

1 Grundlagen

1.1 Laserprinzip

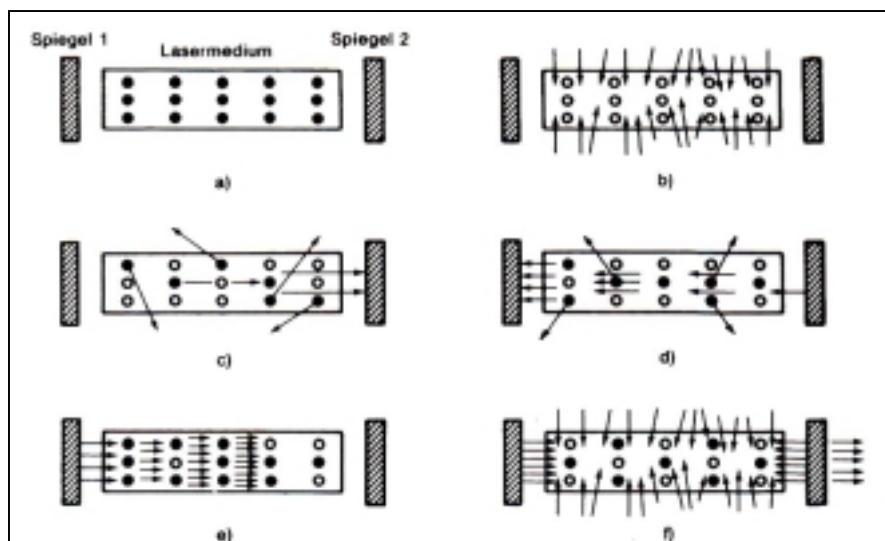
Das Grundprinzip, welches die Funktion eines LASERs (**L**ight **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation) überhaupt möglich macht, wurde bereits 1917 von Einstein vorhergesagt. Es handelt sich hierbei um sogenannte spontane und stimulierte (induzierte) Emission von Lichtwellen.

Wenn Atomen Energie (z.B. in Form von Wärmeenergie) zugeführt wird, so werden sie in einen angeregten Zustand versetzt, also ihre Elektronen vom Grundzustand (E_0) auf höhere Energieebenen (z.B. E_1 , E_2 , ...) gebracht. Da Elektronen aber dazu neigen, in einem möglichst niedrigen Energieniveau zu verweilen, geben sie die Energie spontan in Form von Lichtquanten (auch im sichtbaren Bereich) wieder ab und fallen wieder in einen niedrigeren Energiezustand zurück („Quantensprung“). Die so entstehenden Lichtwellen besitzen eine Wellenlänge, die vom Energieunterschied der Energieniveaus, zwischen denen das Elektron gewandert ist, abhängt. Wenn man das Teilchenmodell für Licht anwendet, so wird, wenn ein Elektron auf eine niedrigere Energiestufe fällt, ein Photon, dessen Energie E gleich der Differenz der Energieniveaus (z.B. $E_2 - E_1$) ist, emittiert. Mathematisch kann man diesen Vorgang mit der Formel $h \cdot f = E_2 - E_1$ ausdrücken, wobei f die Frequenz der elektromagnetischen Welle und h das Plancksche Wirkungsquantum ($6,6256 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$) ist.

Die stimulierte Emission (erzwungene Lichtaussendung) ist der spontanen sehr ähnlich. Man benötigt dafür ein stark angeregtes Medium (Anzahl der angeregten Atome $>$ Anzahl der unangeregten Atome), in dessen Atomen also eine sogenannte Besetzungsinversion (Besetzungsumkehr) herrscht. Das bedeutet, daß sich mehr Elektronen auf einem höheren Energieniveau befinden als in dem darunterliegenden, also die Umkehrung der normal vorliegenden Verhältnisse. Man schickt nun in dieses Medium ein Lichtbündel, dessen Quanten die angeregten Atome sozusagen dazu zwingen, ihren Energieüberschuß in Form von Lichtwellen abzugeben. Ein „Auslösephoton“ induziert also eine Emission und nimmt dadurch ein Photon mit, das die gleiche Energie, Richtung und Polarisation aufweist. Dieses Quant erzwingt bei einem weiteren angeregten Atom eine Lichtaussendung, sodaß das in das Medium gesandte Lichtbündel verstärkt wird. Alle Photonen schwingen im

Gleichtakt parallel in die gleiche Richtung und die Verstärkung ist proportional zur Länge des Lichtweges. Dieser Effekt funktioniert nur, wenn die Wellenlänge der auslösenden Lichtwelle der Energieniveaudifferenz des Atoms entspricht.

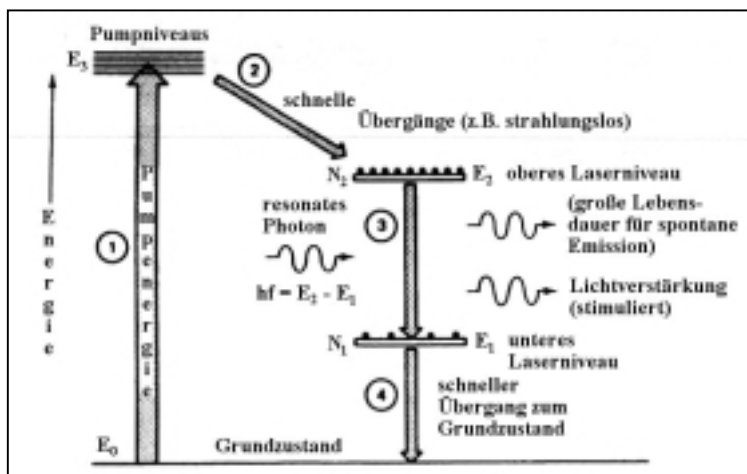
Bei einem Laser befindet sich das Medium in einem sogenannten Resonator (Oszillator) zwischen zwei Spiegeln.



Laseroszillation in einem Laserresonator (Atome im Grundzustand sind als schwarze Punkte und angeregte als Kreise dargestellt): a) Laser ohne Energiezufuhr, b) Pumpen, c) spontane und stimulierte Emission, d) Beginn der resonanten Lichtverstärkung, e) weitere Verstärkung, f) stationärer Zustand;

Die Lichtwellen werden reflektiert und es entsteht eine stehende Welle. Dabei muß der Abstand der beiden Spiegel (d) einem ganzzahligen Vielfachen ($m = 1, 2, 3, \dots$) der halben Wellenlänge ($\lambda/2$) entsprechen ($d = m * \lambda/2$). Die Dauer der Laseremission hängt davon ab, wie lange die Pumpquelle die Besetzungsumkehr aufrecht erhalten kann. Ist die Verstärkung im Resonator groß genug, so kann der Laser die Schwingungen selbst aufrecht erhalten. Bedingung dafür ist: Die Verstärkung im Lasermedium gleicht die Verluste (durch Abstrahlung, Absorption, Streuung, Beugung, usw.) gerade aus. Wegen der Kleinheit der Wellenlänge des Lichts im Vergleich zu den Spiegelabständen werden viele Resonatoreigenschwingungen (Transversale Elektrische und Magnetische Moden, TEM-Moden) angeregt. Um nur eine einzige Grundmode (TEM₀₀-Mode) zu erhalten, müssen alle Moden höherer Ordnung herausgefiltert werden, indem man deren Verstärkung verringert. Weil einer der Spiegel teildurchlässig ist (ca. 2%), kann etwas von dem kohärenten Strahl (einfarbig, alle Photonen phasengleich) austreten. Da nur die axiallaufenden Wellen eine selbständige Laserschwingung aufrecht erhalten können, ist dieses Licht nahezu parallel und wir nennen es dann Laserstrahl.

In einem Lasermedium wird die Verstärkung im allgemeinen nicht durch einen Übergang zwischen E_1 und E_0 ausgelöst (Rubinlaser), sondern man verwendet meistens 4-Niveau-Systeme, da diese stabiler sind. Das hängt mit der natürlichen Verweildauer der Elektronen (Übergangswahrscheinlichkeit) auf der oberen Energiestufe zusammen. Damit eine Besetzungsumkehr erfolgen kann, müssen die Elektronen möglichst lange in einem energetisch höherem Zustand sein. Da im ersten Hauptniveau die Verweildauer aber gering ist, muß beim Pumpen genügend Energie zugeführt werden, sodaß die Elektronen auf ein geeignetes Niveau gebracht werden. Beim 4-Niveau-System werden die Elektronen durch das Pumpen aus dem Grundzustand auf verschiedene höhere Energieebenen gebracht, von wo sie durch spontane Emission in energetisch niedrigere Zustände zurückfallen. Da der Zustand E_2 eine große Lebensdauer besitzt, gehen sehr viele Atome sehr schnell (z.B. strahlungslos) in diesen Zustand über. Teilweise fallen die sich dort befindlichen Elektronen durch spontane Emission auf E_1 oder E_0 zurück, der Übergang zwischen erstem Hauptniveau und Grundniveau geht aber sehr schnell von statten, sodaß sich sehr bald viel mehr Elektronen auf E_2 als auf E_1



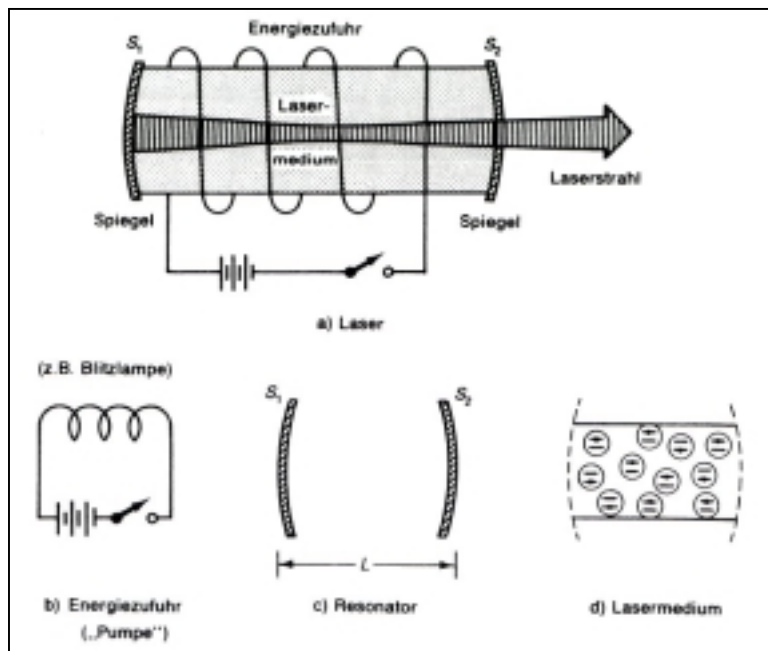
Vier-Niveau-Schema für einen Laserprozess

finden und dadurch die Besetzungsumkehr eintritt. Durch die Besetzungsinversion übertrifft die Rate der stimulierten Emission die Rate der stimulierten Absorption und spontanen Emission. Die Elektronen, die bei der induzierten Lichtaussendung von E_2 auf E_1 wechseln, gehen sehr schnell in den Grundzustand über, wo sie durch das Pumpen wieder Energie erhalten und der Zyklus von vorne beginnt.

Da das Verhältnis von stimulierter Emission (B_{21}) zu spontaner Emission (A_{21}) proportional zu λ^3 ist ($A_{21}/B_{21} = 8 * \pi * h/\lambda^3$), wird bei kleineren Wellenlängen die Wahrscheinlichkeit für ihr Auftreten ähnlich groß und die Besetzungsumkehr wird abgebaut. Darum sind UV- und Röntgenlaser schwieriger zu verwirklichen.

1.2 Aufbau des Lasers

Die wesentlichen Bestandteile eines Lasers sind eine externe Energiequelle, ein Verstärkermedium und ein Resonator.



Laserkomponenten: a) vollständiger Laser; b), c), d) Bestandteile;

Die externe Energiezufuhr (Pumpen) bewirkt die Besetzungsinversion im Lasermedium und wird mittels optischer, elektrischer oder chemischer Verfahren erreicht. Für einen Gaslaser wie den Helium-Neonlaser benützt man eine elektrische Entladung als Pumpe. In einigen Gaslasern stoßen freie Elektronen, die in der Entladung erzeugt werden, je nach Lasermedium mit Atomen, Ionen oder Molekülen zusammen und regen diese direkt an, in anderen wird diese Anregung durch unelastische Stöße zwischen Atomen (oder Molekülen) erzeugt. Bei der zweiten Gaslaserart verwendet man eine Mischung von zwei Gasen, deren Atome in der energetischen Lage übereinstimmen. Die Atome des einen Gases werden durch Pumpen angeregt und übertragen die Energie auf die unangeregten Atome des anderen Gases (resonanter Energietransfer). Optisches Pumpen wendet man bei Festkörper- oder Farbstofflasern an. Die Energie wird durch intensive Strahlung einer thermischen Hochleistungslichtquelle (z.B. Blitzlampe) oder eines anderen Lasers zugeführt. Bei Halbleiterlasern führt man (meistens) die Energie zu, indem man Ladungsträger in einen p-n-Übergang (siehe Lasertyp Halbleiterlaser) bringt.

Als Lasermedium werden sowohl gasförmige (Kohlendioxid, Stickstoff, Helium-Neon-Gemische, Metaldämpfe, usw.), flüssige (Lösungen organischer Farbstoffmoleküle, usw.) als auch feste Stoffe (Rubinkristalle, mit Neodym dotierte Kristalle oder Gläser, Halbleiter, usw.) verwendet, die durch ihre speziellen Energieniveaus die Wellenlänge der Laserstrahlung bestimmen. Damit eine stimulierte Emission in einem Laser funktioniert, braucht man ein Medium, dessen Atome im zweiten (3-Niveau System) oder dritten (4-Niveau System) Energieniveau eine große Aufenthaltswahrscheinlichkeit für Elektronen haben, damit eine Besetzungsumkehr erreicht werden kann.

Das Lasermedium befindet sich in einem *Resonator*, ist also zwischen zwei Plan- oder gekrümmten Spiegeln eingeschlossen. Die Photonen laufen zwischen den Spiegeln hin und her und lösen im Medium ständig Lichtaussendungen aus, sodaß der Strahl ständig verstärkt wird. Einer der Spiegel besitzt einen Reflexionsgrad von 100%, der andere etwa von 98%, damit die stehende Welle teilweise austreten kann. Je nach Justierung der Spiegel wird die Struktur des elektromagnetischen Feldes innerhalb des Resonators und die geometrische Verteilung des Strahlungsflusses über den Querschnitt des ausgekoppelten Laserstrahles bestimmt.

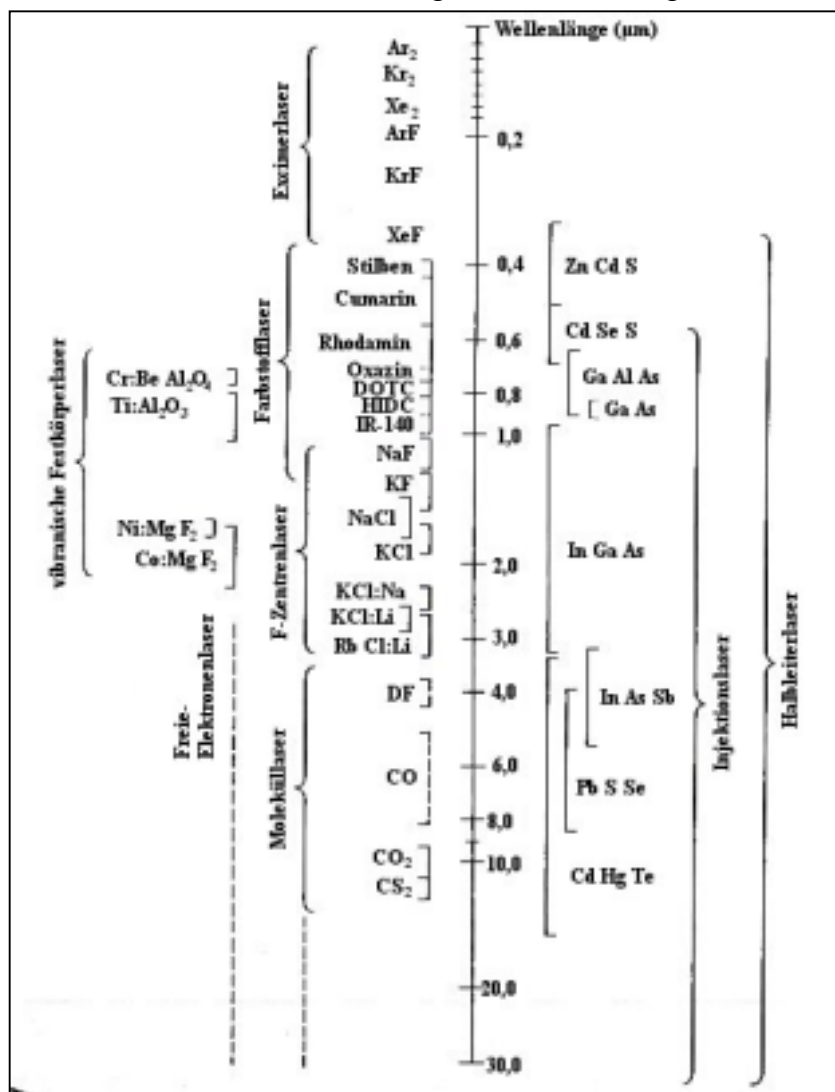
1.3 Geschichte

Erst 1940, 23 Jahre nach den theoretischen Überlegungen Einsteins, gelang es erstmals dem sowjetischen Physiker W.A. Fabrikant, in einem Experiment eine Lichtverstärkung zu erreichen. 1954 konstruierten dann C. H. Townes, J. Gordon und H. Zeiger von der New York Columbia University den ersten Ammoniak-MASER (**M**icrowave oder **M**olecular **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation), der im Mikrowellenbereich arbeitet. Der wesentliche Unterschied gegenüber dem Laser besteht in der Art des Resonators, der beim Maser ein Hohlraumresonator aus Metall ist. Aufgrund der (im Vergleich) großen Wellenlänge der Mikrowellen gibt

es nur eine einzige Mode, was typisch für den Maser ist. Als Masermaterialien werden Gase wie Ammoniak (NH₃), Wasserstoffatome (H), oder Rubidiumatome (Rb) und Festkörper wie Rubin-kristalle (Al₂O₃) verwendet. Nach dieser Erfindung schlugen Townes und A.L. Schawlow von den Bell Labs vier Jahre später vor, das Maserprinzip auf Licht zu übertragen.

1960 gelang T. H. Maiman die erste experimentelle Demonstration des Laserprinzips. Er baute den ersten Rubinlaser (Festkörperlaser), der rotes Licht mit einer Wellenlänge von 694,3 nm (nur in kurzen Impulsen) aussendet. Ein Jahr später folgte dann der erste Gaslaser (Helium-Neonlaser) von A. Javan, W. R. Bennet und D. R. Herriott, der sowohl im infraroten (1,15 µm) als auch im sichtbaren Bereich (632,8 nm) kontinuierlich Laserlicht liefert. Kurz darauf konnten die ersten Halbleiterlaser (Gallium-Arsenid, 840 nm, gepulst) durch R. N. Hall, M. I. Nathan und T. M. Quist verwirklicht werden, die den Markt revolutionierten und bis heute wegen ihrer Kompaktheit und Zuverlässigkeit (hoher Wirkungsgrad, einfache Modulierbarkeit) vom CD-Player bis zur Kommunikationstechnik erfolgreich eingesetzt werden.

1965 bauten Kasper und Pimentel den ersten chemischen Laser (Salzsäure, HCl; 3,8 µm) und ein Jahr später wurde von P. P. Sorokin und F. P. Schäfer der erste Farbstofflaser („Dye“-Laser, Rhodamin 6G) entwickelt, der jede Wellenlänge im Frequenzband von 570 nm bis 625 nm liefern kann. Aktives Medium von Farbstofflasern sind in Flüssigkeiten gelöste Farbstoffe. Die Wellenlängenabstimmbarkeit eröffnete ein breiteres Anwendungsspektrum, trotzdem wurden diese Laser erst in den Siebzigern kommerziell genutzt.



Nach Wellenlänge kontinuierlich abstimmbare Laser

Weitere heute häufig eingesetzte Gaslaser wurden entwickelt, wie der Argonlaser (Ar⁺-Ionen, grünes und blaues Laserlicht), der für Forschung, Medizin und Unterhaltung wichtig ist und der CO₂-Laser (Kohlendioxidlaser, infrarot), der eine hohe Leistung besitzt und somit in der Materialforschung angewendet wird. 1972 konnte dann der erste Excimerlaser (**Exc**ited-**imer**-Laser) verwirklicht werden, der ultraviolette Licht liefert und eine hohe mittlere Leistung erreicht.

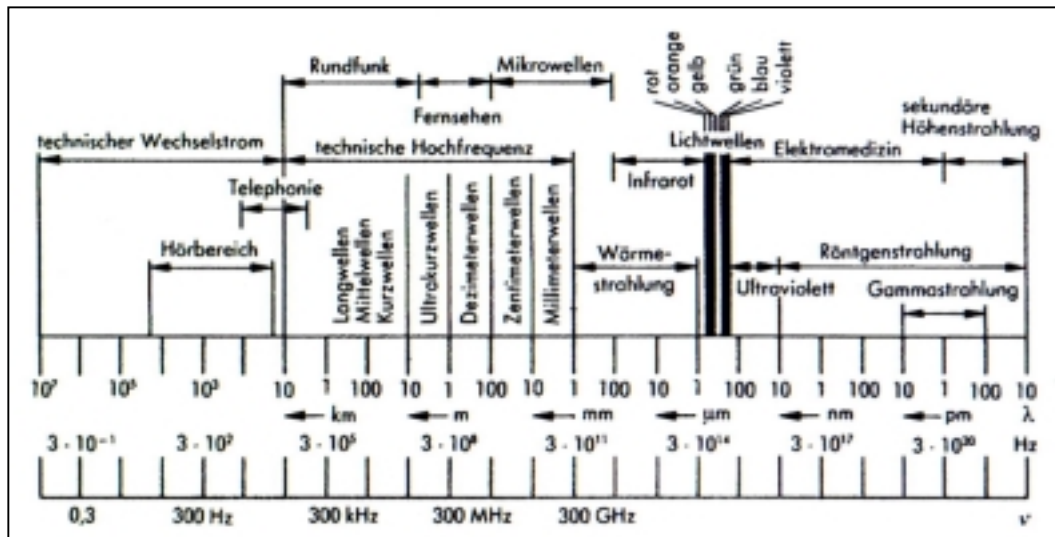
Mitte der Achtziger Jahre wurden einige permanent strahlende Festkörperlaser, unter anderem der Nd-YAG-Laser (**N**eodym-Ionen dotierte **Y**trium-**A**luminium-**G**ranat-Kristalle oder -Gläser als aktives Medium) entwickelt, deren Vorteile der stabile Betrieb, die niedrigen Betriebskosten und die Fähigkeit, kürzeste Impulse zu

erzeugen, sind. Weitere Entwicklungen, wie der Femtosekundenlaser (Festkörperlaser), der

durch sogenannte Modenkoppelung extrem kurze und intensive Impulse erzeugen kann, machten es möglich, die erforderliche Lichtleistung für den 1985 erfundenen Röntgenlaser auch in normalen Labors zu verwirklichen.

Trotz der vielen verschiedenen Lasertypen mit verschiedensten aktiven Medien konnten nicht alle Wellenlängen des Lichts erschlossen werden. Durch die Entwicklung eines Freielektronen-Lasers, dessen aktives Medium ein Elektronenstrahl ist, wird dies aber möglich werden.

Für die Zukunft sind viele neue Entwicklungen geplant, wie zum Beispiel Synchrotrons, starke, inkohärente Lichtquellen mit hoher Güte, Quantenpunktlaser, Ein-Atom-Laser, Hochleistungsdiodenlaser, usw.



Gesamtes Spektrum der elektromagnetischen Strahlung: Nur ein Bruchteil ist für das menschliche Auge sichtbar. Der Bereich vom nahen Infrarot bis zur nahen Röntgenstrahlung ist bisher für Laser erschlossen.

1.4 Genauere Beschreibung einiger Lasertypen

Es gibt mehrere Möglichkeiten, Laser zu klassifizieren. Man kann sie nach Aggregatzustand des aktiven Mediums (fest, flüssig, gasförmig), externer Energiezufuhr (Blitzlampe, elektrische Gasentladung, chemische Reaktion, usw.), Art der Laserstrahlung (gepulst oder kontinuierlich [cw]) oder nach spektralem Bereich der Emission (infrarot, sichtbar, UV) einteilen.

Die folgende Tabelle zeigt die Parameter einiger gebräuchlicher Laser:

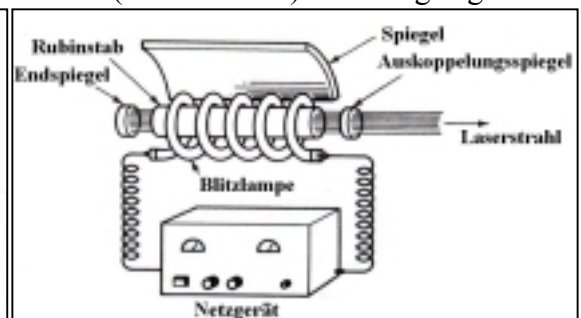
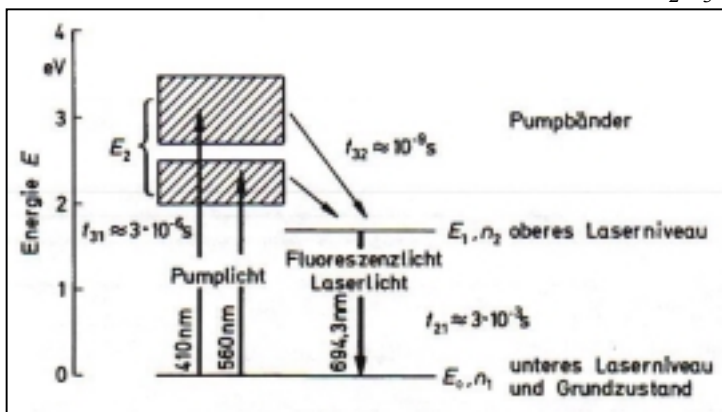
Typ	Wellenlänge (λ)	Energie bei mittlerer Leistung (E)	Art des Ausgangssignals	Strahldurchmesser	voller Strahlöffnungswinkel ($2 * \theta_0$)	Steckdosenwirkungsgrad (η)
Gaslaser						
Excimer (ArF)	193nm	<400mJ/Puls 30W	gepulst Dauer>20ns	rechteckig 6 * 20- 20 * 30mm ²	2-6mrad	<0,5%
Stickstoff	337,1nm	<10mJ/Puls 500mW	Pulsdauer(Δt) 0,5-5ns	rechteckig 2 * 3- 6 * 30mm ²	1-3 * 7mrad	<0,1%
Argonionen	448nm, 514,5nm	<20W	cw = kontinuierlich	0,7-2mm	0,4-1,5mrad	<0,1%
Helium-Neon	632nm	0,1-50 mW	cw	0,5-2mm	0,5-1,7mrad	<0,1%
CO ₂	10,6 μm	<5kW, <10kW 500J/Puls, GW	cw(TEM ₀₀), Multimode gepulst	3-4mm	1-2mrad	5-30%
HF (chemisch)	2,7-3,3 μm	<150W <1kJ/Puls	cw, Δt einige μs	2mm-4cm	1-15mrad	Chemisch 10%
Festkörperlaser						

Typ	Wellenlänge (λ)	Energie bei mittlerer Leistung (E)	Art des Ausgangssignals	Strahldurchmesser	voller Strahlöffnungswinkel (2 * θ ₀)	Steckdosenwirkungsgrad (η)*
Festkörperlaser						
Rubin	694,3nm	0,03-500J/Puls	Δt >0,5ms	1,5mm-2,5cm	0,2-10mrad	<0,5%
Nd:YAG mit Blitzlampe	1,064μm	30W-1kW	cw(TEM ₀₀), Multimode Δt 5ms-10ns	0,75-6mm	2-18mrad	0,5%
mit Diodenlaser gepumpt		2W	cw			
Farbstofflaser (Flüssigkeit) mit Argonionlaser gepumpt	400-950nm	<10W	cw, gepulst	0,4-0,6mm	1-2mrad	10-20% * η _{Argonlaser}
Halbleiterlaser GaAlAs InGaAsP	0,4-30μm 700-900nm 0,65-2μm	Einzel<100mW Matrizenanordnung<50W	cw oder Δt>5ps	Divergiert zu rasch	200 * 600mrad	<25%

* η = optische Leistung/elektrische Leistung = Strahlungsfluß φ_e/P_{el}

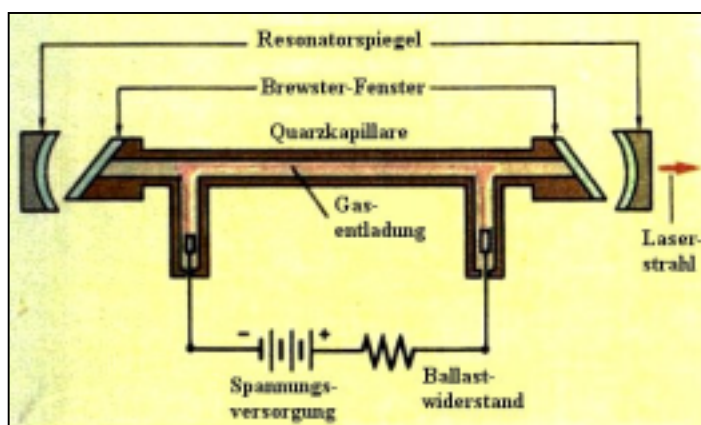
1.4.1 Rubinlaser

Das Medium des Rubinlasers ist ein Al₂O₃-Kristall (Rubinkristall) mit eingelagerten



Energieniveauschema der Chromionen im Rubinlaser (oben) und schematischer Aufbau des Rubinlasers (oben rechts);

Cr³⁺-ionen (ca. 0,05% Chromionen). Die erzwungene Lichtaussendung erfolgt nach einem 3-Niveau-Prinzip, bei dem mindestens die Hälfte aller Elektronen von E₀ auf E₂ gebracht werden muß. Einige Elektronen fallen durch spontane Emission wieder direkt in den Grundzustand zurück, in welchem sie durch die Pumpquelle wieder Energie erhalten; für E₁ ist die Aufenthaltswahrscheinlichkeit für Elektronen groß, wodurch eine Besetzungsinversion aufgebaut wird. Ankommende Lichtquanten mit der passenden Energie können dann eine Emission induzieren. Die sehr hohen benötigten Pumplichtintensitäten können kurzzeitig (~1ms) von Blitzladungsröhren erreicht werden, weshalb nur ein Impulsbetrieb möglich ist.

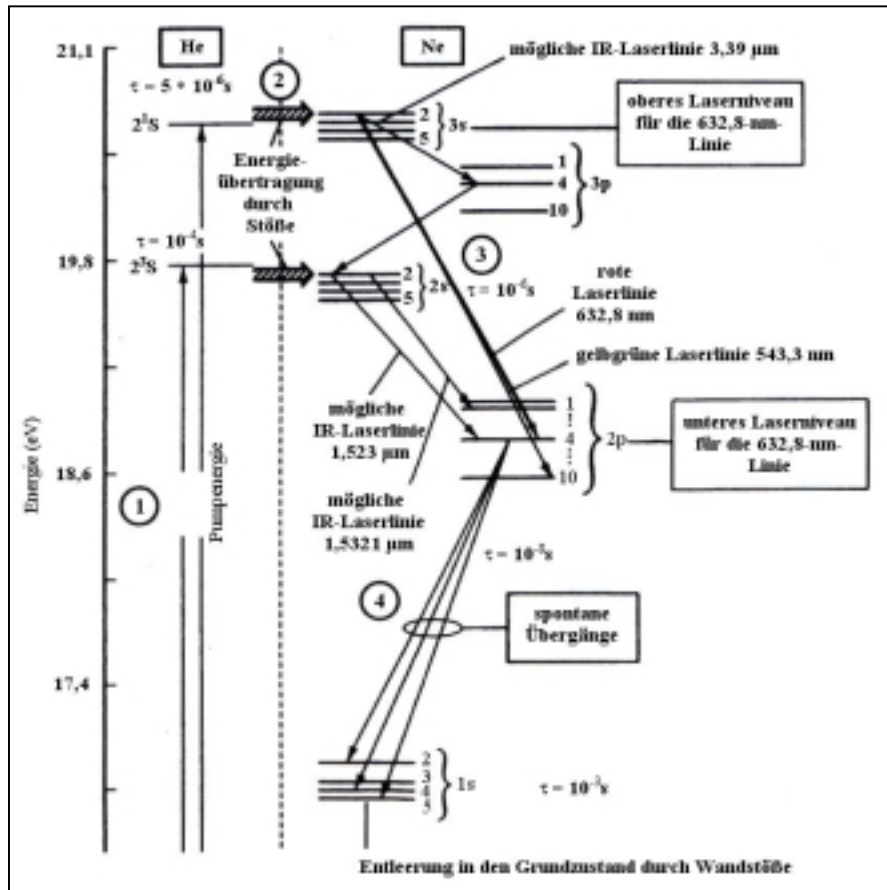


Schematischer Aufbau des He-Ne-Lasers

1.4.2 Helium-Neon-Laser

Der He-Ne-Laser hat, wie der Name schon sagt, als aktives Medium ein Helium-Neon Gasmischung (He:Ne = 6:1) niedrigen Drucks (~1 mbar). Für die Pumpenergie sorgt eine elektrische Gasentladung. Da dieser Laser auf der Basis eines 4-Niveau-Prinzips funktioniert, ist es nicht erforderlich, über 50% der Elektronen auf ein höheres Energieniveau zu heben; somit ist auch nicht so viel Energie aufzuwenden, was einen kontinuierlichen Betrieb ermöglicht.

Durch das Pumpen werden Heliumatome in höhere Energiezustände (2^1S - oder 2^3S -Zustand) angeregt, die energetisch fast gleich mit Energiezuständen des Neons ($3s^2$, $2s^2$) sind. Die angeregten Heliumatome geben die Energie nun durch resonanten Energietransfer an Neonatome im Grundzustand ab, wodurch wiederum diese angeregt werden und eine Besetzungsinversion ermöglicht wird. Beim Neon ist der Prozeß mit der höchsten Übergangswahrscheinlichkeit vom $3s^2$ - (E_3) zum $2p^4$ -Zustand (E_2). Die hier stimulierte Emission liefert Licht mit der Wellenlänge 632,8 nm. Die Elektronen gehen schließlich vom $2p^4$ -Zustand in den $1s$ -Zustand (E_1) und durch Wandstöße in E_0 über, wo sie durch weitere Stöße von Heliumatomen wieder angeregt werden können. Weitere Laseremissionen sind durch induzierte Lichtausstrahlung bei den Übergängen von $3s$ zu $3p$ ($3,39\mu\text{m}$) und von $2s$ zu $2p$ ($1,523\mu\text{m}$) möglich.



Energieniveauschema der Helium- und Neonatome im He-Ne-Laser

Zustand) angeregt, die energetisch fast gleich mit Energiezuständen des Neons ($3s^2$, $2s^2$) sind. Die angeregten Heliumatome geben die Energie nun durch resonanten Energietransfer an Neonatome im Grundzustand ab, wodurch wiederum diese angeregt werden und eine Besetzungsinversion ermöglicht wird. Beim Neon ist der Prozeß mit der höchsten Übergangswahrscheinlichkeit vom $3s^2$ - (E_3) zum $2p^4$ -Zustand (E_2). Die hier stimulierte Emission liefert Licht mit der Wellenlänge 632,8 nm. Die Elektronen gehen schließlich vom $2p^4$ -Zustand in den $1s$ -Zustand (E_1) und durch Wandstöße in E_0 über, wo sie durch weitere Stöße von Heliumatomen wieder angeregt werden können. Weitere Laseremissionen sind durch induzierte Lichtausstrahlung bei den Übergängen von $3s$ zu $3p$ ($3,39\mu\text{m}$) und von $2s$ zu $2p$ ($1,523\mu\text{m}$) möglich.

Beim Starten des Pumpprozesses werden spontane Lichtaussendungen zuerst in alle Richtungen emittiert, aber nur die axiallaufenden Quanten werden zu Auslösephotonen von langer Dauer, da sie von den Spiegeln hin und her reflektiert werden, was die Dichte der kohärenten Photonen anwachsen läßt.

1.4.3 Excimerlaser

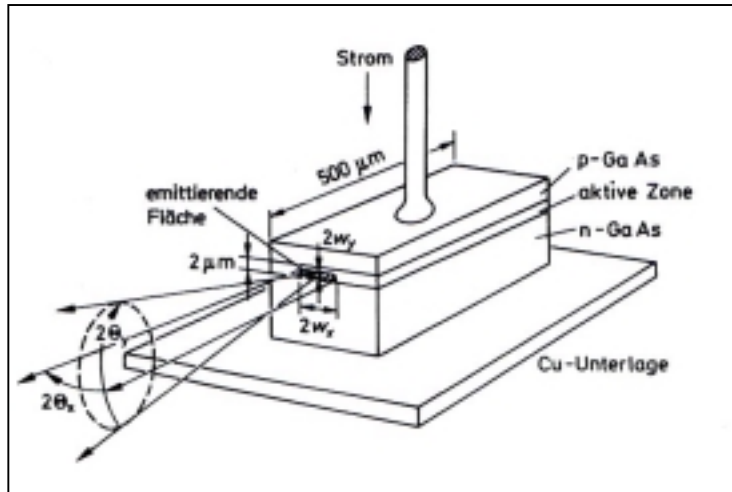
Der Excimerlaser besteht aus einem Gasmischung aus Edelgasen und Halogenen. Als Pumpe dient eine elektrische Entladung, die die Edelgasatome anregt, welche sich dann mit dem Halogen verbinden. Solche Moleküle können je nach Excimerlaser ArF (Argonfluorid, 193 nm), KrF (Kryptonfluorid, 248 nm), XeCl (Xenonchlorid, 308 nm) oder XeF (Xenonfluorid, 351 nm) sein und werden excimers (**excited dimers**) genannt. Diese Moleküle kehren sehr schnell in den Grundzustand zurück, zerfallen und geben die Energie in Form von UV-Licht ab. Dieses wird im

Resonator verstärkt und liefert dann Laserlicht im ultravioletten Bereich. Der Excimerlaser wird häufig in der Medizin eingesetzt und besitzt eine hohe mittlere Leistung.

1.4.4 Halbleiterlaser

Halbleiterlaser sind Festkörperlaser, die aus drei verschiedenen Halbleiterschichten (Halbleiterkristall) bestehen. Häufig verwendet werden GaAs (Galliumarsenid) und InP (Indiumphosphid), sowie Verbindungen von Ga, In, As und P.

Eine GaAs-Laserdiode besteht aus zwei GaAlAs-Schichten, zwischen denen sich eine 2 μm dicke GaAs-Schicht befindet. Halbleitermaterialien (diamantähnliches Atomgitter) leiten den Strom bei Energiezufuhr (z.B. Temperaturerhöhung) besser. Wenn man in die Gitterstrukturen



Schematische Darstellung eines GaAs-Halbleiterlasers

Fremdatome mit anderer Valenzelektronenanzahl bringt (Dotierung), so sind entweder mehr ungebundene Elektronen (negative Ladung, n-Dotierung) oder mehr geöffnete Bindungen aufgrund von weniger Außenelektronen („Löcher“, positive Ladung, p-Dotierung) vorhanden. Dadurch kann der Strom nur in eine Richtung fließen, falsch herum gepolt sperrt die Diode. Bei der GaAs-Laserdiode sind eine GaAlAs-Schicht, sowie die GaAs-Schicht n-dotiert und die zweite Außenschicht p-dotiert. Legt man eine Spannung in Flußrichtung an, wandern Elektronen

aus dem n-dotierten Material (Leitungsband) in das p-dotierte (Valenzband), die Elektronen und Löcher rekombinieren (die Elektronen springen in die Löcher). Dabei wird Energie abgestrahlt. Ist die so entstehende Energiedifferenz der Energieniveaus von Elektronen und „Löchern“ groß genug, kann eine stimulierte Emission stattfinden. Der Halbleiterlaser kann also elektrischen Strom direkt in Licht umwandeln. Die (verspiegelten) Endflächen der Diode bilden gleichzeitig den Resonator. Das Reflexionsvermögen beträgt zwar nur $\sim 32\%$, durch die hohe Verstärkung im Halbleiterlaser reicht dies aber aus, sodaß bei einem GaAs-Laser Laserlicht mit einer Wellenlänge von $\sim 840 \text{ nm}$ austreten kann.

Die Wellenlänge des ausgesendeten Laserlichts wird durch die Größe des energetischen Abstandes (Bandlücke) zwischen dem Leitungs- und dem Valenzband bestimmt. Die Bandlücke hängt von der Art des verwendeten Materials ab. Mit GaN (Galliumnitrid) und ZnSe (Zinksele-nid) konnten 1995 Laserdioden mit grünem und blauem Licht verwirklicht werden. Der Halbleiterlaser hat viele Vorteile; seine Nachteile sind die im Vergleich zu anderen Lasern hohe Divergenz des Laserstrahls und die unscharfe Abgrenzung des Wellenlängenbereichs. Er wird aufgrund seiner kleinen Abmessungen häufig als Pumpquelle für Festkörperlaser eingesetzt.

1.4.5 Röntgenlaser

Röntgenlaser sind besonders schwer zu realisieren, weil die kurze Wellenlänge von unter 30 nm nur mit hohen Pumpleistungen und kurzen Impulsen der Pumpquelle erreicht werden kann. Die Pumpleistung ist umgekehrt proportional zu λ^4 und muß somit über 10^{14} W/cm^2 liegen, die Verweildauer der Elektronen im oberen Energieniveau ist proportional zu λ^3 , sodaß die Impulse der Pumpquelle kürzer als $\sim 10^{-15} \text{ s}$ sein müssen. Außerdem werden geeignete Lasermedien benötigt (z.B. hochionisierte schwere Atome), bei denen Elektronen in inneren Schalen auf

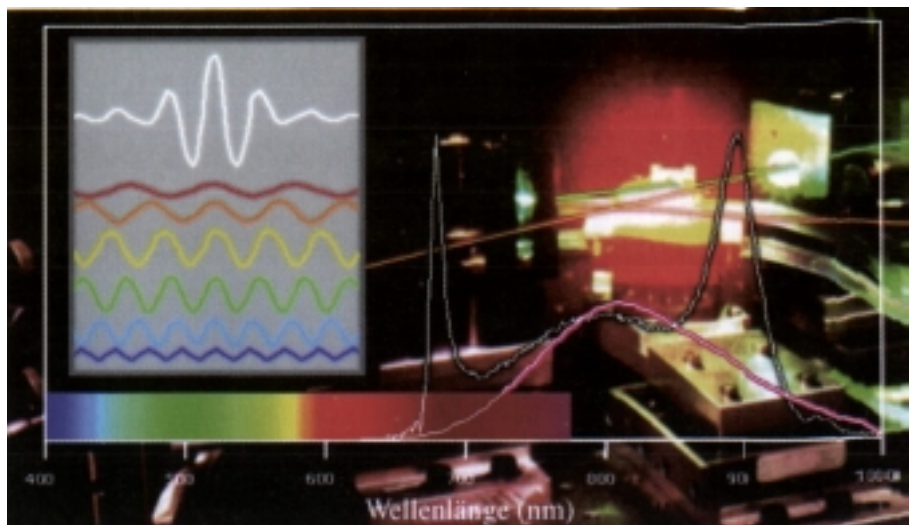
höhere Energieebenen gebracht werden. Die Bindungsenergie von Valenzelektronen beträgt nur etwa 25 eV, weshalb die Energie nur für Wellenlängen von über 50 nm ausreicht ($\lambda \cong h \cdot c / 25\text{eV} = 50 \text{ nm}$; $1\text{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$). Um eine geeignete Konstellation für die Elektronenübergänge zu finden, benötigt man die Hilfe von Computerprogrammen. Ein weiteres Problem ist, daß Röntgenstrahlung schwer mit Spiegeln zu reflektieren ist, mit Mehrschichtspiegeln erreicht man eine Röntgenstrahlenreflektivität von 25%. Trotz all dieser Probleme konnte man Röntgenlaser bis zu einer Wellenlänge von 5 nm verwirklichen.

1.4.6 Femtosekundenlaser

Femtosekundenlaser sind Festkörperlaser, mit denen man durch sogenannte Modenkopplung (engl. Modelocking) extrem kurze intensive Impulse von einigen Femtosekunden erreichen kann.

Eine Möglichkeit, die Impulsdauer von Lasern zu verkürzen, ist der sogenannte Q-Switch-Modus, den man mit einer sogenannten Gütemodulation erreicht. Hierbei wird die Anregungsenergie im Lasermedium gespeichert, um diese dann durch eine plötzliche Erhöhung der Resonatorgüte (Q) als Laserlicht freizusetzen. Durch eine undurchsichtige Blende im Strahlengang kann man die Güte herabsetzen, sodaß ohne Rückkopplung dem aktiven Medium ständig Energie zugeführt wird. Wenn man sie wieder entfernt, entsteht eine starke Emission im Form von kurzen Laserimpulsen von etwa 10^{-8} s.

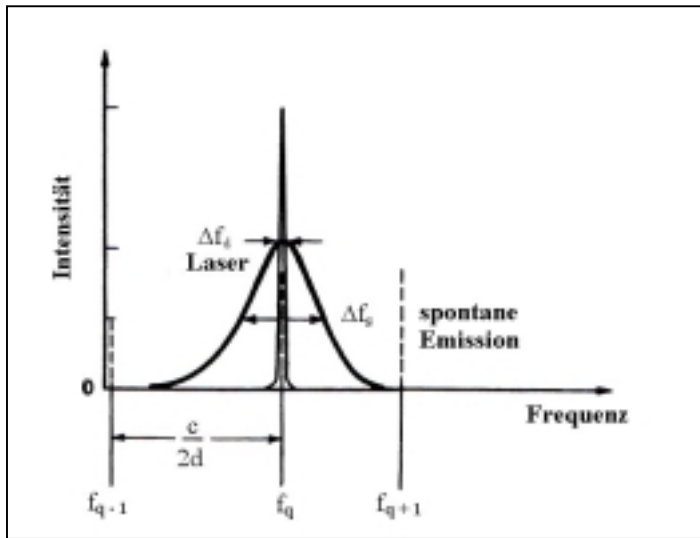
Um Femtosekundenlaser verwirklichen zu können, koppelt man die Phasen der Lasermoden aneinander. Das läuft so ab, daß die Resonatorverluste mit einer Frequenz moduliert werden, die genau der Laufzeit des Lichtes zwischen den Resonatorspiegeln entspricht. Die Phasen der verschiedenen Moden (Wellenformen leicht unterschiedlicher Wellenlänge), die normalerweise ihre relative Lage zueinander durch unkontrollierte Phasensprünge ändern, werden nun starr aneinandergeschnitten. Dieses Verfahren entspricht einer Schwebung, bei der bei akustischen Wellen die Mischung von leicht unterschiedlichen Tönen eine an- und abschwellige Lautstärke ergibt. Der Abstand zwischen An- und Abschwellen ist mit der Impulslänge des Lasers gleichzusetzen. Durch die phasenrichtige Überlagerung der Intensitäten der Einzelmoden und der sehr hohen Frequenz des Lichtes kann der Laser kurze ($\sim 10^{-9}$ bis $3 \cdot 10^{-14}$ s) intensive Lichtimpulse aussenden, die periodisch immer dann emittiert werden, sobald das Laserlicht den Umlauf im Resonator vollendet hat. Die Impulsdauer ist umgekehrt proportional zur Anzahl der gekoppelten Moden. Je größer also die Verstärkungsbandbreite des Lasers ist, desto kürzere Impulse kann man erreichen.



Die Überlagerung mehrerer Lichtwellenlängen ergeben einen kurzen Lichtimpuls. Je breiter das Spektrum ist, desto kürzer dauert der Impuls (links). Rechts im Bild das Spektrum eines Titan-Saphir-Lasers (Pulse von 6,5 Femtosekunden);

Femtosekundenlaser erlauben als Pumpquelle einen einfacheren Betrieb von Röntgenlasern auch außerhalb der Speziallabors und verkleinern deren Größe dadurch um den Faktor 100. Wichtigstes Einsatzgebiet für sie ist die Grundlagenforschung; bald werden sich ihre Vorteile in der Telekommunikation bezahlt machen.

1.5 Lasereigenschaften

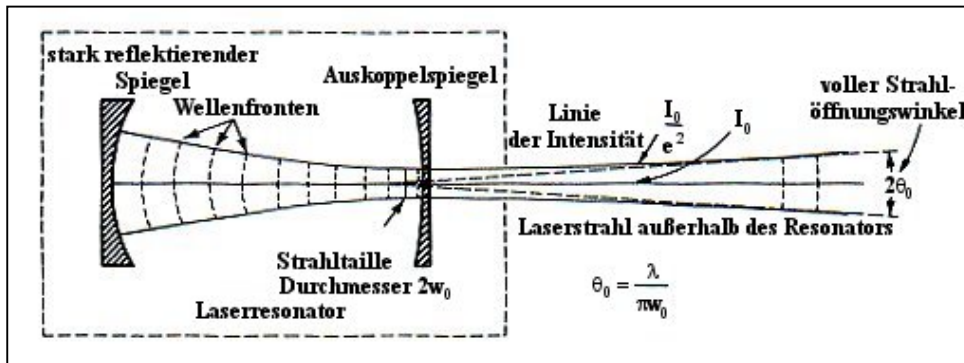


Laserlicht ist praktisch einfarbig (monochromatisch); zwar gibt es keine Lichtquelle, die vollkommen monochromatisch ist, das Laserlicht kommt diesem Ideal aber am nächsten. Man versucht, durch Filterung die TEM₀₀-Mode zu selektieren (Abstand der Moden = $c/(2 \cdot d)$), trotzdem erhält man immer noch eine gewisse Bandbreite (Linienbreite Δf_L), die durch Verluste im Resonator und durch mangelnde mechanische Stabilität bedingt ist.

Linienbreiten stimulierter und spontaner Emission: Der Moden-Frequenzabstand ist $c/(2d)$. Die Restbreite Δf_s entsteht durch Resonatorverluste.

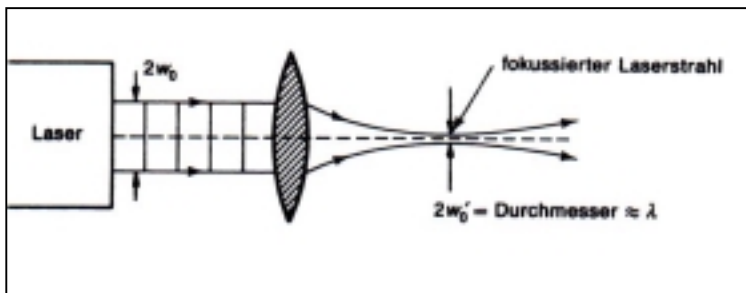
Kohärenz ist eine weitere Lasereigenschaft, wobei man von zeitlicher und räumlicher Kohärenz spricht. Das Erstgenannte ist mit Einfarbigkeit gleichzusetzen, was bedeutet, daß kohärentes Licht monochromatisch ist. Räumliche Kohärenz ist ein Maß für den Grad der Phasenkorrelation, also inwieweit sich alle Wellen gleichen Wellenfronten zuordnen lassen. Durch den Prozeß der stimulierten Emission besitzen die hinzukommenden Photonen identische Phase, Richtung und Polarisation. Durch die Resonatorbedingungen entstehen aber weitere Moden, die eine perfekte Kohärenz verhindern. Inwieweit die richtige Phase an einem gegebenen Raumpunkt aufgrund dieser Eigenschaft vorhersagbar ist, wird durch die Kohärenzzeit τ_c bestimmt (Kohärenzlänge $l_c = c \cdot \tau_c$).

Laser besitzen eine äußerst *kleine Strahldivergenz*, die Lichtbündel treten nahezu parallel



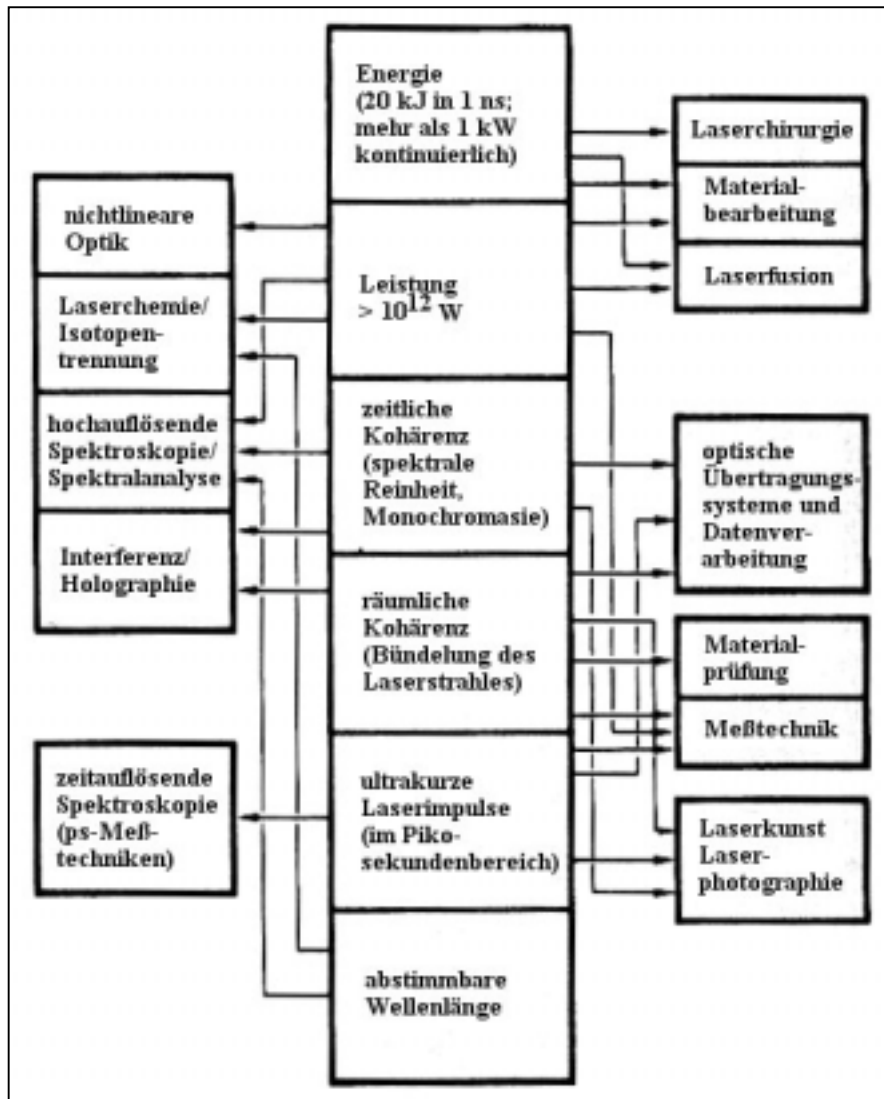
Die durch Beugung entstehende Strahldivergenz wird mit dem vollen Öffnungswinkel $2\theta_0$ beschrieben. An der Strahltaille ist der Ausgangspunkt einer (gestrichelten) Begrenzungslinie, an der die Intensität $1/e^2$ des Wertes auf der Achse (I_0) beträgt.

aus dem Resonator aus. Das Maß der Divergenz wird mit dem Öffnungswinkel θ_0 bezeichnet (voller Öffnungswinkel $2 \cdot \theta_0$) und hängt mit der Wellenlänge und dem Strahlendurchmesser an der engsten Stelle ($2 \cdot w_0$) zusammen ($\theta_0 = \lambda / (\pi \cdot w_0)$). Durch die sehr hohe Parallelität und Intensität des Laserlichts (ein-mW-He-Ne-Laser ist 100mal heller als die Sonne) hat der Laser eine große Reichweite und kann somit z. B. auch dafür eingesetzt werden, die Entfernung zwischen Erde und Mond zu messen.



Fokussierbarkeit des Lasers

Wegen der oben beschriebenen Eigenschaften können Laserstrahlen sehr *gut fokussiert* werden.



Links die den Eigenschaften des Lasers entsprechenden Anwendungen.

Der Laserdurchmesser an der gebündelten Stelle ($2 \cdot w'_0$) entspricht nur mehr etwa einer Wellenlänge. Näherungsweise berechnen kann man ihn durch die Beziehung $w'_0 \cong f' \cdot \theta_0$, wobei f' der Brennweite der Linse entspricht.