Optik

2. Grundlagen Licht

1. Lichtstrahlen (Strahlenoptik) = Licht = geom. Optik
2. elektromag. Welle (Elektrodynamik)
3. Licht ist Welle und Teilchen Quantenoptik

1. Reflexion: $i = -i''$ Brechung: $n \sin(i) = n' \sin(i')$
2. Beugung, Interferenz
$E(r,t) = E_0(\vec{r}) \cdot e^{i(\omega t - k \cdot r)}$
↳ Amplitude

ω - Frequenz
$\frac{E}{|E|}$ - Polarisation
E ⊥ k - Richtung
λ

Phase $\varphi(r,t) = \omega t - \vec{k}\vec{r}$
Intensität $I \sim |E_0|^2$
↳ Amplitude

3. Teilchen / Photon
Energie: $E = \hbar \cdot \omega = \frac{h c}{\lambda}$ Impuls: $p = \hbar \cdot k$

elektromagn. Wellen

Quanten	Wellenoptik	geom. Optik	paraxiale Optik
Photonen	Maxwell	Lichtstrahlen	lin. Brechungsgesetz
Emission	Lichtwellen	Aberration	parax. Größen:
Absorption	Interferenz	Brechungsgesetz	↳ Brennweite
Laser	Beugung	Totalreflexion	↳ Brechkraft
Streuung	Polarisation	parax. opt.	↳ Abb.maßstab
	Fourier	strahlenoptik	↳ Hauptebene

komplexität ← → Anschaulichkeit

$\varepsilon = \varepsilon_0 \cdot \varepsilon_r$ (Dielektr.) [As/Vm]
$\mu = \mu_0 \cdot \mu_r$ (Permeabil.) [Vs/Am]
$D = \varepsilon_r \cdot \varepsilon_0 \cdot E$ E: elektr. Feldstärke [V/m] B: mag. Induktion [T]
$B = \mu_r \cdot \mu_0 \cdot H$ H: magn. Feldstärke [A/m] D: elektr. Verschieb.

Brechungsindex:
$n = \sqrt{\varepsilon_r \mu_r}$
Intensität:
$I \propto |E_0^2|$

Licht-Geschw.
$c_0 = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}} = 3 \cdot 10^8 \frac{1}{ms}$
$c = \frac{\omega}{k} = \frac{c_0}{n}$

Wellenvektor:
$|k| = \sqrt{k_x^2 + k_y^2 + k_z^2} = \omega \cdot \frac{n}{c_0} = n \cdot \frac{2\pi}{\lambda}$
Lichtgeschw. $c = \frac{c_0}{n}$

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

Beugung am Spalt
$\sin(\theta) = \theta = \frac{\lambda}{\Delta x}$

1) Ein Objekt Größe Δx erzeugt Beugungswinkel
↳ Objektwinkel $\sin(\theta) > \lambda / \Delta x$ (Auflösungsgrenze)
2) $NA = \sin(\theta)$ (Lichtfleck min Größe (Punktbild))

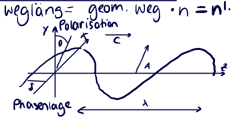
Abbe:
↳ Beugung kreisförm. Begrenzung → Airy
$d_{Airy} = 1{,}22 \cdot \frac{\lambda}{n \cdot \sin(\theta)}$ (NA, Apertur)
$NA = n \cdot \sin(\theta)$
$\Delta x = \frac{0{,}61 \cdot \lambda}{NA}$

Zufa
↳ Licht ist elektromag. Welle
↳ Elektrodynamik (Maxwell) zu Wellengl.
↳ Wellengl. sind transversal ebene Wellen:
Polarisation, Amplitude, Wellenlänge, Richt., Phase
↳ Brechungsindex hängt mit Lichtge. zusammen
↳ Licht kann interferieren
↳ räuml. Begrenzung → Beugung
↳ Licht Teilchenchar.

Eigenschaften:
↳ Frequenz ω → Wellenlänge λ → Brechungsindex n
↳ Lichtgeschw. $c = \frac{c_0}{n}$

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

opt. Weglänge = geom. Weg · n = n · l



Meter: $1dpt = \frac{1}{m} = m^{-1}$
mm: $1dpt = \frac{1000}{mm}$
$\tan = \frac{Geg}{An}$

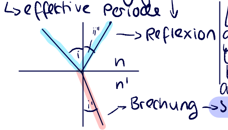
1rad = 180 π
$\frac{\alpha_{Grad}}{180°} = \frac{\alpha_{rad}}{\pi}$

Obj in Brennweite → ∞
Obj näher als Brennweite → virtuell

transversal - k & E ⊥ (E, $\vec{B}$, $\vec{k}$)

Maxwell:
$\nabla \times H = \frac{\partial}{\partial t} D + \vec{j}$ (Ampere) $\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial}{\partial t} B$ (Faraday)
$\nabla \cdot D = \rho$ (Ladungen sind Quellen) $\nabla \cdot B = 0$ (Quellenfreiheit)
Wellengl.: $\Delta E - \frac{n^2}{c_0^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2} \vec{E} = 0$ $\Delta = \frac{d^2}{dx^2} + \frac{d^2}{dy^2} + \frac{d^2}{dz^2}$

Vakuum n=1
↳ Ausbreitungsgeschw. im Medium reduziert
↳ effektive Periode ↓



lässt man Beugungseffekt weg (Wellenoptik), dann kann man Licht als Strahlen beschreib.

geom. Optik → Snellius → Grundgesetz
↳ „exakte" geom. Strahlenoptik (paraxiale Optik, wo Näherungen nötig sind)

Totalreflexion
$\sin(i') = \frac{n}{n'} \sin(i)$
n'>n: optisch dünner ins dicker → immer Lösung für i'
n'<n: optisch dicker ins optisch dünner
↳ keine Lös. für i'
↳ Totalreflexion Grenzwinkel: $\sin(i') = 1$ $\sin(i_G) = \frac{n'}{n}$
↳ Einfallswinkel > als Grenzwinkel → reflektiert
↳ vom Lot aus ↳ < 90°
↳ Einfallswinkel so flach, das Licht Medium nicht wechseln kann, Umlenkprisma, TIR-Mikroskop
Prismen: n = 1,5 $i_G = \arcsin(\frac{1}{n}) \approx 42°$

Akzeptanzwinkel: Totalreflexion zw. Kern & Mantel
$NA = \sqrt{n_K^2 - n_M^2}$

Dispersion & Absorption
n - Brechungszahl
↳ hängt von λ ab → Spektralzerlegung
Dispersion: → monochrom. Licht mit Prismen (Spektrometer)
↳ Abh. von λ zu n $\frac{dn}{d\lambda} < 0$ ($n_{rot} < n_{blau}$)

Absorption
↳ komplex $n = n_r - i n_i$
↳ Lambert-Beersches Gesetz: $I(z) \sim \langle E^2 \rangle = I_0 \cdot \exp(-\alpha \cdot z)$
↳ Absorptionskoeffizient ~ zum Im. der kompl. Brechzahl
↳ Pulsoximetrie
↳ Quantenoptik

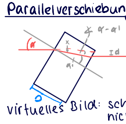
Teilchencharakter
$E = \hbar \omega = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ Impuls $p = \hbar \cdot k = \frac{h}{\lambda}$ $\hbar = \frac{h}{2\pi} = 1{,}05 \cdot 10^{-34}$ Js
↳ Energieertrag ↳ Kraftwirkung
Intensität: $I = \frac{P}{A} = \frac{E}{A \cdot t}$ $\Phi = \frac{I}{E} = \frac{I \cdot \lambda}{h \cdot c}$

Wechselwirkung Licht & Materie:
→ Reflexion, Absorption, Streuung, Transmission
→ Brechung, inelast. Streuung (Fluroszenz)

Streuung
Verhältnis Streuung & Absorption
Absorption: Lichtverlust, Strukturen nicht erkennbar
Streuung: Änderung der Lichtrichtung
Absorption: Energie komplett im Material (Laser
elastische Streuung: kein Energieverlust, eingestrahltes Licht gleiche λ wie Streulicht (Rayleigh)
inelast. Streuung: Energieverlust, d.h. einstreutes Licht hat ↑ λ als eingestrahltes Licht (Fluoresenz)
stim. Emission (Laser) → kohärentes Licht gleicher λ wird emittiert
↳ Licht hat Teilchencharakter

Bildfehler:
„Ideale" Abb. nur bei paraxiale Optik, bei Nutzen Snellius → Bildfehler bei Verwendung von sphärischen Linsen
sphärische Abberationen: Asphären
chrom. L.: Achromsiebed. Achromat

Parallelverschiebung:



Versatz: $d = x \cdot \sin(\alpha - \alpha')$
$x = \frac{D}{\cos(\alpha')}$ $d = \frac{D}{\cos(\alpha')} \cdot \sin(\alpha - \alpha')$
$d = \frac{D}{\cos(\sin^{-1}(\frac{n_1}{n_2}\sin(\alpha)))} \cdot \sin(\alpha - \arcsin(\frac{n_1}{n_2}\sin(\alpha)))$

Virtuelles Bild: scheibare Lichtstrahlen, nur sichtbar nicht auffangbar

---

Vorlesung 3:
- Wellenfront und Strahlen sind äquivalent
- Strahlen sind Normalen zur Wellenfront
(Satz von Malus) $I = I_0 \cdot \cos^2(\theta)$
↳ geom. Optik → Ausbreitung von Licht-Strahlen

Axiome:
↳ Strahlen in homogenen Medien verlaufen auf Geraden
↳ werden gebrochen oder reflektiert
↳ keine Interferenz (beeinflussen sich nicht gegn.)
↳ Strahlwege umkehrbar (vorwärts & rückwärts)

Paraxiale Optik: → 2 Strahlen genügen
↳ kleine Winkel, nicht linear
↳ Winkel zwischen Strahl & opt. Achse sehr klein

geom. Optik
exakt (Snellius)
$n \cdot \sin(i) = n' \sin(i')$
↳ nichtlinear

paraxiale Optik
$n \cdot i = n' \cdot i'$ → Abbgl. → Strahlkonstr. → Brennweite → Brechkraft
↳ Näherung
↳ ideal
↳ Kleinwinkelnäh. $\sin i = i$

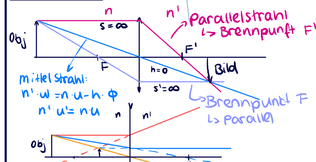
paraxial: ↳ Totalrefl. ↳ Bildfehler
↳ einfache Abbildungsgl. (Beziehung zw. Winkeln, Höhen, Schnittweiten → Abbildungsgleichung
↳ perfekte geom. Abbildung ohne Abbildungsfehler
↳ alle schneiden sich in einem Punkt
Gültigkeit: kleine Einfallswinkel, Strahlhöhen, Krümmungen
Grenzbereich: Abweichung zwischen Snellius und paraxial → Abbildungsfehler = Aberrationen
Problem: Systeme ohne Symmetrieachse nur mit Vorsicht gebrauchen

Abbildungsgleichungen: $a' = 0$ → Bild ∞
$n \cdot i = n' \cdot i'$ $\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = (\frac{n' - n}{r}) = \varphi = \frac{1}{f'}$
einfallender Strahl ∥ $s = \infty$ $s' = \frac{n'}{\varphi} = f'$
ausfallender Strahl ∥ $s' = \infty$ $s = -\frac{n}{\varphi} = f$
Immersion: $\frac{f'}{f} = -\frac{n'}{n}$ $a' = \frac{a \cdot f'}{a + f'}$

$\Phi = \varphi_1 + \varphi_2$ $\Phi = \frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f}$
↳ Brechkraft
$\varphi_1 = \frac{V_1}{V_1 - V_2} \cdot \Phi$ $f'_2 = \frac{V_2 - V_1}{V_2} \cdot f'_{TL}$
$\varphi_2 = -\frac{V_2}{V_1 - V_2} \cdot \Phi$ $n' \cdot u' = n \cdot u - h \cdot \varphi$

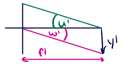
dünne Linse: $r_2 = \frac{(n'-1) \cdot r_1}{(n'-1) - \varphi \cdot r_1}$
$\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \Phi = \frac{1}{f'}$ $\Phi = (n-1)(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2})$
$f' = -f = \frac{1}{\Phi}$ n=1 ↳ zusammengesetzt
Spiegel:
$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{r}$ $\varphi = -\frac{2}{r}$

Konstruktion:



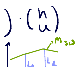
Pixelgröße
δg → obj δ'g → bild
→ δ'g < δ: Begrenzung Pixelgröße
→ δ'g > δ: durch Beugungseffekt

Abbildungsmaßstab:
$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{n \cdot s'}{n' \cdot s} = \frac{n \cdot u}{n' \cdot u'} = \frac{\Gamma_{mik}}{\Gamma_{ok}}$ (Winkel)
$y = f \cdot w$ $f'_{neu} = n \cdot f'$
$y' = f \cdot \tan(\omega)$ → Obj → ∞



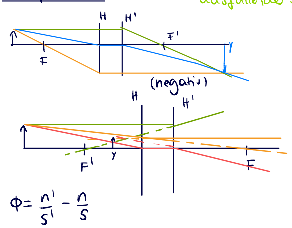
Auge / Lupe / Vergrößerung → näher als der Sehbereich
↳ Je größer Objektwinkel, desto größer Bild ↳ 2+ Linsen
Sehwinkel: $\varepsilon_0 = \frac{y}{250mm}$ → Bildgröße evtl. Zeichnung $y' = -f' \cdot \varepsilon_0$
Lupe: relative Vergrößerung
$\Gamma = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{250mm}{f'_L}$ Physik.
(Objekt / Bild)
Abbildungsmaßstab: $\beta = \frac{Bildgröße}{Objektgröße} = \frac{y'}{y}$
Vergrößerung: $\Gamma = \frac{Sehwinkel\ mit\ Instrument}{Sehwinkel\ ohne\ Instrument} = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0}$
↳ Auge, visuell
ε_0 → deutliche Sehweite 250mm
Tiefenmaßstab α: $\alpha = \frac{\Delta s'}{\Delta s} = \frac{n'}{n} \beta^2 = \frac{n \cdot u^2}{n' \cdot u'^2}$

Matrix: (parax. Strahl) → linear
$\begin{pmatrix} h_i \\ u_i \end{pmatrix}$ → Höhe zur opt. Achse, → Winkel opt. Achse $= \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h \\ u \end{pmatrix}$
Linse: $\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -1/f' & 1 \end{pmatrix}$ Strecke: $\begin{pmatrix} 1 & L \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$

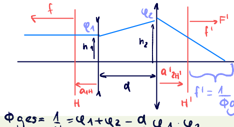


$d_{Tub+Oku} = -f'_{Tub} - f'_{Oku}$ ↳ Winkel in rad & t

dicke Linsen:
↳ Brechung eines parallelen Strahls ist äquiv. zur Brechung an der bildseit. Hauptebene
↳ parallel auslaufende Strahlen können die Einzelflächen durch Brechung an der objektseitigen Hauptebene H ersetzt werden
$f' = \frac{1}{\Phi}$ → von Hauptebene zu Brennpunkt
↳ parallel einfallender Strahl schneidet sich mit real ausfallender Strahl
Hauptebenen: (positiv)



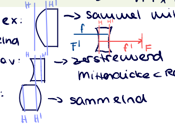
$\Phi = \frac{n'}{s'} - \frac{n}{s}$



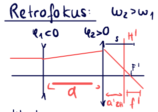
$a = \frac{a' f'}{f' - a'}$

$\Phi_{ges} = \frac{1}{f'} = \varphi_1 + \varphi_2 - \frac{d}{n} \varphi_1 \cdot \varphi_2$
$= \frac{1}{f'_1} + \frac{1}{f'_2} - \frac{d}{n} \frac{1}{f'_1 f'_2}$ $\Phi = \frac{1}{f'} = \varphi_1 + \frac{h_2}{h_1} \cdot \varphi_2$
$a_{1H} = f' \varphi_2 \cdot \frac{d}{n}$ $a_{2H'} = -f' \varphi_1 \cdot \frac{d}{n}$ $\varphi = \frac{n' - n}{r}$
$\varphi_1 = \frac{n-1}{r_1}$ $\varphi_2 = \frac{1-n}{r_2}$ $\varphi = \sum_{k=1}^{n} \frac{h_k}{h_1} \varphi_k = \sum_{k=1}^{n} w_k \varphi_k$

Brechkraft dicke Linse:
$\Phi = \frac{1}{f'} = (n-1)(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}) + \frac{(n-1)^2 d}{n \cdot r_1 \cdot r_2}$

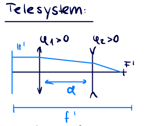


Retrofokus: $\omega_2 > \omega_1$



- H' hinter dem System

Telesystem:

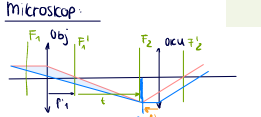


H' vor System

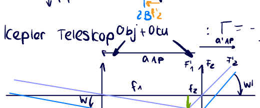
$f' \Rightarrow H' \rightarrow F'$
Bild ins ∞ → paralleler Strahl → $y'_{L1} = f'_{ges} a_{1H}$
↳ Objekt im f'ges vor H
Bild vor Brennpunkt: Bild virtuell

Tubuslänge
→ Kombination zwei pos. Linsen
Tubuslänge:
$t = d - f'_1 - f'_2$
$f' = -\frac{f'_1 f'_2}{t}$
HE:
$a_{1H} = -\frac{f'_1 d}{t}$
$a_{2H'} = \frac{f'_2 \cdot d}{t}$

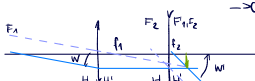
Mikroskop:



Kepler Teleskop Obj + Oku : $\Gamma = -\frac{f'_{Obj}}{f'_{Oku}}$



↳ Bild umgekehrt
Galilei Obj + neg. Linse



→ aufrechtes Bild
$\Gamma = \frac{\omega'}{\omega} = \frac{f_1}{f_2}$

Zoom: opt. Sys. mit variabler Brennweite f (Vergrößerung β) und konst. Bildlage (Vario-System)
↳ Linsenbew. Variator, Kompensator
$V = \frac{f'_{max}}{f'_{min}} = \frac{\beta_{max}}{\beta_{min}}$

Lage der AP: $\frac{1}{f} = \frac{1}{s'} - \frac{1}{s}$ $d_{AP} = d_{Bl} \cdot |\beta'|$ $|\frac{a'}{a}|$
$\frac{y'}{y} = \frac{s'}{s}$ $s' = \frac{s \cdot f'}{s + f'}$
$\pi (x \cdot r)^2 = 2\pi r^2$ ↳ $\pi x^2 r^2 = 2\pi r^2$ $x = \sqrt{2}$
↗ doppelte Fläche $d_{EP}^2 \sim \frac{1}{k^2}$ ↳ Durchmesser
halbe Belichtungszeit: $d_{EP} \cdot \sqrt{2}$
Feld-Ebenen: Bilder des Obj. → konj. Ebenen
↳ reelle Feld & Pupillenebenen stets abwechselnd aufeinander
Aperaturblende:
↳ reale physikalische Begrenzung
↳ beschränkt Lichtstrom, der zur Abb. beiträgt → Größe & Lage wichtig
↳ k → Schärfentiefe, Auflösung, Helligkeit
Tiefenmaßstab: Tiefe im Bild
Hauptstrahl: Feldpunkt durch Mitte AB
Randstrahl: Feldpunkt zum Rand AB
$d_{EP} = 2 \cdot h$ $k = \frac{f'}{2h} = \frac{f'}{d_{EP}}$
Öffnungszahl
$\tan(u) = \frac{d_{AB}}{2 f'}$

Objektiv 1,4 / 50 (k, f')
Fernglas / Okular 10 x 50mm (Vergrößerung, Durchmesser)

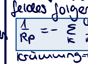
Öffnungswinkel NA:
$NA = n \cdot \sin(u)$ $k = \frac{f'}{2h} = \frac{1}{2 \sin u}$ $k = \frac{1}{2 \cdot NA} = \frac{f'}{d_{EP}}$
Objektiv: 60x / 0,8 (Vergrößerung, NA)
Auflösungsvermögen $\Delta x = \frac{0{,}61 \cdot \lambda}{NA}$ ← Auflösung mit ↑ NA kleiner
Schärfentiefe: $\delta g = 2 \cdot \Delta x$
↳ Bild scharf wahrgenommen
↳ mit ↑ NA ↓ $D_f = k \cdot \delta g = \frac{\delta g}{2 \cdot NA}$
Hauptstrahl → schneidet opt. Achse
Austrittspupille: Bild der AB (Richtung Bild) ← austretender Lichtstrom
Eintrittspupille: Bild der AB (Richtung Objekt) = Aperaturblend
↳ Größe = einfallender Lichtstrom
k = f'
Telezentrie: Winkel zw. d_{EP} Hauptstrahl & Objekt / Bild
telezentrisch (θ = 90°) → parallel zur opt. Achse (senkr. Bildebene)
Feldblende: ↗ reale Begrenzung limitiert sichtbares Feld (Hauptstrahl)
↳ Eintritts & Austrittsluke ↳ Größe des Feldes
Vignettierung: wenn Begrenzung nicht mit der Objekt / Bildpos. o. Pupille zusammenfallen, wird Strahlenbündel feldabhängig beschnitten

---

krit. Beleuchtung: Abb. der Lichtquelle in die Bildebene, Abb. der AB / Pupillen aufeinander
- Strukturen der Lichtquelle im Bild sichtbar
↳ + bei LED
köhl. Beleuchtung: Abb. der Lichtquelle in die Pupille der Abb. optik, Abb. der Beleuchtungspupille ins Objekt
+ Lichtquelle nicht scharf im Bild sichtbar

Physikalische Optik: 5
Lichtwelle → Beugung beugungsbegrenzte Ab.
↳ Beugungsscheibchen geom. Spot < Airy - d
ideal - Airy real = PSF
geom. Aberrationen (Spot
ideal → ein Pkt d=0
exakt (geom. d>0
real ↳ wellenopt. Aberration (Physik
PSF (Point Spread Function)
Wellen opt. (mit Beug. & Aberration)
ohne = Airy $d = 1{,}22 \cdot \frac{\lambda}{NA}$
↗ Lichtstrahl ⊥ auf WF
Wellenfront & Strahlenbild äquivalent
↳ ideales Bild = sphärische Wellenfront (Kugelwelle)
↳ geom. Fehler → Abw. von Kugelwelle ↗ Fokus nicht in 1 Pkt
unterschiedl. Winkel, Versch. f'
Schnittpunkt von achs-fernen Strahlen verschoben
↳ Defokus
↳ Längsabweichung
Bildfehler
Bildschärfefehler: Öffnungsfehler, sphärische Aberration, Koma, Astigmatismus ↳ Asphären
Bildformfehler: Verzeichnung, Bildfeldwölbung
Farbfehler: Farblängsabweichung, Farbvergrößerungsfehler
Korrektur Öffnungsfehler:
↳ abh. vom Einfallswinkel → große i-Winkel schlecht
↳ Linsenform optimieren
↳ Kompensation: pos/neg Linse
↳ Verteilen der i-Winkel auf mehrere Flächen/Linsen
Asphären: zu starke Brechkraft → red. Brechkraft
Koma: Zerstreuung mit ↑ Öffnung → pkt. bild
↳ Zentrum wandert
Korrektur: Symmetrisierung
Astigmatismus: Hauptstrahl „schräg" durch Linse
↳ tangentiale & sagitale Strahlen „erfahren" unterschl. Brechung
tangential: in Feldrichtung sagittal: quer zur Feldrichtung
↳ tangential + sagital zusam. → Petzvalschale → Bildfeldwölbung

Satz von Petzval
↳ astigmatismusfreies Bild aus mehreren Linsen an Luft hat die Bildschale eines ebenen Objektfeldes folgende Bildkrümmung
$\frac{1}{R_P} = -\sum_k \frac{\varphi_k}{n_k}$ Φ Einzel-Brechkraft, R_P Petzval-Radius
Krümmung = 0 → ebenes Bildfeld
Verzeichnis $V = \frac{y'_{real} - y'_{ideal}}{y'_{ideal}}$ [%]



Farbfehler - chrom. Bildfehler
Dispersion: Brechungsindex abh. von λ → chrom. Bildfehler
↳ Materialeigenschaft von Glas
normale Dispersion: n↓ mit ↑λ → blaues Licht stärker gebrochen als rotes
Maßzahlen:
Abbezahl V beschreibt
$V = \frac{n_{gelb} - 1}{n_{bl} - n_{rot}}$ $V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$
↳ je kleiner v-differenz, desto größer Einzelbrechkräfte
opt. Gläser V = 20 ... 90
Krongläser: + Linse
geringe Dispersion → hohes V
↳ kleine Brechzahl
Flintgläser: - Linse
groß Dispersion → kleines V
↳ höhere Brechzahl
Chrom. Längsaberration (Farblängsfehler)
↳ Dispersion → Brechzahl nimmt mit ↑ λ ab → blaues Licht wird stärker gebrochen als rotes
↳ Variation der parax. Brennweite mit der Wellenlänge
Längsfehler = chrom. Variation der Brechkraft
Farbfehler = $\Delta\varphi = \frac{\varphi_d}{V}$ Einzellinse:
↳ Fehler nicht vermeidbar / korrigierbar
Korrektur: Achromat: blau = rot
↳ Kombination von + & - Linse unterschiedl. Dispersion → 2 Wellenlängen übereinstimmen
$\Phi = \varphi_1 + \varphi_2$ $0 = \Delta\Phi_1 + \Delta\Phi_2 = \frac{\Phi_1}{V_1} + \frac{\Phi_2}{V_2}$
↳ $\varphi_1 = \frac{V_1}{V_1 - V_2} \Phi$ $\varphi_2 = \frac{-V_2}{V_1 - V_2} \Phi$
$\beta' = \frac{NA}{NA'}$

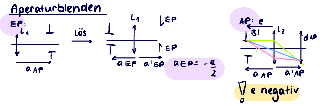
Abschneiden von Randstrahlen bei Abb. von achsf. Feldpkt. Verlust an Beleuchtungsstärke am Bildrand
Datenpunkte: $N_x \times N_y = \frac{L_x}{d_{Airy}} \times \frac{L_y}{d_{Airy}}$ $d_{Airy} = \frac{1{,}22 \lambda}{NA}$

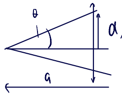
Auge → bewegl., Sehzellen
Ophthalmolgie = Augenheilkunde
↳ 120 Mio. Stäbchen, 6 Mio. Zapfen
Anatomie: Linse, Glaskörper, Netzhaut, Retina, Iris, Pupille, Sclera
Tagsehen: photopisch $V(\lambda)$ Nachtsehen (skoplopisch)
Retina: Makula (gelber Fleck), Fovea = Zentrum, blinder Fleck = Durchtritt Sehnerv
↳ Stäbchen Zapfen
Adaption = Anpassung an Helligkeit über Pupillen d (Iris)
Luft ($n=1$), Hornhaut $n=1{,}37$, Augenkammer $n=1{,}33$
Linse $n=1{,}4$ Glaskörper $n=1{,}33$
↳ Hauptbrechkraft Hornhaut
1. Pupillend: 1,5 mm (Sonne), 8 mm (nachts)
2. max. Sehwinkel (Fovea) 5°, Auge 108° $\alpha_c=1$
3. empf. λ → 555 nm 4. Abbe-Zahl 50,23
$f=-17{,}185$ mm $f'=22$ mm EP ⇒ $s=-3{,}047$ mm
$D_A=59$ dpt $D_C=43$ dpt (↳ 70%) $D_L=19$ dpt (↳ 30%) Auflösung = $d_{Airy}=5{,}7\,\mu m$

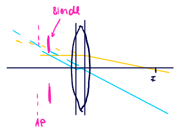
Akkomodation: unterschiedl. Entfernungen fokus. max. 14 dpt
↳ Deformation Linse ↳ elast.
↳ nimmt ab im Alter
↳ Akkomodationsvermögung
$\Delta D = \frac{1}{s_{fern}} - \frac{1}{s_{nah}}$
Airy ⇒ $d_{Airy} = 1{,}22 \cdot \frac{\lambda}{n \sin(\theta)}$ $\sin(\theta)=\frac{D}{2f'}$ Auge = 5,7 µm d_{Airy}
$Visus = \frac{1}{a}$ = 1,0 (normal)
↳ 1 Winkelmin. ↳ 2 Obj in 1
Visus = 0,5 → 2 ↳ Sehvermögen
Landolt-Ring = Normalsehzeichen
↳ 8 verschied. Richtungen
↳ Visus 1 b = 1,74 → 6 m
↳ normalsichtig

Augenkrankheit
Linse entfernen
↳ Fehlsichtig, Katarakt, Glaukom, Retina Degeneration max = 25 dpt
Myopie: kurzsichtig nah = scharf
↳ Auge zu lang, Cornea stark gebrochen, Brennweite zu klein → Neg Linse
Hyperopie: weitsichtig nah = unscharf
↳ Auge zu kurz, Brennweite zu lang, max 13 dpt
↳ + Linse
Astigmatismus: immer unscharf, winkelabh.
↳ nicht-sphärische Form
↳ Zylinderlinse
Emmetropie (normal)
Glaukom: druck-induzierte Schädigung Sehnerv
diabet. Retinopathie: Netzhauterkrank. → diabetes
altersbedingte Makuladegeneration: Erkrank. an Stelle des schärfsten Sehens

Linsen-basierte Refraktionskorrektur 43 dpt
↳ Implantation Interokular Linse
↳ Austausch durch IOL
aphakes Auge ↳ ohne Linse
phakes → mit natürl.
Cornea-basierte
↳ radiale Keratotomie, LASIK
→ intra Okular Linse
Gel IOL → Entfernung Linse → Befüllung mit Gel + Akkomodation – biokompatibilität
Lasik (Laser-assisted in situ keratomileusis)
Refraktionsfehler: Abbildungsfehler des Auges, Licht nicht korrekt auf Netzhaut
φ mit Brille: $\varphi_1 = \frac{\varphi_{Auge} - \varphi_2}{1 - e \cdot \varphi_2}$
Kurz: Abflachung
Weit: Ansteilung

Aperturblenden



Öffnungswinkel:
$\tan(\theta) = \frac{d_{EP}/2}{a} = \frac{f'}{2 \cdot k \cdot |a|}$
$k = \frac{f'}{d_{EP}}$
$\beta' = \frac{a'}{a}$ $\frac{1}{f'} = \frac{1}{a \cdot \beta'} - \frac{1}{a}$
$a = \frac{f'}{\beta'} - f'$



Objektiv:
Anforderung:
↳ große Bildfeld (Verzeichnung, Koma, Bildfeldwölbung, Astigmatismus)
↳ farbtreue Widergabe: Korrektion Farbfehler
↳ Auflösung feiner Details
↳ leichte Bauform
mk vs. + Linse
↳ für große Vergrößerung kurze Brennweite, was bei einer Linse nur mit kr erzielt werden kann
Grundfkt. → Brennweite übersetzt Winkel in Bildgröße $y' = f \cdot w$, $y = f \tan w$
NA
↳ Auflösungsgrenze
Mikroskop = visuelles System
$\Gamma = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{250\,mm}{f'_L}$
→ hohe Vergröß. kleine Brennweite (Mikroskop)
$t = a - f'_1 - f'_2$
Mikroskop 2 Linsen: $\Gamma_{Mikro} = \frac{250\,mm}{f'_{Mikro}} = -\frac{t}{f'_{obj}} \cdot \frac{250\,mm}{f'_{oku}}$
mit Tubuslinse: $\Gamma_{Mikro} = -\frac{f'_{Tubus}}{f'_{obj}} \cdot \frac{250\,mm}{f'_{oku}}$ ↳ ∞ Strahlengang
als Fernrohrlupe: $\Gamma_{Mikro} = \Gamma_{obj} \cdot \Gamma_{Tele} = \frac{250\,mm}{f'_{obj}} \cdot -\frac{f'_{TL}}{f'_{oku}}$ (Teleskop)
$\Gamma_{oku} = \frac{250\,mm}{f'_{oku}}$ $\beta_{obj} = -\frac{f'_{TL}}{f'_{obj}}$ $\Gamma_{Mikro} = \frac{250\,mm}{f_{Mikro}}$
$f' = -\frac{f'_1 f'_2}{t}$
zB → obj. seitiger Brennpkt des Gesamtsystems, zB f'_T
Mikro mit Tub: Objekt in objekseit. Brennebene des Objectivs $f'_{TL} = t/2$

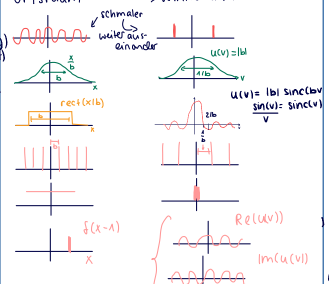
Immersion: Flüssigkeit Obj & Deckglas
↳ Vergrößerung des tat. wirks. Winkels des Öffnungskegels, n angepasst → weniger Brechung
↳ + ↑ NA → ↑ Auflösung, Hellig.
↳ Vermeidung Totalreflexion
Okular: 10 × 120,6 → SF
Foku (Vergrößerung)
↳ Abb. reelles ZB nach ∞, damit Bild mit Auge betrachtet werden kann
↳ Okular auf Pupille anpassen
↳ Zwischenbildlage besitzen → Adaption
Beleuchtung: Auflicht (Epi) (undurchsichtig), Durchlicht (trans) (transparent)
Hellfeld/Dunkelfeld: → „schräge Beleuchtung, kein direktes Licht, nur gebeugtes Licht
Abbe Auflösung $\Delta x = \frac{0{,}61 \cdot \lambda}{NA}$ $\Gamma_{Förd} = 500 \ldots 1000 \cdot NA$

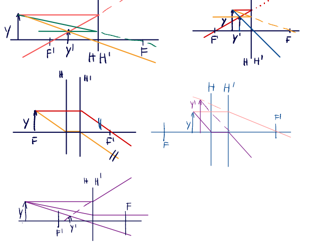
Schärfentiefe
$2Df = \frac{\lambda}{NA^2} + \frac{\delta}{NA}$ + Akkom.
Anforderungen:
↳ beugungsoptischer Term
↳ geom. Term
↳ Akkomodation → durch Auge
förderl. Vergrößerung → max. sinnv. Vergröß. durch Auge limitiert
Mikroskop: 100 × 10,9 (Maßstab zB & NA)
Okular: 10 × 122 (Vergröß. & Sehfeldz)
Objektiv: 60 × 1,4 Oil (Vergrößerung, NA, Immersionsmedium)
→ Pixel
Bildfeld: [50 × 30] ΔP
Objektfeld: " × " β'^{-1}

Zoom: Linsengruppen
große Bewegung
• Variator: ändert Brennweite, Maßstab
• Kompensator: kompensiert Defokussierung und hält das Bild scharf
↳ opt. System mit variabler Brennweite f und konst. Bildlage, Änderung f' und dadurch Abbildungsmaßstab
↳ Photo-Filmobjektive
↳ + & − Linse
$V = \frac{f_{max}}{f_{min}} = \frac{\beta_{max}}{\beta_{min}} = \frac{\Gamma_{max}}{\Gamma_{min}}$
OP-Mikro: 2 Galilei-Teleskope

Fourier: Wellenfront ⊥ Lichtstrahlen
$u(x) = \int_{-a}^{a} u(v) e^{2\pi i x v} dv$
$e^{ix} = \cos(x) + i \sin(x)$
↳ darstellung im Ortsraum & im Fourierraum → umrechenbar & equivalent
Ortsraum: $U(x) = \int u(v) e^{2\pi i x v} dv$
Fourier: $u(v) = \int U(x) \cdot e^{-2\pi i x v} dx$
↳ Übersetzung
↳ Fourier-Trafo-Regel: aus „schmal" wird „breit"
↳ Abb.system → uf-System
↳ NA Begrenzung → Verarbeitung Punktbild
↳ NA Tiefpass-Filterung → beschneidet Beugungsordnung
↳ Obj-Beleuchtung → Einfluss Intensität Auflösung & Kontrast
$\sin(a)_{max} = 1$

Beugung Spalt:
$\Delta\theta = 2 \cdot \frac{\lambda}{b}$ → min. → Spalt = b
$\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$
Gittermax: m = Ordnung, Periode = d
$\sin(\theta_m) = m \cdot \frac{\lambda}{d}$
MTF:
$\frac{1}{d} = \frac{NA}{\lambda}$ $\frac{1}{d} = 2 \cdot \frac{NA}{\lambda}$ $\tan(\theta) = \frac{h}{d}$ (0.−1., Git. → Schirm)
↳ breiter Spalt, schmaleres Bild
$d_1 = d_0 \cdot \cos(\theta)$ $d_2 = d_0 \cdot \cos^2(\theta)$
Beugung an der Blende führt zu Kugelwellen (Hygensches Prinzip), die sich überlagern und das Muster eines Beugungsscheibchen ausbilden
kleine Ausdehnung im Ortsraum führen zu großen Ausdehnungen im Ortsfrequenzraum. Symmetrien bleiben enthalten
$h_2 - h_1 = d$ → $\ell \tan(\alpha_2) - \ell \cdot \tan(\alpha_1) = d$
$\ell = \frac{d}{\tan(\alpha_2) - \tan(\alpha_1)}$
Spotgröße ~ d_{Airy}
Ortsraum $u(x)$ → Winkelraum $u(v)$

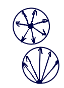




Sichtbar: 380 – 780 nm (blau, rot) ↓ ultraviolett ↑ infrarot
Auge: rot, grün, blau (Zapfen) → mischung
weiß ⇒ x = y = z = 1/3
Spektrometer: genaue Vermessung von der spektralen Verteilung von Licht, wie viel Licht pro λ?
↳ Info über molekulare Zusammensetzung → Detector
Monochromaten: spektrale Filterung von Licht ↳ ähnl. wie Spektrometer → Beleuchtung
Winkeldispersion: → abh. von λ mit unterschiedl. Winkel $D = \frac{d\theta}{d\lambda}$
Gitter: blau schwach gebrochen ↳ $\sin\theta = m \cdot \frac{\lambda}{d}$
Prisma: stark abgelenkt ↳ $\frac{dn}{d\lambda}$
Auflösungsvermögen: $A = \frac{\lambda}{d\lambda}$ → Intensität Maxima trennen, trotz ähnl. λ
Grenz-Auflösungsvermögen: Auflös.verm. ~ Winkeldispersion
Beugungslimit → Beugung = Dispersion
$d\theta_B = \frac{\lambda}{a}$ (Beugung) $= d\theta_D = D \cdot d\lambda$ (Dispersion)
$A = \frac{\lambda}{d\lambda} = a \cdot D = m \cdot N$
Gitter: $D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cdot \cos(\theta_m)}$ $a = L \cdot \cos(\theta_m)$
$A = \frac{m \cdot L}{d} = m \cdot N$ L = Bereich Probe, m = Beugungsord., N = Anzahl Spalten
$= \frac{m \cdot d}{g}$ → d - Dicke Strahl
↳ Beugung → $d \cdot \sin(\theta) = m \cdot \lambda$ → blau weniger abgelenkt als rot
↳ mehrere Ordn.
Prisma: $D = \frac{d\theta}{dn} \cdot \frac{dn}{d\lambda} = \frac{2 \cdot \sin(\frac{\alpha}{2})}{\cos(i')} \cdot \frac{dn}{d\lambda}$
$a = l \cdot \cos(i')$
blau: Brechung
• blau stärker gebroch. als rotes, da λ ↓
$A = b \cdot \frac{dn}{d\lambda}$ } Material-dispersion
↳ Basislänge
Dispersion: $\frac{\Delta n}{\Delta\lambda}$
b ges:
$b = A \cdot \frac{d\lambda}{dn} = A \cdot \frac{\lambda_F - \lambda_C}{n_F - n_C}$
Kollimiert → parallel
$V = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$ $n_F - n_C = \frac{n_d - 1}{V}$ $b = A \cdot \frac{V(\lambda_F - \lambda_C)}{n_d - 1}$ ↳ $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$
Hyperspektrale Bildgebung
Bildaufnahme & Spektrale Information in jedem Bildpunkt
↳ Tumordiagnose
isotrop → in alle Richtungen gleich
Lambert → Zuna. Absorption von Licht in einer Lös. und der Konzentration der Substanz, sowie die Schichtdicke Absorption ~ c ~ Weglänge
Theorie Laser
↳ Vergrößerung durch Teleskope
Verbesserung Gitterspektrometer:
↳ höhere Ordnung, ↑ Spaltzahl, Dispersion erhöhen, größeres a
freier Spektralbereich:
↳ Überlappfreier Bereich

zu 10.
Leistung $d\Phi$
pro Fläche → Beleuchtungsstärke $E = \frac{d\Phi}{dA}$
pro Etendue → Strahldichte $L = \frac{d\Phi}{d\Omega\, dA \cos\theta}$
pro proj. Raumwinkel
$L = \frac{I}{dA \cdot \cos(\theta)}$ pro proj. Fläche
pro Raumwinkel → Strahlstärke $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$

Strahlungsleistung (Strahlungsfluss)
= Energie pro Zeiteinheit [W], die als elektromagn. Strahlung emittiert wird
Def: PHYSIKALISCH WIRKSAME STRAHLUNGSGRÖßE [W]
Radiometrie: Strahlungsphys. (radiometr.) Größe
Strahlungsenergie bei allen λ
SI-Einheit [J, W]
ges. Strahlleistung: $\Phi = \int \Phi(\lambda) \cdot d\lambda$ [W] $= \dot{N} \cdot E$
Konstante Lichtstär. $\Phi_V = I_V \int d\Omega = I_V \cdot \Omega$
Photometrie: Beschränkung auf sichtb. Spektrum
↳ auf Lumen basieren
Auge Detektor (physiologisch)
Empfindlichkeit des Auges bei verschied. λ
Lumen vs. Watt ↳ Lumen, Lux, Candela $[V \cdot \Phi \cdot \lambda]$
sichtbare Leistung: $\Phi_V = 683 \frac{lm}{W} \int_\lambda \Phi(\lambda) V(\lambda) d\lambda$ [lumen = lm]
Def ↳ für das menschl. Auge wahrnehmbare Strahlungsgröße (Lumen)
Strahlenfluss: [Watt] Φ: · Strahlungsphysikalische Größe (radiometrisch) · empfängerunabhängig · kompl. Strahlungsleistung
↕ Äquivalent
Lichstrom Φ_V [Lumen]: · lichttechn. Größe (photometr.) · Auge des Empfängers · Lichtmenge vom Auge wahrgenommen
Φ von 1 W bei $\lambda = 555$ nm → Φ_V von 683 lm (Lumen)
1 W $\lambda = 610$ nm → 0,5 · 683 = 341 lm
1 W Leuchtstoffröhre 80–100 lm
1 W Glühlampe (T = 2500 K) → 15 – 20 lm
1 W Thermalstrahler → 94 lm (6000 K)
$\frac{\Phi_V\,[Lumen]}{\Phi}$ $\mu = \frac{\Phi_V}{P}$ [Lumen/W] μ → Effizienz
Strahlstärke: $I = \frac{d\Phi}{d\Omega}$ [W/sr] $= L \cdot A$
Lichtstärke $I_V = \frac{d\Phi_V}{d\Omega}$ [$\frac{lm}{sr}$ = cd]
Leistung pro Raumwinkel: cd = candela
Strahlungsleistung: $\Phi_E = E_{Phot} \cdot N_{Phot}$
Strahlenflussdichte: $\Phi_{Phot} = \frac{I}{E_{Phot}}$
Beleuchtungsgrößen-Spektrum
- Licht/Ω $I = \frac{\Phi}{\Omega}$
- Licht/Fläche $E_V = \frac{\Phi}{A}$
- Helligkeit/Etendue
Richtungscharakteristik:
Abh. der Strahl/Lichtstärke vom Beobacht.-Winkel
$I = \frac{d\Phi}{d\Omega} = I(\theta, \varphi)$
isotrop: $I(\theta) = const$
Lambert: $I(\theta) \propto \cos(\theta)$

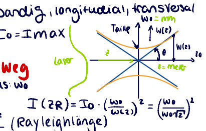


Strahlungsleistung:
Raumwinkel:
$d\Omega = \sin(\theta) \cdot d\theta \cdot d\varphi$ [sr] $I = \frac{P}{A}$
$\Omega = 2\pi (1 - \cos(\theta))$
$\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta} \sin\theta \cdot d\theta$ $\Omega = 2\pi$ Halbraum, $\Omega = 4\pi$ Vollraum
$d\Omega = \frac{dA_\perp}{r^2}$ [sr]
Bestrahlungsstärke: Quellen bezogen
$E = \frac{d\Phi}{dA}$ [W/m²] $\Phi_V = E_V \cdot A = E_V \cdot \frac{\pi d^2}{4}$
Beleuchtungsstärke: $E_V = \frac{d\Phi_V}{dA}$ [lm/m² = lux] $= \frac{I}{r^2}$ ↳ r^2 → Abstand
$A_{Bel} = A_L \cdot \beta'^2$
Zusammenhang Strahlstärke/Beleuchtungsstärke
↳ isotrop abstr. Quelle
$E = \frac{d\Phi}{dA} = \frac{d\Phi}{d\Omega} \cdot \frac{d\Omega}{dA} = \frac{I}{r^2}$ (I, $1/r^2$)
$\Phi_E = N \cdot E = N \cdot \frac{h \cdot c}{\lambda}$
Bestrahlung: $H = E \cdot T$ [Ws/m² = J/m²] T - Belichtungsdauer
Belichtung: $H_V = E_V \cdot T$ [Lux · s]
Anw. → Lasik, Fotographie, Radiometrie
Helligkeit/Leuchtdichte:
• Pupillenöffnung def. wie viel Licht ins Auge
• Je kleiner Lichtquelle desto heller, da A'_{LQ} kleiner ↳ Bild Netzhaut kleiner
• Helligkeit = Leuchtdichte: $L_{LQ} = \frac{d\Phi}{d\Omega \cdot A_{LQ}}$

Einheiten radiometr. analog mit [W] – photometr.

Strahldichte/Leuchtdichte
Strahldichte: $L = \frac{I}{dA \cdot d\Omega \cdot \cos(\theta)} = \frac{I}{A \cdot \Omega}$ [W/m² · sr] $L = \frac{d\Phi}{dH}$
Leuchtdichte: $L_V = \frac{I}{dA \cdot d\Omega \cos(\theta)}$ [cd/m²] $L_V = \frac{I}{A \cdot \alpha_{Helligkeit}}$
Maß für Helligkeit: $d\Omega_P = \cos(\theta) \cdot d\Omega$
$L = \frac{10^5\,lux}{0{,}0001\,sr} = 10^9 \frac{cd}{m^2}$ → Sonne
Etendue H: $dH = dA \cdot \cos(\theta)\, d\Omega$
$H = A \pi \cdot NA^2$ [m² · sr] $\frac{d\Omega_P}{}$ Lichtleitwert
$H = A \cdot \pi \cdot \sin^2(\theta)$ Ω_P $dH = dA\, d\Omega \cos(\theta)$
Laserpointer: ($\Phi = 100$ lm) $H = 3 \cdot 10^{-10}$ m² sr → kleine Etendue
$L = \frac{100\,lm}{H} = 3 \cdot 10^{11} \frac{cd}{m^2}$ → große Helligkeit
Fläche Winkel Trade-off
$H = H'$ $A\pi\,NA^2 = A'\pi\,NA'^2$
Anregungs & Fluorenzphotonen: $N_{Phot,Anr} = \frac{P_{opt}}{E_{Phot}}$ $N_{Phot} = \% \cdot N_{Phot,Anr}$
↳ Etendue Erhaltungsgröße
↳ Strahldichte/Erhaltungsgröße/kann nicht vergrößert werden!
Leuchtdichte

LASER λ = 200 nm (UV) – 10 µm (IR)
Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
Wechselwirkung Laser-Gewebe: Zeit [fs – ms] ~ Stärke [W/m²]
→ Photodisruption, Photoablation, Koagulation, Vaporisation, Photochemie ← Intensität
Prozesse Laser: Energie-Niveau, Absorption, Emission, Besetzungsinversion… ↑ stimulierte
$E = \hbar \cdot w$ $E = \frac{h \cdot c}{\lambda} = E_2 - E_1$
Intensität die rein geht, neg. V2, Absorption
Absorption: $I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha \cdot z}$: $dI = -\sigma_{12} \cdot N_1 \cdot I \cdot dz$
Emission: $dI = \sigma_{12} \cdot N_2 \cdot I \cdot dz$ (stim.) $+ \frac{1}{c \cdot \tau_{sp}} N_2\, dz$ (spont.)
Lichtintensität:
$I = I_0 \cdot e^{+(N_2 - N_1)\sigma_{12} \cdot z}$ z: Länge $N_2 > N_1$ $g = \sigma_{12}(N_2 - N_1)$
g: $= I_0 \cdot e^{g \cdot z}$
Angeregt: exponentielle Verstärkung
Radius = 0 ↳ Intensität am Größten
Grundzustand: Lambert-Beersches-Gesetz
Komponenten: Verstärkungsmedium (Besetzungsinversion), Pump-Mechanismus (Energie zufuhr), Resonator (Rückkopplung)
Laser: Nd-YAG, Farbstoff-Laser, Excimer, CO_2-Laser
Laserspektrum sehr schmalbandig, longitudinal, transversal
Lasermoden: $L = m \cdot \frac{\lambda_m}{2}$ $I_0 = I_{max}$
Gauß-Intensitätverteilung: r - Weg
$I(r) = I_0 \cdot \exp\left[-2 \frac{r^2}{w_0(z)^2}\right]$ Radius: w_0



Strahlradius/Taille
$w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$ $z_0 = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda}$ (Rayleighlänge)
$I(z_R) = I_0 \cdot \left(\frac{w_0}{w(z)}\right)^2 = \left(\frac{w_0}{w_0\sqrt{2}}\right)^2$
↳ bleibt Gaußförmig, d ändert sich mit Ausbreitung (asymptotisch) (Ausbreitungsverhalten)
→ Divergenz: $\theta_0 = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0}$ [mrad] w_0 klein, θ groß $A = \pi \cdot w_0^2$
Etendue: $H = \pi \cdot A \cdot NA^2 \approx \pi^2 \cdot w_0^2 \cdot \theta_0^2 = \lambda^2$ $NA = \theta_0 = \frac{\lambda}{\pi \cdot w_0}$
Helligkeit: $L = \frac{d\Phi}{H} = \frac{d\Phi}{\lambda^2}$ $\frac{\lambda}{\pi} = w_0 \cdot \theta_0$ (Strahlparameterprodukt)
• Intensität gaußförmig, große Leuchtdichte & Bestrahlungsstärke, Strahltaille w_0 bestimmt θ → Strahlparameterpro. konstant
Photochem: chem. Prozesse bräunen div ↓ Intensität
↳ Photodyn. Therapie PDT
Koagulation: Ei kochen, nicht reversibel
↳ reversible Erwärm., irrever. Gewebeänd., Karbonisierung, Verdampfen
↳ Blutstillung, Dermatologie, endovenöse Behandlung
Photoablation: direkte Verdampfung (LASIK) ↑ lineare Absorption
↳ Zertrümmerung Nieren/Blasenstein, Lasik
Photodisruption: femtosekunden, Volumen herauslasern ↓ n.l.
Kohärenz: kann sich selbst zur Interferenz bringen = def. Phase
↳ zeitl. Kohärenz in Ausbreitungsrichtung (z)
↳ räuml. Kohärenz in Quer-Richtung (x, y - Richtung)
↳ Photonen: Wellenzug: l_c → Länge Wellenzug
Kohärenzzeit: $\tau_c = \frac{l_c}{c}$ ↳ Interferometer (zeitl.)
OCT - opt. Kohärenz tomographie (Weißlichtinterferometer für transparente Objekte → Tiefeninfos Gewebe
räuml. Kohärenz ~ Divergenz
↳ Doppelspalt
Laser Speckle-Effekt: Interferenz an rauen Oberflächen durch Interferenz - Störeffekt, - Nützlich
↳ Bewegungsinfos, Blutfluss
Wellenfrontradius: $R(z) = z + \frac{z_0^2}{z} = z + \left(\frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda}\right) \cdot \frac{1}{z}$ → Krümmungsradius
max. Visibilitätskurve: 555 nm