

# - Laser / Maser -

## 1. Das Funktionsprinzip

Zur Beschreibung der Funktion eines Lasers geht man von drei möglichen Elektron-Photon-Interaktionen aus:

Absorption eines Photons:

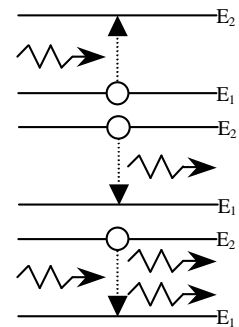
Ein Photon trifft auf ein Elektron mit der Energie  $E_1$ . Das Elektron absorbiert das Photon und hat nun die Energie  $E_2 = E_1 + hf$ .

Spontane Emission eines Photons:

Ein Elektron mit der Energie  $E_2$  fällt auf  $E_1$  zurück, wobei ein Photon mit einer Energie  $E_2 - E_1 = hf$  frei wird.

Stimulierte Emission eines Photons („Lasing“):

Ein Photon bringt ein Elektron mit der Energie  $E_2 = E_1 + hf$  dazu, zurück auf  $E_1$  zu fallen, wodurch ein zweites Photon mit einer Energie von  $E_2 - E_1 = hf$  frei wird.



Ein Laser macht sich den letztgenannten Effekt zunutze, um Licht zu verstärken (**L**ight **a**mplification by **s**timulated **e**mission of **r**adiation). Das beim Lasing erzeugte Photon hat dieselbe Frequenz, Richtung, Polarisation und Phasenlage, der Laser sendet also kohärentes Licht aus. Eine gewisse Spektrallinienbreite des Lasers ergibt sich durch die kleinen Energieunterschiede des Photons von  $E_2 - E_1$ .

## 2. Energiebänder und die Geschichte des Lasers

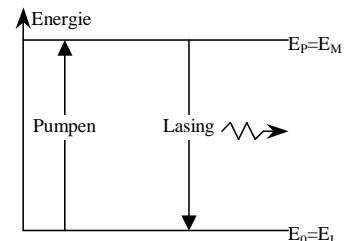
Damit die Vorteile des Lasings zum Tragen kommen ist es notwendig, daß die Rate der stimulierten Emissionen gegenüber der Rate der spontanen Emissionen und Absorptionen so hoch wie möglich ist: zu viele spontane Emissionen stören die Kohärenz des aus dem Laser austretenden Lichts, zu viele Absorptionen (zer)stören den Kaskadeneffekt.

Im sichtbaren Bereich (z.B. für grünes Licht bei Zimmertemperatur) berechnet sich aber die Rate von stimulierten Emissionen pro spontaner Emission  $\eta$  zu einem Wert in der Größenordnung von  $10^{-40}$ . Stimulierte Emissionen kommen also so gut wie nie vor.

$$\eta \sim \left( e^{\frac{h \cdot f}{k \cdot T}} - 1 \right)^{-1}$$

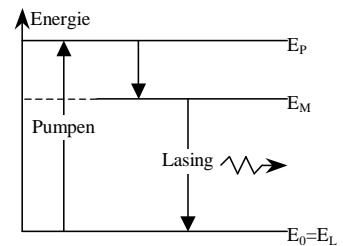
Ganz anders dagegen im Mikrowellenbereich: Bei Frequenzen um 1 GHz liegt  $\eta$  im Bereich von  $10^{+4}$ , man spricht dann von einem „aktiven“ Lasermedium. Es ist daher nicht weiter verwunderlich, daß der erste Laser, der 1954 von C. H. Townes, J. P. Gordon und H. J. Zeiger entwickelt wurde, im Mikrowellenbereich arbeitete (daher Maser). Solche Maser findet man auch im Weltall, vorzugsweise in Regionen der Sternbildung.

Es ist aber auch möglich, daß  $\eta$  im sichtbaren Bereich Werte über 1 annimmt: Man muß lediglich deutlich mehr Elektronen im höheren Energieband anbieten, so daß es zu einer Populationsinversion zwischen den Energiebändern kommt. Das ist durch sog. „Pumpen“, die Zufuhr von Energie von außen, möglich. Die verbreitetsten Energieformen sind intensive Lichtblitze, Hochfrequenzradiowellen oder Primärlaserlicht, es wurden aber auch Mechanismen auf Basis von chemischer oder thermischer Energie entwickelt.



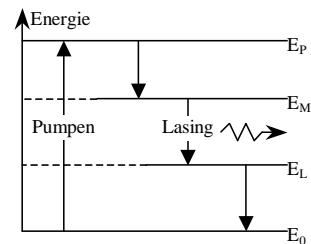
Je voller jedoch das höhere Energieband wird, desto mehr Pumpenergie ist notwendig, um noch Elektronen auf  $E_P$  zu pumpen - das Pumpen erfordert bald überproportional viel Energie und  $\eta$  wird bestenfalls 1.

Beim Rubin-Laser, den T. H. Maimann 1960 als ersten Laser entwickelte, existiert deshalb ein metastabiles Energieband  $E_M$  zwischen dem Grundlevel  $E_0$  und dem Pumpziel  $E_P$ , so daß sich hier  $\eta$  über 1 steigern läßt: Die Elektronen werden von  $E_0$  auf  $E_P$  gepumpt und fallen nach kurzer Zeit ohne zu „strahlen“ auf das metastabile Energieband  $E_M$  zurück. Auf diese Weise sind auf  $E_P$  immer „Plätze frei“. Lasing findet dann zwischen  $E_M$  und  $E_L=E_0$  statt. Trotzdem benötigt man immer noch sehr hohe Pumpenergien, da sich verhältnismäßig viele Elektronen auf  $E_L$  befinden, man also mehr als die Hälfte der Elektronen von  $E_L$  nach  $E_M$  bringen muß, damit sich Populationsinversion einstellt.



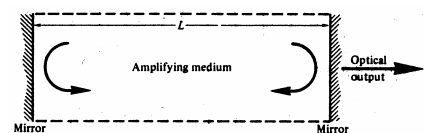
bringen muß, damit sich

Bei moderneren Lasern, wie z.B. dem Helium-Neon-Laser, existiert noch ein viertes Energieband. Lasing findet hier zwischen  $E_M$  und einem zusätzlichem Lasing-Zielband  $E_L$  statt. Von  $E_L$  fallen die Elektronen dann relativ schnell wieder auf  $E_0$  zurück, wodurch sich stets relativ wenige Elektronen auf  $E_L$  befinden, d.h. wenige Elektronen auf  $E_M$  genügen, damit sich Populationsinversion einstellt, also die Chance für stimulierte Emission größer als die für Absorption oder spontane Emission ist.



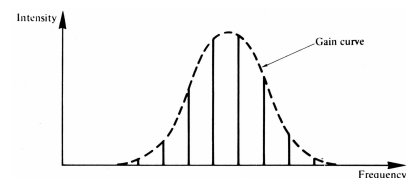
### 3. Aufbau von Lasern und emittiertes Licht

Da die lichtverstärkende Wirkung des Lasers nicht besonders groß ist, müssen die Photonen zur Erzeugung von intensivem Laserlicht einen relativ großen Weg im Lasermedium zurücklegen. Deshalb setzt man an das eine Ende des Mediums einen totalreflektierenden, an das andere Ende einen halbdurchlässigen Spiegel. Auf diese Weise wird verstärktes Licht immer weiter verstärkt, bis sich der Verstärkungsgrad mit Verlusten im Medium und an den Spiegeln die Waage hält.



Verstärkungsgrad mit Verlusten im

Es liegt - bedingt durch seine Entstehung durch Energieübergänge im Atom - in einem schmalen Frequenzbereich um  $E_2-E_1$ , und wird nur bei diskreten Frequenzen, für die sich zwischen den Spiegeln eine stehende Welle aufbaut, verstärkt.

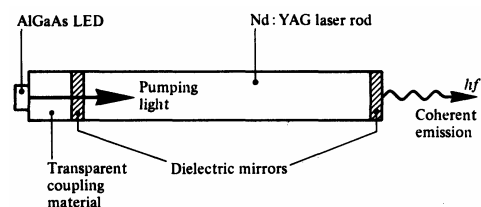


Dieses stark eingeeengte Linienspektrum qualifiziert den Laser besonders für den Einsatz z.B. in der Lichtleitertechnik.

### 4. Lasertypen

Laser lassen sich nach der Art des Lasermediums in Festkörperlaser (Rubin, Nd:YAG), Gaslaser (HeNe, CO<sub>2</sub>) und Halbleiterlaser (GaAs) aufteilen. Zwar ist als aktives Medium auch eine Flüssigkeit vorstellbar, diese Form des Lasers wird in der Praxis aber so gut wie nicht eingesetzt.

Beim Festkörperlaser, wie dem neodymiumdotierten Yttrium-Aluminium-Granat-Laser (Nd:YAG-Laser), wird das Lasermedium mit Fremdlicht bestrahlt.

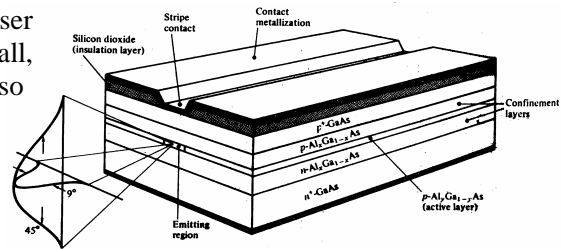


- + effektive Spektrallinienbreite von 0.01nm
- + hohe Lebenserwartung
- teuer
- groß
- wegen LED nicht schnell modulierbar, daher ist ein externer optischer Modulator nötig
- Dauerstrichbetrieb nur bei sehr kleinen Ausgangsleistungen möglich

Beim Gaslaser, wie dem Helium-Neon-Laser (HeNe-Laser) erfolgt das Pumpen entweder durch Fremdlicht oder durch das Anlegen einer Hochspannung. Es wurden aber auch andere Pumpquellen, z.B. Deuteriumfluorid im CO<sub>2</sub>-Laser entwickelt.

- + Dauerstrichbetrieb
- + hohe maximale Ausgangsleistung von bis zu 100 kW, gepulst bis zu 10<sup>12</sup> Watt (CO<sub>2</sub>)
- relativ geringe Lebenserwartung

Beim Halbleiterlaser, wie dem Gallium-Arsenid-Laser (GaAs-Laser), ist das aktive Medium ein Halbleiterkristall, an den Gleichspannung angelegt wird. Der Laser ist also zugleich LED.



- + hohe Ausgangsleistung bei kleinem Aufwand
- + extrem schnell modulierbar (im GHz-Bereich)
- + als Halbleiterbaustein in Staubkorngröße herstellbar
- + Dauerstrich- oder Impulsbetrieb
- + Betrieb mit Gleichstrom
- Spektrallinienbreite um 1nm

Gaslaser sind momentan noch die verbreitetsten Lasertypen, jedoch werden dem Halbleiterlaser die besten Zukunftschancen vorausgesagt. Er wird hauptsächlich im Gebiet der Elektronik, wie z.B. in CD-Playern, verwendet. Festkörperlaser werden meistens als Nachverstärker von bereits erzeugtem Laserlicht eingesetzt. Mit einem zusätzlichen Laser aus einer neodymium-dotierten Singlemode-Glasfaser läßt sich z.B. das Emissionsspektrum auf nur noch eine Wellenlänge einengen.

## 5. Einsatzbereiche

Aus den zahlreichen Vorzügen des Lasers, wie Schmalbandigkeit (bis 0.01 nm), kurzer Pulsdauer (bis zu 10<sup>-15</sup> s), hoher Ausgangsleistung (bis 10<sup>12</sup> W) und extrem kleinen Öffnungswinkeln, die im Idealfall nur durch die Unschärferelation begrenzt sind, ergibt sich eine breite Palette von Anwendungsmöglichkeiten:

- Laserskalpell
- Effektlaser, Laserzielmarkierer
- Messung von Entfernungen und Geschwindigkeiten
- Holographie, Datenspeicherung auf CDs, MOs, DVDs, auch holographische Datenspeicherung
- Datenübertragung mit Laser (Lichtleiter) und Maser (Kupferkabel<sup>1</sup>)
- Maser als „rauschfreie“ Verstärker in Satellitenübertragung und Radioastronomie
- Wegen hoher Stabilität der vom Maser erzeugten Frequenzen als Zeitbasis in Atomuhren
- Forschung: Lichtantriebe, Atom-„Laser“

## 6. Quellen

- John M. Senior: Optical Fiber Communications – Principles and Practice
- Focus 1/2000, S.90 und 4/2000, S.172
- <http://www.achilles.net/~jtalbot/glossary>
- <http://www.funkandwagnalls.com/encyclopedia/low/articles/m/m016000953f.html>
- <http://www.krref.krefeld.schulen.net/referate/physik/r0027t00.htm>
- <http://www.mobius.demon.co.uk/lasers/ele.html>, [devices.html](http://www.mobius.demon.co.uk/lasers/devices.html)
- <http://www.stud.uni-bayreuth.de/~a2803/laser.html>
- [http://www.tu-bs.de/institute/pci/aggericke/PC4/Kap\\_III/Laser.htm](http://www.tu-bs.de/institute/pci/aggericke/PC4/Kap_III/Laser.htm)

<sup>1</sup> Die Firma Media Fusion meldete im November '99 eine neue Übertragungsmethode zum Patent an: Datenpakete werden mit einer Rate von einigen MB/s über das magnetische Feld der Stromleitungen verschickt. Eingespeist werden sie über einen Maser, der Mikrowellen erzeugt.