

**TEIL 16**

Nachdenken/Nachlesen:

Was ist ein MASER ? Wieso wurde er wohl vor dem Laser verwirklicht ?

**18. Laser**

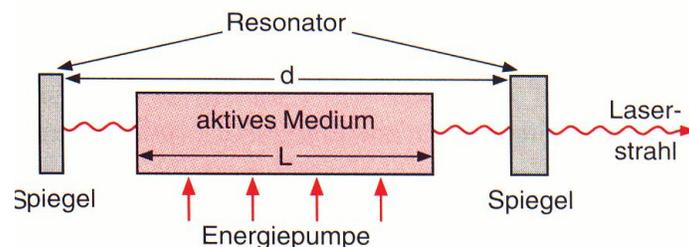
Der **LASER** (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) spielt heute in den Naturwissenschaften, in der Technik und auch im Alltag eine große Rolle.

Er wurde zum ersten mal experimentell von Theodore H. Maiman im Jahr 1960 realisiert, in Form eines (Rubin-)Lasers.

**18.1. Das Laser-Prinzip**

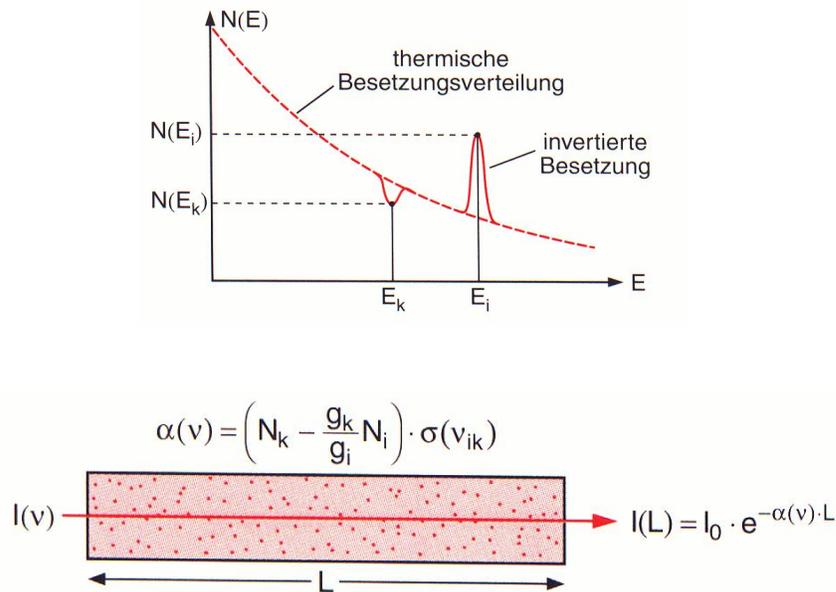
Eine externe *Energiequelle* regt in einem *aktiven Medium* Niveaus so an, dass eine **Besetzungsinversion** auftritt, d.h. im angeregten Zustand befinden sich mehr Atome als in einem tieferliegenden.

Ein *optischer Resonator* sammelt das bei dem Übergang  $i \rightarrow k$  emittierte Licht, welches dann weitere Übergänge im Medium *induziert*, vgl. Skizze. Bei einer hinreichend hohen Photon- bzw. Modendichte überwiegt die induzierte gegenüber der spontanen Emission, d.h. die Photonen werden gewissermaßen ‘verdoppelt’.



Das aus dem Resonator (zB. durch einen halbdurchlässigen Spiegel) austretende Laserlicht hat die folgenden interessanten Eigenschaften:

- starke räumliche Bündelung
- große Kohärenzlänge
- Monochromatizität



*Notwendige* Bedingung für den Laserbetrieb ist die Besetzungsinversion ( $\rightarrow$  Dominanz von *induzierter* Emission relativ zur Absorption), die eine Abweichung vom thermischen Gleichgewicht bedeutet und nur mit 'Tricks' aufrechterhalten werden kann.

Wieso die Inversion nötig ist, zeigt die folgende einfache Betrachtung: Der das Medium passierende Lichtstrahl erfährt Absorption und induziert andererseits Emission, wodurch er verstärkt wird. Die Laserbedingung lautet, dass der frequenzabhängige Absorptionskoeffizient  $\alpha$  negativ wird, d.h. es tritt **Lichtverstärkung** auf:

$$I(x) = I_0 \cdot e^{-\alpha x} \quad (1)$$

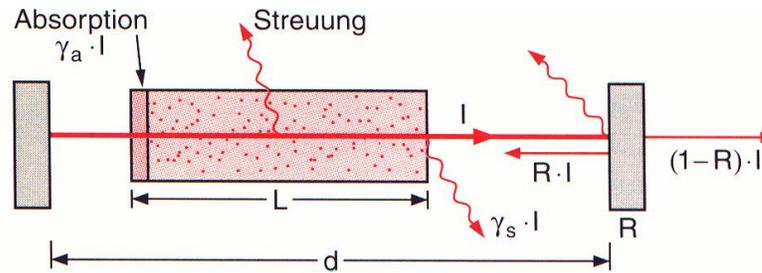
$$\alpha(\nu) = \left( N_k - \frac{g_k}{g_i} \cdot N_i \right) \cdot \sigma(\nu) \quad (2)$$

mit dem Absorptionswirkungsquerschnitt  $\sigma(\nu)$ . Hier wurde implizit  $B_{ik} = g_k/g_i \cdot B_{ki}$  benutzt, also die Gleichheit der Einsteinkoeffizienten (multipliziert mit den entsprechenden statistischen Gewichten) für Absorption und induzierte Emission.  $N$  sind hier die Besetzungszahlen pro Volumen. Also, bei gleichen statistischen Gewichten:  $N_i > N_k$ .

Außerdem müssen andere Verluste berücksichtigt werden, u.a. Absorption (etwa in den Fenstern einer Gaszelle), Streuung und unvollständige Reflexion (an einer Seite erwünscht, Austritt des Laserlichtes!), siehe Skizze. Die *notwendige* Bedingung

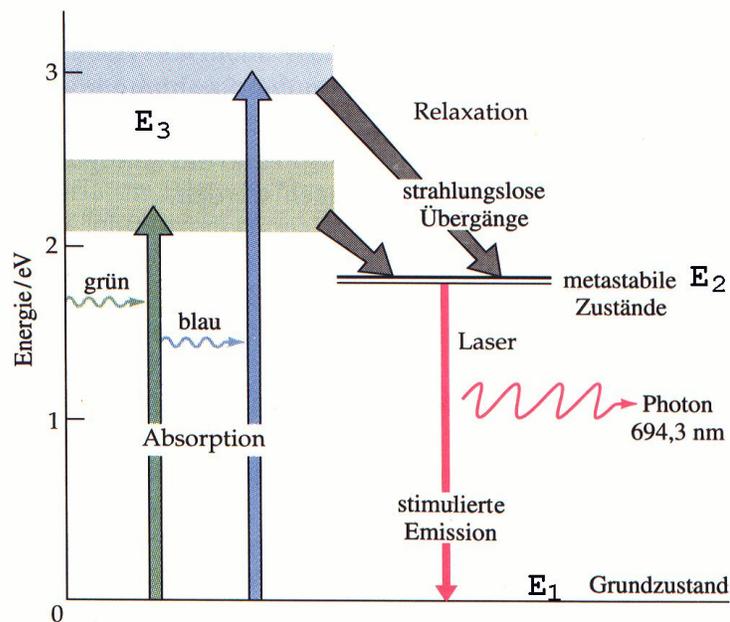
$$\alpha < 0 \quad (3)$$

ist also in der Regel nicht *hinreichend*. Die spontane Emission, proportional zu  $A_{ik}$ , sollte relativ zur induzierten unterdrückt sein - dies geschieht insbesondere durch den Resonator, denn der erlaubt nur die Verstärkung von kohärentem Licht. Eine Bedingung in Form einer einfachen Gleichung lässt sich hier nicht hinschreiben.



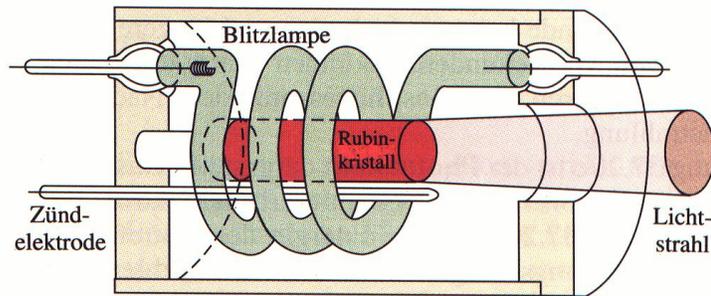
## 18.2. Der Rubin-Laser

Der Festkörper Rubin besteht aus  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , das mit  $\text{Cr}^{3+}$ -Ionen dotiert ist (sie ersetzen  $\sim 0.1\%$  der  $\text{Al}^{3+}$ -Ionen). Die Chromionen spielen die Hauptrolle, denn mit ihnen kann man eine Besetzungsinversion herstellen, siehe Graphik. Durch optisches Pumpen mit einer Lichtquelle mit breitem Spek-

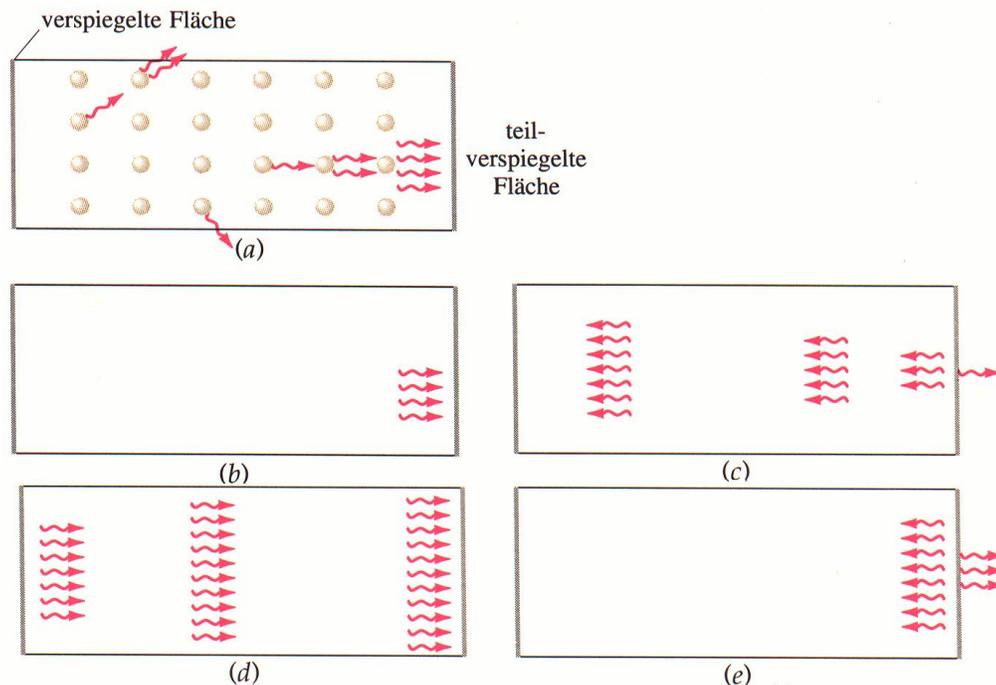


trum werden im Chrom aus dem Grundzustand der Energie  $E_1$  heraus Zustände  $E_3$  angeregt, deren Energieniveaus wegen der Wechselwirkung mit den Gitteratomen (Aluminium und Sauerstoff) stark verbreitert sind (hohe Effizienz!). Dann gehen sie (teilweise) durch schnelle strahlungslose Übergänge (Wechselwirkungen mit Gitterschwingungen) schnell in einen metastabilen (d.h. langlebigen) Zustand  $E_2$  über. Wenn mehr als die Hälfte der Chrom-Ionen in diesem Zustand sind, liegt Besetzungsinversion gegenüber dem Grundzustand  $E_1$  vor. Da hier drei Niveaus involviert sind, spricht man vom 'Drei-Niveau-Laser'.

Technische Realisierung (ähnlich dem Maiman-Laser): siehe Abbildung. Um die erforderliche Intensität zu erreichen, benutzt man eine Blitzlampe (und erhält einen gepulsten Laserstrahl). Die Zündelektrode triggert den Blitz. Die Blitzdauer (typ. 1 ms) ist kürzer als die Lebensdauer des Niveaus  $E_2$  (3 ms), also können durch spontane Emission Übergänge  $E_2 \rightarrow E_1$  nicht so schnell erfolgen wie durch den Pumpvorgang nach  $E_2$  nachgeliefert werden. Das rote Laserlicht hat die Wellenlänge  $\lambda = 694.3 \text{ nm}$ , das entspricht der Energiedifferenz  $E_2 - E_1$ . Beide Seiten des zylinderförmigen Rubinstabes sind verspiegelt, mit  $R \sim 99.9\%$  und  $R \sim 90\%$ .

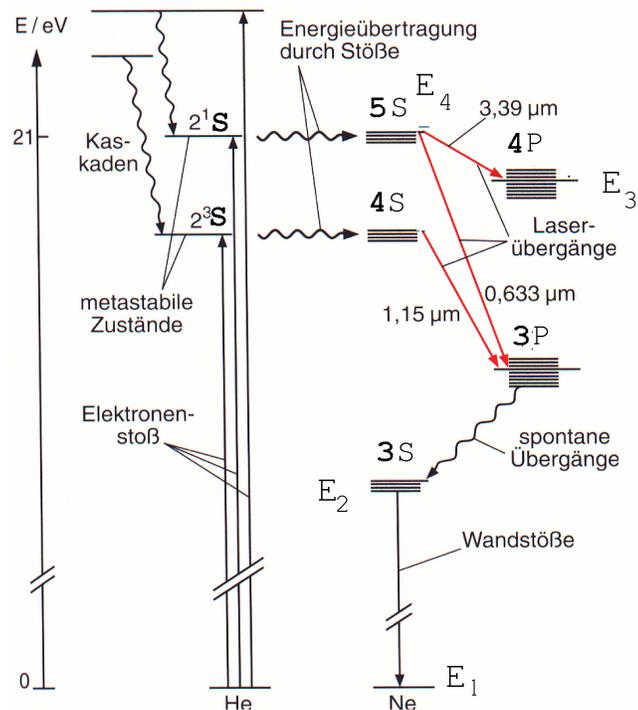


Dieser **optische Resonator** spielt eine entscheidende Rolle. Nur parallel zur Achse laufende Photonen werden verstärkt. Es bilden sich stehende Wellen wenn die Resonatorlänge  $l$  ein ganzzahliges Vielfaches der halben Laserwellenlänge beträgt, mehr dazu später.



### 18.3. He-Ne-Laser

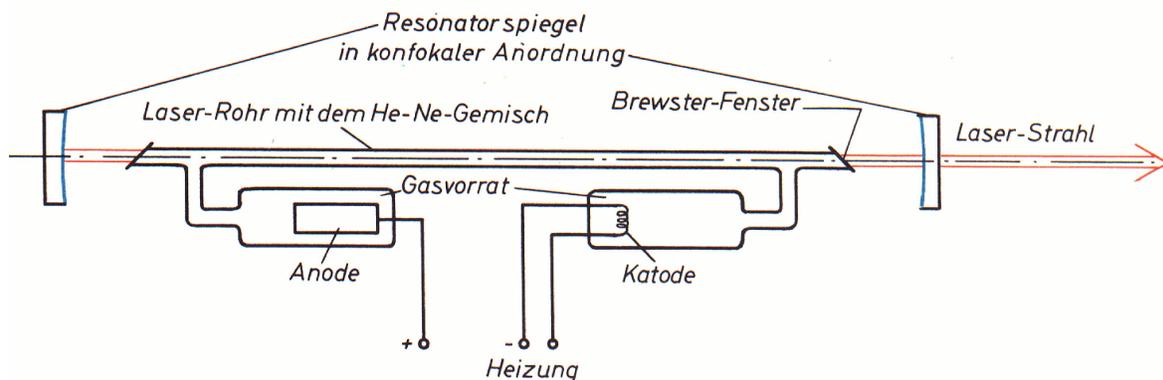
Der erste kontinuierlich arbeitende Laser ist der 1961 erfundene Helium-Neon-Laser. Das aktive Medium ist Neon-Gas, aber die 80%ige Beimischung von Helium ist entscheidend für die Herstellung der Besetzungsinversion. In einer Gasentladung werden u.a. die langlebigen He-Zustände  $2^1S$  und  $2^3S$  angeregt. Ein Dipol-Strahlungsübergang zwischen den angeregten Helium-Niveaus und dem Helium-Grundzustand verletzt die Auswahlregel  $\Delta l = 1$ , daher die hohe Lebensdauer. Die angeregten Helium-Atome können ihre Energie sehr effizient auf  $4S$  und  $5S$  Anregungszustände der Neontome übertragen, die sehr ähnliche Energiewerte aufweisen. Letztere können auch direkt aus dem Grundzustand durch Elektron-Stöße angeregt werden, aber dieser Beitrag ist kleiner. Es gibt mehrere Laserübergänge, u.a mit einer Wellenlänge von 633 nm (rot). Das zugehörige untere  $3P$ -Niveau 'zerfällt' schnell spontan, wird also schnell entleert, so dass Besetzungsinversion in Bezug auf  $5S$



und  $3P$  auftritt. Hier spricht man vom 'Vier-Niveau-Laser'. Ein Wiederauffüllen der Zustände mit  $E_3$  aus dem Grundzustand ist schwierig und daher selten: Ein optischer Übergang erfordert nahezu 20 eV, bei einem Elektron-Stoßprozess würde der Bahn-Drehimpuls unverändert bleiben.

FRAGEN: Warum sind jene Helium-Zustände metastabil ? Wieso gibt es keinen Laser-Übergang zwischen diesen und dem Helium-Grundzustand ?

Realisierung: Kontinuierliche Gasentladung bei einem Druck von etwa 1 mbar. Das Gasrohr muss

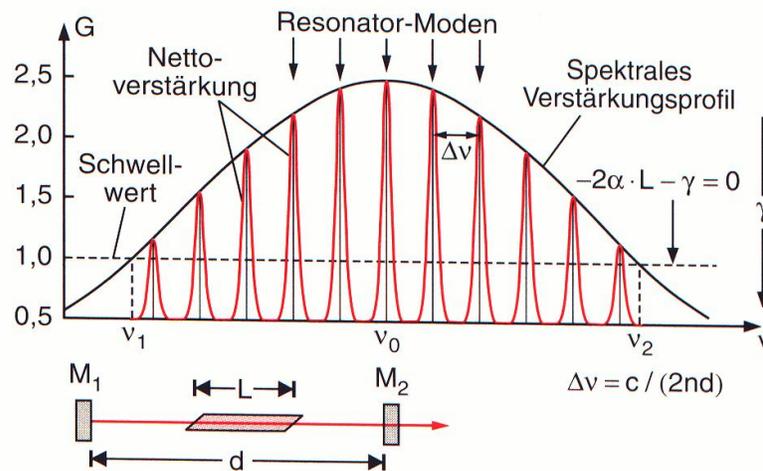


dünn sein, damit es viele Wandstöße zur Entvölkerung des  $3S$ -Neon-Niveaus gibt.

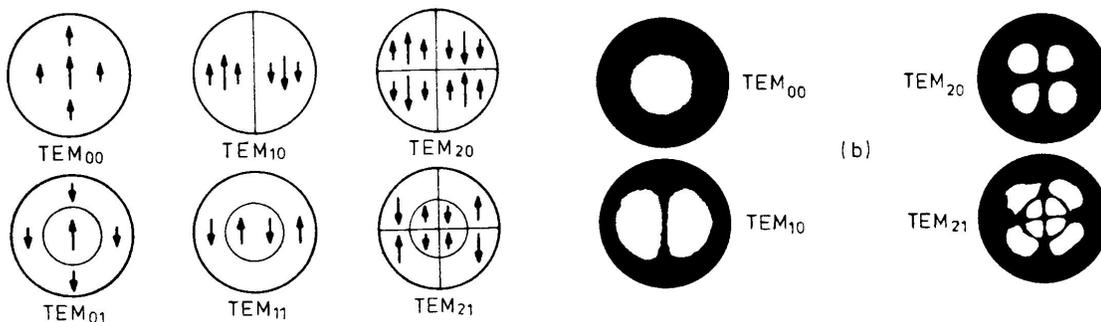
**VERSUCH:** He-Ne Laser

### 18.4. Resonatoren und Moden

Man benutzt zwei planparallele Spiegel im Abstand  $d$  oder zwei sphärische Spiegel ('konfokaler Resonator') mit Krümmungsradien  $r_1 = r_2 = d$ . Bestimmte Frequenzen, die stehenden Wellen entsprechen, werden verstärkt. Die resultierende Linienbreite ist in der Regel viel kleiner als die Breite der Laserlinie. Es tragen also verschiedene Resonatormoden gleichzeitig zum ausgekoppelten Licht



bei. Diese Moden unterscheiden sich außer in der Frequenz auch in der Verteilung der elektrischen Feldstärke in der Ebene senkrecht zur Strahlachse. Dies ist eine Folge der Beugung an den endlich großen Spiegeln. Bei kreisförmigen Spiegeln ergeben sich folgende Feldstärke- bzw. Intensitätsverteilungen für einige Transversale Elektro-Magnetische Moden: Durch geeignete 'Störmanöver' kann



man unerwünschte Moden unterdrücken (unterhalb die Verstärkungsschwelle bringen), z.B. durch Einfügen einer planparallelen Platte mit hoher Finesse. Man kann so einen Einmoden-Laser erhalten, der insbesondere auch nur bei einer Wellenlänge emittiert.

Linear polarisiertes Laserlicht kann man erzeugen, indem man eine Brewster-Platte unter dem Brewster-Winkel innerhalb des Resonators in den Strahl stellt. Die beim einfachen Lichtdurchgang entstehende partielle Polarisation wird durch den Verstärkungseffekt auf nahezu 100% erhöht. Brewster-Fenster haben ferner den Vorteil, dass sie bei 'richtiger' Polarisation nahezu 100% durchlässig sind, siehe Einsatz im He-Ne-Laser.

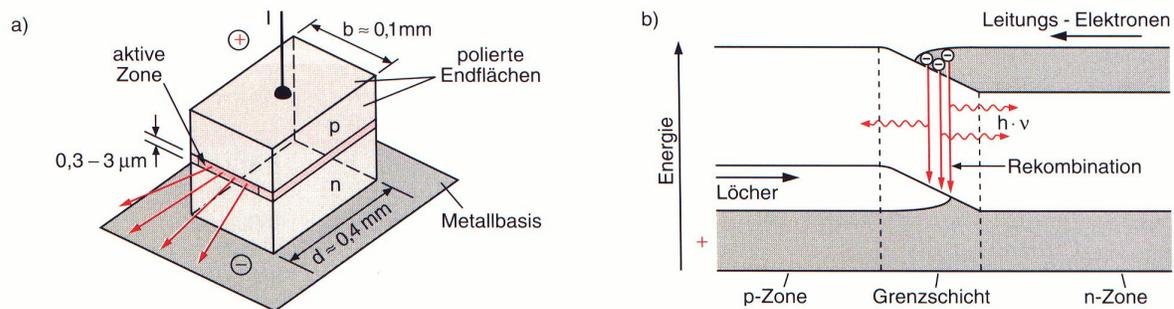
**VERSUCH: LASER**

## 18.5. Andere Lasertypen

Man kann Laser nach verschiedenen Kriterien klassifizieren, etwa nach Aggregatzustand des Lasermaterials (Festkörper, Gas, Flüssigkeit), nach der Zeitstruktur (kontinuierlich, gepulst) oder nach der Leistung ('Laserklasse').

Hier sollen noch zwei wichtige Typen vorgestellt, deren spezielle Eigenschaften sie in erster Linie dem aktiven Lasermaterial verdanken:

**Halbleiterlaser** Eine Diode in Durchlassrichtung wird benutzt, um Besetzungsinversion zu erzeugen.



Man kann sehr kleine Dioden recht einfach herstellen, da man die polierten Kristallflächen gleichzeitig als Resonator verwenden kann. Der Wirkungsgrad für die Umwandlung der elektrischen Energie in Licht erreicht in gängigen **Laserdioden** 25%, das ist ein sehr hoher Wert.

*Anwendungen:*

*CD-Laufwerke (Lesen und schreiben), Laser-Pointer*

**Anschauungsobjekt:** Laser aus CD-Laufwerk etc

## Farbstofflaser

Komplexe Moleküle (organische Farbstoffe), die in einer Flüssigkeit gelöst sind, zeichnen sich durch eine große Zahl eng benachbarter Energieniveaus aus (s. Kapitel 11), die durch Wechselwirkung mit dem Lösungsmittel so weit verbreitert werden, dass sie überlappen und daher in einem recht breiten Frequenzband ( $\sim 100$  nm) die Laserbedingung erfüllen.

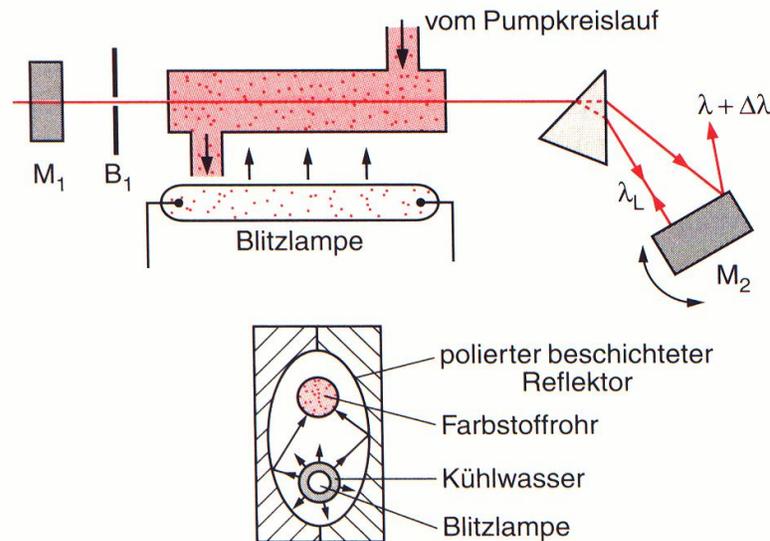
Extern kann dann durch Variation der Resonatorparameter, durch Gitter oder Interferometer die Auswahl der Wellenlänge erfolgen: Durch Verändern der Parameter dieser optischen Elemente ist das Laserlicht in der Wellenlänge *durchstimmbar*. Darin liegt sein großer Vorteil gegenüber anderen Lasern.

## 18.6. Eigenschaften und Anwendungen

- **Divergenz**

Durch das Laserprinzip selbst erzeugt man einen Strahl mit sehr kleiner Winkeldivergenz, die man durch Linsen weiter verbessern kann. Man erreicht Öffnungswinkel von  $10^{-5}$ .

*Anwendungen:*



Entfernungsmessungen ('Laser ranging'), z.B. zwischen Erde-Mond: Laserstrahl wird an einem auf dem Mond aufgestellten Reflektor ('Katzenauge') reflektiert und die Laufzeit gemessen:  
Tests des Gravitationsgesetzes

Laser-Pointer

- **Intensität**

Fokussierung auf  $10 \mu\text{m}$  ist möglich, bei einer Laser-Dauerleistung von  $10 \text{ W}$  bedeutet dies  $I = 10^5 \text{ W}/\text{mm}^2$ .

Anwendungen:

Materialbearbeitung, Chirurgie

Kernfusion via Trägheits-Einschluss

- **Kohärenz**

Kohärenzlängen von vielen km sind erreichbar.

Anwendungen (siehe Physik III):

Interferometrie (z.B. Michelson-Apparat als Gravitationswellendetektor)

Holographie

CD-Player

- **Linienschärfe**

Bei Einmodenlasern kann man Linienbreiten von weniger als  $1 \text{ Hz}$  erreichen.

Anwendungen:

Laserspektroskopie: genaue Anregung bestimmter Übergänge

Frequenznormal

- **Pulsbetrieb**

Mit einer Pockels-Zelle (elektrooptischer Effekt) kann man Laser in  $t = 10^{-9} \text{ s}$  ab- und anschalten.

Durch Ausnutzung nichtlinearer Effekte beim Durchgang durch Materie kann man Laserpulse auf  $10^{-15}$  s verkürzen ('optische Impulskompression')

*Anwendungen:*

*zeitaufgelöste Spektroskopie*