

# Laser : Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

## Geschichte:

- 1917 Grundprinzip der stimulierten Emission ( Albert Einstein )
- 1960 Geburtsstunde des Lasers  
Erfinder: T.H. Mainman von Hughes Res. Lab in Maliba  
Gould hat bereits 1957 eine Laseranordnung skizziert
- 1958 wurde Maser von Towers Realisiert ( M = Microwave )

## 1 Eigenschaften der Laserstrahlung

### 1.1 Technische Eigenschaften

- hochfrequent  $f = \text{Frequenz} = (\lambda_0/c_0)^{-1} = (\text{Wellenlänge im Vakuum/Lichtgeschwindigkeit im Vakuum})^{-1}$   
 $= c_0/\lambda_0 = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s} / 633 \cdot 10^{-9} = 474 \text{ THz}$   
→ Übertragung von  $10^{14}$  bits/s möglich derzeit aber nur 120 GHz modulierbar

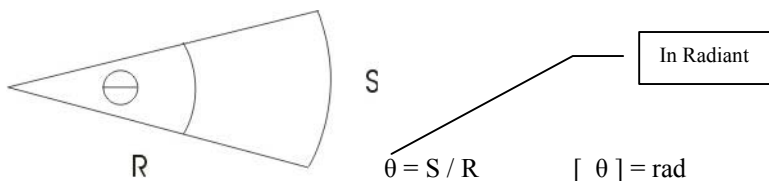
- monochromatisch (einfarbig)

Charakterisiert durch Frequenzbandbreite  $\Delta f$

Eine einzige Frequenz gibt es in der Natur nicht, nur in der Mathematik.

Realisiert wurden  $\Delta f = 1 \text{ Hz}$

- Parallel, divergent  $\theta$



typische Divergenzen beim Laser 1 mrad, d.h. in tausend Metern weitet sich der Strahldurchmesser auf 1 m auf, denn  $\theta = 1 \text{ m} / 1000 \text{ m} = 10^{-3} \text{ rad}$

- intensiv, charakterisiert durch Intensität = mittlere Leistung / Fläche =  $\bar{P} / A$   
erreicht wurden Leistungen bei PulsLasern von kurzzeitig  $10^{14} \text{ W/cm}^2$

- kohärent ( Wellen im Gleichschritt )

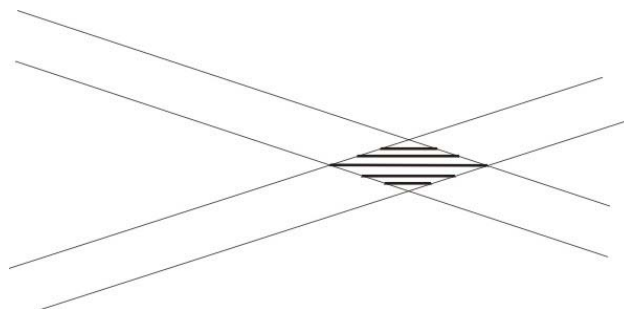
die Phasen der ausgesandten Wellen sind miteinander verkoppelt. Der Phasenunterschied ist sehr gering.

Charakterisiert wird Kohärenz durch Kohärenzlänge  $l_K = C / 2 \cdot \pi \cdot \Delta f$ . Das ist die Länge eines Wellenzuges.

Benötigt wird die Kohärenz bei der Holographie, sie bestimmt die Aufnahmetiefe.

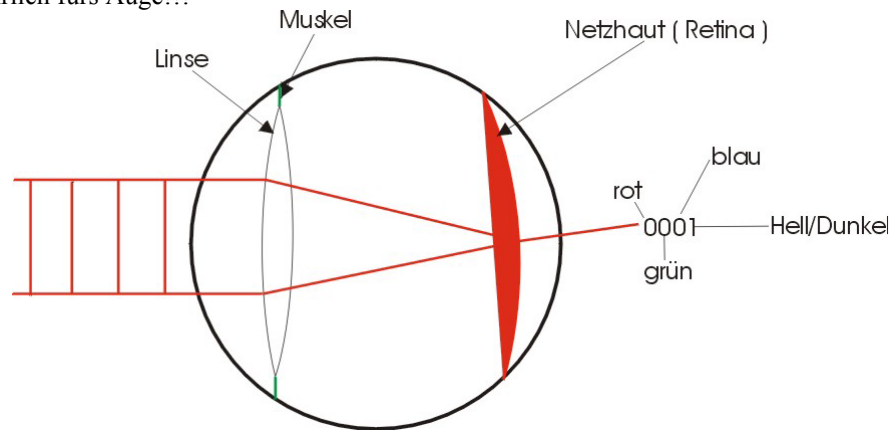
- interferenzfähig

Bei Überlagerung zweier kohärenter Lichtbündel gleicher Frequenz erhält man ein örtliches Interferenzmuster, dass aus Hell- und Dunkelstreifen besteht, die in der Winkelhalbierenden der beiden sich überlagernden Bündel liegen.



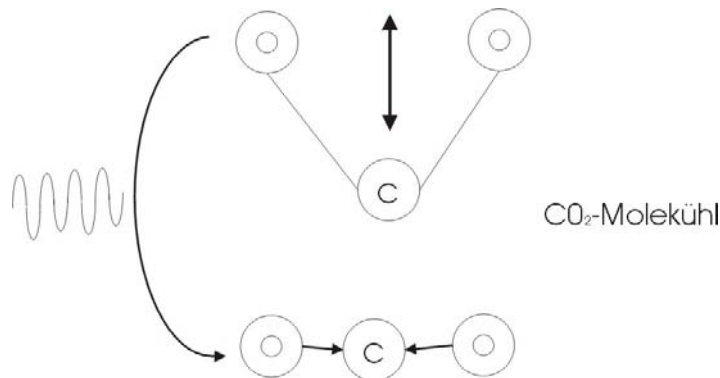
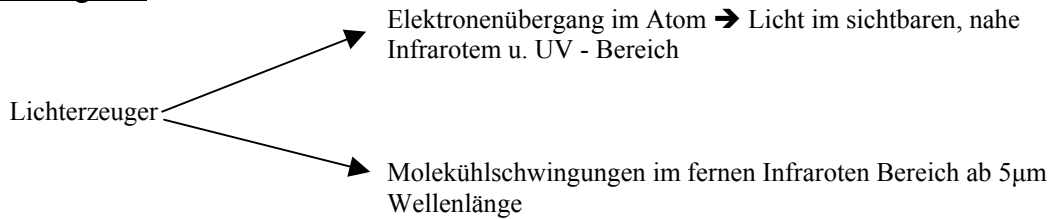
## 1.2 Augensicherheit

Laser sind gefährlich fürs Auge!!!



## 2. Aufbau und Funktionsweise von Lasern

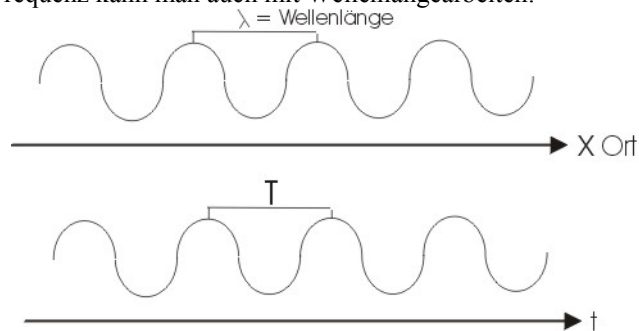
### 2.1 Grundbegriffe



Grundzustand: Elektronen und Moleküle haben niedrigste Energie

Angeregter Zustand: Elektronen nehmen kurzfristig höheren Energiezustand ein

Aussendung von Licht bzw. Photon der Energie  $\Delta W = h \cdot f$  mit  $W =$  Energie,  $h =$  Plancksche Konstante  $= 6,63 \cdot 10^{-34}$  Js,  $f =$  Frequenz bei Übergang von angeregtem Zustand in den Grundzustand. Statt mit Frequenz kann man auch mit Wellenlängen arbeiten:



$$\rightarrow \lambda_0 / T = c_0 = \lambda_0 \cdot f$$

Im Medium (z.B. Glas) ist die Lichtgeschwindigkeit kleiner.

$$C_0 / C_{\text{Med}} = n = \text{Brechungsindex} = \sqrt{\epsilon_r}$$

→  $C_0 / n = C_{\text{Med}} = C_M = f * \lambda_0 / n$  d.h. Wellenlänge verkürzt sich im Medium

Intensität einer Welle:  $\bar{P} / A = \text{mittlere Leistung} / \text{bestrahlte Fläche}$

Intensität:  $\bar{E}^2 / Z = \text{mittlere quadratisches Feld} / \text{Wellenwiderstand}$

$$Z_0 = 377 \Omega$$

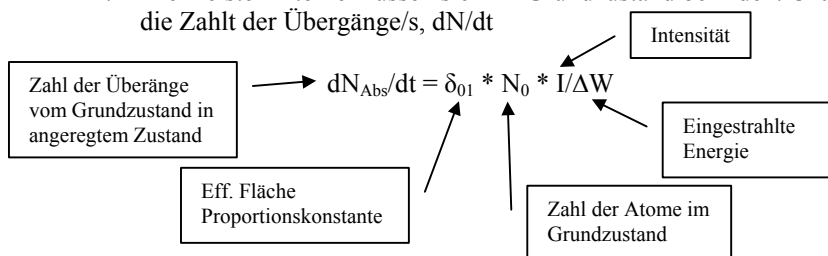
## 2.2 Elementare Wechselwirkungsprozesse



### Absorption

Findet unter 2 Bedingungen statt

1. Es gibt einen erlaubten Energiezustand über dem Grundzustand des Atoms, so dass Energie  $\Delta W = h * f$  der eingestrahlten Welle absorbiert werden kann.
2. Die meisten Atome müssen sich im Grundzustand befinden. Charakterisiert wird die Absorption über die Zahl der Übergänge/s,  $dN/dt$

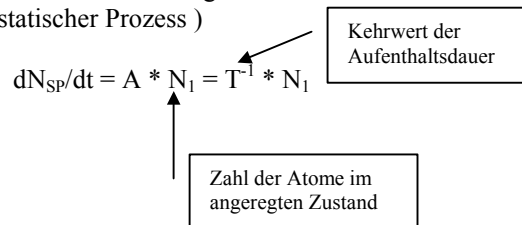


### Spontane Emission

Vorraussetzung:

Atom ist im angeregten Zustand

Nach ca.  $10^{-8} \text{s} - 10^{-9} \text{s}$  Aufenthaltsdauer = T geht Atom im Grundzustand und sendet ein Photon in irgendeine beliebige Richtung aus ( statischer Prozess )

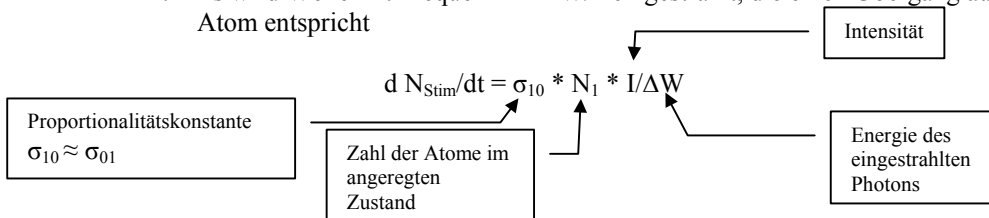


Es gibt einige Atome, bei denen T im Bereich 1 ms bis 1µs liegt. Man spricht von sog. metastabilen Zuständen

### Stimulierte Emission

Bedingung:

1. Elektron befindet sich im angeregten Zustand
2. Es wird Welle mit Frequenz  $f = \Delta W / h$  eingestrahlt, die einen Übergang auf ein erlaubtes Niveau im Atom entspricht

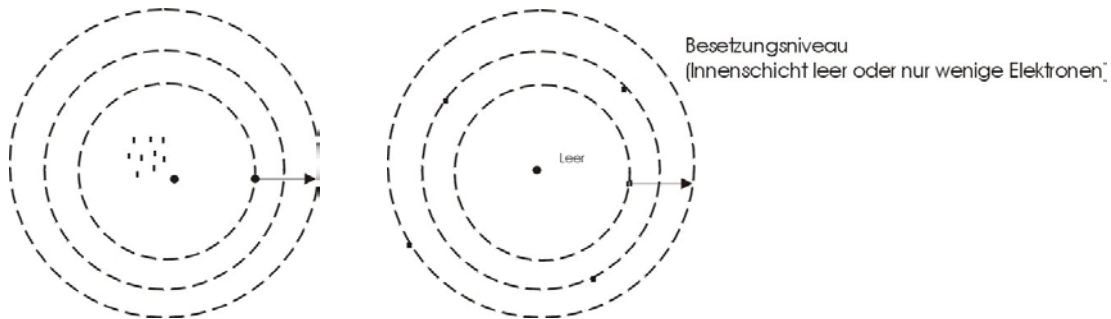


### Wahrscheinlichkeit für stimulierte Emission

$$\text{Stimulierte Emission/spontane Emission} = \sigma_{10} * N_1 * I / \Delta W / T^{-1} * N_1 = 1/10^{10}$$

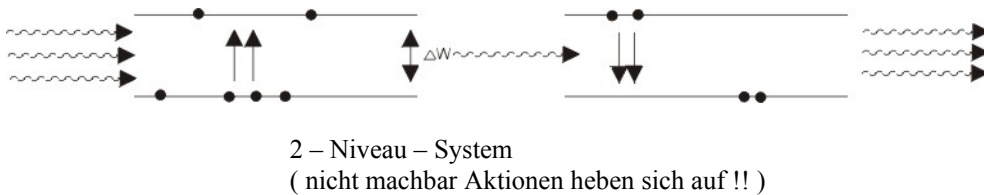
→ d.h. stimulierte Emission dann wahrscheinlich, wenn sich mehr Elektronen im angeregten Zustand befinden als im Grundzustand

1. Laserbedingung  
Oberes Laserniveau muss stärker besetzt sein, als das untere Laserniveau. Man spricht von Besetzungsinversion



### 2.3 Technische Anforderungen zur Erzeugung einer Besetzungsinversion

- Thermische Anregung nicht erfolgsversprechend, da  $N_1/N_0$  maximal bei unendlich hoher Temperatur genau 1 werden kann. Deshalb gibt es in der Natur keine Laser  
Folgerung von Mainman:  
Anregung nur mit frequenzselektiven Prozessen wie Spektrallampen, geschwindigkeitsabhängige Prozesse wie Beschleunigung im elektronische Feld oder chemische Prozesse
- Spontane Emission muss unterdrückt werden, indem man Atome auswählt mit metastabilen Zustand
- 2 – Niveau – Laser ist nicht machbar. Es muss Punktfrequenz von Laserfrequenz entkoppelt werden



### 2.4 Laserfähige Atomsysteme

3 – Niveau – System

$E_1$  = Grundniveau

$E_2$  = Pumpniveau, auf dass die Elektronen mit frequenzselektiver Anregung gebracht werden

$E_3$  = metastabiles Laserniveau

Laserübergang:  $E_3 \Rightarrow E_1$

Übergang  $E_2 \Rightarrow E_3$  ist strahlungslos, d.h. bei kleinen Energiedifferenzen wird die Energie durch Stöße mit Wand oder Kristall abgegeben. Daher ist es notwendig die laserfähigen Atome wie Chrom ( $^{3+}\text{Cr}$ ) in ein Kristallgitter als Stoßaufnehmer einzubetten.

4 – Niveau - System

- Wie 3 Niveau System jedoch mit zusätzlichem Niveau  $E_2$  nahe Grundzustand

- Laserübergang  $E_3 \Rightarrow E_2$ , wobei  $E_2$  im Gegensatz zum Grundzustand normalerweise leer ist.

- Zusätzlich technische Anforderungen

$E_2 - E_1$  – Übergang muss durch Stoßprozesse erzwungen werden

Vorteile:

- geringste Pumpleistung reicht zum Erreichen des Besetzungsniveaus aus
- Entkopplung des Laserniveaus und Pumpniveaus ist hierbei optimal, Pumpniveau und Laserniveau können sogar 2 verschiedenen Atomsystemen angehören. ( siehe HeNe - Laser )

Bsp.: Neodym – Atomsystem  $^{3+}\text{Nd}$  wird in YAG – Gitter eingebettet mit 0,5 – 3,5%  
Lebensdauer des oberen Laserniveaus  $T = 230 \mu\text{s}$

## 2.5 Einwegverstärker ( siehe Bild 2.6 )

Er besteht aus zylindrischen Kristall mit eingebetteten laserfähigen Atomen.

$$\text{Verstärkungsfaktor } G = I/I_0 = e^{\delta \cdot (N_1 - N_0) \cdot d} = e^{g \cdot d}$$

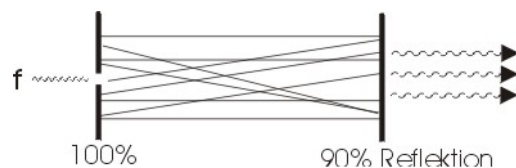
Differentielle  
Verstärkung

Lasermaterial	Verstärkungsfaktor	g
$^{3+}\text{Cr}$	G = 10	2,3/m
$^{3+}\text{Nd}$	G = 10	2,3/m
HeNe	G = 12	0,18/m

Verstärkung abhängig von Besetzungsdifferenz des Laserniveaus

→ Verstärkung steigt mit Länge

Um reale Länge zu reduzieren kann man den Lichtweg zwischen zwei Spiegeln halten.



Eine Anordnung zwischen zwei Spiegeln wird Resonator genannt. Es liegt Mitkopplung vor, da Verstärkung bei jedem Durchgang steigt. Jeder mitgekoppelte Verstärker neigt zum Schwingen ↔ ausgekoppelte Energie < verstärkte Erregung.

Dann findet Selbsterregung statt. Laser ist ein selbsterregter Oszillator, d.h. Einkopplung einer Welle ist nicht mehr nötig.

### 2. Laserbedingung

Die Verstärkung des Strahlenfeldes durch simulierte Emission je Durchgang durch den Resonator muss größer sein als die Verluste je Durchgang

Verluste:

- Auskoppelverluste 10 – 40%
- Absorption durch Spiegel 0,1%
- Justierfehler 1%

## 2.6 Laserbetrieb

Laser ist ein selbsterregter Oszillator d.h. hierbei ist erste und zweite Laserbedingung erfüllt. Es ist keine externe Lichtwelle zur Stimulation erforderlich. Durch Spontane Emission eines angeregten Atoms in Richtung der Laserachse wird die simulierte Emission aller anderen Atome induziert. Im Resonator ist die Laserintensität um ein Vielfaches höher als außerhalb. Zur Konstruktion des Lasers ist nur eine einzige Formel notwendig:

$$I / I_0 = e^{g \cdot z} \quad \text{mit } z = \text{Laufweg im Laserverstärker, } g = \text{diff. Verstärkung}$$

$$g = \alpha_i + \frac{1}{2} \cdot L \cdot \ln(1/R_1 \cdot R_2)$$

L = Resonatorlänge,  $R_1, R_2$  = Reflexivität der Spiegel

$R_1$  oder  $R_2 = 100\%$  und  $R_2$  muss berechnet werden

Beispiel: HeNe Laser  $g = 0,18/\text{m}$

$$L = 20 \text{ cm} \quad \alpha_i = 0$$

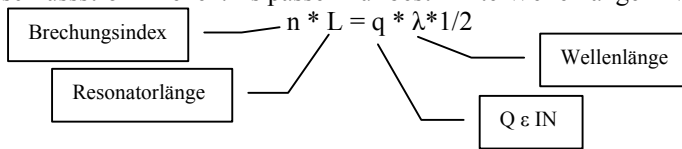
$$R_1 = 99,999\% \quad R_2 = 93\%$$

Tatsächlich wird aus Funktionssicherheitsgründen  $R_2 = 95\%$  genommen

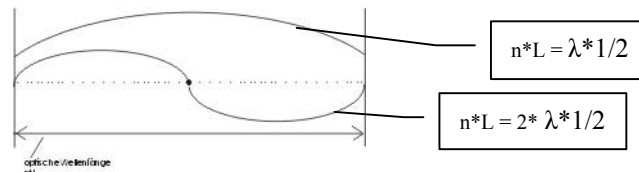
## 2.7 Eigenschwingung (Moden) im Resonator

### 2.7.1 Longitudinalmoden

An metallischen Spiegeln sind immer Schwingungsknoten ( $\vec{E} = 0$ ). Sonst würde infolge eines elektrischen Feldes ein Kurzschlussstrom fließen. Es passen nur bestimmte Wellenlängen zwischen die Spiegel:



(siehe Bild 2.7)



Alle Werte zwischen  $\lambda_q$  und  $\lambda_{q+1}$  sind nicht existent. Man spricht von Longitudinalmoden.

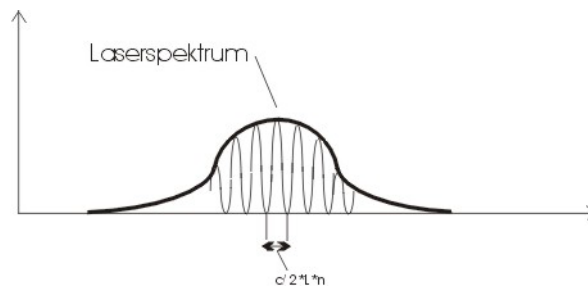
$$\text{Aus } f_g = q \cdot c / 2nL \leftrightarrow c / \lambda_q$$

Der Frequenzabstand  $\Delta f_M = f_{q+1} - f_q = c / 2n \cdot L = \text{konstante}$

→ Je länger der Resonator desto dichter liegen die Moden

Es werden nicht alle Moden mit Index q verstärkt, sondern nur die, die innerhalb der Verstärkungsbandbreite liegen (Bild 2.8)

Auswirkung der L - Moden:



#### Singelmodebetrieb

a) Resonator kurz

$$\rightarrow \Delta f_n = c / 2 \cdot n \cdot L$$

d.h.  $\Delta f_n$  wird groß, wenn L klein wird

Macht man L so klein, dass nur einen einzigen Longitudinalmode unter verstärkungsbandbreite paßt, dann wird nur eine einzige Mode verstärkt. Das wäre wirklich monochromatischer Betrieb.

b) Verstärkung groß machen

→ Verstärkungsbandbreite wird schmal

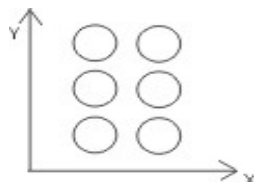
(Eigenschaft eines Verstärkers)

#### Transversal Moden

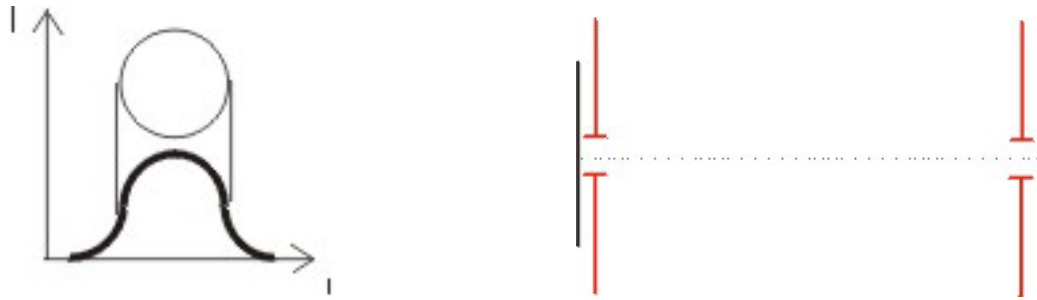
Sie entstehen durch Interferenz zwischen nicht axialen Strahlen und führen zur Aufspaltung des Strahls in mehrere Intensitätsflecken.

Man beschreibt die Moden durch die Anzahl der Nullstellen in x- und y- Richtung zwischen den Intensitätsflecken

$$TEM_{XY} = TEM_{12} =$$



Gewünscht wird in vielen Fällen TEM<sub>00</sub> als ein gausförmiges Intensitätsprofil.



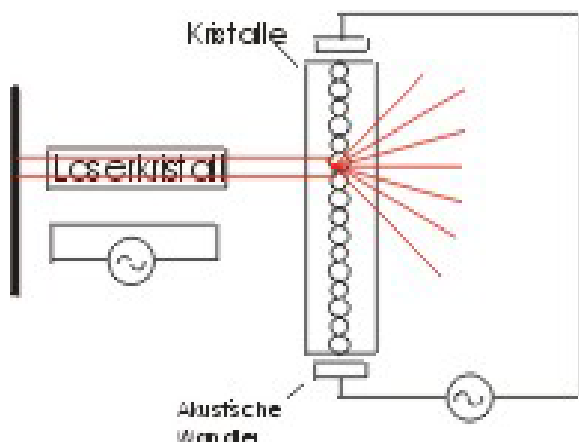
Technisch realisierbar durch Modenblenden vor dem Spiegeln. Sie verkleinern den Winkel zwischen den Strahlen.

## 2.8 Pulsbetrieb

### 2.8.1 Q – Switch – Betrieb

Q steht für güte eines Schwingkreises. Ein Resonator ist ein Schwingkreis, indem Licht hin und her oszilliert.

Prinzip: Laseroszillation läßt man erst dann anschwingen, wenn die durch Pumpstrahlung erzeugte Besetzungsniveau ihr Maximum erreicht hat. Dies wird durch einen innerhalb des Oszillators angeordneten Schalters erreicht, der den Lichtweg blockiert oder die Intensität soweit abschwächt, dass keine stimulierte Emission einsetzen kann (siehe Schwellverhalten). Der Verlust und damit die Güte des Resonators wird damit gesteuert. Als Schalter eignen sich rotierende Blenden, Spiegel, elektrooptische Schalter (Pockets – oder Kerr - Zellen), akustische Schalter, die eine Dichtemodulation im Kristall produzieren und damit Photonen aus Achsrichtung ablenken.



Schaltzeiten:  $2 \cdot L / c = T_{\text{Schalt}} \approx 10^{-9} \text{ s}$

Impulsleistung:  $P_{\text{Puls}} = 10^{11} \text{ W/cm}^2$

### 2.8.2 Mode - Locking

Diese Art der Schalter erzeugt Pulse von 10 – 100 Femtosekunden =  $10 \cdot 10^{-15} \text{ s}$  bis  $100 \cdot 10^{-15} \text{ s}$ .

Prinzip: Herstellung fester Phasenbeziehungen zwischen möglichst vielen Eigenschwingungen (Longitudinal Modes) Voraussetzung:

- breitbandige Verstärkung
- breitbandige Spiegel
- Unterdrückung des CW – Betriebs

Durch Überlagerung der Moden in einem solchen breitbandigen Resonator wird ein extrem schmaler Puls in der Mitte erzeugt. (siehe Bild 2.15). Problem ist phasenrichtige Kopplung, da die verschiedenen Longitudinal Moden eine unterschiedliche Ausbreitungsgeschwindigkeit haben. Die Kopplung erfolgt derart, dass durch eine Prismenanordnung die Wege kurzweiliger Moden verlängert und der langweiligen Moden verkürzt wird. Der optische Kerreffekt bewirkt Selbstfokussierung bei intensiven Impulsen. Dadurch kann der kontinuierliche Betrieb mit Hilfe einer Modenblende unterdrückt werden.

Anwendungen:

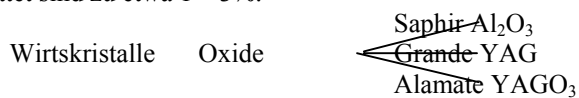
- Relativistische Beschleunigung von Elektronen im Kiefeld des Pulses (siehe Bild 3.12)
- Röntgenlaser aus Plasma mittels Femtosekundenlaser
- Positronenerzeugung
- Neutronenerzeugung
- Kernfusion

### 3 Lasertypen

- Festkörperlaser
- CO<sub>2</sub> – Laser
- Eximerlaser
- Diodenlaser

#### 3.1 Festkörperlaser

Sie bestehen aus optisch wirksamen Übergangsmetallen oder seltenen Erden mit 3 – Niveau – Übergängen wie Cr, Ni, Co oder 4 – Niveau – Übergang wie Nd, Er, Ho die in Kristallgitter, auch Wirtskristallen genannt eingebettet sind zu etwa 1 – 3%.



Beispiel: Rubinlaser      Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : <sup>3+</sup>Cr  
λ = 694,3 nm  
Δf = 300 GHz bei Raumtemperatur  
Pumpenergie: Xenon Lampen nur im Puls laserbetrieb sinnvoll  
P = 100 KW, Pulsenergie = 50 J  
Im CW – Betrieb max. 1 mW

2. Beispiel: Nd: YAG

#### 3.2 Gaslaser

##### 3.2.1 CO<sub>2</sub> – Laser

Vorteile: Wirkungsgrad ≈ 40%

Prinzip: 4 – Niveau – Laser

- N<sub>2</sub> = Stickstoff übernimmt den Pumppart
- CO<sub>2</sub> = Laserpart übernimmt Energieübertragung über elastische Stoßprozesse
- He = erhöht den Druck im Laser

Gemisch: CO<sub>2</sub> : N<sub>2</sub> : He  
: 1 : 6

Niveauschema: siehe Bild 3.5

Entleerung der unteren Laserniveaus erfolgt in einem Wärmeaustauscher in oder außerhalb des Resonators

Wellenlänge λ = 694,3 μm (FemInfraRot)

Pumpen erfolgt durch Hochvoltentladung oder durch Hochfrequenzentladung (Microwelle)

##### 3.2.2 He – Ne – Laser

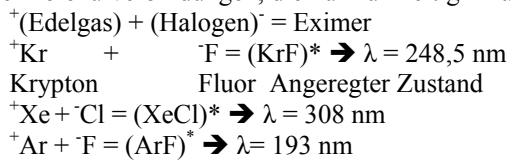
Lasermedium: - He – Ne – Gasgemisch im Verhältnis 5:1 mit ca. 1mbar = 100 Pascal

- He übernimmt Pumppart
- Ne übernimmt Laserpart
- Entleerung der unteren Laserniveaus in Neon erfolgt über Glaskapillare Ø ≤ 1mm
- Anregung über Niederdruckentladung bei Stößen von einigen Milliampere bei ca. 1250V.      Zündung bei 10.000V
- Wirkungsgrad < 0,1%
- Lebensdauer > 20.000 Std.
- Wellenlänge = 6333 nm ( rot )



### 3.3 Eximer-Laser (Eximer = Exited Dimer)

Spezielle Molekülverbindungen, die nur kurzzeitig im angeregten Zustand existieren.



Vierniveausystem:

Anregung erfolgt

- Vorionisation entspricht  $10^7/\text{cm}^3$  Elektronen
- In Hochdruckgasentladung mit 10 kV werden Elektronendichten von  $10^{15}/\text{cm}^3$  Elektronen in Lawinenprozess erzeugt

Laserverstärkung:

$10^4$  pro Durchgang nur als Pulslaser verfügbar

Repetitionsraten : 100Hz

Pulsenergie: 1 – 10 Joule

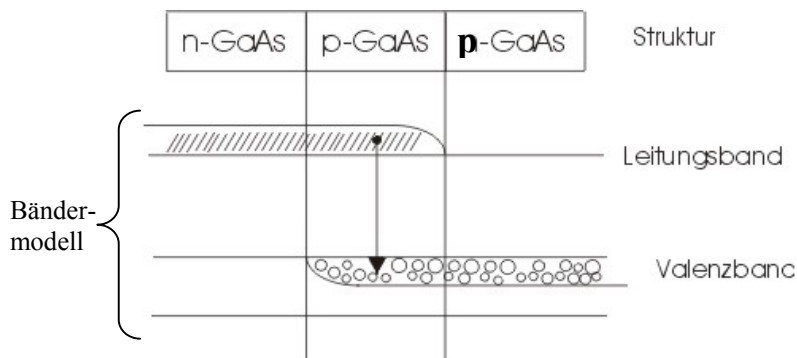
Pulszeit: 10 ns

Anwendungen:

1. Halbleitertechnik als UV-Strahlenquellen für die Photolithographie  $\rightarrow$  Strukturen von  $0,13 \mu\text{m}$  erzeugbar
2. Mikrostrukturierung von Kunststoffen
  - Mikrolinsenarrays
  - Zahnräder mit im Durchschnitt  $100 \mu\text{m}$

### 3.4 Halbleiterlaser (Diodenlaser)

#### 1. Homostrukturlaser

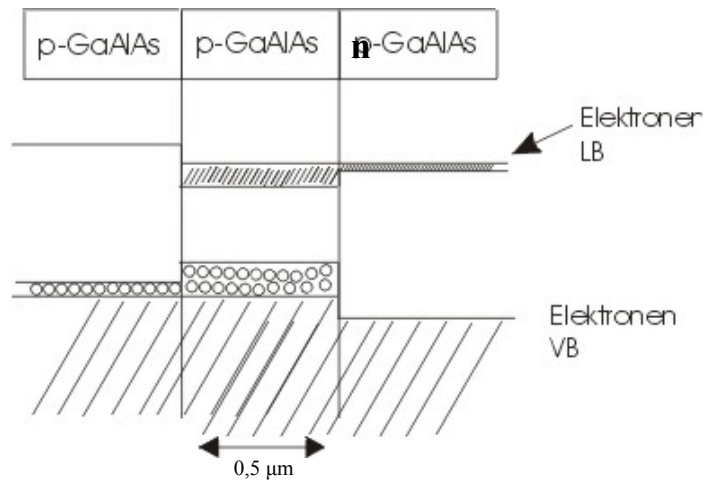


Besetzungsinversion  $\leftrightarrow$  wenn # Paare von Löchern im Valenzband und Elektronen im Leitungsband größer ist als Löchern im LB und Elektronen im VB.

Schwellströme für Laseremission bei  $100\text{kA}/\text{cm}^2$

## 2. Heterostruktur Laser

Übergangsbereich wird begrenzt



Schwellstromdichte bei ca.  $1 \text{ kA/cm}^2$

Man unterscheidet zwischen

- Kanten emittierenden Dioden
- VCSEL (vertical cavity surface emitting)

Anwendung:

- CD – Player  $\lambda = 750 \text{ nm}$
  - DVD – Player  $\lambda = 650 \text{ nm}$
  - Laser – Fernsehen
  - Laserprojektionen
  - Materialbearbeitung
- 2 Watt Laser werden zu Zeilen, dann Barren angeordnet, so daß 4 kW Laser produziert werden können

## 7. Holografie

holos = vollständig  
grafie = schreiben

Erfinder: Denis Gabor 1947/48

Um Gesamtheit einer Welle zu speichern benötigt man 3 Informationen:

Amplitude der Welle

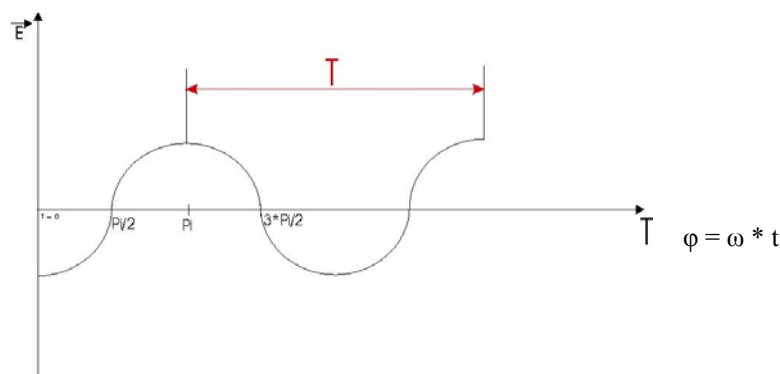
Phaser der Welle

Wellenlänge

Elektromagnetische Welle:  $\vec{E} = E_0 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$

Nullphasenwinkel

$$2 \cdot \pi \cdot f = 2 \pi \cdot c / \lambda$$



Fotographie speichert nur  $E_0^2 = \overline{E^2}$  = gemittelttes Quadrat der Amplitude der Welle

Wie hängt die Phase mit der Zeit zusammen??

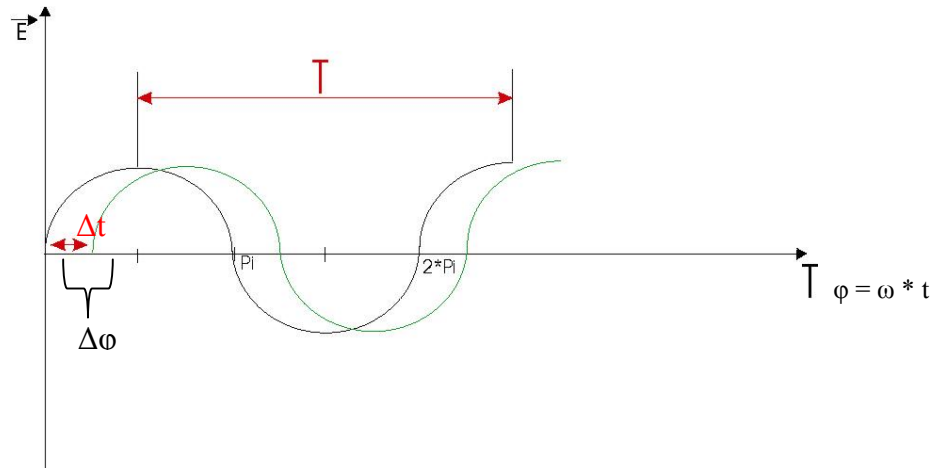
$$\Delta t / T = \Delta \phi / 2\pi$$

Schwingungsdauer

Um Phaseninfo zu erhalten, benötigt man 2 Wellen:

Referenzwelle

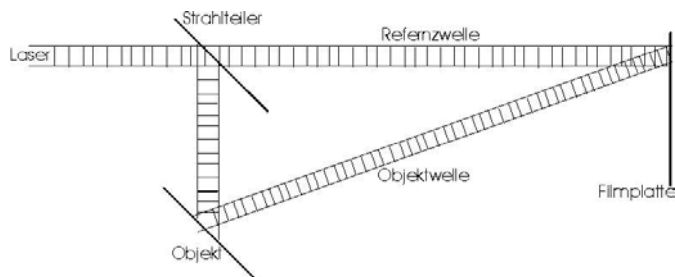
Objektwelle



### 7.1 Aufzeichnung eines Hologramms

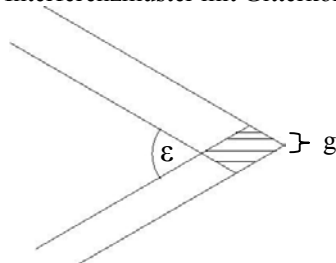
Die Tiefe eines Objektes liefert verschiedene Phasen in Bezug zur Phase der einfallenden Welle. Die Phasenbeziehung und damit die Tiefe läßt sich in Interferenzstreifenmustern zwischen einer Referenzwelle und Objektwelle auf einer Filmplatte abspeichern.

Voraussetzung: kohärente Lichtquellen mit fester Phasenbeziehung  
Herstellung mittels Strahlteilers



Beobachtungen:

- Interferenzmuster mit Gitterkonstanten



- Gitterkonstante  $g$  hängt vom Einfallswinkel ab. Nach Bild 7.3  $\sin \epsilon = \lambda / g$
- Phasenunterschied zweier Wellen äußert sich in einer Verschiebung des Gesamtgitters zum Nullpunkt der Filmebene

Hologramm eines Objekts enthält folgende Infos:

Amplitudenschwankungen  $\rightarrow$  Kontrastschwankungen auf Filmebene

Phasenschwankungen  $\rightarrow$  Positionsschwankungen des Interferenzmusters

Winkeländerungen zwischen Referenz und Objektwelle  $\rightarrow$  Abstandsschwankungen des Interferenzgitters

Bei holographischer Aufnahme ist Winkel  $\epsilon$  immer konstant und bestimmt auch den Winkel bei Wiedergabe.  
 Bild 7.5 zeigt Aufnahme eines Hologramms  
 Bild 7.4 Hologramm eines Punktes

Die Tiefeninfo steckt in den Phasenschwankungen des Interferenzmusters  $\Delta\phi = x/g * 2\pi$  mit  $x = \text{abs. Position}$

## 7.2 Wiedergabe des Hologramms

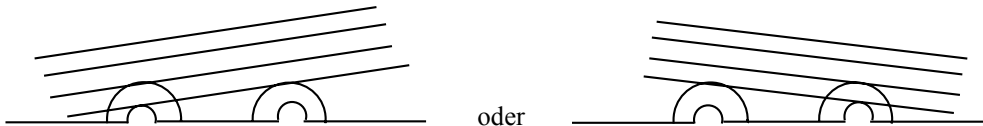
Sie erfolgt durch Ausnutzung von Beugungserscheinungen.

Beugung läßt sich verstehen, wenn man Spalte eines Hologramms als Öffnungen auffasst, aus denen Kugelwellen abgestrahlt werden. Diese Kugelwellen interferieren wieder konstruktiv in bestimmten Richtungen. Es entstehen Beugungsmaxima der Ordnung

0te Ordnung = Tangenten einer Kugelwellen, die gleichzeitig und gleichphasig von den Kugeln ausgehen

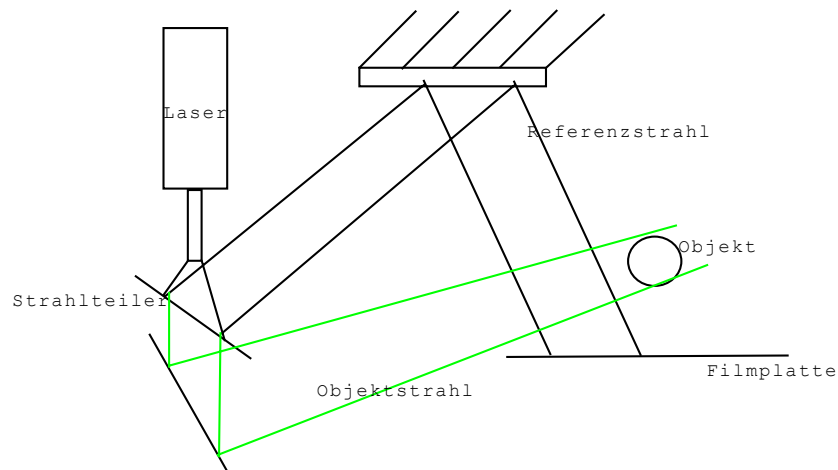


1te Ordnung = Tangenten an Kugelwellen, die gegenüber der ersten um einen Phase der Kugelwelle versetzt sind



Um einen Beugungsstrahl zu unterdrücken damit sich die gesamte Intensität des Holo im zweiten Beugungsstrahl 1ter Ordnung befindet, ist es zweckgemäß, bei der Aufnahme und Wiedergabe unter Winkel  $>45$  Grad zu arbeiten. (Siehe 7.7 unten)

Deshalb bevorzugter Strahlengang:



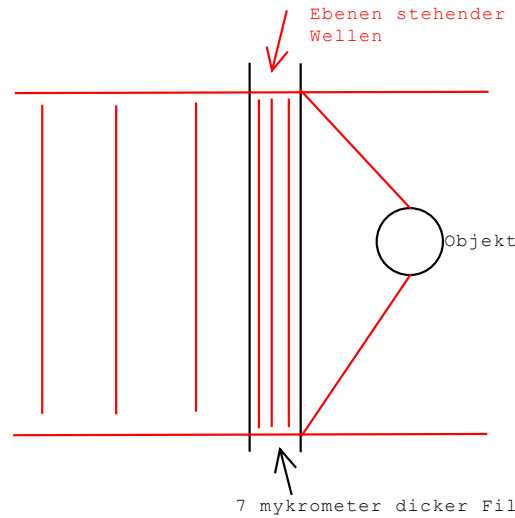
Wiedergabe erfolgt wie oben aber ohne Objektstrahl und ohne Strahlteiler. Letzterer wird durch Vollspiegel ersetzt.

Eigenschaften von Hologrammen:

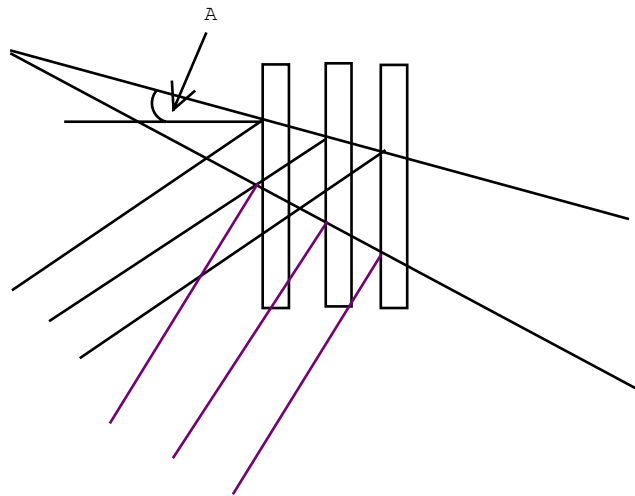
- in jedem Flächenstück ist gesamte Objektstruktur aufgezeichnet
- Objekt ist auf Filmebene nicht mehr lokalisierbar
- Bei Aufnahme und Wiedergabe sind keine Linsen außer zur Strahlaufweitung erforderlich
- Bei Wiedergabe macht sich Speckle – Muster bemerkbar, d.h. das Licht erscheint verklumpt. Dies ist bedingt durch Rauigkeit des Objekts und durch Beugungseffekte der Augenlinse.

### Hologrammtypen:

1. Amplitudenhologramme → Hologramme mit Schwärzungen, an denen Laserlicht absorbiert wird. Sie rühren von dem Silber nach Entwicklung eines Silberhalogenitfilms her
2. Phasenhologramme → Silber wird entweder herausgelöst. Dann entsteht Reliefstruktur (Bild 7.8) oder Silber wird in Silberoxid umgewandelt, das anderen Brechungsindex hat als das Filmmaterial
3. Volumenhologramme → Aufnahmen erfolgt durch folgendes Schema.



4. Mann nutzt die dicke der Emulsion zur Speicherung der Interferenzen zwischen Objektstrahl und Referenzstrahl aus. Es entstehen stehende Wellen, die zu Intensitätsmaxima führen. Die Wiedergabe erfolgt mit Weislichtquelle mit folgendem Schema:



Bragg – Reflektion →  $\Delta = 2 * d * \sin (A) = k * \lambda$