Allgemein

Sin(ua)n = NA

Frequenz $\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T}$

Wellenlänge $\lambda = \frac{2\pi c}{\omega} = \frac{c}{f}$

Grenzflächenindex $\lambda_n = \frac{\lambda}{n}$

Brechungsindex $n = \frac{c}{c_M} = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$

Lichtgeschwindigkeit $c = \frac{c_0}{n}$

Ebene Welle $\vec{E}(\vec{r},t) = \vec{E}_0(\vec{r})\, e^{i(\omega t - \vec{k}\vec{r})}$

Wellenvektor $k = 2\pi/\lambda = \omega/c$

Interferenz $I \propto |E_{Summe}|^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2\cos(\varphi_1 - \varphi_2)$

opt. Wellenlänge $OPL = nL$ $OPL = n_1d_1 + n_2d_2$

Snelliusches Brechung: $n\sin(i) = n'\sin(i')$ i gegen Lot

Totalreflexion b $\sin(i_{GB}) = \frac{n'}{n}$ Reflexion 100%

Faser $NA = \sqrt{n_1^2 - n_2^2} = \sin(u_E)$ Kegelöffnung

Satz von Fermat: Lichtstrahl verbindet 2 Pkte über Strecke mit kürzestem Zeitaufwand, nicht kürzestem Weg

Dispersion $\Delta n = n(\lambda_2) - n(\lambda_1)$ Brechungsindex abhängig von λ

norm. " $\frac{dn}{d\lambda} < 0$

Absorption $I(z) = I_0 e^{-\alpha z}$ α: Absorptionskoeff. [1/m], z Propendicke

L-Lambert-Beersches Gesetz: Abschwächung Intensität

optische Systeme

- Quanten: Licht ist Welle & Teilchen
  → Photoelektr. Effekt, Emission, Absorption Laser
- Physik: beinhaltet Wellenoptik, bigeom Optik
  → Max-Well-Gleichungen, Lichtwellen, Interferenz, Beugung, Polarisation
- geom: Strahlen sind Normale zur webenfront
  Satz von Haus $I = I_0 \cos^2(\alpha)$
  → Ausbreitung von Lichtstrahlen
  - Axiome 1 Strahlen laufen auf Geraden in homog. Medien
    2 keine Beugung, nur Reflexion & Brechung
    3 keine Interferenz, keine gg. Beeinflussung
    4 Strahlenwege sind umkehrbar
  → Brechungsgesetz, Lichtstrahlen, Abberation
- paraxial: Vereinfachung der geom Optik, Betrachtung von Lichtstrahlen die mit kl Winkel zu opt. Achse haben $\sin(\alpha) \approx \tan(\alpha)$
  - Annahme 1 Taylorentwicklung, 1. Ord.
    2 k. Winkel $\sin(\alpha) \approx \tan(\alpha) \rightarrow n\alpha = n\alpha'\cos(\alpha) \approx 1$
    3 k. Strahlenhöhe k. Krümmungen
    → nicht für Systeme ohne Symm. Achse
    4 Grenzbereich: Abberationen aufgrund von Abw. Weißstab, Hauptebene
  → Lins.: Brechungsgesetz, Paraxiale Größe: Brennweite, Brechkraft, Abbe, Weißstab, Hauptebene

Matrix

Paraxiale Optik, um rad

- Freiraum/Ausbreitungsstrecke L $\begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
- Brennweite $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{f} & 1 \end{pmatrix}$ dünne Linse
- Medium $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}$ M_2M_1
- $\begin{pmatrix} 1 & f \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
- verrechnung $\begin{pmatrix} y' \\ \alpha' \end{pmatrix} = M_1\begin{pmatrix} y \\ \alpha \end{pmatrix}$
- → Galilei-Teleskop $\alpha = 0 \Rightarrow \alpha' = 0$

Vorzeichen

1 Ursprung: Schnittpunkt
2 Licht links → reell+
   Strecken rechts → reell+
3 Winkel
4 Radien (+ −)

Linse $P = \frac{n'}{f'}$

dünn

$\frac{1}{f_{ges}} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}$

$\bar{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$

$f_{ges} = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d}$

$\alpha_{AH} = f_{ges} * \frac{1}{f_2}$

$\beta_{AH} = -f_{ges} * \frac{1}{f_1}$

dick

$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{n f_1 f_2}$ $\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2$

$\bar{f} = \frac{n}{\varphi} = \frac{n}{\varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2}$ $\frac{1}{f} = \frac{(n-1)d}{nr_1r_2}$

$\alpha_{AH} = f_{ges} * \frac{1}{f_2}$ $\psi_2 = \frac{\varphi_2}{n}$

$\beta_{AH} = -f_{ges} * \frac{1}{f_1}$ $\psi_1 = \frac{\varphi_1}{n}$

Gesamtbrennkraft $\varphi = \frac{1}{f} = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2$

$a = s - a_{AH}$

$\frac{1}{f} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{a'}$ $\frac{1}{f} = \frac{1}{a} - \frac{1}{s}$

$\beta_{ges} = \alpha_{AH} * f_{ges}$

a: Abstand Hauptebene - Objekt
s: Abstand Linse - Objekt

Lupe

Vergrößerung $\Gamma = \frac{\tan\alpha'}{\tan\alpha} = \frac{\text{Sehwinkel mit Instrument}}{\text{Sehwinkel ohne Instrument}}$

Sammellinse, Konvex
kürzere Brennweite → stärkere Vergrößerung
virtuelle Abbildung auf Seite des Betrachters
→ Licht wird so gebrochen dass Auge unter größerem Winkel wahrnimmt

Abbildungsgleichung

$\frac{\beta'}{\beta} = \frac{y'}{y} = \frac{n\alpha}{n'\alpha'} = \frac{dx}{dx'} = -\frac{f_2'}{f_1'} = \frac{NA}{NA'} = \frac{\Gamma_{Tub}}{\Gamma_{Obj}}$ Bildgröße / Objektgröße

$\varphi = \frac{n'}{f'} = \frac{n}{f} = \frac{\alpha'}{y'} = \frac{s'}{sf'}$

Brechkraft Einzelfläche $\varphi_E = \frac{(n'-n)}{r}$

$\frac{1}{\beta_1} = \frac{1}{\beta_{AP}} \frac{1}{\beta_{AP}}$ $D_{AB} = \frac{D_{AP}}{1\beta'1}$ $D_{AP} = \frac{\alpha_{AP}}{a_{AP}}$ $a_{AH} = s_{AP} - a_{AH}$

Objekt in ∞ (Winkel ω) $y' = -\omega f'$

Bild in ∞ (Winkel ω') $\omega' = y/f'$

$\tan(\alpha) = \frac{h}{f}$

Mikroskop

60x10.70

ohne Tubus $\Gamma_{Mikro} = \frac{-t}{f'_{Obj}} * \frac{250mm}{f'_{Okul}} = \frac{250mm}{f'_{Mikro}}$ $f'_{Mikro} = \frac{f'_{Tubus} * 250mm}{f'_{Obj} * f'_{Okul}}$

mit Tubus 3-linsig $\Gamma_{Mikro} = -\frac{f'_{Tubus}}{f'_{Obj}} * \frac{250mm}{f'_{Okul}}$ $f' = -\frac{f_1' * f_2'}{t}$

$a_{2U} = -\frac{f_{Obj}'^2}{t} \alpha_{2H} = \frac{f_{Okul}'^2}{t} > 0$ $\beta' = \frac{f'_{Tubuslins}}{f'_{Obj}}$

t Abstand f_1' f_2'

$t = d - f_1' - f_2'$ d Abstand der Linsen

förderliche Vergrößerung $\Gamma_{förd} = 500 \cdot \ldots \cdot 1000\,NA$

Immersion Medium mit ähnlicher Brechzahl wie objektnahes Linsenmaterial → mehr Auflösung, kleinerer Abb. fehler, verbesserte Lichtsammlung, höhere Vergrößerung

Zoom: variable Brennweite, Bild const., Verschiebung von Linsen → Veränderung f' → Veränderung β

Dämmungsfaktor $V = \frac{f'_{max}}{f'_{min}} = \frac{\beta_{max}}{\beta_{min}} = \frac{\Gamma_{max}}{\Gamma_{min}}$

Variator: ändert Brennweite & vergrößerung Maßstab

Kompensator: kompensiert Defokussierung & Bild scharf

Dunkelfeld: Licht fällt auf Objekt, sodass nur das Objekt gebeugtes Licht ins Auge gelangt → helles Objekt auf dunklem Untergrund

Hellfeld: gleichmäßige Beleuchtung und Kontrastbildung → objekte dunkel auf hellem Untergrund

Teleskop

Vergrößerung $\Gamma = -\frac{f'_{Obj}}{f'_{Okul}}$

Kepler-Teleskop: Objektiv+Okular, Bild umgekehrt

$\Gamma_z = \frac{w'}{w} = -\frac{f_1'}{f_2'} < 0$

Galilei-Teleskop: Objektiv+negative Linse, aufrechtes Bild

$\Gamma = \frac{w'}{w} = -\frac{f_1'}{f_2'} > 0$

Austrittspupille AP Lage $a_{AP} = -(f'_{Obj} + f'_{Okul})$

Okular

$\Gamma_{Okul} = \frac{250mm}{f'_{Okul}}$

Senfeldzahl 10x18mm

Blendenzahl $k = 2NA$

Objektiv

$\beta_{Obj} = -\frac{f'_{Tub}}{f'_{Obj}}$

100x 10.9 $NA = n\sin(\theta)$

Photoobjekt

Blendenzahl 2/60 Brennweite

Gauß-Familie

Hypergon-Typ: Sphärische Aberration & Farbfehler stärker nicht korrigierbar

Topogon-Typ: größere Öffnung, Astigmatismus korrigiert

Portraitobjektiv: Farbkorrektion öffnung und Bildfeldwölbung besser korrigiert

Dagor-Typ: Besonders gute Farbkorrektion

Auflösungsvermögen

Auflösungsgrenze $\Delta y = 0{,}61\,\frac{\lambda}{NA}$ Beugungsbegrenzung

förderl. vergrößerung $\Gamma_{förd} \leq 500 \ldots 1000\,NA$

Winkelauflösung $\Delta x = \frac{\Delta y}{F} = 0{,}61\,\frac{\lambda}{NA'_{Mikro}} = 0{,}61\,\frac{\lambda}{NA \cdot 250mm}\,\Gamma$

Tiefenauflösung $\Delta a = \frac{\alpha \cdot a^2}{P}$

α Stereowinkel wie $\frac{1}{60} \cdot \frac{1}{60} \cdot \frac{2\pi}{360} = rad$

a Entfernung

P Pupillenabstand ca. 65mm

Schärfentiefe

$2Df = \frac{\lambda}{NA^2} + \frac{\delta}{NA} + Akkomodation$

$2Df = \frac{\lambda}{NA^2} + \frac{0{,}34mm}{NA \cdot \Gamma_{OPMi}} + \frac{(250mm)^2}{\Gamma^2_{OPMi}}\left(\frac{1}{S_{fern}} - \frac{1}{S_{nah}}\right)$

beobachtbarer Bereich

Asensor = Pixelzahl · Pixelgröße

$|\beta'| = \frac{A_{Sensor}}{A_{Objekt}}$

geom. Begrenzung $\delta x_{Pixel} = \frac{\text{Pixelgröße}}{|\beta'|}$

→ Begrenzungsfaktoren $\Delta y = \delta x$ Beugung & δx_{Pixel} geom Beugung

Anzahl an Datenpunkte $N_x \times N_y = \frac{L_x}{d_{AIRY}} \times \frac{L_y}{d_{AIRY}}$

Blende

Aperturblende: reale, physikalische Begrenzung des Lichtstroms: Pupille

Eintrittspupille: objektseitiges Bild der Aperturblende

Austrittspupille: bildseitiges Bild

Lage der Pupillen: Ort wo Hauptstrahl opt. Achse schneidet

Feldblende: begrenzt sichtbares Feld, kreuzt Hauptstrahl, Luken

Ein-&Ausmittsluke: Bilder der Feldblende

Angabe der Feldgröße = Senfeldzahl

Vignettierung: Abschneiden von Randstrahlen bei der Abbildung an Beleuchtungsstärke/Abschattung am Bildrand

Telezentrie: Hauptstrahlen vor bzw. hinter dem opt. System sind parallel zur opt. Achse. EP & AP → ∞

→ telezentrisch: Hauptstrahl parallel zur opt. Achse

Feldlinse: steuert Pupillenlage zur vermeidung von Vignetierung

Knt. Beleuchtung: Abbildung der Lichtquelle in die Bildebene

köhlersche Bel.: Abbildung der Lichtquelle in EP der Abbildungsoptik

Öffnungs-/Blendenzahl $k = \frac{f'}{d_{EP}} = \frac{1}{2NA}$

$NA = n\sin(u) = \frac{d_{EP}}{2f'}$

Tiefenschärfe $D_f = k\delta_g = \frac{\delta_s}{2NA} = \frac{\Delta y}{NA}$

beugbegrenzte Auflösung $\Delta y = 0{,}61\,\frac{\lambda}{NA}$

Belichtungszeit $\sim 1/k^2 \sim d_{EP}^{-2}$

Beugungsscheibchen $d_{Airy} = 1{,}22\,\frac{\lambda}{NA} \approx 1{,}22\,\frac{f'\lambda}{d}$

Abbesche Sinusbedingung $NA' = \frac{NA}{|\beta'|}$ Umrechnung Objekt in Bildebene

Blendenöffnung beeinflusst: Auflösungsvermögen, Schärfentiefe, Bestrahlungsstärke $\frac{d/2}{|f'\beta'|}$

objektseitiger Öffnungswinkel $\tan(u) = \frac{d/2}{|f'\beta'|}$

Huygen'sches Prinzip: Beugung an Blende → Kugelwellen (überlagern sich und bilden Muster eines Beugungsscheibchens aus)

Auge

Optische Analogie

Brechkraft Auge D = 59dpt

Brechkraft Hornhaut D = 43dpt

Brechkraft linse D = 19-20dpt

Einzelbrechkraft $\varphi = \frac{(n'-n)}{r} = \frac{n'}{s'} - \frac{n}{s}$

Durchmesser Punktbild $d_{Airy} = 1{,}22\,\frac{\lambda}{NA} = 1{,}22\,\frac{2\lambda f'}{n\,D}$

Winkelauflösung $\alpha_E = \frac{d_{AIRY}}{s'_{ret}} = n\,\frac{d_{Airy}}{s'} = 1{,}22\,\frac{\lambda}{n\,d} = 1'$ Logarithmus ↑ Begenminuten → 60 ↓ Begenminuten

Visus (Sehschärfe) $V = 1/\alpha$

$\varphi_{Auge} = \varphi_1 + \varphi_2 - d\varphi_1\varphi_2 \Leftrightarrow \varphi_1 = \frac{\varphi_{Auge} - \varphi_2}{1 - d\varphi_2}$

Akkomodation $\Delta D_{Brechk} = \frac{1}{s'_{fern}} - \frac{1}{s'_{nah}}$ Anpassung Fokus Lagen

Adaptation: Anpassung an Lichtverhältnisse
1 skotopisch: nur Stäbchen sehen (10^{-6} cd/m²)
2 mesopisch: Stäbchen & Zapfen (
3 photopisch: nur Zapfen sehen (

Emmetropie: Normalsichtig

Refraktionsfehler: Abweichung in Brechkraft des Auges → einfallendes Licht wird nicht korrekt auf Netzhaut fokussiert → unscharfe Sicht/Sehprobleme

Myopie: Kurzsichtig, Zerstreuungslinse (-), Augapfel zu lang, Cornea zu stark gebogen, f' von Linse zu klein

Hyperopie: weitsichtig, Sammellinse (+), Augapfel zu kurz, Cornea zu schwach gebrochen, f' von Linse zu groß

Katarakt: Grauer Star, Lambert-Beersches Gesetz $I = I_0 e^{-Md}$ $-20dpt\ (\sim 30\%)$

Filter

Kantenfilter: Lässt bis zu bestimmter λ durch, danach blockiert es

Bandpassfilter: Lässt einen bestimmten Bereich an λ durch, davor & dahinter wird nicht blockiert

Fresnel-Reflexion: T = 1 - R $R = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2$ Anteil des Lichts das reflektiert wird

T: Transmission R: Reflexion

Anti-Reflexschichten: kein reflektierendes Licht durch Anpassung von

1 Dicke $d = \frac{\lambda}{4 n_{AR}}$

Gangunterschied $\Delta\varnothing = 2n_S d = (2m+1)\frac{\lambda}{2}$

2 Brechungsindex Intensitäten müssen gl. sein

$R_1 = \left(\frac{n_0 - n_{AR}}{n_0 + n_{AR}}\right)^2 \overset{!}{=} \left(\frac{n_{AR} - n_S}{n_S + n_{AR}}\right)^2 = R_2$

$n_{AR} = \sqrt{n_0 n_S}$

Schräger Einfall

- Auslöschung $\Delta\varnothing = (2m+1)\lambda/2 = 2n_S d^2\cos(\alpha')$
- Verstärkung $\Delta\varnothing = m\lambda = 2n_S d\cos(\alpha')$

Spektrale Methoden & Elemente

Dispersion: Abhängigkeit der Fortpflanzungsgeschwindigkeit einer Wellenbewegung von der Wellenlänge

$D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d\cos(\theta_m)}$ Material, Prisma Ursache Dispersion

spektrale Aufteilung von Licht: Gitter, Prisma

Prisma $D = \frac{d\theta}{dn} \cdot \frac{dn}{d\lambda} = \frac{2\sin(\alpha/2)}{\cos(i)} \cdot \frac{dn}{d\lambda}$

$A = b\frac{dn}{d\lambda} = b\frac{\Delta n}{\Delta\lambda} = aD$

effektiver Öffnungswinkel $a = L\cos(i)$

Spektrometer: Vermessung spektraler Verteilung, teilt Licht in unterschiedliche Wellenlängen/Frequenz

Monochromator: spektrale Filterung, präzise Messung von spezifischen λ

→ Fähigkeit des Spektralapparats für Lichtquellen, nahe beieinander liegende λ die Intensitätsmaxima nach Durchgang durch den Apparat räumlich zu trennen

Fourier-Optik

$F[u(x)](v) = \int_{-\infty}^{\infty} u(x) e^{-i2\pi vx}\,dx$

Zerlegung in periodische Funktion

Ortsraum kann in Fourierraum umgerechnet werden → macht Rechnungen einfacher

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

Ortsraum u(x) Fourierraum u(v)

Elektromagnetische Welle

$\vec{E}(\vec{r},t) = \vec{E}_0(\vec{r})\, e^{i(-\vec{k}\vec{r} + \omega t)}$

eben $\vec{E}(\vec{r}) = \vec{E}_0\, e^{-i\vec{k}\vec{r}}$

$\Delta\vec{E} = 0 \Rightarrow \vec{k}\,\vec{E} = 0$,

k senkrecht auf E & B

→ transversale EM Welle (TEM)

$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(-\vec{k}\vec{r})$ $\lambda = 2\pi/|k|$

Eine gekippte ebene Welle entspricht den Elementen der Fouriertransformation

Die Fourier-konjugierte Größe zum Ort x/y (Querrichtung) ist der Winkel $v = \sin(\theta)$ der Welle zur opt. Achse

Die Wellenlänge senkrecht impliziert in der Ortskoordinate

Einzellinse: verhält sich genau wie Fouriertransformation → linse übersetzt Winkel in Ort (Brennpunkt ausgenommen)

Beugung

Einfachspalt

vor Spalt | nach Spalt | Winkelspektrum = FT

Max $b\sin(\alpha) = (m + 1/2)\lambda$

min $b\sin(\alpha) = m\lambda$

Doppelspalt

Max $b\sin(\alpha) = m\lambda$

min $b\sin(\alpha) = (m + 1/2)\lambda$ $\Delta\theta = 2\lambda/b$

Gitter

$\sin(\theta_m) = m\frac{\lambda}{g} = v_m$

Dispersion $D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{g\cos(\theta_m)}$ $FSR = \frac{\lambda}{m}$

Auflösungsvermögen $A = \frac{m_0}{\delta} = mN$

MTF-Grenzfrequenz für Übertragung von Gittern durch opt. Systeme $\frac{1}{g} = 2\,\frac{NA}{\lambda}$

Fourierpaare = gleiche Symmetrieachse

Beleuchtung

Strahlenfluss [W] $\Phi_e = I_e \, d\Omega = NE$

Lichtleistung / [lm] $\Phi_v(\lambda) = 683 \frac{lm}{W} \cdot V(\lambda) \cdot \Phi_e(\lambda)$

Strahl-/Lichtstärke $[\frac{W}{sr}] \cdot [cd]$

$I_e = \frac{d\Phi_e}{d\Omega} = S \cdot L \cdot A$ $\quad I_v$

Beleuchtungs-/ Bestrahlungsstärke $[\frac{lm}{m^2}]$ $E_v = \frac{d\Phi_v}{dA} = \frac{I}{r^2} \cdot \cos\theta$ $[lx]$

Effizienz $[\frac{lm}{W}]$ $\mu = \frac{\Phi_v}{P}$

Strahlen-/ Leuchtdichte $[cd/m^2]$ $L_e = \frac{I_e}{A} = \frac{d\Phi}{dH} = \frac{d\Phi_e}{dA \, d\Omega \cos\theta}$

Lichtleitwert / $[m^2 sr]$ $H = A \cdot \pi \cdot NA^2$ $\quad dH = dA \, d\Omega \cos\theta$

Etendue

Etendue-Erhaltung $H' = H$; $L' = L$

Raumwinkel $[sr]$ $\Omega = 2\pi(1 - \cos(\theta))$

Gestaltung / Beleuchtung $[lm \cdot s] H = \int E \, dt$

Strahlungsleistung: Energie pro Zeit, die als elektromag. Strahlung emittiert wird

Radiometrie (Watt): Strahlungsphysikalische Größe

Photometrie: Beschränkung auf sichtbares Spektrum (auf Auge bezogen) (Lumen)

1/r²-Gesetz: isotrope Quelle (Bestrahlungsstärke nimmt 1/r² ab)

Isotroper Strahler: $I(\theta) = \text{const.}$

Lambert-Strahler: $I(\theta) \propto \cos(\theta)$

Effizienz Lichtquelle $[\frac{lm}{W}]$ $\frac{\Phi_v}{P}$

Leuchtdichte von Lichtquellen kann nicht erhöht werden – Helligkeit

Je kl. Lichtquelle desto heller, da Fläche A_{ob} kleiner

LASER

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

Energie $E_{Phot} = \frac{hc}{\lambda} = \hbar\omega$

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

Verstärkung $I(z) = I_0 e^{(N_2 - N_1)\sigma_{21} z} = I_0 e^{gz}$

Lichtintensität

Intensitätsverteilung $I(r) = I_0 \exp(-2\frac{r^2}{w(z)^2})$

Lasermoden $L = m\frac{\lambda}{2}$

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

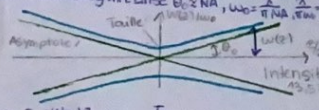
Strahlradius $w(z) = w_0\sqrt{1 + (\frac{z}{z_0})^2}$

Konfokalparameter $z_0 = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$ Rayleigh range

Divergenz $\theta_0 = \frac{\lambda}{\pi w_0}$

Strahlparameterprodukt $w_0\theta_0 = \frac{\lambda}{\pi}$

→ bei Fokussierung mit Linse $\theta_0 \approx NA$, $w_0 = \frac{\lambda}{\pi NA}$, $\frac{\lambda}{\pi NA} = \frac{w_0}{z_R}$



$I(r) = I_0(\frac{w_0}{w(r)})^2$; $I(z_0) = \frac{I_0}{2}$

Grundkomponenten: 1 Verstärkungsmedium, 2 Pump-Mechanismus, 3 Resonator

Grundprozesse: Absorption, stimulierte Emission, Strahlungsübergänge zu Energieniveaus

Intensitätsverteilung Gaußförmig

Strahltaille wo bestimmt Divergenz θ und Ausbreitungsverhalten. Produkt aus beiden ist const.

→ Strahlparameterprodukt

Sehr große Leuchtdichte & Bestrahlungsstärke möglich

Wellenlänge bestimmt Eindringtiefe ins Gewebe

Höhere Intensitäten bei vergleichsweise langen WW-Zeiten

Licht

1 Intensität $I \propto |\vec{E}_{el}|^2$

2 Phase $\varphi(\vec{r}, t) = \omega t - \vec{k}\vec{r}$

3 Richtung $\vec{k}/|k|$

4 Polarisation $\vec{E}/|E|$

5 Frequenz $\omega = 2\pi\varphi\lambda$

λ_{vis}: 380 ... 780nm

Unterhalb: Ultraviolett

Oberhalb: Infrarot

WW-Licht & Materie: Reflexion, Brechung, Streuung, Absorption, inelastische "

Reelles Bild: Lichtstrahlen kommen tatsächlich an einem Punkt zusammen und können auf Bildschirm / Projektionsfläche sichtbar gemacht werden. Es kann aufgefangen werden, da es Licht tatsächlich an diesem Punkt gibt

virtuelles Bild: entsteht, wenn Lichtstrahlen scheinbar aus einem bestimmten Punkt hervorzukommen scheinen, aber tatsächlich nicht an diesem Punkt zusammenlaufen. Es kann nicht aufgefangen werden, da keine tatsächlichen Lichtstrahlen an diesem Ort sind.

Photonen

Teilchencharakter $E_{Phot} = \frac{hc}{\lambda}$ (Energie) $\quad P = \hbar k$ (Impuls)

Photonenfluss $[1/m^2]$ $\Phi = \frac{I_{Fokus}}{E_{Phot}} = \frac{P_{opt}}{A_{Fokus} E_{Phot}} = \frac{N_{Phot}}{A}$ Anzahl

Anzahl $N_{Phot} = \frac{I_{Fokus} A}{E_{Phot}} = \frac{E_{Photonenenergie}}{E_{Phot}}$

Intensität $I_{Fokus} = \frac{P_{opt}}{A} = \frac{P_{opt}}{\pi(\frac{d_{Fokus}}{2})^2} = \frac{E}{At}$

Strahlungsübergang $H = \frac{d\Phi}{d\lambda}$ Laser

Photometrisches Grundgesetz: Übertragene Leistung ist gleich durch Leuchtdichte, Fläche & Abstand

Etendue-Erhaltung → Φ bleiben erhalten

H' = H → Quelle muss System angepasst sein

Bildfehler

Bildschärfefehler: Korrektur

Öffnungsfehler/sphärische Aberration: -/+ Linse, verteilt

Astigmatismus: Linsenfehler, mehrere Flächen

Koma: Symmetrisierung des Systems

Bildformfehler:

Bildfeldwölbung: negative Brechkraft

Verzeichnung: bei kl. Randstrahlhöhe

Farbfehler

Farblängsabweichung: Achromatisierung

Farbvergrößerungsfehler: Kombination + - Linsen

Satz von Petzval $\frac{1}{R_P} = -\sum \frac{\Phi_K}{n_K}$

chromatischer Fehler

Abbe-Zahl $\nu_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C} = \frac{n_d - 1}{\Delta n}$ beschreibt Dispersion

Farbfehler $\Delta\varphi = \frac{\varphi}{\nu}$ → Änderung Brechkraft

Achromasie-Bedingung $0 = \Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2 = \frac{\varphi_1}{\nu_1} + \frac{\varphi_2}{\nu_2}$

$\hookrightarrow \varphi_1 = \frac{\nu_1}{\nu_2 - \nu_1}\varphi_{ges}$ $\quad \varphi_2 = -\frac{\nu_2}{\nu_2 - \nu_1}\varphi_{ges}$

→ Das Pumplicht benötigt eine höhere Energie als das Laserlicht, damit das gesamte Photon über einen Zwischenzustand in das obere Laserniveau relaxieren kann von dort aus erfolgt die stimulierte Emission (450nm)

Anwendungsbeispiele

Photodisruption (Nd:YAG-Laser) Augeninnendruck senken

Photokoagulation (Argon-Laser) Netzhautlöcher zuschweißen

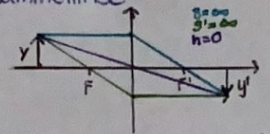
Aufsteigende Intensität:

PTD — Gleitschleifen — Lasik

Photochemie, Koagulation, Ablation, Disruption

Bildkonstruktionen

Sammellinse



Parallelstrahl durch bildseitigen Brennpunkt

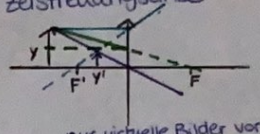
Mittelstrahl wird nicht gebrochen

Brennpunktstrahl durch objektseitigen Brennpunkt

→ Objekt in Brennpunkt: Bild in ∞

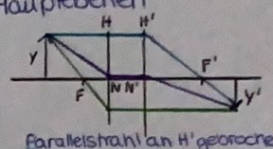
→ Objekt zw Brennpunkt & Linse: virtuelles, vergrößertes Bild

Zerstreuungslinse



nur virtuelle Bilder vor Linse möglich (auch wenn Objekt im Brennpunkt steht)

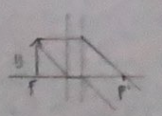
Hauptebenen



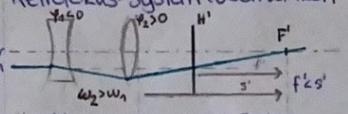
Parallelstrahl an H' gebrochen

Mittelstrahl auf opt. Achse zw. Hauptebenen

Brennpunktstrahl an H gebrochen



Retrofokus-System (Weitwinkel)

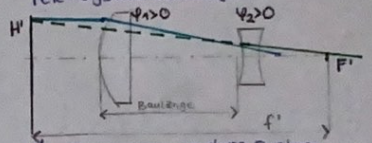


Hauptebene H' liegt hinter dem System

Brennweite ist kleiner als Schnittweite s'

$a'_{2H} = -f'\varphi_1 d > 0$

Tele-System (Teleobjektiv)

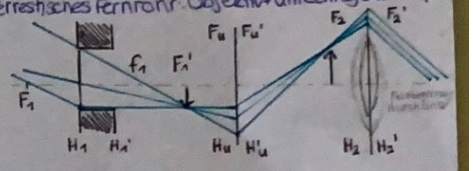


Hauptebene H' ist vor dem System

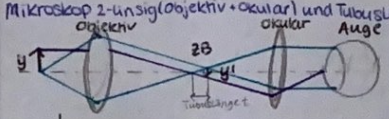
Brennweite des Systems ist länger als die Baulänge f' > Baulänge

$a'_{2H} = -f'\varphi_1 d > 0$

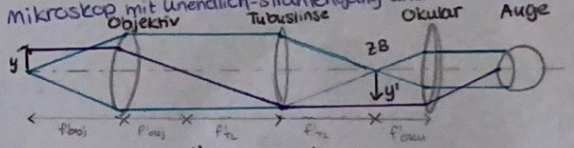
Terrestrisches Fernrohr: Objektiv + Umkehrsystem + Lupe



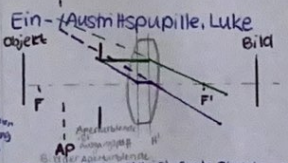
Mikroskop 2-linsig (Objektiv + Okular) und Tubuslänge



Mikroskop mit unendlich-Strahlengang und Tubuslinse



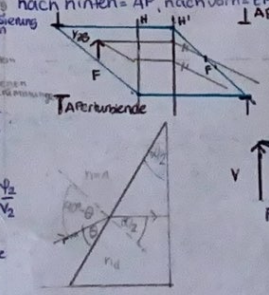
Ein-/Austrittspupille, Luke

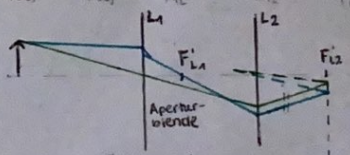


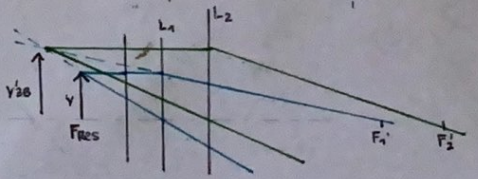
Ausgangspunkt ist reale Blende = Aperturblende

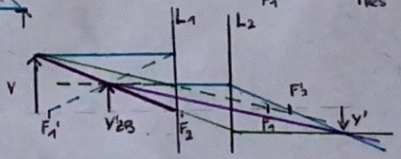
Bild der Aperturblende (z.B. Fernsichtkon, Rechnung)

nach hinten = AP, nach vorne = EP









$NA = n\sin(\theta)$

$\tan(\theta) = \frac{d}{2f_{obj}}$

NA – Auflösungsvermögen eines Objektivs. größerer Wert = auflösungsvermögen Objektiv besseres

Landolt Ring: Normsehzeichen für Sehtests, testet ob Auge ausreichend scharf sehen kann, 1° Rastlinien

visus 1 = Normalsehschärfe, 2 Objekte unter Winkel von 1 Bogenminute gerade noch wahrnehmbar