

2. Laser

2.LASER	1
2.1Grundlagen	2
2.1.1 Absorption und Emission	2
2.1.2 Inversion und Verstärkung	3
2.1.3 Eigenschaften von Laserlicht	4
2.2Lasertypen	5
2.2.1 Schmalbandige Laser	5
2.2.2 Pulslaser	6
2.2.3 Modenkopplung	8
2.3Lasermedien	9
2.3.1 Farbstoffe	9
2.3.2 Gaslaser	12
2.3.3 Festkörperlaser	14
2.3.4 Halbleiterlaser	16
2.4Optische Frequenzmischung	18

Literatur: Demtröder, Kap. 5
Siegman
Kneubühl / Siegrist
D. Meschede, 'Optik, Licht und Laser', Teubner, Stuttgart (2000).

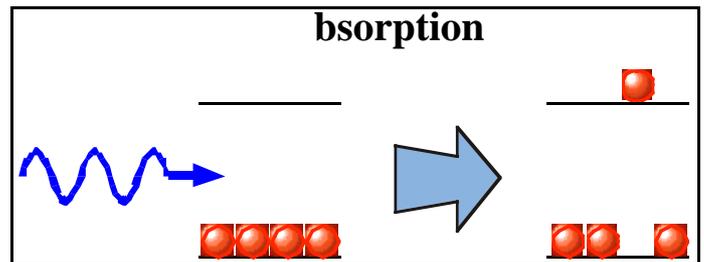
2.1 Grundlagen

Wenn wir im folgenden die Wechselwirkung von Licht und Materie diskutieren werden wir wenig darüber sagen, wie das Licht erzeugt wurde. Viele der Aussagen werden unabhängig von der Art des Lichtes sein, aber andere Experimente lassen sich nur mit Hilfe von Lasern durchführen.

LASER = Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

2.1.1 Absorption und Emission

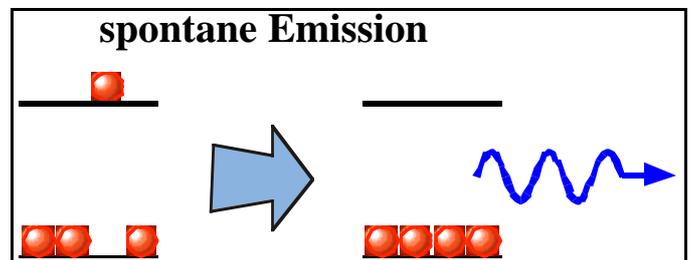
In einem quantenmechanischen Bild wird bei der Absorption von Licht ein Photon vernichtet und dadurch ein materielles System aus einem niedrigen (meist aus dem Grundzustand) in einen energetisch höher liegenden Zustand gebracht. Daraus resultiert eine Abschwächung des Lichtes mit der Wahrscheinlichkeit



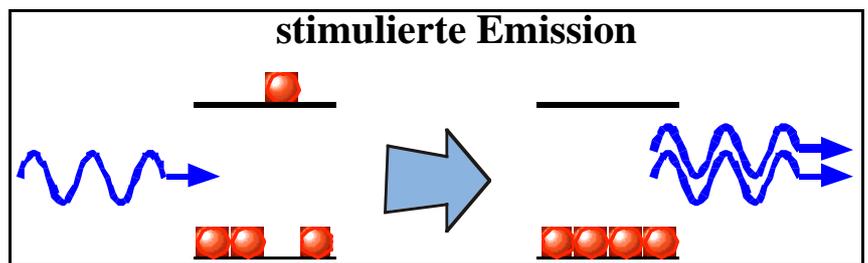
$$\text{Absorption: } dI/dz = -\kappa I N_g,$$

wobei N_g die Population des Grundzustandes und κ den Absorptionsquerschnitt darstellt.

Beim inversen Prozess geht das System aus dem angeregten Zustand in den Grundzustand über und emittiert dabei ein Photon. Dieser Prozess kann ohne äußere Einwirkung stattfinden und wird dann als spontane Emission bezeichnet.



Emission kann aber auch stimuliert erfolgen: in diesem Fall induziert ein Photon den Übergang. Das emittierte Photon wird dabei eine Kopie des einfallenden Photons; somit erfolgt in diesem Fall eine Verstärkung des einfallenden Lichtes



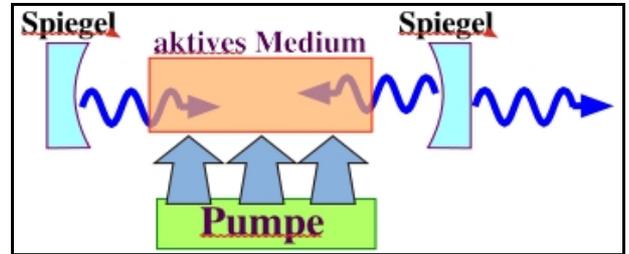
$$dI/dz = \kappa I N_e,$$

wobei N_e die Population des angeregten Zustandes darstellt.

2.1.2 Inversion und Verstärkung

Ein Laser verwendet mehrfache stimulierte Emission um ein intensives optisches Feld zu erzeugen. Dazu muss das Licht mehrfach durch ein verstärkendes Medium geschickt werden.

Neben dem aktiven Medium umfaßt ein Laser weitere Elemente, so insbesondere Spiegel, welche einen Resonator definieren. Sie dienen dazu, den entstehenden Laserstrahl mehrfach durch das atomare Medium zu lenken, so daß die Verstärkung groß genug ist. Weiterhin wird eine Pumpquelle benötigt, welche die Populationsinversion erzeugt. Dazu kann man in besonders geeigneten Fällen elektrischen Strom verwenden. In vielen Fällen wird aber auch Licht verwendet, entweder von einer klassischen Blitzlampe oder von einem anderen Laser.

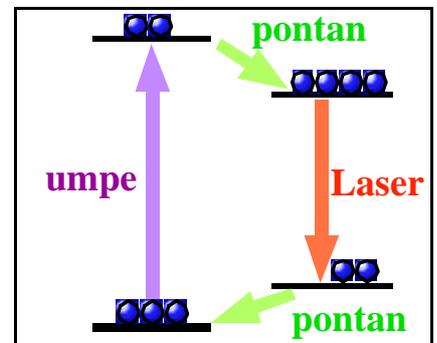


Das aktive Medium eines Lasers kann nur dann verstärken, wenn die Verstärkung aufgrund der induzierten Emission höher ist als die Abschwächung aufgrund der Absorption. Beide treten in einem gegebenen Medium mit der gleichen Wahrscheinlichkeit auf. Das aktive Medium ändert die Lichtintensität um

$$dI/dz = \kappa I (N_e - N_g) .$$

Somit resultiert eine Verstärkung wenn $N_e > N_g$.

Um eine Inversion zu erzeugen muss dem System Energie zugeführt werden. Die kann nicht auf demjenigen Übergang geschehen, welcher für die Lasertätigkeit verwendet wird, sondern muss auf einem Übergang höherer Energie geschehen. Aus dem oberen Zustand des Pumpübergangs sollte das System mit hoher Effizienz in den oberen Zustand des Laserniveaus übergehen. Dieser Übergang kann z.B. ein Vibrationsübergang sein (z.B. im Ti:Sa Laser) oder er kann stoßinduziert sein (z.B. HeNe Laser). Die Population des unteren Laserzustandes muss ebenfalls durch spontane Prozesse wieder entleert werden damit die Populationsinversion aufrecht erhalten bleibt.



Erreicht man auf diese Weise dass das einfallende Licht verstärkt wird, so muss die Verstärkung zunächst die Verluste ausgleichen, welche in jedem Resonator anfallen, u.a. durch Absorption und Streuung, Beugungsverluste, sowie durch die Auskopplung. Als einfaches Modell für die Verluste können wir annehmen dass bei jedem Umlauf im Resonator ein konstanter Anteil $-\Delta_L$ des Lichtes verloren geht. Pro Umlauf ändert sich dann die Intensität insgesamt um

$$\Delta I = I [\kappa d (N_e - N_g) - \Delta_L] ,$$

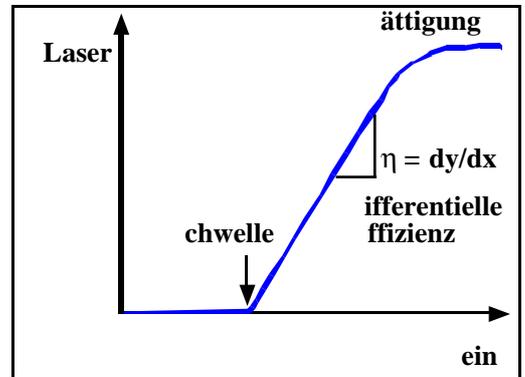
wobei d die Länge des aktiven Mediums darstellt. Verstärkung tritt demnach auf wenn

$$(N_e - N_g) > \Delta_L / (\kappa d) .$$

Positive Verstärkung führt zu einem exponentiellen Wachstum der Laserintensität solange die hier verwendeten Parameter konstant sind. Allerdings wurde hier nicht berücksichtigt dass die Populationen von Grund- und angeregtem Zustand durch die induzierten Übergänge auch von der Lichtintensität abhängen. Das Wachstum der Lichtintensität wird deshalb gestoppt wenn die Populationsinversion $(N_e - N_g)$ zu klein wird.

Dieses wird dann gestoppt wenn der Pumpprozess die Inversion nicht mehr aufrecht erhalten kann. Dies kann durch die Pumpquelle bestimmt sein, welche eine endliche Leistung besitzt; es kann aber auch durch das Medium bestimmt werden: Da nur ein Teil der Pumpenergie in der Form von Laserlicht wieder auf dem Medium austritt wird bei jedem Laserprozess im aktiven Medium auch Energie frei, was zu einer Erwärmung führt. Die erreichbare Leistung ist deshalb häufig dadurch limitiert dass man das aktive Medium nicht mehr stärker pumpen darf ohne Schäden zu erzeugen.

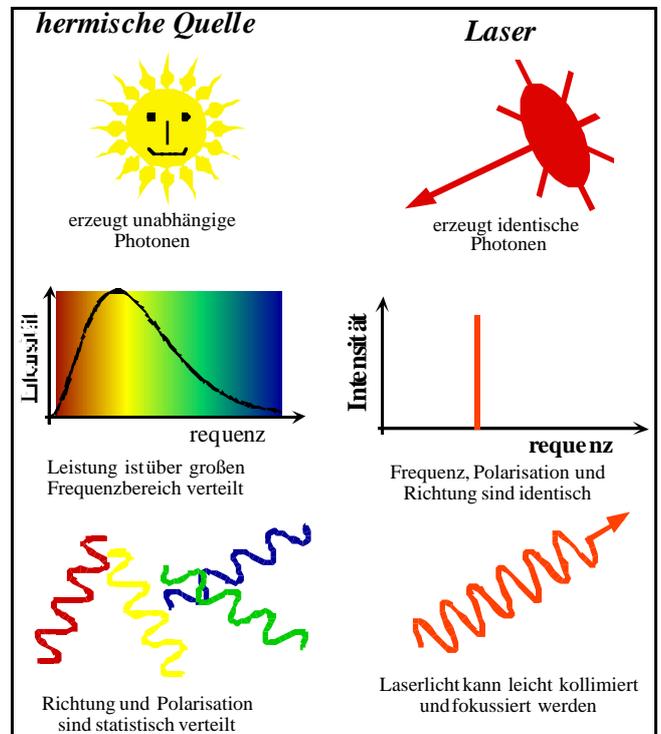
Eine typische Eingangs - Ausgangsleistungskurve enthält einen Bereich unterhalb der Laserschwelle, einen Bereich konstanter differentieller Effizienz und einen Bereich der Sättigung, wo die Ausgangsleistung kaum oder gar nicht mehr zunimmt.



2.1.3 Eigenschaften von Laserlicht

Während auch eine Lampe ein intensives Lichtfeld erzeugen kann, sind im Falle eines Wärmestrahlers die einzelnen Photonen unabhängig voneinander, während im Laser im Idealfall alle identisch sind. Die stellt den wichtigsten Unterschied zwischen einer klassischen Lichtquelle und einem Laser dar. Man kann dies auf verschiedene Weise ausnutzen.

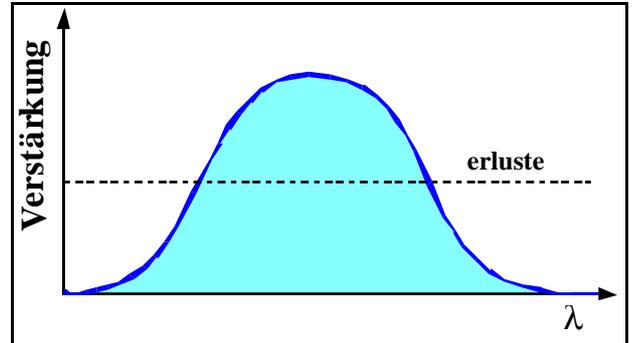
Das Phänomen wird allgemein als Kohärenz bezeichnet; damit bezeichnet man wohldefinierte Phasenbeziehungen. Fixe Phasen gibt es im Laserlicht zwischen einzelnen Punkten im Raum (räumliche Kohärenz) und zwischen unterschiedlichen Zeiten (zeitliche Kohärenz). Die zeitliche Kohärenz sagt im wesentlichen dass das Laserfeld sehr monochromatisch ist, d.h. ein schmales Frequenzspektrum aufweist. Die räumliche Kohärenz ermöglicht Messungen, bei denen die Interferenz von unterschiedlichen Lichtfeldern genutzt wird. Dazu gehört u.a. auch die Fokussierung oder Kollimierung eines Laserstrahls.



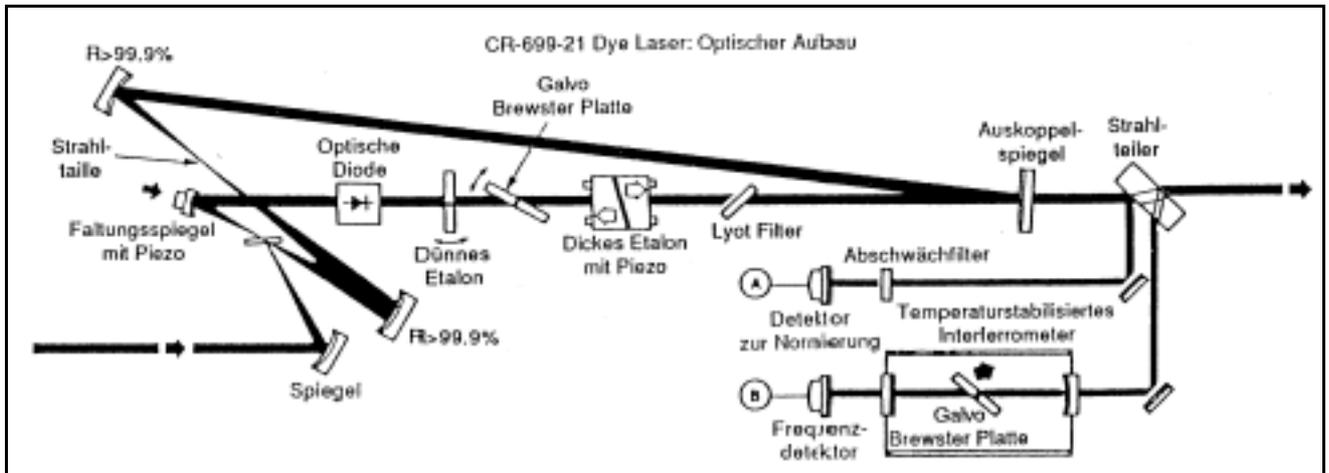
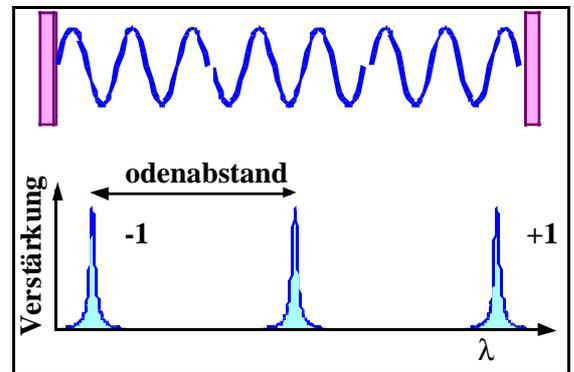
2.2 Lasertypen

2.2.1 Schmalbandige Laser

Jedes aktive Medium eines Lasers besitzt eine gewisse Bandbreite, über welches es verstärken kann. Man bezeichnet dies als die Verstärkungsbandbreite. In vielen Fällen will man aber möglichst schmalbandiges Licht erzeugen. Dann ist es nötig, die Bandbreite einzuschränken. Ein erster Schritt dazu ist automatisch gegeben durch die Struktur des Laserresonators.



Aufgrund der Randbedingungen (z.B. Knoten an den Spiegeln) besitzt jeder Resonator bestimmte Moden. Der wichtigste Resonatortyp besitzt die gleichen Moden wie der Fabry-Perot Resonator (bekannt aus PIII). Normalerweise gibt es viele Moden innerhalb der Verstärkungsbandbreite. Wenn man den Laser so optimieren will, daß er nur auf einer dieser Moden arbeitet und damit möglichst schmalbandiges Licht erzeugt, muß man weitere frequenzselektive Elemente in der Resonator bringen. Damit kann man erreichen, daß alle Photonen, welche vom aktiven Medium emittiert werden, in die gleiche Mode des Resonators emittiert werden. Im Idealfall haben sie somit alle die gleiche Frequenz.

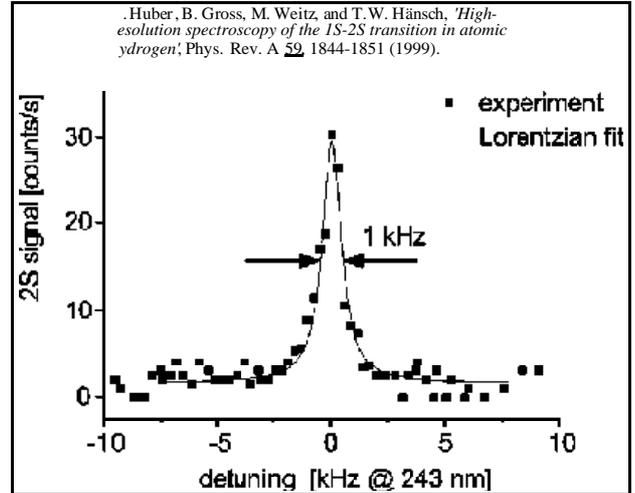


Der Resonator sieht in einem solchen System deshalb häufig sehr viel komplexer aus als auf dem einfachen Schema. In diesem Beispiel ist ein Ring-Farbstofflaser der Firma Coherent dargestellt. Als aktives Medium dient ein Farbstoffstrahl; die optische Diode sorgt dafür dass Licht nur in eine Richtung läuft. Galvo, Etalons und Lyot Filter dienen zur Frequenz-Selektion.

Heute erreichbar sind in kommerziellen Systemen Linienbreiten im Bereich von ca. 1 MHz. In unserem Labor läuft ein System, dessen Linienbreite im Bereich von einigen kHz

liegt, und Spezialsysteme erreichen Werte unterhalb von 1 Hz. Diese Werte müssen verglichen werden mit der Frequenz des Lichtfeldes von etwas weniger als 10^{15} Hz.

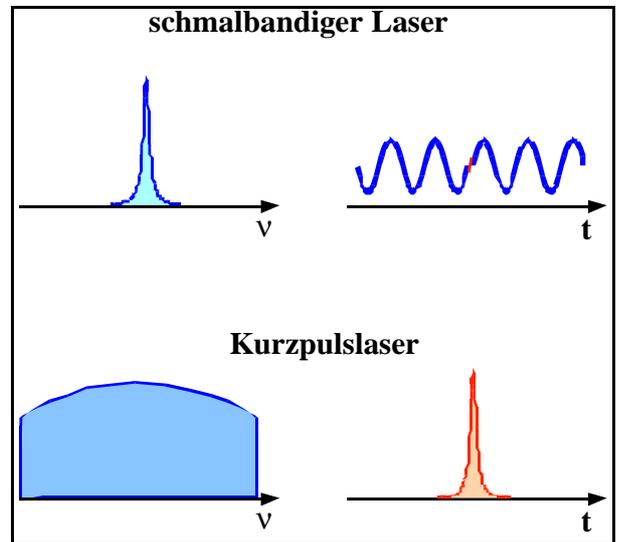
In diesem Beispiel wurde ein schmalbandiger Laser verwendet um den 1S-2S Übergang des Wasserstoffatoms zu vermessen. Der Übergang ist besonders interessant weil er sich theoretisch recht gut berechnen lässt und über eine präzise Messung einige Naturkonstanten wie z.B. die Rydbergkonstante, den Lamb-shift oder die Feinstrukturkopplungskonstante α bestimmt werden können.



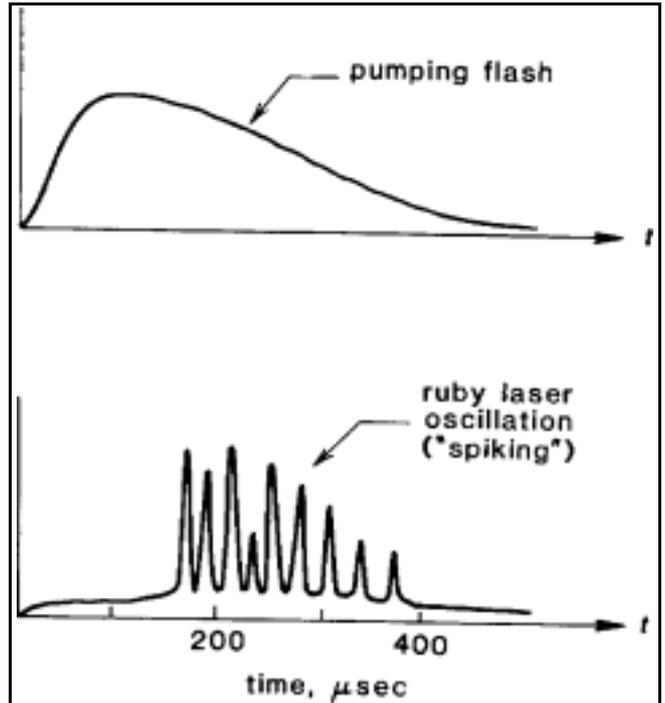
2.2.2 Pulslaser

In anderen Fällen möchte man möglichst kurze Laserpulse erzeugen. Dies erlaubt einerseits hohe Spitzenleistungen, andererseits gibt dies die Möglichkeit, schnelle Phänomene zu untersuchen. Mit Laborsystemen ("table-top") kann man heute Leistungen von einigen Terawatt (10^{12} W) erreichen, während einzelne Lasersysteme bis in den Petawatt Bereich (10^{15} W) vorstoßen. Hier bemüht man sich also, dafür zu sorgen, daß alle Photonen zur gleichen Zeit erzeugt werden. In der Praxis wichtiger ist wohl die Möglichkeit, schnelle Prozesse im Bereich von einigen fsec zu untersuchen.

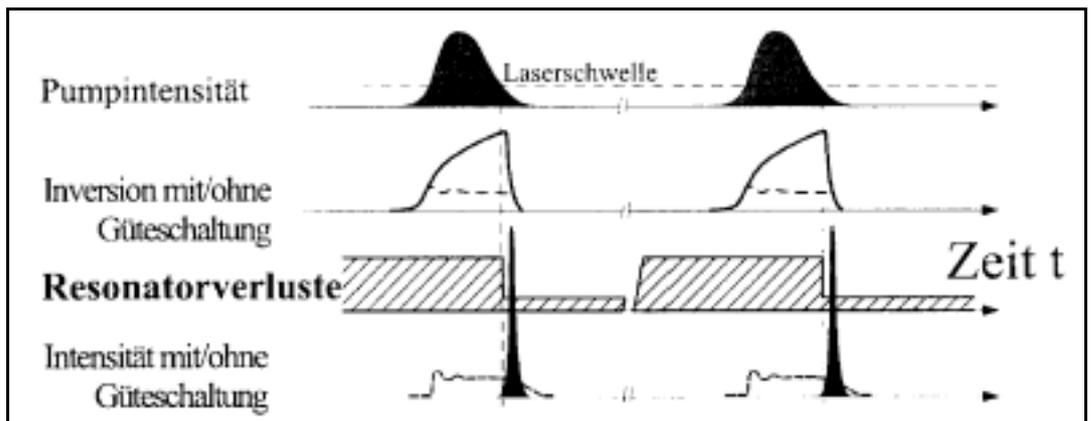
Bei einem schmalbandigen Laser bedingt eine schmale Verteilung im Frequenzraum eine kontinuierliche Operation: das Feld muss eine große Verteilung im Zeitraum (dem Fourier-transformierten Raum) aufweisen. Bei einem Kurzpulslaser hat man umgekehrt eine schmale Verteilung im Zeitraum. Aus den Eigenschaften der Fouriertransformation ist somit klar dass die Verteilung im Frequenzraum breit sein muss ($\Delta\nu \Delta t > 1$). Ein Puls von 10 fsec Dauer bedingt eine Frequenz-Unschärfe von 10^{-14} sec und damit bei einer Wellenlänge von 800 nm etwa ein 200 nm breites Spektrum. Damit Licht mit einem so breiten Spektrum erzeugt werden kann muss das aktive Medium ein entsprechend breites Verstärkungsprofil besitzen.



Die einfachste Möglichkeit, kurze Pulse zu erzeugen, ist die Verwendung kurzer Pump-pulse. Das klassische Beispiel dafür ist ein Blitzlampen-gepumpter Rubinlaser. Damit erhält man Pulse mit hoher Energie; allerdings sind sie nicht besonders kurz und die Pulsform ist sehr unregelmäßig.



Eine Verbesserung erhält man indem man die Verluste des Resonator moduliert, z.B. indem man einen schnell schaltbaren Absorber in den Resonator einbaut. Solange der Pump-Puls

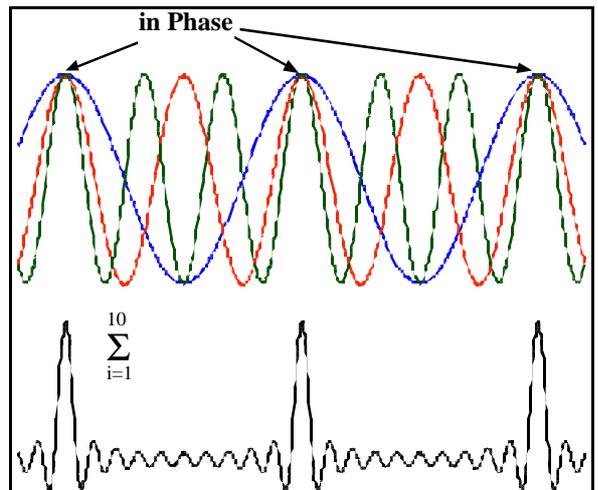


dauert werden die Resonatorverluste hoch gehalten um damit zu verhindern dass der Laser die Schwelle überschreitet und die Populationsinversion abbaut. Am Ende des Pump-pulses, wenn die Inversion ihren Maximalwert erreicht hat, werden die Resonatorverluste ausgeschaltet. Aufgrund der jetzt sehr hohen Verstärkung kann die Laserintensität sehr schnell ansteigen, so dass eine hohe Spitzenleistung erreicht und ein kurzer Puls wird. Diese Technik wird als "Güteschaltung" oder "Q-switching" bezeichnet. Damit können Pulse von einigen J Energie und einigen nsec Länge erzeugt werden.

Dies ist allerdings nur möglich wenn der Resonator sehr klein gehalten wird: Da der Auskoppelspiegel jeweils nur einen Teil des Lichtes auskoppelt muss der Puls mehrmals im Resonator umlaufen bevor er ihn ganz verlassen kann. Mit einigen nsec Dauer hat man damit eine Grenze erreicht, welche u.a. durch die Größe des Resonators limitiert ist. Man kann dies auch im Frequenzraum ausdrücken: ein kürzerer Puls würde eine breitere Resonatormode benötigen.

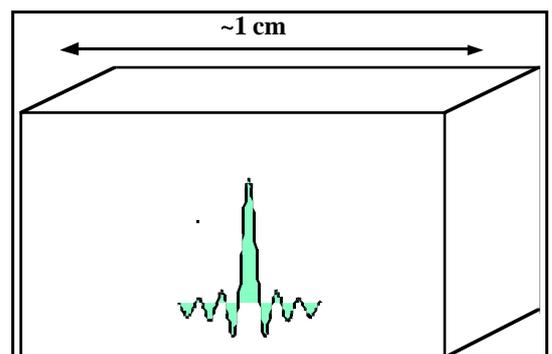
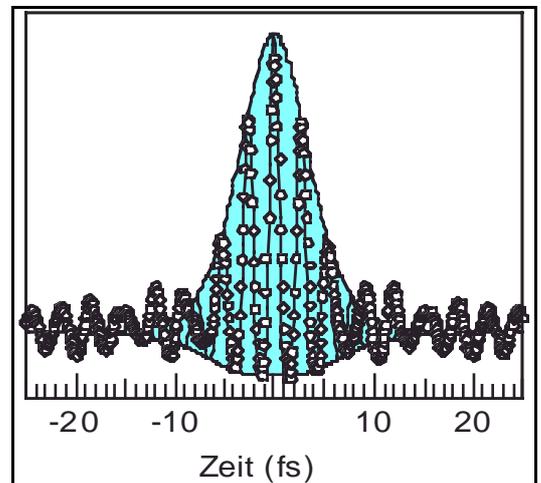
2.2.3 Modenkopplung

Noch kürzere Pulse erhält man mit Hilfe der Modenkopplung: wenn die verschiedenen Moden des Resonators phasenstarr aneinander gekoppelt sind addieren sie sich so, dass das Feld meistens verschwindet; lediglich für eine sehr kurze Zeit enthält man ein endliches Feld, einen kurzen Puls. In einem typischen Laser hat man bis zu einer Million Moden zur Verfügung (Modenabstand $\sim 10^8$ Hz, Bandbreite $\sim 10^{14}$ Hz) und kann damit eine sehr kurze Pulse erreichen.



Die Grenze liegt heute Werte im Bereich von etwa 5 fsec. In diesem Fall enthält der Puls nur noch etwa 5 Oszillationen. Dargestellt ist die Autokorrelationsfunktion, welche direkt gemessen werden kann. Der eigentliche Puls ist noch etwas kürzer.

Experimentell bestimmt man die Länge eines solchen Punktes über seine räumliche Ausdehnung. Diese beträgt für einen Puls von einigen fsec nur noch wenige μm . Man muss sich einen solchen Laserpuls somit eher als eine "Lichtscheibe" vorstellen als einen Lichtstrahl. Ein solcher Laserpuls muß offenbar anders diskutiert werden als ein kontinuierlicher Laserstrahl. Insbesondere kann man einen solchen Puls nicht einer einzelnen Mode des Laserresonators zuordnen. Die Pulse können besser im Zeitbereich als im Frequenzbereich beschrieben werden. In einem modengekoppelten Laser läuft ein einzelner Laserpuls um, von dem mit einer fixen Wiederholrate ein Teil ausgekoppelt wird. Somit haben die einzelnen Pulse einer solchen Pulsfolge eine fixe Wiederholrate und eine feste Phasenbeziehung.

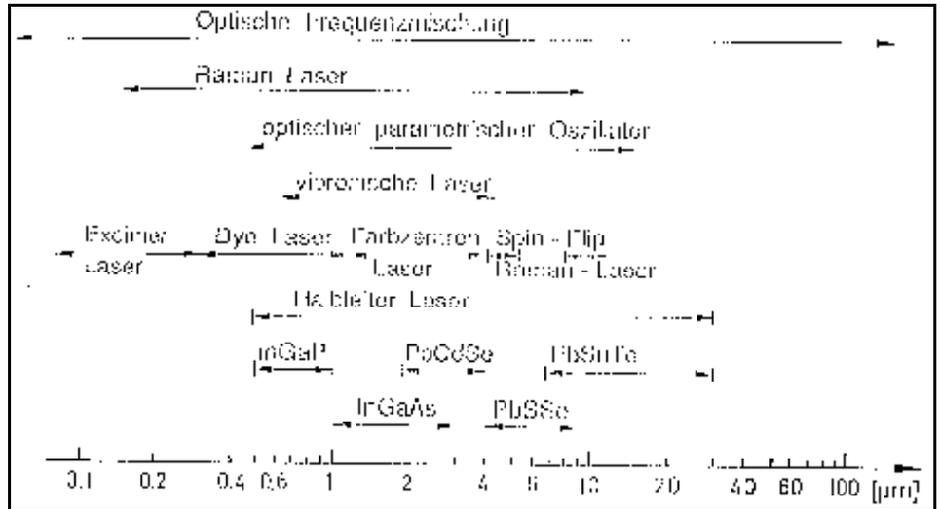


Die spektrale Breite des Lasers sollte hier im idealen Fall nur durch das aktive Medium begrenzt werden, d.h. der Resonator sollte möglichst breitbandig sein. Dies stellt insbesondere an die Spiegel einen großen Anspruch, da diese ja gleichzeitig eine hohe Reflektivität aufweisen müssen.

2.3 Lasermedien

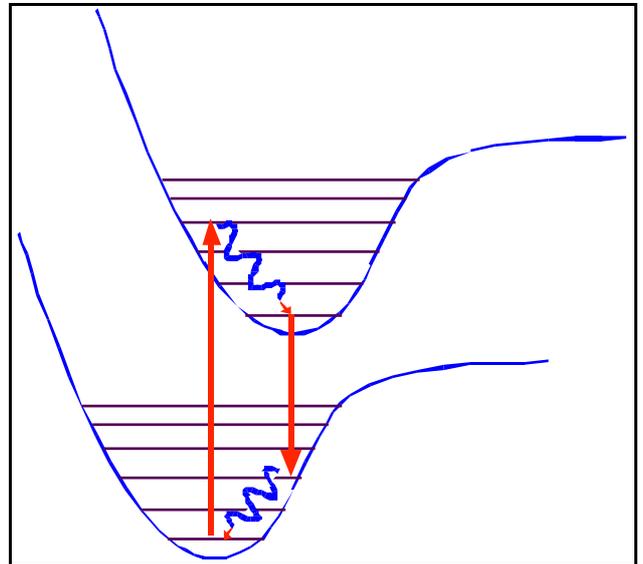
Eine weitere Unterscheidung von Lasertypen besteht in der Art des aktiven Mediums. Da jedes dieser Medien nur einen gewissen Parameterbereich abdeckt, bezüglich Leistung, Kohärenz, Wellenlängenbereich etc., existiert kein "ideales" Medium, sondern man muß je nach Anwendung das geeignete Medium auswählen.

Ein wesentliches Kriterium für die Wahl eines Lasermediums ist der Wellenlängenbereich, der damit abgedeckt werden kann. Weiterhin spielen aber auch die Pulsdauer, Leistung, verfügbare Pumpquelle, etc. eine wichtige Rolle. In allen Fällen besteht die Notwendigkeit, eine Besetzungsinversion zu erzeugen. Die wichtigsten Medien sollen im folgenden kurz diskutiert werden.

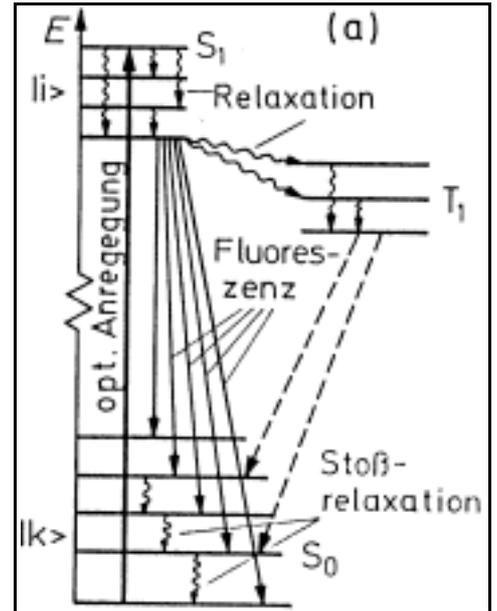


2.3.1 Farbstoffe

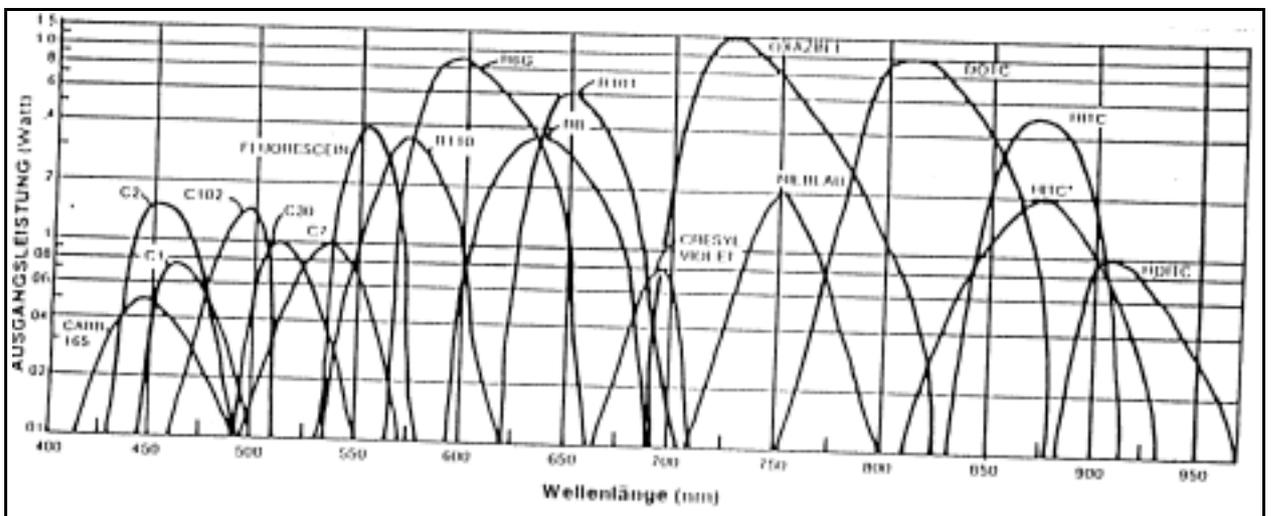
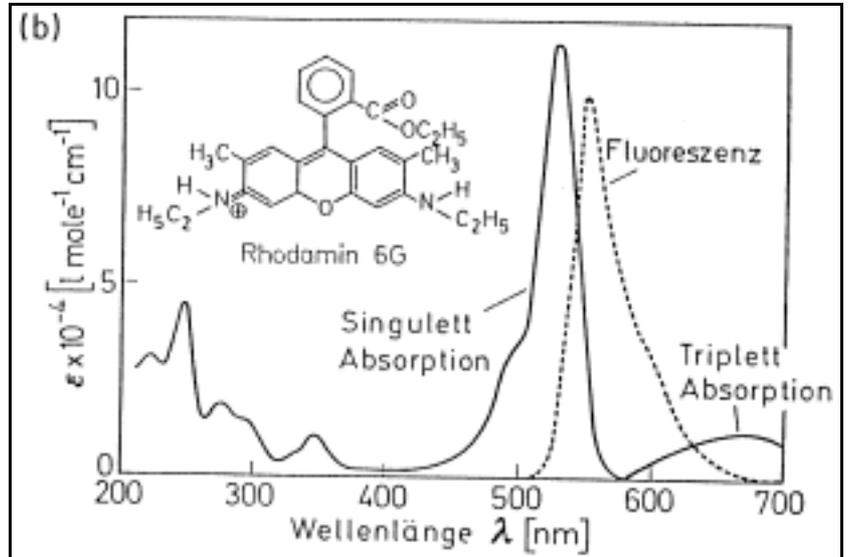
Das Erzeugen einer Besetzungsinversion kann z.B. molekulare Zustände verwenden. Man verwendet hier meist ein sog. 4-Niveausystem: Man pumpt den Übergang von einem Grundzustand in einen angeregten Zustand, welcher z.B. ein elektronisch und vibratorisch angeregter Zustand sein kann. Relaxation des Vibrations-Freiheitsgrades bringt das Molekül in einen Zustand, der nur noch elektronisch angeregt ist. Der eigentliche Laserübergang findet von diesem Zustand in einen vibratorisch angeregten Zustand des elektronischen Grundzustandes statt. Dieser muß anschließend schnell entvölkert werden, damit die Populationsinversion erhalten bleibt. Wichtige Beispiele für molekulare Systeme sind Farbstofflaser, bei denen das Farbstoffmolekül in einer Flüssigkeit gelöst ist. Sie bieten einen breiten Abstimmbereich für Dauerstrichlaser und die Möglichkeit, kurze Pulse zu erzeugen.



Bei molekularen Lasermedien nutzt man Übergänge zwischen Zuständen, welche sich sowohl durch elektronische als auch durch vibratorische Quantenzahlen unterscheiden. Der obere Zustand des Pumpübergangs sowie der untere Zustand des Laserübergangs sind vibratorisch angeregt. Populationsinversion kann in solchen Systemen relativ leicht erreicht werden weil die Schwingungsrelaxation, d.h. die Reduktion der vibratorischen Anregung auf null, in Flüssigkeiten meist sehr schnell ist. Pumpet man in einen elektronisch angeregten Zustand, so relaxieren die Moleküle sehr schnell in den vibratorischen Grundzustand. Der untere Zustand des Laserübergangs ist ein vibratorisch angeregter Zustand des elektronischen Grundzustandes und wird deshalb auch sehr schnell durch Vibrationsrelaxation (induziert durch Stöße) entleert.



Dabei handelt es sich typischerweise um aromatische Moleküle. Hier ist die Struktur eines der beliebtesten Farbstoffmoleküle dargestellt: Rhodamin 6G. Der Chromophor, d.h. der Bereich des Moleküls, welcher für die Absorption und Emission verantwortlich ist, wird durch den aromatischen Bereich bestimmt. Man pumpt im Bereich der Singulett Absorption, z.B. mit einer Wellenlänge von 514 nm (Ar-Ionen Laser). Für die Emission ist die Stokes-verschobene Fluoreszenzlinie relevant, wobei der Bereich, der stark mit der Absorptionskurve überlappt, nicht nutzbar ist.



Es steht eine große Auswahl an Laserfarbstoffen zur Verfügung, mit denen sowohl für gepulste wie auch für Dauerstrichlaser ein relativ großer Wellenlängenbereich abgedeckt werden kann. Ein Molekül kann typischerweise über einen Wellenlängenbereich von etwa 50 nm verwendet werden. Aufgrund des großen Bereiches über den Verstärkung verfügbar ist kann jeder Farbstofflaser über einen relativ breiten Wellenlängenbereich abgestimmt werden und die Bandbreite ermöglicht relativ kurze Pulse.

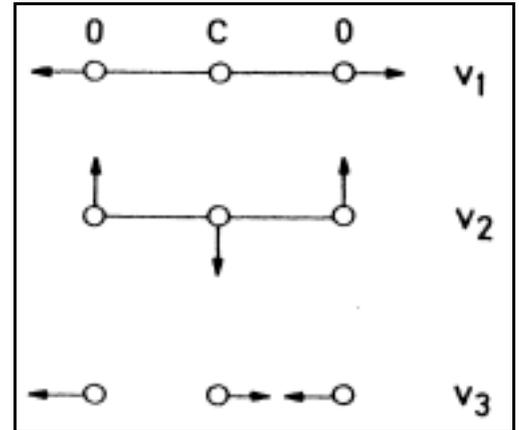
Tabelle 5.3. Farbstofflaserdaten bei verschiedenen Pumpquellen

Pumpe	Abstimm- bereich [nm]	Puls- dauer [ns]	Spitzen- leistung [W]	Puls- energie [mJ]	Pulsfolge- frequenz [s ⁻¹]	Mittlere Ausgangs- leistung [W]
Exzimer- Laser	370-985	10-200	≤10 ⁷	≤ 300	20-200	0.1-10
N ₂ -Laser	370-1020	1-10	<10 ⁵	<1	<10 ³	0.01-0.1
Blitz- lampen	300-800	300-10000	10 ³ -10 ⁴	<5000	1-100	0.1-200
Ar ⁺ Laser Kr ⁺ Laser	400-1100	cw	cw	-	cw	0.1-5
Nd:YAG- Laser λ/2:530nm λ/3:355nm	400-920	10-20	10 ⁵ -10 ⁷	10-100	10-30	0.1-1
Kupfer dampf- laser	530-890	30-50	≈10 ⁴ -10 ⁵	≈1 mJ	≤10 ⁴	≤10

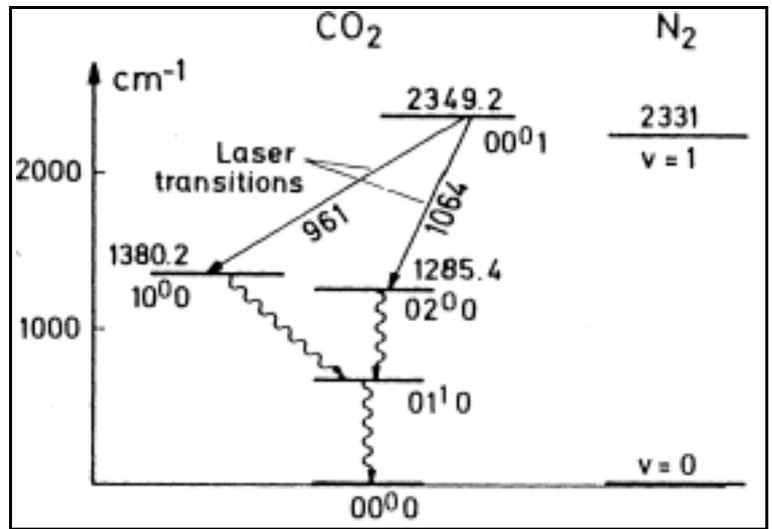
Der große Nachteil von Farbstofflasern ist dass sie meist mit einem Laser gepumpt werden müssen. Die Pump-Wellenlänge ändert auch mit dem Molekül, der Bereich, in dem gepumpt werden kann, ist jedoch meist mindestens so breit wie der Verstärkungs-
bereich.

2.3.2 Gaslaser

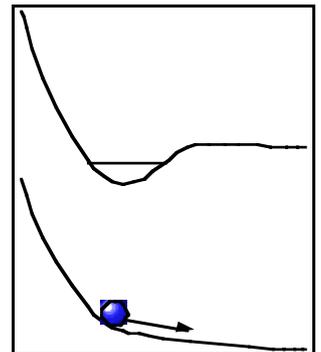
Molekulare Medien werden auch in gasförmigem Zustand verwendet. Das klassische Beispiel dafür ist der **CO₂-Laser**, bei dem Molekülschwingungen des CO₂-Moleküls verwendet werden.



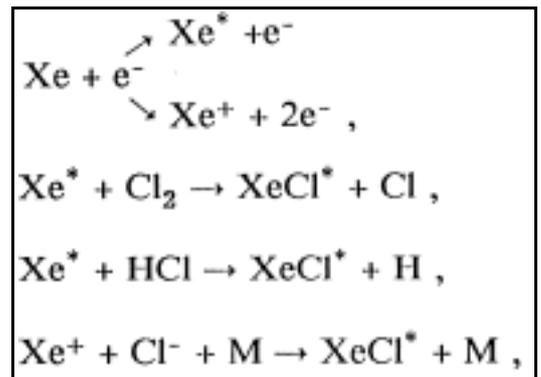
Die Schwingungen werden indirekt angeregt, indem zunächst Stickstoffmoleküle über Elektronenstoß angeregt werden. Von diesen wird die Anregung durch Stöße auf die CO₂ Moleküle übertragen. Damit können sehr hohe Leistungen erreicht werden, welche im industriellen Bereich z.B. für Schweißanlagen verwendet werden. Die Wellenlängen liegen im Infraroten. Die erreichbaren Wellenlängen sind diskret, d.h. ein CO₂ Laser ist nicht oder fast nicht abstimmbar.



Ein anderes Beispiel ist der **Excimerlaser**. Der Name ist eine Abkürzung für "excited dimer", also ein angeregtes Dimer. Dabei handelt es sich um Moleküle, die nur im angeregten Zustand existieren, während der elektronische Grundzustand schnell dissoziiert und so die Entvölkerung des niedrig liegenden Laserniveaus sicherstellt.



Ein typisches Beispiel einer Excimer Mischung enthält Xenon, Cl₂ und HCl Gas. Über mehrere Pfade kann in diesem Gemisch durch Elektronenstoß angeregtes XeCl* entstehen. Dieses kann als oberer Zustand des Laserübergangs dienen.



Durch unterschiedliche Kombinationen eines Edelgases mit einem Halogenatom können unterschiedliche Excimer-Moleküle erzeugt werden, welche Übergänge im Ultravioletten Bereich des Spektrums besitzen. Excimerlaser werden immer gepulst betrieben und werden u.a. für die Augen-

Tabelle 5.4. Charakteristische Daten einiger Exzimerlaser

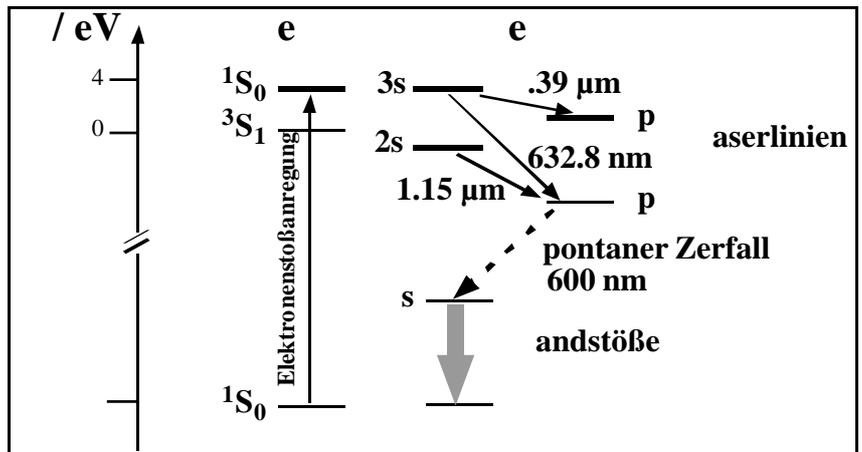
Lasermedium	F ₂	ArF	KrCl	KrF	XeCl	XeF
Wellenlänge [nm]	157	193	222	248	308	357
Pulsenergie [mJ]	15	≤500	≤60	≤1000	≤500	200

Pulsbreiten: 10-200ns
 Repetitionsraten: 1-200 Hz je nach Ausstattung
 Strahldivergenz: 1×3 mrad
 Schwankung der Pulsenergie von Pulse zu Puls: 3-10%
 Zeitjitter: ≈ 1-3 ns

chirurgie eingesetzt oder für die Chipherstellung. Excimerlaser haben die kürzeste Wellenlänge von Laborlasern. Allerdings ist die Strahlqualität sehr schlecht, d.h. die räumliche Kohärenz ist gering, so dass der Strahl nur begrenzt fokussierbar ist.

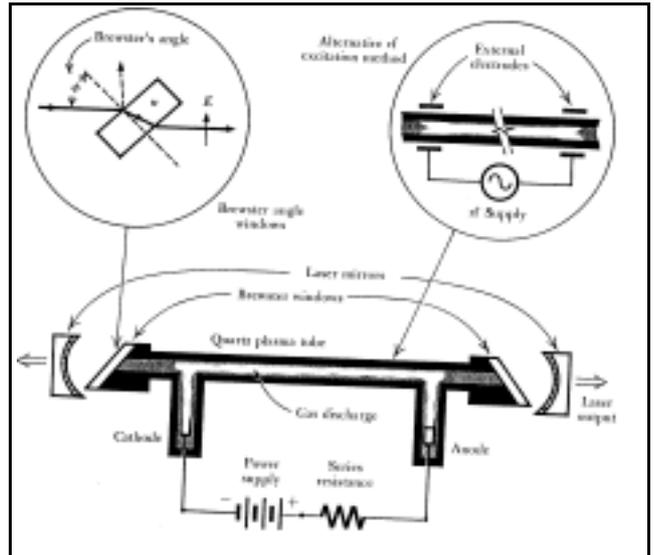
Analog können auch Atome durch Elektronenstrahl angeregt werden, wie z.B. in einem **HeNe**-Laser.

Dieser Lasertyp dürfte vielen schon aus der Mittelschule, aus der Vorlesung oder aus dem Praktikum bekannt sein; man regt hierbei He Atome durch Elektronenstoß an. Diese übertragen die Energie anschließend auf Ne Atome, und diese stellen das eigentliche aktive Medium dar.



HeNe Laser sind auch gut geeignet für die Diskussion von grundsätzlichen Aspekten, da sie relativ einfach aufgebaut sind. Das Rohr, in dem die Plasma-Entladung stattfindet, muss relativ lang sein um genügend hohe Verstärkung zu erhalten. Außerdem muss der Querschnitt relativ gering sein, damit genügend Stöße der Atome mit der Wand stattfinden. Die Austrittsfenster sind im Brewsterwinkel montiert um die Reflexionsverluste klein zu halten.

Ähnlich funktioniert der Ar-Ionenlaser. Dieser emittiert im sichtbaren und ultravioleten Teil des Spektrums.



2.3.3 Festkörperlaser

Der Rubinlaser war der erste Laser überhaupt. Er wurde von einer Blitzlampe gepumpt, d.h. hier stellte Licht die Pumpenergie zur Verfügung.

Einer der wichtigsten Lasertypen heute ist der Nd:YAG Laser: Der Laserübergang geschieht hier zwischen zwei elektronischen Zuständen des atomaren Ions Pr, welches in einer Matrix aus Yttrium-Aluminium-Garnet eingebettet ist. Da die atomaren Übergänge in diesem Fall relativ schmal sind ist dieser Lasertyp praktisch ein Festfrequenzlaser. Nd:YAG wird praktisch nur bei $1.064 \mu\text{m}$ verwendet, oder bei der zweiten Harmonischen (532 nm , grün).

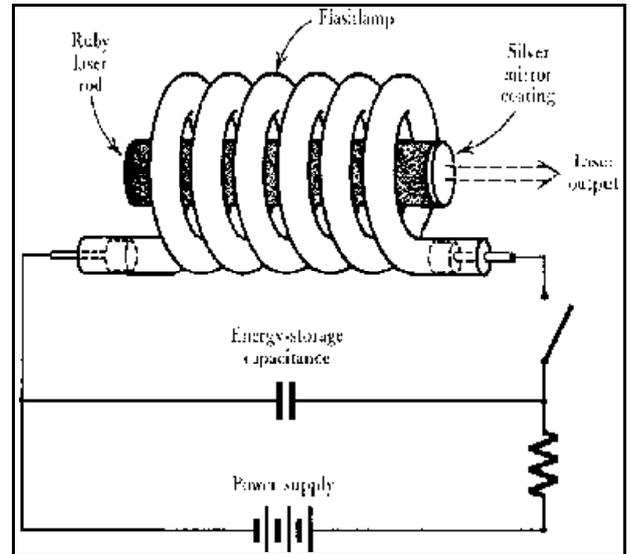
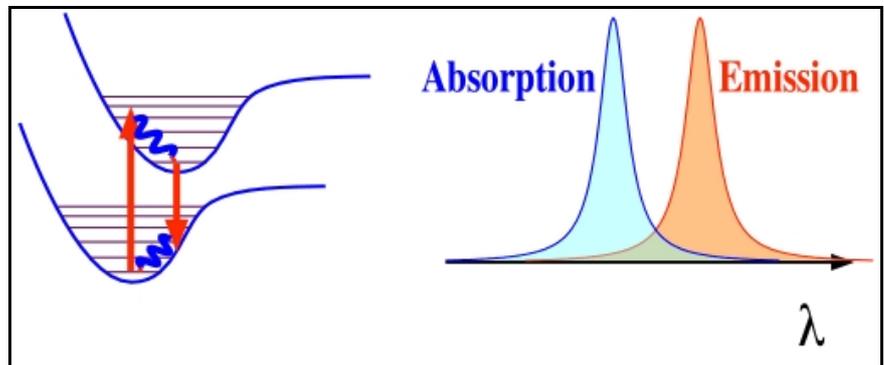


Tabelle 5.2. Charakteristische Daten einiger durchstimmbarer Festkörperlaser

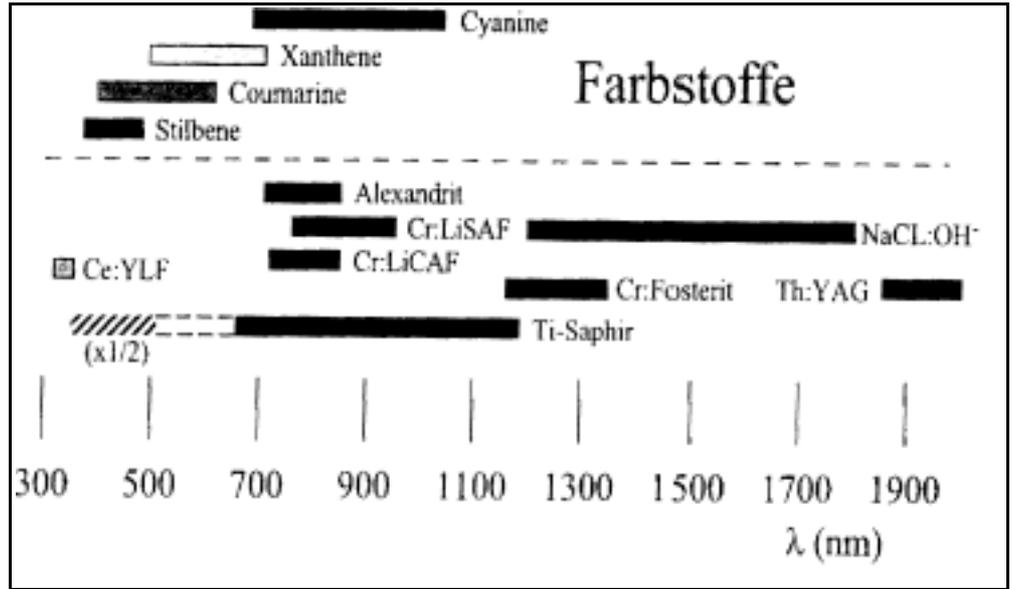
Laser-medium	Formel	Abstimm-bereich [nm]	Betriebs-temperatur	Pumpquelle
Ti:Saphir	$\text{Al}_2\text{O}_3:\text{Ti}^{3+}$	660-986	RT	Ar \pm Laser
Alexandrit	$\text{BeAl}_2\text{O}_4:\text{Cr}^{3+}$	710-820	22-300°C	Blitzlampe
	$\text{SrAlF}_5:\text{Cr}^{3+}$	720-842	RT	Kr \pm Laser
	$\text{KznF}_3:\text{Co}^{2+}$	825-1010	RT	Kr \pm Laser
		1650-2070	77K	cw Nd:Y Laser
F_2^+ F-zentren	NaCl/OH^-	1400-1750	77K	cw Nd:YAG-Laser
F_A II "	$\text{RbCl}:\text{Li}$	2,6-3,3 μm	77K	Kr $^+$ -Laser
F_2^+ A "	$\text{Kl}:\text{Li}$	2,38-3,99 μm	77K	Er:YLF-Laser
F_3^+ "	LiF	500-640nm	77K	Farbstofflaser

Gerade auf dem Gebiet der Festkörperlaser hat in den letzten Jahren ein erheblicher Entwicklungsschub stattgefunden und es wurden neue Lasermaterialien entwickelt, die ein relativ breites Verstärkungsprofil aufweisen. Ein besonders wichtiges Material ist Ti:Saphir, bei dem Ti-Ionen in einer Saphir (=Al₂O₃) Matrix eingebettet sind.

Die Absorption dieses Materials ist gegenüber der Emissionswellenlänge um mehrere 100 nm verschoben, weil die Minima des Grund- und angeregten Zustandes bei unterschiedlichen Kernkoordinaten liegen.



Da das Medium selber in diesem Fall einen breiten Wellenlängenbereich abdeckt, kann diese Art von Lasern von etwa 700 bis 950 nm betrieben werden. Wie im Falle des Farbstofflasers wird die Frequenz durch den Resonator festgelegt. Das gleiche Material ist aber auch eine ideale Basis für einen Kurzpulslaser, da seine große Bandbreite kurze Pulse ermöglicht.



Eine Gruppe von Materialien liefert ähnliches Verhalten in unterschiedlichen Wellenlängenbereichen.

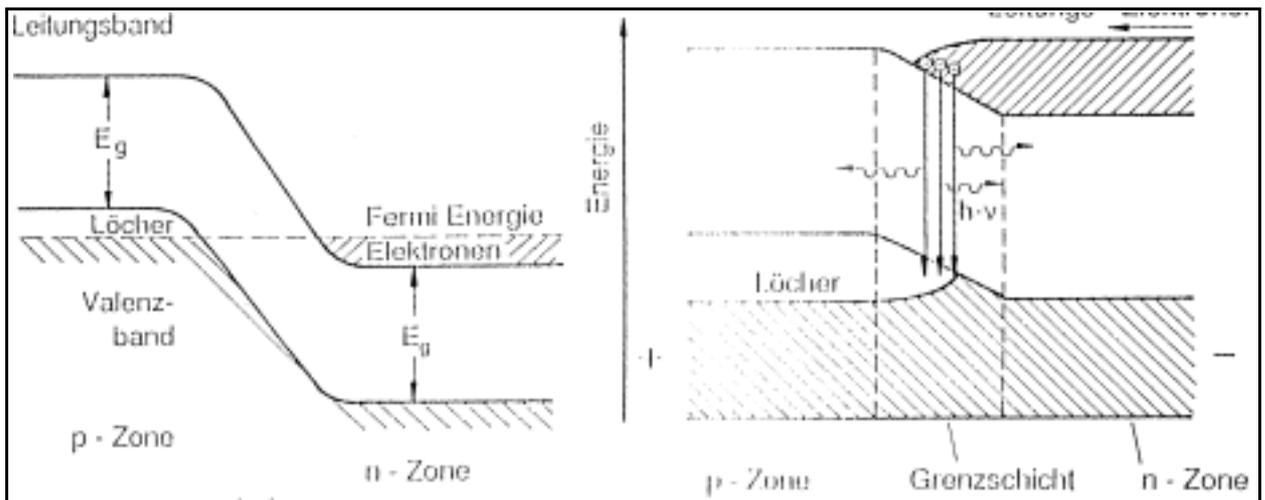
Eine weitere Klasse von Festkörperlasern sind die Farbzentrenlaser. Die aktiven Zentren sind hier Defekte in Alkali-Halogenid Kristallen, wie z.B. Kochsalz. Diese emittieren im Infraroten. Sie sind für diesen Wellenlängenbereich relativ attraktiv, da sie auch durchstimbar sind. Allerdings müssen sie bei tiefen Temperaturen betrieben werden.

Festkörperlaser bieten gegenüber Farbstofflasern den Vorteil, daß sie weniger wartungsintensiv sind und höhere Ausgangsleistungen erlauben.

2.3.4 Halbleiterlaser

Alle bisher diskutierten Lasermedien sind lokalisierte Zentren wie Atome, Ionen oder Moleküle. Der heute wichtigste Laser ist aber der Halbleiterlaser. Sie werden nicht nur in Laserpointern und CD-Spielern eingesetzt, sondern auch in der Forschung immer stärker genutzt. Hier sind die Elektronen delokalisiert, also in ihren Bändern frei beweglich. Licht wird in diesem Fall durch Rekombination, also durch gegenseitige Annihilation von Elektronen im Leitungsband und Löchern im Valenzband erzeugt.

Hier wird die Besetzungsinversion zwischen dem Valenz- und Leitungsband eines Halbleiters erzeugt, indem man in einen p/n Übergang Ladungsträger injiziert.

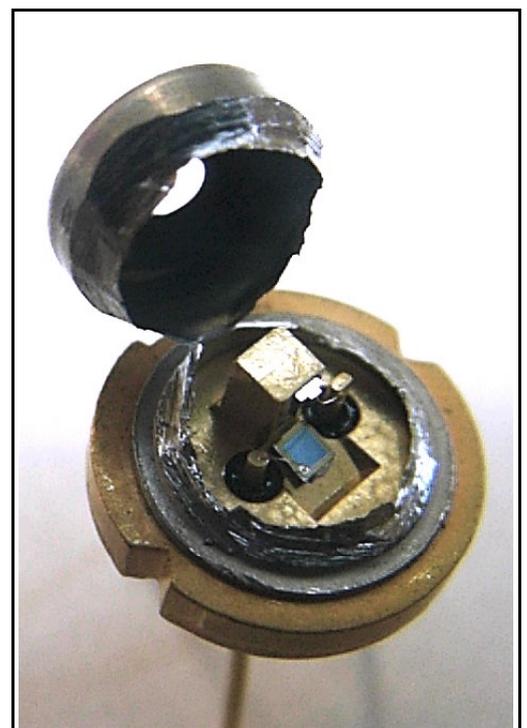


Man braucht dazu lediglich durch die Diode in Vorwärtsrichtung einen Strom zu leiten. Im Bereich des p/n Übergangs besteht dann eine Inversion. Die Wellenlänge der Emission kann über die Bandlücke des Materials eingestellt werden. Halbleiterlaser können mit den meisten direkten Halbleitern hergestellt werden. Indirekte Halbleiter, wie z.B. Silizium, sind hingegen zu wenig effizient. Die wichtigsten Basismaterialien im sichtbaren sind GaAs, AlGaAs, InGaAs und weitere III/V Verbindungen. Für kürzere Wellenlängen bis ca. 400 nm werden gegenwärtig II/VI Materialien entwickelt. Für längere Wellenlängen sind vor allem Bleiverbindungen im Einsatz, die allerdings teilweise auch gekühlt werden müssen. Es gibt aber auch neuere Systeme, die auf GaAs basieren, das so strukturiert ist, daß die Bandlücke "unterteilt" wird und damit Photonen mit niedrigerer Energie erzeugt werden. Im Vergleich zu anderen Lasermaterialien haben Halbleiter eine sehr hohe Verstärkung: Über eine Distanz von wenigen 100 μm werden Verstärkungsfaktoren von bis zu zwei erreicht. Deshalb müssen Laserdioden nicht entspiegelt werden: die reflektierte Leistung an der Facete des Kristalles reicht aus um genügend Leistung im Resonator aufzubauen.

Halbleiterlaser haben verschiedene attraktive Vorteile:

- sie können in großen Mengen hergestellt werden (Chipproduktion)
- sie sind sehr kompakt (typische Dimensionen $5\mu\text{m} \times 20\mu\text{m} \times 100\mu\text{m}$)
- sie sind sehr effizient: Bis zu 50% der elektrischen Energie kann in Licht umgewandelt werden. Halbleiterlaser sind somit die effizientesten Lichtquellen überhaupt.

Man kann heute Halbleiter-Lasersysteme mit mehreren kW Leistung herstellen.



2.4 Optische Frequenzmischung

Obwohl inzwischen eine große Auswahl von Lasermedien existieren ist es manchmal schwierig, eines zu finden, das genau die gewünschten Anforderungen erfüllt. Weitere Möglichkeiten bietet dann die nichtlineare Optik: bei hohen Leistungen zeigen viele Materialien nichtlineares Verhalten: wenn sie mit Licht einer gegebenen Wellenlänge gepumpt werden, strahlen sie nicht nur Licht dieser Wellenlänge, sondern auch anderer Wellenlängen ab.

Die wichtigsten Möglichkeiten der nichtlinearen Optik sind:

- Frequenzverdopplung / Erzeugung der zweiten Harmonischen: hier werden z.B. 2 Photonen addiert um eines der doppelten Frequenz zu erzeugen.
- Höhere Harmonische, insbesondere 3. Harmonische.
- Summenfrequenzerzeugung: Hier werden zwei Photonen unterschiedlicher Frequenz addiert, resp. subtrahiert (Differenzfrequenzerzeugung).
- parameterische Oszillatoren: Die entspricht dem inversen Prozess der Summenfrequenzerzeugung: ein Photon wird in zwei aufgespalten.

Allgemein werden diese Prozesse auch als 2-, resp. 3-Wellen-Mischprozesse bezeichnet. Dabei werden die einfallenden wie auch die auslaufenden Wellen gezählt. Frequenzverdopplung z.B. ist ein 3-Wellen-Mischprozess, da zwei einlaufende Photonen zu einem auslaufenden summiert werden.

Wichtig ist in all diesen Fällen, daß alle Prozesse Energie und Impuls der Photonen erhalten müssen. Dies führt zum Problem der Phasenanpassung.