Optik

Brechungsindex $n = \sqrt{\varepsilon_r \cdot \mu_r}$ $E = E_0 \cdot e^{i(\omega t - kr)}$ x=i Elmagwelle

Kreisfrequenz $\Rightarrow \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$

Sichtbares Licht: ca 400–750 nm UV / Infrarot

$\lambda = \frac{2\pi}{k} \quad \frac{\omega}{c_0} k = \frac{\omega n}{c_0}$ (Wellenvektor)

c: Ausbreitungsgeschwindigkeit $c_{med} = \frac{c_0}{n}$

$\lambda = \frac{c}{f}$

Intensität $I = |E_{summe}|^2$

Beugung: optische $\lambda \Rightarrow OPL = n \cdot l$

Jeder Punkt kann als Ausgangspunkt einer Elementarwelle Angesehen werden

An Grenzflächen → n ändert sich

Geschwindigkeit ↓ wenn n ↑ $\lambda_n = \frac{\lambda_0}{n}$

Snellius $n \cdot \sin(i) = n' \cdot \sin(i')$

→ i vom Lot aus ! Reflexion $i = -i$

Satz von Fermat: Lichtstrahl verbindet 2 Punkte Über schnellsten weg.

Totalreflexion max Winkel $\sin i = \frac{n'}{n}$ Grenz

Akzeptanzapertur der Faser $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$

Dispersion: Brechungsindex abhängig von λ

$\Delta n = n(\lambda_1) - n(\lambda_2)$ Normale Disp. $\frac{\partial n}{\partial \lambda} < 0$

Absorption: Abschwächung der Intensität nach Lambert-Beer. Gesetz $I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha z}$

α: Koeffizient z=Dicke der Probe

Teilchencharakter $E = h \cdot f$ (Energie) $= h \cdot \frac{c}{\lambda}$

$h = 6{,}626 \cdot 10^{-34}$ Js $p = h \cdot k$ (Impuls)

Photonenfluss $\Phi = \frac{I}{E_1} = \frac{P}{AE_1}$

Intensität $I = \frac{P}{A} = \frac{E}{A \cdot t}$ $\rightarrow E = P \cdot t$

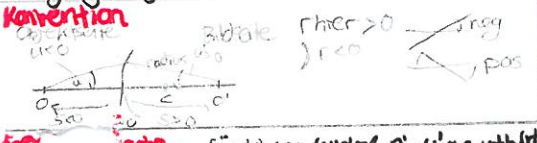
Gesamtenergie $E = \#d.Protonen \cdot E_{pro\,Photon}$

Geometrische Optik: Strahlen normal zu Wellenfront Strahlen gerade, keine Beugung, keine Beeinflussung → Snellius, nicht in einem Punkt, Abbildungsfehler

Paraxiale Optik: kleine Winkel, linear, Snellius vereinfacht, keine Fehler, ein Punkt, symmetrisch

Physik. Optik: Licht als Welle, Beugung, Airy, beugungsbegrenzt, Fehler,

Konvention



Grenzfläche für kleine Winkel $n' \cdot u' = n \cdot u$ mit $u = \frac{(n'-n)}{r}$

Bildlage unabhängig von u

$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n'-n}{r}$

Brechkraft $f = \frac{(n'-n)}{n \cdot r}$ [dpt] $n = 1$ bei Luft

Reflexion ebener Spiegel $r = \infty$

hohlspiegel $r < 0$, Spiegel $r > 0$

Reflexion: $n_i = -n'$; Brechkraftspiegel $f = \frac{-2}{r}$

Abbildungsgl. Spiegel $\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{r}$ + weil gl. Richtg

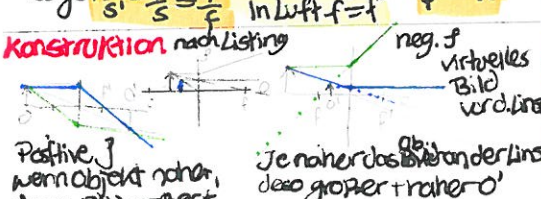
Dünne Linse

1 Fläche: $\frac{n_1'}{s_1'} - \frac{n_1}{s_1} = f_1$; 2. Fläche $\frac{n_2'}{s_2'} - \frac{n_2}{s_2} = f_2$

$\Phi = f_1 + f_2 = \frac{n_2'}{s'} - \frac{n}{s}$ $\frac{f'}{f} = \frac{n'}{n}$

Abbgl. $\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f}$ In Luft $f = f'$

Konstruktion nach Listing



Maßstab $\beta = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} = \frac{T_{mik}}{T_{ok}}$ Maßstab

vergrößerung $T = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{250mm}{f_1'}$

ohne

∴ s = f

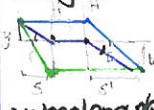
Abstab: Tiefe in z-Richtung $\alpha = \frac{n'}{n} \cdot \beta^2$

$s' \text{ im } \infty \quad y' = -f' \cdot u$ Bild im Brennpunkt

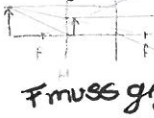
Dicke Linse: 2 Hauptebenen

Konstruktion

Pos f

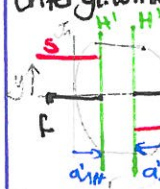


Neg f



N: Knotenpunkte

Strahlen dort verlassen unter gl. Winkel



f muss neg sein

$f_1 = \frac{n-1}{r_1} \quad f_2 = \frac{1-n}{r_2}$ für 2 Linsen

$\Phi = \frac{1}{f'} = f_1 + f_2 - \frac{d}{n} f_1 f_2$

$\Phi = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) + \frac{(n-1)^2 d}{n r_1 r_2}$ für 1 Linse

Hauptebenen: $a_{1H} = f' \cdot f_2 \frac{d}{n}$

$a_{2H'} = -f' f_1 \frac{d}{n}$ $f' = \frac{n'}{f}$

$f' = \frac{h_1}{u}$

Linsensysteme: analog zu dicken Linsen

Luft dazwischen $n = 1$

Paraxialer Gewichtungsfaktor $\omega_K = \frac{h_K}{h_1}$

$f = \sum \omega_K \cdot f_K$ Gesamtbrechkraft

Retrofokus: Sammelnd neg Frontlinse + pos Linse Weitwinkel H' hinter dem System > 0

Teleobjektiv: pos Frontlinse + neg Linse H' vor dem System teleobjektiv

Tubuslänge $t = d - f_1 - f_2'$ $t > 0$ Hauptebenen

Brennweite $f' = \frac{-f_1 \cdot f_2}{t}$

Brechkraft $\Phi = \frac{1}{f} = f_1 + f_2 - d f_1 f_2$

$a_{1H} = \frac{-f_1 \cdot d}{t}$ $a_{2H'} = \frac{f_2 \cdot d}{t}$

Mikroskop Objektiv + Okular: ZB mit Okular betrachtet $f' = -\frac{f'_{obj} \cdot f_{ok}}{t}$ $T = \frac{250}{f_1'}$

Bild im Unendlichen → Paralleles Licht

Afokales System $t = 0$ Brennpunkte fallen zusammen

Winkelvergrößerung $T = \frac{\omega'}{\omega}$ 2 Pos. Linsen

Teleskop: Kepler: Bild umgekehrt $T = \frac{-f_1}{f}$ mit Zwischenbild ↔ schlüsselloch blick

Galilei: Bild aufrecht $T > 0$ Objektiv + neg L.

Varioskop: variables Abstand, Zoom: f variabel

Variofaktor / Dehnungsfaktor $V = \frac{f_{max}}{f_{min}} = \frac{B_{max}}{B_{min}}$

Blenden begrenzen Lichtweg / Lichtstrom der vom System aufgenommen wird

II Hauptstrahl mitte der Blende

I und III: Randstrahlen

Größe (ø) der Blende $d_{BP} = 2h$

K = Öffnungszahl / Blendzahl

$k = \frac{|f'|}{2n} = \frac{|f'|}{d_{BP}} = \frac{1}{2NA}$!

Beschriftungen: Fotoobj: 1,4 / 50 (K / f in mm)

Fernglas: 10 x 50 (Winkelvergrößerung / ø dep in mm)

Mikroskop obj: 60 x 0,8 (Vergrößerung / NA) Okular: 10 x 12 mm (T / sehfeld zahl)

$NA = n \cdot \sin\alpha$ Numerische Apertur

Belichtungszeit $\sim z \cdot k^2$ also $\sqrt{2}$ $d_{BP}' = \sqrt{2} d_{BP}$

wenn zeit $\frac{1}{2}$ $NA^* = \sqrt{n_{kern}^2 - n_{mantel}^2}$ Grenzwinkel Lichtleiter

Auflösung / Schärfentiefe

Auflösungsvermögen (Abbe) $\Delta x = \frac{0{,}61 \cdot \lambda}{NA}$

Schärfentiefe: Zerstreuungskreis, der noch scharf ist $D_f = \frac{\delta_g}{z \cdot NA}$ (3 Pixel als δ_g)

Pupillen Linsenfassung / Irisblende

AP: Bildseitiges Bild der Blende, falschherum durch Linse schauen, Blende ist objekt

$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f}$ Bild scheinbar aus AP

EP: objektseitiges Bild der Blende

Blende vorder Linse: EP = Blende, keine optik davor, kepler Teleskop: AP im Auge

Galilei: AP liegt zw d. 2 Linsen → Auge ist nicht dort → schlüsselloch blick

Telezentrisch: Hauptstrahl ∥ zur opt. Achse

EP in ∞, vergrößerung unabhängig von s

nicht telezentrisch: Hauptstrahl nicht parallel

Fehler

Ein/Austrittsluke, z.B. begrenzt Bild, schlechter: Angabe der Feldgröße bei Okularen

10x / 22 bedeutet 10x Vergrößerung Ø 22 mm

Vignettierung Begrenzung anders als Pupille feldabhängige Begrenzung, Intensität am Feldrand reduziert → Bildfehler

Feldlinse Amort des ZB im Vignettierung zu vermeiden Köhlersche Beleuchtung: Abbildung der Lichtquelle in AP / EP verteilt Lichtquelle nicht scharf im Bild

Beugungslimit ohne Bildfehler Durchmesser $d \geq \frac{1{,}22 \cdot \lambda}{NA}$ Point Spread funk PSF

MTF: modulation transfere func. Strichgitter + Beugung + Fehler

$\max V_{max} = \frac{2NA}{\lambda}$ (Frequenz)

Fehler

Wellenaberration: Wellenfronten eher Ellipsen als Kreisform

Öffnungsfehler / sphärische Abb: große Öffnung → Strahlen schneiden sich nicht in einem Punkt

Koma: Zerstreuungskreis nimmt mit Öffnung zu komatische Schweif

Astigmatismus: Pupille 2D 2 Richtungen fokus rückt auseinander → Unschärfe

Petzval ohne Astigmatismus: Bildfeldwölbung mit dem Radius $\frac{1}{R_p} = -\sum_K \Phi_K / n_K$ wieder gewichtete Lösung → Triplett

$R_p = 0$ Bildfeld eben

-Verzeichnung: Linse + Blende: kissenförmig

Blende + Linse: tonnenförmig $V = \frac{y'_{real} - y'_{ideal}}{y'_{ideal}}$

Farbfehler

chrom. Bildfehler: Dispersion: n abhängig von λ

Blau mehr als Rot Maß für Dispersion / Abbe Zahl

$V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$ oder $V_e = \frac{n_e - 1}{n_F - n_C}$ $V = 20 - 90$

Kronglas: V klein: kleine Brechzahl, Flintgl. groß V; chrom. Variation der Brechkraft $\Delta f = f_d / V_d$

$\Delta f = \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)(n_d - 1) \cdot \frac{(n_F - n_e)}{(n_d - 1)}$

Achromasiebed.

2 Dünne Linsen in Kontakt $f = f_1 + f_2$ $f_1 = \frac{V_1}{V_1 - V_2} f$

Bed: $0 = \Delta f_1 + \Delta f_2 = \frac{f_1}{V_1} + \frac{f_2}{V_2}$ $f_2 = \frac{-V_2}{V_1 - V_2} f$

Auge Akkomodationsbreite: Bereich, indem man scharfstellen kann max 14 dpt $\Delta D = \frac{1}{s_{fern}} - \frac{1}{s_{nah}}$

Myopie (Kurzsichtigkeit): Auge zu lang, Cornea zu gekrümmt, f zu klein: Neg Linse

Hyperopie: (Weitsichtigkeit): Auge zu kurz, cornea zu wenig gekrümmt, f zu groß: Pos. Linse

Stäbchen: Kontrast, Zapfen: Farbe

Fovea: Gelber Fleck bestes Sehen

Blinder Fleck: Sehnerv: Papille

Tagsehen ca 560 nm / Nachtsehen 500 nm

Adaption: Anpassung an Helligkeit über Pupille 8-2

$\frac{n}{f} - \frac{n'}{f'} = f = \frac{n' - n}{r}$ Gesamt f = 590 Pt

$f \neq f'$ da keine Luft dazwischen $f = 22mm$ $f' = ?$

fern: zonulafasern gespannt, ciliarmuskel entspannt

Nah: entspannt, gespannt

Auflösungsvermögen Beugung an der Pupille

$d_{Airy} = \frac{1{,}22 \cdot \lambda}{\sin\theta \cdot n}$ $\sin\theta = D/2f$ $d_{Airy} = 5{,}7\mu m$ Pol gen

Schärfentiefe (visus) 1/ winkelmin

Astigmatismus: Stabsichtigkeit / immer Unscharf → zylinder Linse

Beleuchtung Einfluss auf Kontrast + Auflösung

Auflicht: von oben beleuchtet / Durchlicht von unten

Beleuchtungs NA: Blende vor der Lichtquelle

wenn NA klein: Kontrast hoch (bei Auflicht)

Hellfeld: Gegenlicht: komplette Breite, Dunkelfeld von der Seite Beleuchtet + spinnennetz (nur auf objekt)

Winkelauflösung Auge $\alpha_c = \frac{n \cdot d_{Airy}}{f'} = 0{,}3 mrad = \frac{1}{\ldots}$

Winkelauflösung Mikroskop $\omega = \frac{y}{f_2}$ oder $\frac{}{f}$ $\Delta\omega = \frac{\Delta y}{f}$

$\Delta\omega = \frac{0{,}61 \cdot \lambda}{NA \cdot 250mm} \cdot T_{ford}$ $T_{ford} = \frac{\Delta\omega}{\ldots} = (2-4)$

$\approx 10-30$

OP Mikroskop $T = \frac{f_{TL}}{f_{OB}} \cdot T_{200} \cdot \frac{250\,mm}{f_{OK}} = 3-15x$

Tiefenauflösung

$\Delta a = \frac{a \cdot y_P}{P} = \frac{\alpha \cdot a^2}{P}$ unterschied davor / dahinter

P = Pupillenabstand

a: entfernung zum fixpunkt (vorne)

α: Stereowinkel in rad

y_P' stereoskopische Parallaxe $\alpha = \frac{y_P}{a}$

$\Delta a_{Auge} = 45\mu m$ / Lateral 75 µm

bei Instrumenten: $\Delta a = \frac{a \cdot f_0'}{P} = \frac{\alpha_{Auge} \cdot f}{\gamma \cdot f + f_{ok}}$

γ = Zoom

Schärfentiefe δ: Auge

$2D_f = \frac{1}{NA^2} + \frac{0{,}3\,mm}{NA \cdot f_{OPMI}} + \frac{250mm^2}{f_{OPMI}} \left(\frac{1}{s_{fern}} - \frac{1}{s_{nah}}\right)$ winkelweg Akkomodation

(2 Linsig) $V_{mikro} = V_{obj} \cdot V_{oku} = \frac{f'_{obj}}{250mm} \cdot \frac{250mm}{f'_{oku}}$

(3 Linsig mit Tubuslinse $V_{mikro} = \frac{-f'_{Tubus}}{f'_{obj}} \cdot \frac{250mm}{f'_{oku}}$

Objektiv $\beta_{obj} = \frac{-f'_{TL}}{f'_{obj}}$ Okular: $V_{oku} = \frac{250mm}{f'_{oku}}$

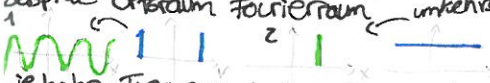
Fourier zerlegung in periodische Funktion

Ortsraum kann in Fourierraum umgerechnet werden → macht Rechnungen einfacher

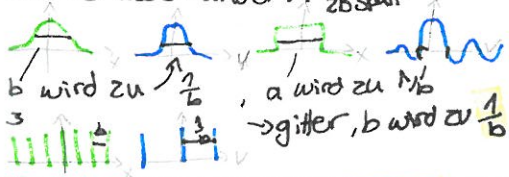
Ortsraum $u(x) = \int u(v) e^{2\pi i x v} dv$

F. raum $u(v) = \int u(x) e^{-2\pi i x v} dv$

Beispiele Ortsraum Fourierraum umkehrbar



je höher Frequenz, desto weiter sind die Striche auseinander v. zB Spalt



b wird zu $\frac{1}{b}$, a wird zu $\frac{1}{a}$ → gitter, b wird zu $\frac{1}{b}$

Einzellinse ebene welle fällt ein, kugelwelle aus



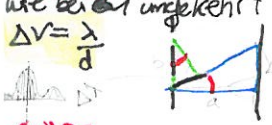
gerader Strahl wie bei 2, Winkel θ wie bei 1 $v = f \cdot \sin\theta$

Linse übersetzt Winkel in Ort (und umgekehrt)

Einzelspalt minima bei $\sin\alpha = \frac{k\lambda}{d}$, und max bei $\sin\alpha = \frac{2k+1}{2d} \cdot \lambda$ $\Delta\theta = 2\lambda/a$

Doppelspalt wie bei 1 umgekehrt Interferenzmuster

$\Delta y = \frac{\lambda}{d}$



2 ähnliche Δ winkel sind gleich $\frac{\Delta\lambda}{b} = \frac{\Delta x}{a}$

Gitter wie bei 3 $\sin\theta = v_m = m\frac{\lambda}{g} = \frac{n \cdot \lambda}{g}$

g = gitterconst höchste Beugungsordnung bei $\theta = 90°$

n = Ordnung L→ zB Strichgitter

2-f System Einzellinse

4 f System: 2 Linsen, Standard sind Punktlichtquellen



hier sind orte winkel orte getrennt

• Frequenzraum gut für Blende

Frequenzfilter Blenden begrenzen winkelraum

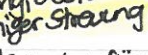
Nullstellen bei $x \pm \lambda/2NA$, breite eines 1D Punktes: $d_{PSF} = \lambda/NA$

Rechteckblende □ $dx_{PSF} = \frac{\lambda}{NA}$

Runde blende ○ $\frac{1.22}{NA}$

Je schmäler in eine Richtung, desto mehr streung, Blende größer: weniger Streuung

Rayleigh Kriterium 2 objekte noch auflösbar, wenn Max 1 im Min 2 liegt



NA entspricht Begrenzung im Winkelraum → verbreiterung des Punktbilds $\Delta x = \frac{0,61 \cdot \lambda}{NA}$

Filter

Kantenfilter: ab einer λ wird geblockt, darunter frei

Bandpassfilter: nur bestimmte λ

Fresnel Reflexion R = Reflexion T = Transmission

$T = 1 - R$ $R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2$ mehrere Linsen $T = (1-R)^{\text{Flächenzahl}}$

Intensitäten $I = n \cdot I_0$ oder $R_1 \cdot I_0$

Für destruktive Interferenz muss $I_1 = I_2$ gelten

Antireflexschicht parallele Strahlen

best. Interferenz $\Delta\phi = (2m+1) \cdot \frac{\lambda}{2}$

R-Schichtdicke $d = \frac{\lambda}{4 n_{AR}}$ λ/4-Schicht

aus $I_1 = I_2$ folgt trotzdem Restreflexion

$n_{AR} = \sqrt{n_0 \cdot n_s}$

schräger Einfall: Je nach Winkel Dest/Konst.

Spektrometer: Aufbau Lichtquelle, Spalt - Linse - Prisma/gitter - Linse - Selektionsspalt - Detektor

Dispersion Winkeldispersion $D = \frac{d\theta}{d\lambda}$ Prisma: materialabh. Gitter Beugung

Spektrales Auflösungsvermögen $A = \frac{\lambda}{\Delta\lambda}$

Zumindest Trennung von λ

Beugung an Öffnung: $d\theta_B = \pm \frac{\lambda}{a}$ (Nullstellen)

$A = \frac{\lambda}{d\lambda} = a \cdot D$ a = Öffnung D: Winkeldisp. $= \frac{N}{m}$

verbessern durch größeres N: Spaltzahl/Ordnung m

Dispersion am Gitter

$D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d\cos\theta_m}$ Gitterg $\sin\theta_m = m \cdot \frac{\lambda}{d}$

d = gitterperiode θ: Beugungswinkel

Auflösungsvermögen am Gitter $A = \frac{m \cdot L}{d} = mN$

N = Anzahl d. Spalte Je größer N, desto schmäler maxima und kleiner Nebenmaxima

Prismenspektrometer

$D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{d\theta}{dn} \cdot \frac{dn}{d\lambda}$ Strahlenverlauf symm.

Brechzahl. materialab.

winkeld. $D = \frac{2 \cdot \sin(\alpha/2)}{\cos i} \cdot \frac{dn}{d\lambda}$ Basislänge

Auflösungsvermögen: $A = \frac{\lambda}{d\lambda} = a \cdot D = b \cdot \frac{dn}{d\lambda}$ material

Effektive Öffnung des Prismas: $a = l \cdot \cos i$

Radiometrie: phy größe, SI Einheit bei allen λ

Photometrie: sichtbares Licht, Auge als detektor spezielle Einheiten (Lux, lm, cd)

↳ mit V

Umrechnung: $\Phi_v(\lambda) = 683 \frac{lm}{W} \cdot V(\lambda) \cdot \Phi(\lambda)$

Strahlungsleistung / Lichtstrom

$\Phi = \int_\lambda \Phi(\lambda) d\lambda$ [W] $\Phi_v = \int \Phi_v V(\lambda) d\lambda$ [lm]

$V(\lambda)$ ist gg: bei λ = 560 (Tagsehen) $V = 1$

sonst ≠ 1: v. spektrale Helligkeitsempfindlichkeit

Strahlstärke / Lichtstärke

$I = d\Phi/d\Omega$ [W/sr] $I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega}$ [lm/sr = cd]

Raumwinkel $d\Omega = \sin\theta \cdot d\theta \cdot d\varphi = \frac{dA_\perp}{r_2^2}$

θ: Lichtkegelöffnung

Skizze: normalerweise

für Lichtkegel $\Omega = 2\pi \cdot (1 - \cos\theta)$

Halbraum $\Omega = 2\pi$, Vollraum 4π

Ausstrahlung / Lichtausstrahlung

$M = \frac{d\Phi}{dA}$ [W/m²] $M_v = \frac{d\Phi_v}{dA}$ [lm/m² = Lux]

→ Leistung, die vom Ort emmitiert wird (Quelle)

Bestrahlungsstärke / Beleuchtungsstärke

$E = d\Phi/dA$ [W/m²] $E_v = d\Phi_v/dA$ [Lux]

→ Leistung pro fläche die bestrahlt wird

→ Isotope quelle $E = 1/r^2$ (weitentfernte Punktquelle)

Bestrahlung / Belichtung (Dosis)

$H = E \cdot T$ [Ws/m² = J/m²] $H_v = E_v \cdot T$ [lux · s]

→ wie viel Lichtmenge/Energie pro Fläche und zeit T = Belichtungsdauer

Strahldichte / Leuchtdichte

$L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega dA \cos\theta}$ [W/m²sr] $L_r = \frac{d^2\Phi_v}{d\Omega dA \cos\theta}$ [cd/m²]

→ maß für Helligkeit, je kleiner Lichtquelle und gleicher Intensität, desto heller

Lichtleitwert / Etendue

$L = d\Phi/dH$ mit $dH = dA \cdot \cos\theta \cdot d\Omega$

→ beschreibt orts + winkelausdehnung

$H = \pi \cdot A \cdot NA^2$ $H = H'$: Enterdue, Etraltung

→ wenn I_v const: $\Phi_v = I_v \cdot d\Omega$ **Lichtstrom**

→ wenn L const $\cdot I(\theta) = L \cdot A \cdot \cos\theta$

(Lambertsch-cos-Gesetz)

Photometrisches Grundgesetz: Übertragene Leistung geg durch Abstand und Sender/Empfängerfläche

Leuchtdichte von Lichtquellen kann nicht erhöht werden

Laser basieren auf Übergängen zw Energieniveau

$E_{Photon} = \frac{h \cdot c}{\lambda} = E_2 - E_1$: $\lambda_{Photon} = \frac{h \cdot c}{E_2 - E_1}$

Absorption: Durch Photon anregung eines Teilchens von E_1 auf E_2

$I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha z}$

wegen $I \sim e$ I wird nie = 0

I = Intensität

α: Absorptionskoeff. (materialab)

z: Dicke der Probe

$I(z) = \langle \vec{E}^2 \rangle$ (Lambert-Beersches Gesetz)

Spontane Emission von Photonen: Angeregtes Teilchen geht auf E_1 zurück → Licht wird fre

Zerfallsgesetz $d I_{sp} = \frac{1}{\tau_{sp}} \cdot N_2 dt$

Stimulierte Emission von Photonen

Licht wird erzeugt 2 kohärente Photonen

$dI = \sigma_{12} \cdot N_2 I \cdot dz$

Verstärkungsfaktor g (Gain) [1/m]

$g = \sigma_{12} \cdot (N_2 - N_1)$ σ_{12} = Wirkungsquerschn.

$I = I_0 \cdot e^{gz} = I_0 \cdot \exp((N_2 - N_1)\sigma_{12} \cdot z)$

Pumpmechanismus muss oberes Niveau auffülle

zB optisch, el, chem.

- Resonator (Rückkopplung über Spiegel
- Verstärkungsmedium (Besetzungsinversion)

Spiegelabstände: $L = m \cdot \lambda/2$

Laserfrequenz $\nu = \frac{c}{\lambda} = m \cdot c/2L$

Spiegel gebogen $\omega_0 [1 + \ldots]$ ω_2

Intensitätsverteilung $I(r) = I_0 \cdot \exp\left[-\frac{2r^2}{\omega_0^2}\right]$

Strahlradius $\omega(z) = \omega_0 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$

z: Position in z Richtung

$z_0 = \frac{\pi \cdot \omega_0^2}{\lambda}$ Rayleigh range / konfokalparameter

Divergere $\Theta = \frac{\lambda}{\pi \cdot \omega_0}$ Wellenfrontradius $R(z) = z + \frac{z_0^2}{z}$

$z \ll z_0$: Asymptoten

$z \gg z_0$: $\omega(z) = \omega \cdot z/z_0$ $\omega_0 = \frac{\lambda}{\pi NA}$

Matrizen

Strahl = s $\begin{pmatrix} h \\ u \end{pmatrix}$ hohe Winkel → Paraxial

Strahlausbreitung $\begin{pmatrix} 1 & -L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h' \\ u' \end{pmatrix} = (A) \cdot \begin{pmatrix} x \\ u \end{pmatrix}$

Brechung an Ebener Fläche $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & n_1/n_2 \end{pmatrix}$

Dünne Linse $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \beta & 1 \end{pmatrix}$

→ immer von hinten multiplizieren $T = L_1 L_2 \ldots$

$1\,cm^2 = 0,0001\,m^2$ $A = \pi r^2$

$1\,mm^2 = 1 \cdot 10^{-6}\,m^2$

$\mu = \frac{E_{nutz}}{E_{zu}}$ -el Leistung

Wechselwirkungen zw Licht u. Materie

Brechung, Reflexion Absorption, Photoeffekt

Fluoreszenz, Streuung

Vermessung des Auges Keratograph (Hornhaut

Skiaskop

OCT: optische kohärenz Tomographie

axiale Auflösung $\Delta x = \frac{\lambda}{NA^2}$

laterale Äuflösung $l_c = \lambda^2/\Delta\lambda$

Gesetz von Malus: Intensität von Polarisiertem Licht $I = I_0 \cdot \cos^2(\alpha)$

Kontrast $k = \frac{I_{max} - I_{min}}{I_{max} + I_{min}}$; $I_{ges} = I_1 + I_2 \pm 2\sqrt{I_1 I_2} \cdot \cos(\delta_2 - \delta_1)$