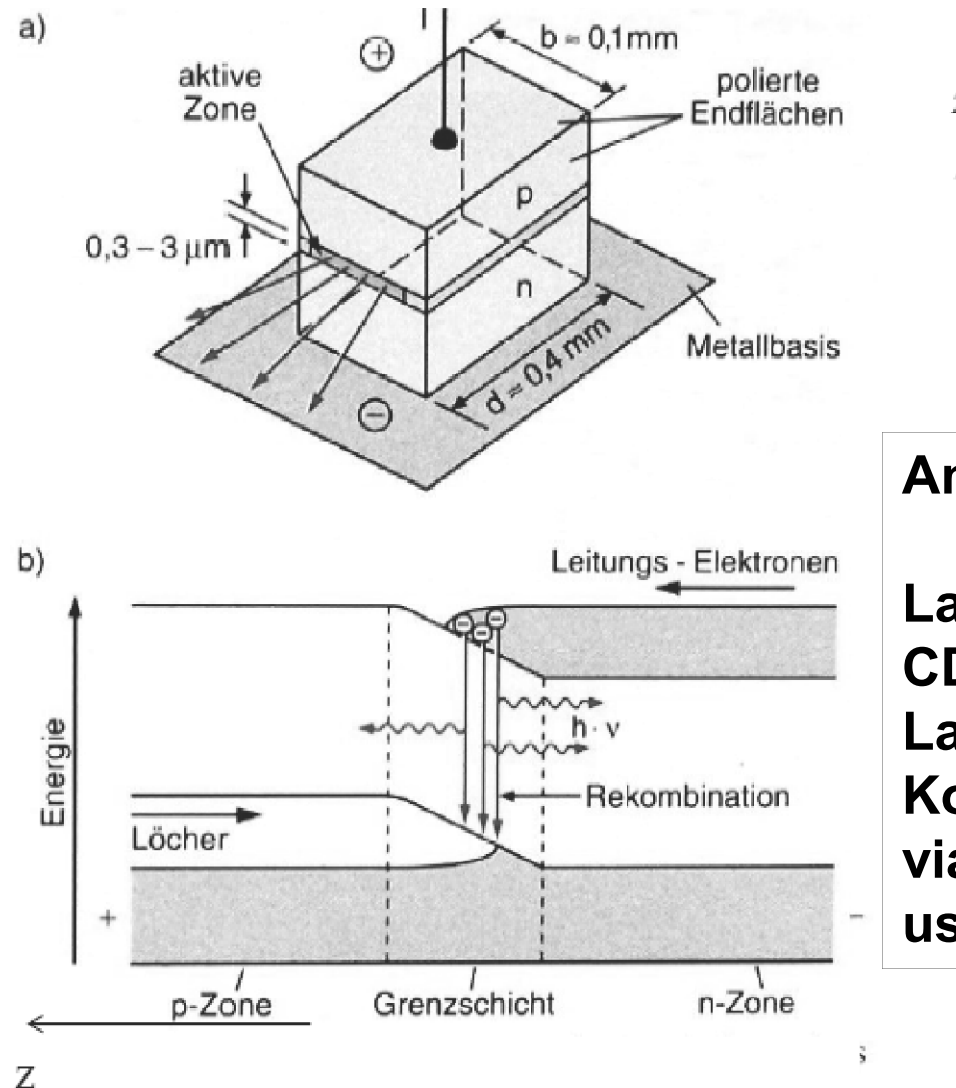
Springt ein Elektron vom Valenzband (VB) ins Leitungsband, dann hinterlässt es ein Loch ins Leitungsband. Durch Doping mit Fremdatomen kann man die Löcher- und Elektronenkonzentration stark erhöhen. Bringt man ein p-Type (erhöhte Löcherkonzentration) mit einem n-Type Halbleiter (erhöhte Elektronkonzentration) in einen elektrischen Kontakt, dann entsteht ein Bauelement mit 2 Elektroden, die so-genannte Diode.

Durch ein elektrisches Feld kann man die Elektronen in einer Diode vom n-Typ ins p-Typ jagen. Dabei entsteht kohärentes Laserlicht durch die Rekombination von Elektronen und Löchern.

Halbleiter Laser

Dioden Laser

klein
aber
oho

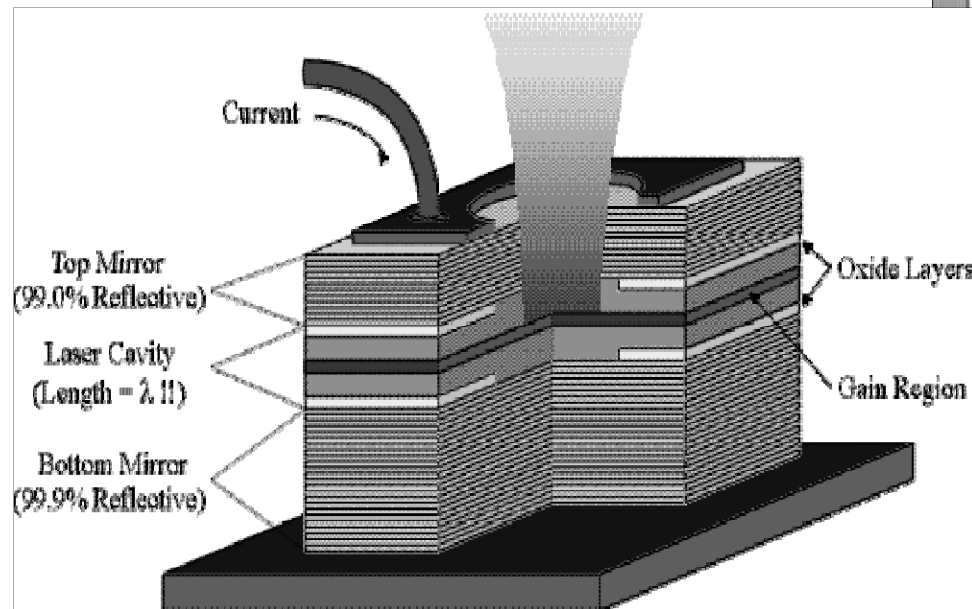


Anwendungen:

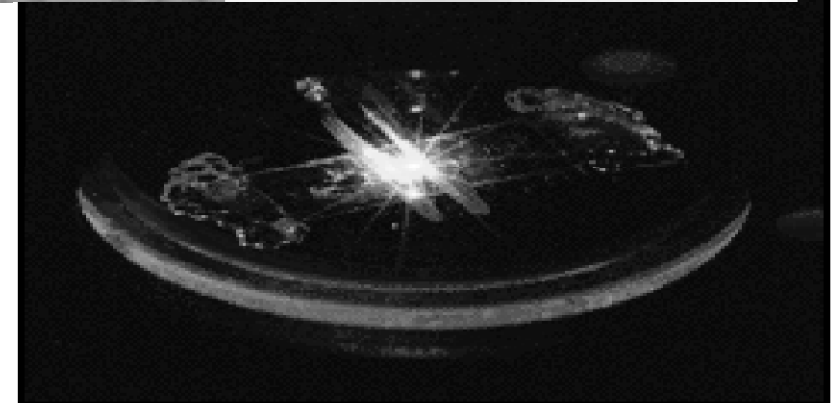
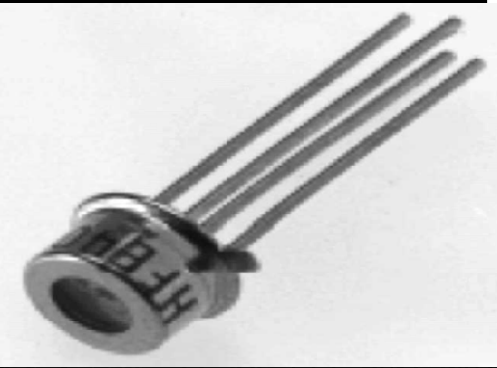
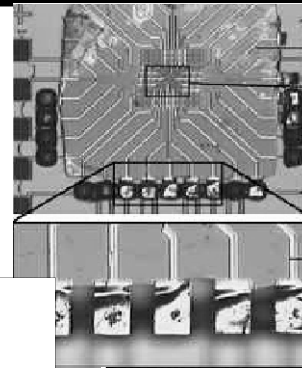
Laser pointer
CD player
Laserdrucker
Kommunikation
via Glasfaser
usw.

VCSEL=Vertical Cavity Surface Emitting Laser

<http://en.wikipedia.org/wiki/VCSEL>



**Telecommunication
AIDS detector**



LAB ON A CHIP COMES CLOSER - A biocavity laser - a VCSEL capped by a glass plate enclosing a blood sample, all about the size of a quarter - is excited by a pump laser in Paul Gourley's lab. The VCSEL device can produce information about the state of millions of blood cells in a few minutes. [Download 150dpi jpg image, 'VCSEL.jpg', 1.5MB](#)

Farbstofflaser

Farbstoff Laser

= durchstimmbare
Breitbandlaser

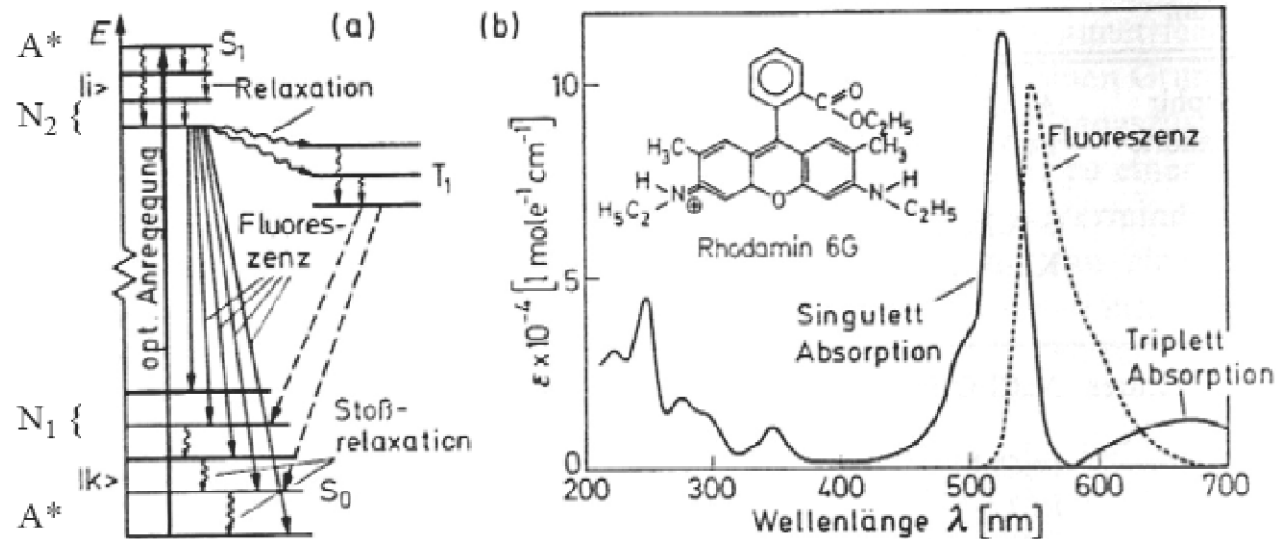


Abb. 5.60. (a) Vereinfacht dargestelltes Termschema eines Farbstofflasers und (b) Struktur, Absorptions- und Emissionsspektrum von Rhodamin 6G in Äthanol gelöst = 4-Niveau-System

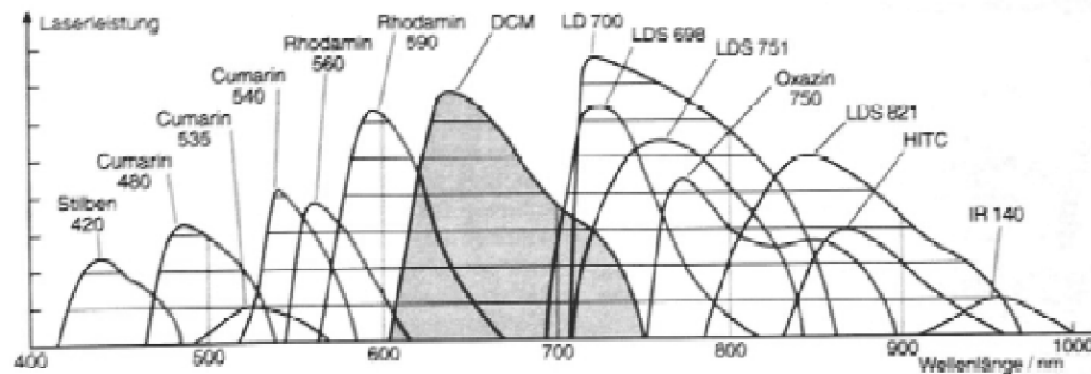
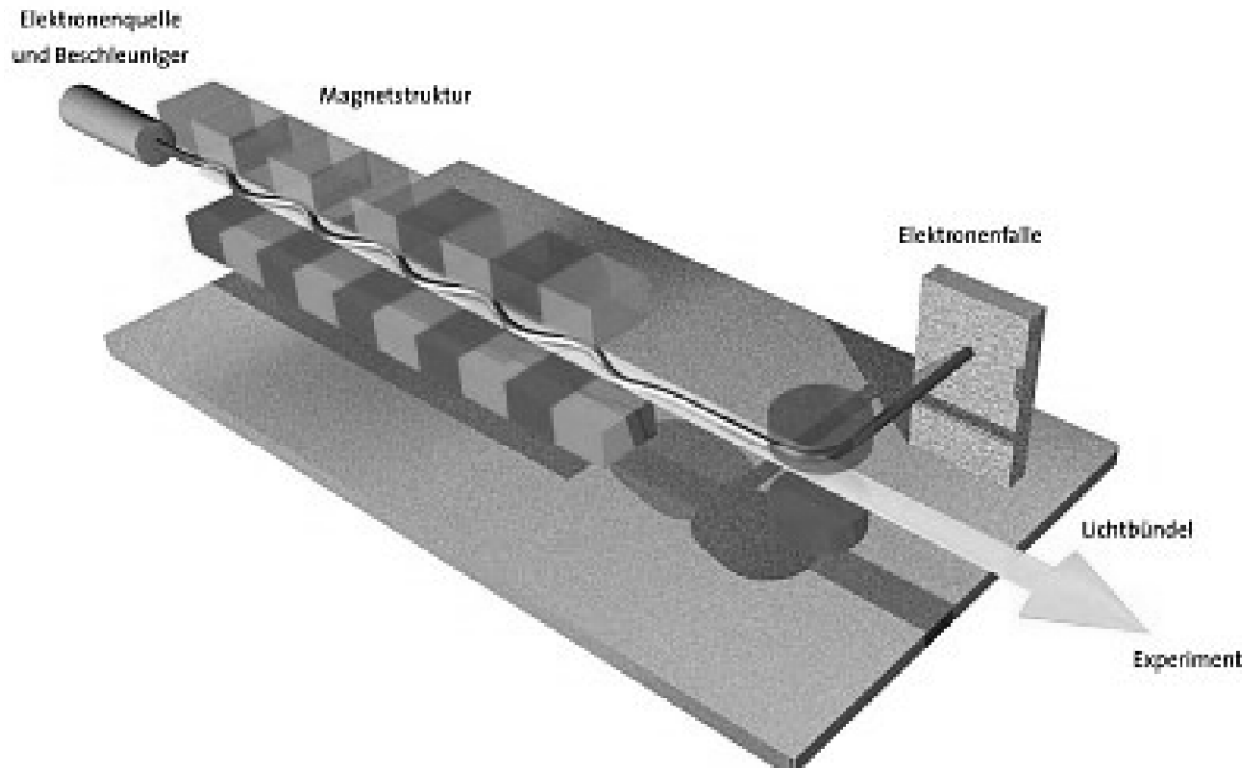


Abb. 8.25. Durchstimmbereiche einiger Farbstofflasermedien

Free Electron Laser



**Gebaut bei
DESY
in Hamburg**

Elektronen durch Ondulator -> kohärentes Röntgenlicht -> Amplituden der Photonen addieren -> Leistung $\propto N^2$ statt N .

The free-electron laser hat den größten Frequenzbereich range aller Laser wobei die Wellenlänge vom Mikrowellenbereich über das sichtbare Licht zu Röntgenstrahlen geändert werden kann.

Typische Festkörper Laser

Laser gain medium and type	Operation wavelength(s)	Pump source	Applications and notes
<u>Ruby</u> solid-state laser	694.3 nm	Flashlamp	<u>Holography</u> , <u>tattoo</u> removal. The first type of laser invented, in 1960.
<u>Neodymium YAG (Nd:YAG)</u> solid-state laser	1.064 μm , (1.32 μm)	Flashlamp, <u>laser diode</u>	Material processing, <u>rangefinding</u> , laser target designation, surgery, research, pumping other lasers (in combination with <u>frequency doubling</u>). One of the most common high power lasers. Usually pulsed (down to fractions of a <u>nanosecond</u>)
<u>Neodymium YLF (Nd:YLF)</u> solid-state laser	1.047 and 1.053 μm	Flashlamp, laser diode	Mostly used for pulsed pumping of certain types of pulsed <u>Ti:sapphire</u> lasers, in combination with <u>frequency doubling</u> .
<u>Neodymium YVO₄ (Nd:YVO)</u> solid-state laser	1.064 μm	laser diode	Mostly used for continuous pumping of <u>mode-locked</u> <u>Ti:sapphire</u> lasers, in combination with <u>frequency doubling</u> .
<u>Neodymium Glass (Nd:Glass)</u> solid-state laser	$\sim 1.062 \mu\text{m}$ (Silicate glasses), $\sim 1.054 \mu\text{m}$ (Phosphate glasses)	Flashlamp, laser diode	Used in extremely high power (<u>Terawatt</u> scale), high energy (Megajoules) multiple beam systems for <u>inertial confinement fusion</u> . Nd:Glass lasers are usually <u>frequency tripled</u> to the <u>third harmonic</u> at 351 nm in laser fusion devices.
<u>Titanium sapphire (Ti:sapphire)</u> solid-state laser	650-1100 nm	Other laser	Spectroscopy, <u>LIDAR</u> , research. This material is often used in highly-tunable <u>mode-locked infrared</u> lasers to produce <u>ultrashort pulses</u> and in amplifier lasers to produce ultrashort and ultra-intense pulses.
<u>Thulium YAG (Tm:YAG)</u> solid-state laser	2.0 μm	Laser diode	Laser radar.
<u>Ytterbium YAG (Yb:YAG)</u> solid-state laser	1.03 μm	Laser diode, flashlamp	<u>Optical refrigeration</u> , materials processing, ultrashort pulse research, <u>multiphoton microscopy</u> , <u>LIDAR</u> .
<u>Holmium YAG (Ho:YAG)</u> solid-state laser	2.1 μm	Laser diode	Tissue ablation, <u>kidney stone</u> removal, <u>dentistry</u> .
<u>Cerium doped lithium strontium (or calcium)</u>	~ 280 to 316 nm	Frequency quadrupled Nd:YAG laser pumped,	Remote atmospheric sensing, <u>LIDAR</u> , optics research.

Typische Gas Laser

Laser gain medium and type	Operation wavelength(s)	Pump source	Applications and notes
<u>Helium-neon gas laser</u>	632.8 nm (543.5 nm, 593.9 nm, 611.8 nm, 1.1523 μ m, 1.52 μ m, 3.3913 μ m)	Electrical discharge	<u>Interferometry</u> , <u>holography</u> , <u>spectroscopy</u> , <u>barcode scanning</u> , alignment, optical demonstrations.
<u>Argon ion gas laser</u>	488.0 nm, 514.5 nm, (351 nm, 465.8 nm, 472.7 nm, 528.7 nm)	Electrical discharge	<u>Retinal phototherapy</u> (for <u>diabetes</u>), <u>lithography</u> , pumping other lasers.
<u>Krypton ion gas laser</u>	416 nm, 530.9 nm, 568.2 nm, 647.1 nm, 676.4 nm, 752.5 nm, 799.3 nm	Electrical discharge	Scientific research, mixed with argon for creation of "white-light" lasers, light shows.
<u>Xenon ion gas laser</u>	Many lines throughout entire visible spectrum extending into the <u>UV</u> and <u>IR</u> .	Electrical discharge	Scientific research.
<u>Nitrogen gas laser</u>	337.1 nm	Electrical discharge	Pumping of dye lasers, measurement of air pollution, scientific research, nitrogen lasers are capable of operating <u>superradiantly</u> (without a resonator cavity), amateur laser construction.
<u>Hydrogen fluoride laser</u>	2.7 to 2.9 μ m for (Hydrogen fluoride) 3.6 to 4.2 μ m for (<u>Deuterium</u> fluoride)	Chemical reaction in a burning jet of <u>ethylene</u> and <u>nitrogen</u> trifluoride (NF_3)	Used in research for laser weaponry by the U.S. <u>DOD</u> , operated in <u>continuous wave</u> mode and capable of extremely high powers in the <u>megawatt</u> range.
Chemical <u>Oxygen-Iodine Laser (COIL)</u>	1.315 μ m	Chemical reaction in a jet of singlet delta oxygen and iodine	Laser weaponry, scientific and materials research, laser used in the U.S. military's <u>Airborne laser</u> , operated in <u>continuous wave</u> mode and capable of extremely high powers in the <u>megawatt</u> range.
<u>Carbon dioxide (CO_2) gas laser</u>	10.6 μ m, (9.4 μ m)	Transverse (high power) or longitudinal (low power) electrical discharge	Material processing (<u>cutting</u> , <u>welding</u> , etc.), <u>surgery</u> .

Geschichte des Lasers

Theoretically, the principle of the maser was described by Nikolay Basov and Alexander Prokhorov from Lebedev Institute of Physics at an *All-Union Conference on Radio-Spectroscopy* held by USSR Academy of Sciences in May 1952. They subsequently published their results in October 1954. Independently, Charles H. Townes, J. P. Gordon, and H. J. Zeiger built the first maser at Columbia University in 1953. The device used stimulated emission in a stream of energised ammonia molecules to produce amplification of microwaves at a frequency of 24 gigahertz. For their research in this field Townes, Basov and Prokhorov were awarded the Nobel Prize in Physics in 1964.

Townes later worked with Arthur L. Schawlow to describe the principle of the optical maser, or laser, which Theodore H. Maiman first demonstrated in 1960.

Maser: Microwave Amplification by stimulated Emission
Microwellen Verstärker, Rauschen $\propto \nu^3$ durch spontane Emission kleiner als beim Laser, Freq. sehr stabil.

Zum Mitnehmen

**Laser high tech für Kommunikation,
Medizin, Technik, Spektroskopie.**