

Optik Übersicht

• Grundlagen: Licht

Elektromagnetische Welle

Licht als Welle und Teilchen

Licht als Strahl

• Maxwell Gleichungen in homogenen Medien

1 $\nabla \times \vec{H} = \frac{d}{dt} \vec{D} + \vec{j}$ (Ampere)

2 $\nabla \times \vec{E} = - \frac{d}{dt} \vec{B}$ (Faraday)

3 $\nabla \cdot \vec{B} = 0$ (Ladungen sind außen)

4 $\nabla \cdot \vec{E} = 0$ (Quellenfreiheit)

$\vec{j}$ = Stromdichte [A/m^2]

$\vec{j}$ = Raumladungsdichte [As/m^3]

$\vec{B} = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 \cdot \vec{E}$ und $\vec{D} = \mu_r \mu_0 \vec{H}$

Wellengleichung:

- für elektromagnetische Wellen $\Delta \vec{E} - \mu \epsilon \cdot \frac{d^2}{dt^2} \vec{E} = 0$

$$\Delta E - \frac{n^2}{c_0^2} \frac{d^2}{dt^2} \vec{E} = 0$$

Der Brechungsindex:

$$n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$$

Lichtgeschwindigkeit $c_0 = \left(\frac{1}{n}\right) = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_{r0}}} = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

- für harmonische Schwingung (int) (Helmholtz-Gl.)

$$\Delta E + n^2 \frac{\omega^2}{c_0^2} \vec{E} = 0 \quad \text{mit } \omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$$

Sichtbares Licht ca. 400 - 750 nm

darunter Ultraviolett

darüber Infrarot

Divergenz $\nabla \cdot \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$

E : el. Feldstärke, [V/m]

H : mag. " [A/m]

B : mag. Induktion [$Vs/m^2 = Tesla$]

D : el. Versiebung [As/m^2]

ϵ = Dielektrikum [As/Vm]

μ : Permeabilität [Vs/Am]

$\lambda = \frac{2\pi}{k}$

mit $k = \frac{\omega n}{c_0}$

Wellenvektor / Wellenzahl

c ist die Ausbreitungsgeschwindigkeit

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

$\rightarrow E(\vec{r}, t) = E_0(\vec{r}) \cdot e^{i \cdot f(r, t)}$
Ebene Welle

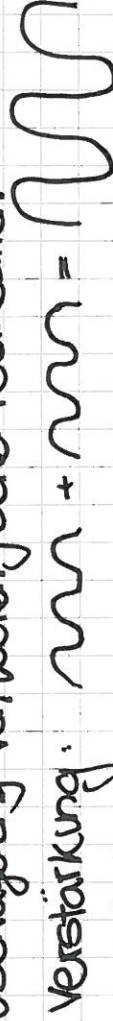
$f(r, t) = \omega t - \vec{k} \cdot \vec{r}$

Phasengeschwindigkeit: $c = \frac{\omega}{k} = \frac{c_0}{n}$

$c_{\text{medium}} = \frac{c_0}{n}$

• Interferenz

$\rightarrow$ Überlagerung von Wellen gleicher Polarisation

Verstärkung: 

Auslöschung: 

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

• Beugung (Huygens)

Optische λ : $OP_L = n \lambda$

Jeden Punkt kann als Ausgangspunkt einer Elementarwelle gesehen werden. Nach einem Spalt breitet sich die Welle erneut aus

• Licht und Materie Beugungseffekt $\Delta x = \frac{\lambda}{\sin \alpha} \approx \frac{\lambda}{\Delta \alpha}$ Beugungsgrenze

$\rightarrow$ Grenzflächen:

$d_{\text{Airy}} = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{NA}$

$\rightarrow n$ ändert sich: Geschwindigkeit verändert sich (langsamer)

$c = \frac{c_0}{n} < c_0$ die geänderte Wellenlänge beträgt $\lambda = \frac{\lambda_0}{n}$

$\rightarrow$ Licht wird abgebremst

Brechungsgesetz: $n \sin i = n' \sin i' \rightarrow \frac{\lambda_0}{n \sin i} = \lambda_0$

Reflexion $i = i'$ (Snellius)

Wenn n größer $\rightarrow i$ kleiner

Satz von Fermat: ein Lichtstrahl verbindet 2 Punkte

immer über den schnellsten Weg.

Totalreflexion: Grenzwinkel $\sin i' = 1$ $n' < n$: Totalreflexion

maximaler Winkel

Formel $\sin i_c = \frac{n'}{n}$

z.B. bei Prismen, Glasfaserkabel

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



• Dispersion und Absorption

Brechzahl kann auch komplex sein und ist wellenlängenabhängig

$$n = n(\lambda) - i n_i(\lambda) \quad \nabla$$

Dispersion: Abhängigkeit des (realen) Brechungsindex von der Wellenlänge

$$\Delta n = n(\lambda_1) - n(\lambda_2) \quad \nabla \quad \text{Normale Dispersion} \quad \frac{dn}{d\lambda} < 0$$

Absorption: n_i & Abschwächung der Intensität

$$\text{Lambert-Beersches Gesetz} \quad I(z) = I_0 \cdot e^{-\alpha z} \quad \nabla$$

Der Absorptionskoeffizient ist proportional zum Inhaltanteil von n

Glühende feste / flüssige Körper: liefern kontinuierliches Spektrum

Glühende Gase / Dämpfe, liefern diskontinuierliche Spektren (Energie ^{niveaus})
 Sauerstoffgehalt des Blutes kann über Absorption von Licht am Hämoglobin gemessen werden

• Teilchencharakter des Lichts

$$\text{Energie: } E = h \cdot \omega \quad \text{Impuls: } p = h \cdot k \quad \nabla \quad \text{Gesamtenergie } E = p \cdot t$$

$$h \cdot \text{Plancksches Wirkungsquantum} \quad 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ Js} \quad \nabla \quad E = \# \text{ der Photonen} \cdot \text{Energie pro Photon}$$

$$\text{Photonenfluss: Intensität} \quad I = \frac{P}{A} = \frac{E}{A \cdot t} \quad \nabla$$

$$\hookrightarrow \phi = \frac{I}{E_h} = \frac{I \cdot \lambda}{h \cdot c} \quad \phi = \frac{I}{E_h} = \frac{P}{A E_h}$$

• Streuung

Wichtig bei Geweben: Streuung bedeutet Änderung der Lichtrichtung

$\rightarrow$ dabei sind keine Strukturen erkennbar ∇ $\alpha = \frac{K_s}{K_s + \alpha}$ (Albedo)

elastische Streuung: kein Energieverlust, λ bleibt gleich (Rauheit, wie Streuung)

inelastische Streuung: Energieverlust gestreutes Licht hat größere λ (also E kleiner)

$\rightarrow$ Lichtabsorption $\rightarrow$ Erwärmung $\rightarrow$ Gewebeänderung: wer beim Spiegel

Aufwärmung $\rightarrow$ Denaturierung von $\rightarrow$ Austrocknung $\rightarrow$ Karbonisierung $\rightarrow$ Vertreiben / Verdampfen Eiweißen

• Fluoreszenz

• Photolumineszenz: Körper kann Leuchten, wenn er von einer Lichtquelle angestrahlt wird

Fluoreszent: kein Leuchten nach Abschalten der Lichtquelle

Phosphoreszenz: Mit Nachleuchten " " "

→ Lichtemission erfolgt unter Energieverlust

→ Fluoreszenzanregung von sichtbarem Licht, sind nur Lichtquellen geeignet die

Licht mit höherer Energie (kleiner λ) ausstrahlen (z.B. UV, blaues Licht, Röntgenlicht)

0.2
0.3a

• Geometrische Optik

Strahlen sind normal zur Wellenfront (Satz von Malus)

Geometrische Optik: Ausbreitung von Lichtstrahlen

Axiome: Strahlen in homogenen Medien laufen auf Geraden

Strahlen an Grenzflächen zw. Medien werden gebrochen oder reflektiert (keine Beugung)

Strahlen beeinflussen sich gegenseitig nicht

Strahlen sind umkehrbar (Konvention: von links nach rechts)

• Paraxiale Optik

Für kleine Winkel: Lineare Beziehung Snellius $n \cdot \alpha = n' \cdot \alpha'$

Im Bogenmaß, Taylor-Entwicklung 1. Ordnung

→ Einfachere Gleichungen: Abbildungsgleichung

→ keine Abbildungsfehler: Alle Strahlen schneiden sich in einem Punkt

→ Abweichungen verursachen Bildfehler (Aberrationen)

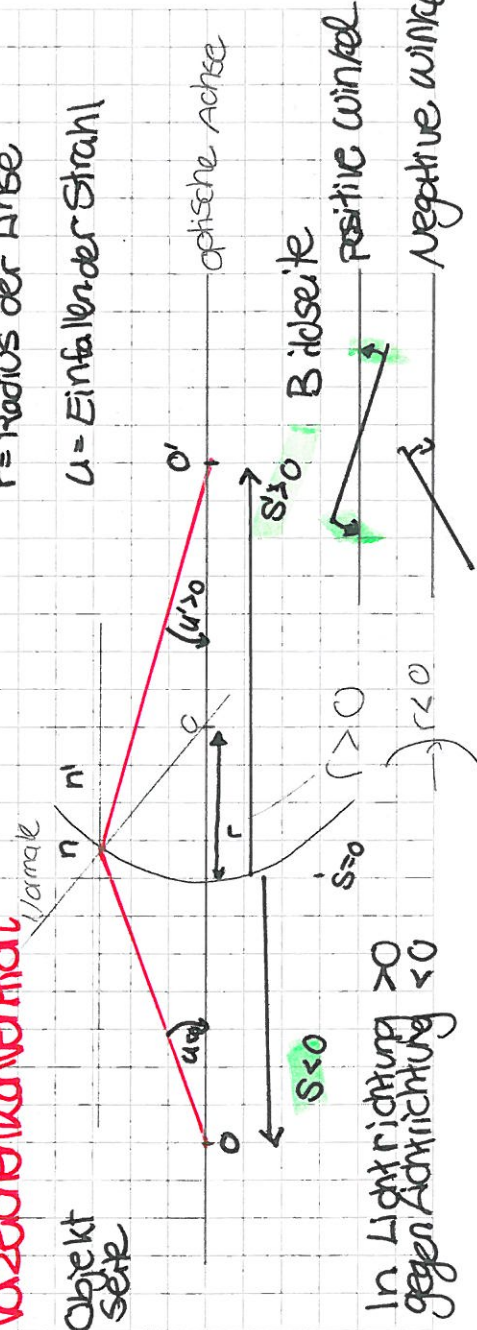
→ nur benutzbar, wenn symmetrisch

• Vorzeichenkonvention

r = Radius der Linse

u = Einfallender Strahl

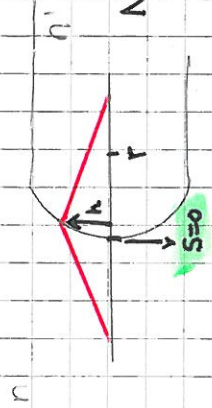
Objekt
Seite



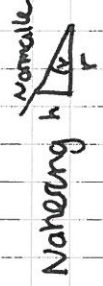
Optik Übersicht

1/13

• Eine Sphärische Grenzfläche



Abbildungsgleichung: $\nabla n' \cdot u' = n \cdot u + h \cdot \frac{(n' - n)}{r}$



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

Reelles Bild kann nur erzeugt werden, wenn Objekt weiter weg als Brennpunkt im Grenzfall: kollimiertes Licht

-> Bildlage ist unabhängig von u

-> Es genügt 2 Strahlen zu bestimmen: Schnittpunkt

• Brechkraft

$$f = \frac{(n' - n)}{r} \quad \nabla \quad [\text{Dioptr} = 1 \text{m}^{-1}] \quad \text{Dioptrie}$$

für Einzellbrechkraft $\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = f$ $n' \cdot u' = n \cdot u + h \cdot f$ ∇

• Abbildungsgleichung für Reflexion

Hohlspiegel hat $r < 0$, Erhabener Spiegel $r > 0$

Reflexionsgesetz $n_i = -n' \cdot i' \quad \nabla$ für Luft mit $n=1 \quad n' = -n$

Brechkraft Spiegel $f = \frac{2}{r}$ $r = \text{Radius} \quad \nabla$

Abbildungsgleichung für den Spiegel



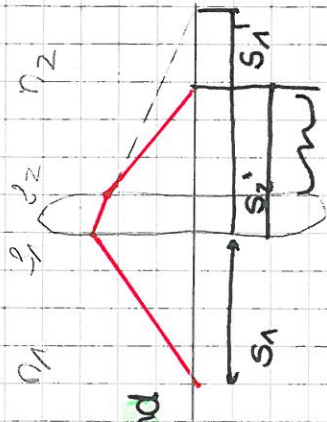
$$\frac{1}{s'} + \frac{1}{s} = \frac{2}{r} \quad \text{um } f$$

+ weil in die gleiche Richtung

• Dünne Linse

2 Kugelflächen (Brechkraft) in geringem Abstand

1 Fläche $\frac{n'_1}{s'_1} = \frac{n_1}{s_1} = f_1 \quad \nabla$



2 Fläche $\frac{n'_2}{s'_2} = \frac{n_2}{s_2} = f_2 \quad \nabla$

$$s_2 = s'_2 - d$$

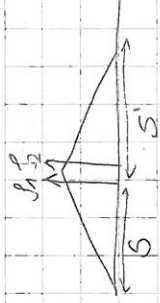
$\hookrightarrow \frac{n'_2}{s'_2} - \frac{n'_1}{s_1} = \Phi \quad \nabla$

$\Phi = f_1 + f_2$ (Gesamtbrechkraft)

In Luft $n_1 = n_2 = 1$ Linse n

Linien-Abbildungsgleichung

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



Linienmachergleichung $\phi = \phi_1 + \phi_2 = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right)$

Je kleiner der Radius, desto stärker gebrochen ist die Linse

• Brennweite:

f' : Bildseitige Brennweite

f' : Objektseitige Brennweite

f : Objektseitige Brennweite

f : Objektseitige Brennweite

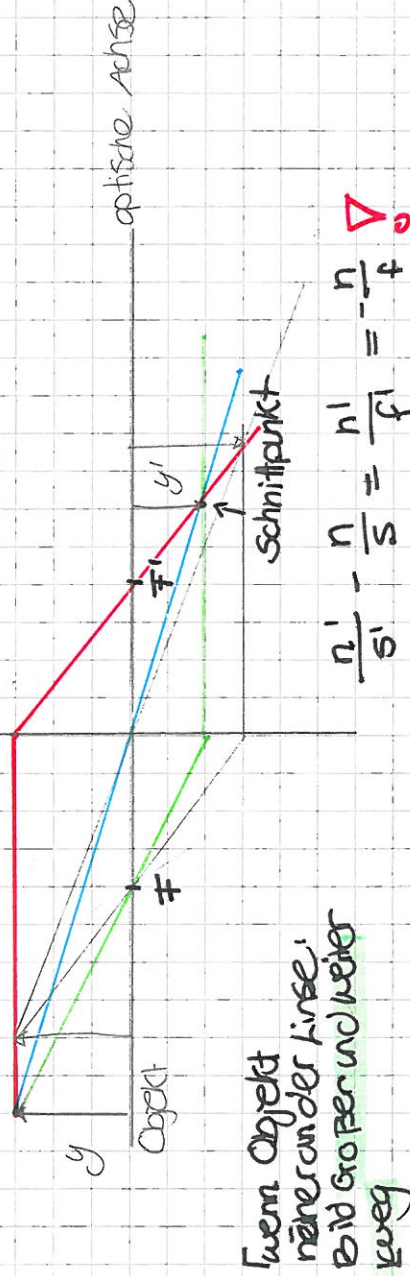
Allgemein $\frac{f'}{f} = \frac{n'}{n}$

An Luft gilt $f = -f'$

• Bildkonstruktion

— Positive Brechkraft

Parallelstrahl $s = \infty$ $s' = f$
Mittelsstrahl $h = 0$ $s = f$
Brennpunktstrahl $s' = \infty$



Wenn Objekt näher an der Linse, Bild größer und weiter weg

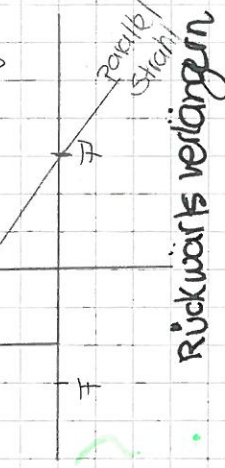
$$\frac{n'}{s'} - \frac{n}{s} = \frac{n'}{f} = -\frac{n}{f}$$

Δ $n' \cdot u' = n \cdot u + h \cdot f \rightarrow h = 0 \quad n' \cdot u' = n \cdot u$

Objekt	Bild
1. links von f	reell, verkleinert
2. $2 \times f$	reell $2f'$ $B = -1$
3. $2f > y > f$	reell, vergrößert
4. zw. f und Linse	virtuell, vergrößert
5. in f	im ∞

virtuelles Bild

kein Brennpunktstrahl möglich

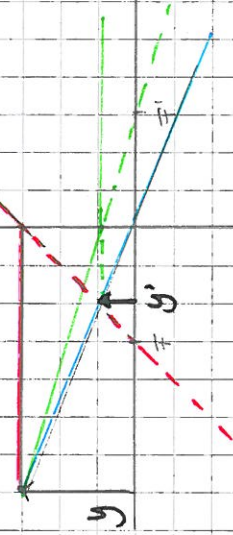


Rückwärts verlängern

Optik Übersicht

/ / 4

- Negative Brechkraft



Virtuelles Bild vor der Linse

↳ Kann nicht auf einem Schirm aufgetragen werden

Je näher das Bild an der Linse, desto größer und näher an der Linse ist das virtuelle Bild.

• Abbildungsmaßstab

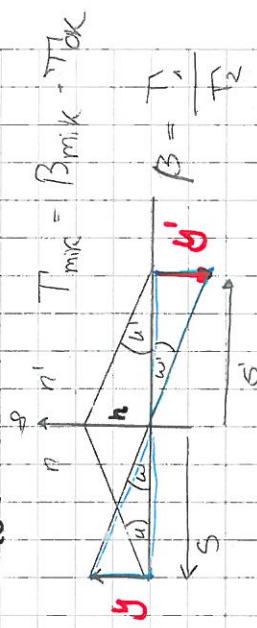
$$\text{Maßstab } \beta = \frac{y'}{y} \cdot \frac{s}{s'}$$

Dreieck

$$y = s \omega$$

$$y' = s' \omega'$$

$$n \omega = n' \omega'$$



$$\frac{T_{\text{Mik}}}{T_{\text{Ok}}}$$

$$\beta = \frac{n \cdot s'}{n' \cdot s} \cdot \frac{s}{s'} = \frac{n \cdot u}{n' \cdot u'}$$

Winkelzusammenhang: $u = \frac{h}{s} \Rightarrow \beta = \frac{n \cdot u}{n' \cdot u'}$

$$u' = \frac{h}{s'}$$

Vergrößerung

$$T = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0} = \frac{f_2'}{f_1'}$$

für Auge

→ 250mm → s_0' Bezugsweite

ε_0 = Sehwinkel ohne Instrument
 ε = Sehwinkel mit Instrument

Mik Lupe: Abstand Objekt = Linsenbrennweite

Abbildungsmaßstab für paraxiale Abbildung einer Linse

Bei visuellen optischen Systemen (und afokalen Systemen): Vergrößerung

↳ Winkelvergrößerung

$$T = \beta_{\text{Obj}} \cdot T_{\text{Ok}} = -f_{\text{Tubus}} \cdot \frac{250 \text{ mm}}{f_{\text{Oku}}}$$

Vergrößerung Mikroskop + Tubuslinse

• Tiefenmaßstab

Objekt (y) hat eine Tiefe, Ausdehnung in z-Richtung auf optischer Achse

$\Delta s \rightarrow \Delta s'$ Differenzierung der Abbildungsgleichung

$$\alpha = \frac{ds'}{ds} = \frac{n u^2}{n' u'^2} = \frac{n'}{n} \beta^2$$

• Matrixoptik

Strahl wird durch Abstand zur optischen Achse (h) und Winkel (u) beschrieben

Vektorschreibweise $s = \begin{pmatrix} h \\ u \end{pmatrix}$ → lineare Umrechnung weil paraxial

• bei einfacher Strahlbreitung $h_2 = h_1 - L \cdot u_1$

$$u_2 = u_1$$

In Vektorschreibweise $\begin{pmatrix} h_2 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -L \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_1 \\ u_1 \end{pmatrix}$!

• Brechung an ebener Fläche ~~höher~~ bleibt gleich Winkel ändert sich

$$\begin{pmatrix} h_2 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h_1 \\ u_1 \end{pmatrix}$$

• Brechung an dünner Linse Höhe bleibt gleich, Winkel ändert sich

$$\begin{pmatrix} h_2 \\ u_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ f & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} h_1 \\ h_2 \end{pmatrix}$$

Reihenfolge wichtig

• Allgemein

$$\begin{pmatrix} h_1 \\ u_1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} AB \\ CD \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} h \\ u \end{pmatrix}$$

Objekt im Unendlichen

• Dicke Linsen

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

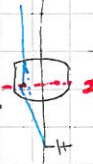
Die Dicke der Linse darf nicht vernachlässigt werden: zusammengesetztes System

hintere Hauptachse H' : Parallel einfallender Strahl bricht vereinfacht an der



bildseitigen Hauptebene, schneidet opt. Achse bei f'

vordere Hauptachse H : Parallel ausfallender Strahl bricht vereinfacht an der



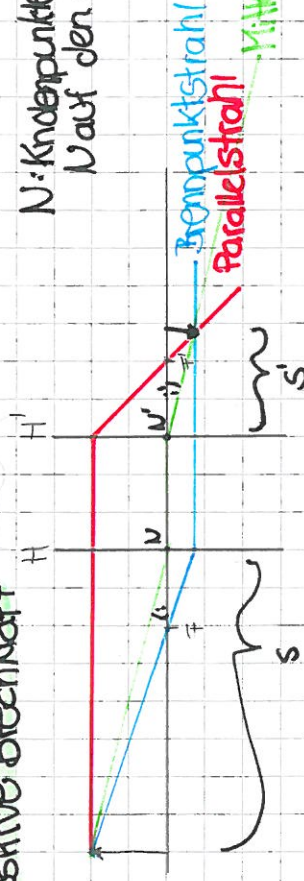
objektseitigen Hauptebene, schneidet opt. Achse bei f

-> eig. gibt es 2. Brechungen: an der vorderen Linse und beim Austreten

-> Auch bei einem System aus mehreren Linsen können gesamt Hauptachsen berechnet werden, die die Brechungen vereinfachen

• Korrektur bei **Dicken Linsen**

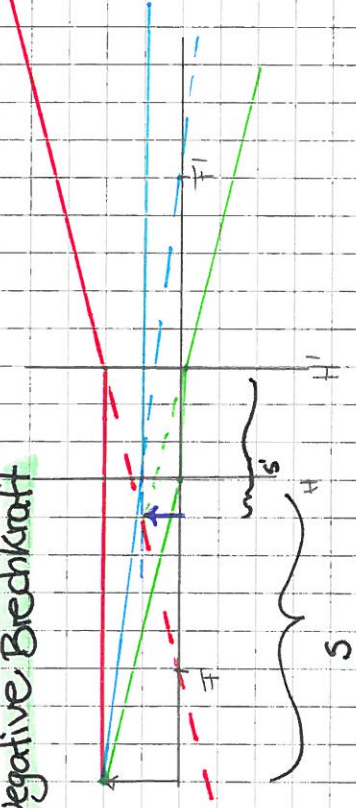
-> Positive Brechkraft



N: Knotenpunkte, in der Luft liegt N' auf den Hauptebenen

-> Jeder einfallende Strahl durch N verlässt N' unter demselben Winkel $i = i'$

→ Negative Brechkraft



f muss gegeben sein

Abbildungsgleichung $\nabla \circ \frac{n'}{s} - \frac{n}{s} = f$ Gesamtbrechkraft

• mehrteilige Systeme

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

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

h_1 : höhe des Parallelstrahls

u : Winkel beim Austritt

d : Abstand der Brechkkräfte

h_1 : höhe des Parallelstrahles vor der 1. Brechung

h_2 : höhe des Parallelstrahles zw 1. und 2. Brechung

Einzelbrechkkräfte in Luft

$\nabla \circ f_1 = \frac{n-1}{r_1}$

$f_2 = \frac{1-n}{r_2}$

$\nabla \circ \Phi = \frac{1}{f} = f_1 + f_2 - \frac{d}{n_1 r_1 r_2}$

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

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

Hauptebenen

$\nabla \circ a_{1H} = f' \cdot f_2 \cdot \frac{d}{n}$

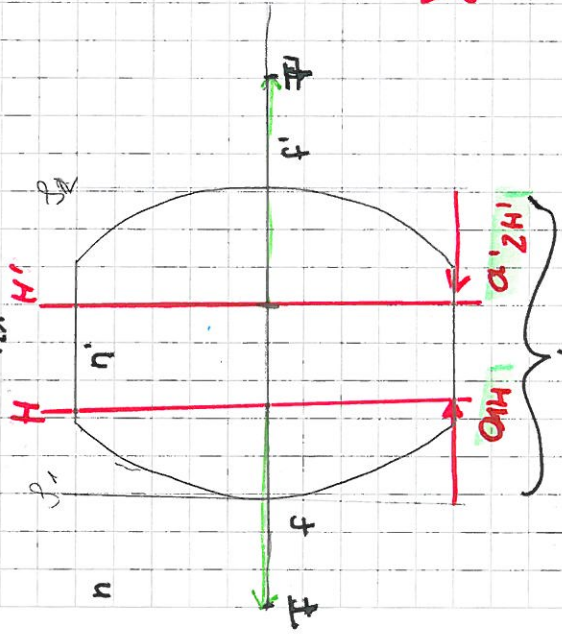
$\nabla \circ a'_{2H} = -f' \cdot f_1 \cdot \frac{d}{n}$

• Linsenvarianten

Konvex	D
Konkav	I
Plan	□

Plankonvex	D
Kombinationen	I
Bikonvex	□

D immer sammelnd
I immer zerstreuend
□ Hauptebenen inner halb
→ immer sammelnd



Paraxial

- Sammellinse: Mitteldicke > Randdicke - endung - konvex
- Zerstreuungslinse: Mitteldicke < Randdicke - endung - konkav

Durchbiegung

- form der Linse bei gleicher Brechkraft
- Änderung der Einfallswinkel
- verschiebung der Hauptebenen: $\parallel C \parallel D \parallel$
- wichtig zur Korrektur Bildfehlern!

zusammengesetzte Linsen-systeme

- 2 Linsen in Luft $\rightarrow$ analog zu dicken Linsen

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

Hauptebenen $= f_1 + \underbrace{(1 - d f_1) f_2}_{\omega_2 \text{ Faktor}}$

$\Delta a_{1H} = + f' \cdot f_2 \cdot d$

$\Delta a'_{2H} = - f' \cdot f_1 \cdot d$

- mehr als 2 Linsen

$\Delta J = \frac{u'_1}{h_1} = \sum_{k=1}^n \frac{h_k}{h_1} f_k = \sum_{k=1}^n \omega_k f_k$

mit $\omega_k = \frac{h_k}{h_1}$ Paraxialer

Gewichtungsfaktor

$\rightarrow$ Gesamtbrechkraft des Systems ist die gewichtete Summe der Einzelbrechkraft

$\rightarrow$ Strahlhöhe des Paraxialen Eingangsstrahl erlaubt Aussage über gewichtete

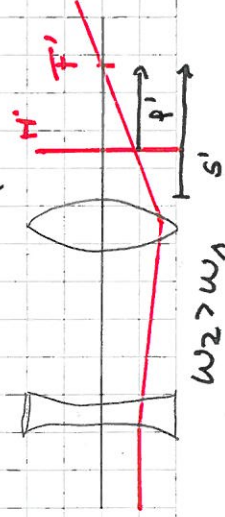
Brechkraftverteilung / Gesamtbrechkraft $\phi = f_1 + \omega_2 \cdot f_2 + \dots$ $\omega_k = \frac{h_k}{h_1}$ Δ

Retrofokus: Summen-Brechkraft pos: $\omega_2 > \omega_1$: sammelnd

$\hookrightarrow$ besteht aus neg. Fräntlinse und dahinter einer pos Linse: Weitwinkelobjektiv

$\rightarrow$ +Hauptebene H' liegt hinter den System! $a'_{2H} = -f f_1 \cdot d > 0$

$\rightarrow$ Brennweite ist kleiner als Schnittweite $s' \rightarrow f' < s'$



$\omega_2 > \omega_1$

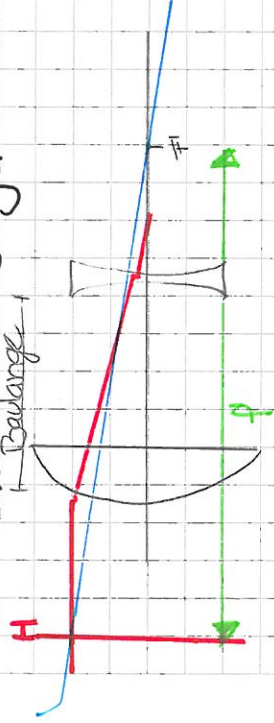
Optik Übersicht

/ / 6

Telesystem: Summe - Brechkraft positiv $w_2 < w_1$ Teleskopobjektiv
Kombination einer positiven Frontlinse und danach eine **neg. Linse**

H' ist vor dem System $a'_{2H} = -f \cdot f_1 \cdot d > 0$

Die Brennweite des Systems ist länger als die Baulänge $f' > l_2$



• Tubuslänge

$$\text{Tubuslänge } t = \overline{F_1' F_2} = d - f_1' - f_2'$$

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

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

$$\text{Hauptebenen } a_{1H} = -\frac{f_1 d}{t}$$

$$a'_{2H} = \frac{f_2 d}{t}$$

Systemwirkung hängt von t ab

wenn $t > 0$ Hauptebenen außerhalb des Systems $a_{1H} < 0$

-> negative Linse mit zugänglichem Brennpunkt (f) $a'_{2H} > 0$

$\hookrightarrow$ vor dem System (bei II ist das nicht der Fall)

-> Lupe: Objekt im Fokus -> bild im Unendlichen -> Paralleles Licht

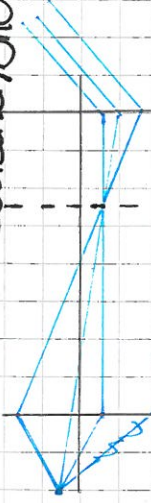
• Mikroskop

besteht aus Objektiv und Okular: Das Zwischenbild wird mit dem Okular betrachtet

$$f' = -\frac{f'_{\text{obj}} \cdot f'_{\text{ok}}}{t}$$

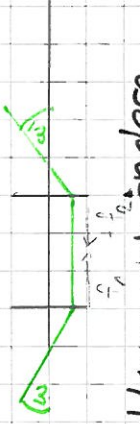
$$\text{Vergrößerung } T = \frac{250 \text{ mm}}{f'}$$

Zwischenbild



• Afokales System: Tubulänge = 0

→ Brennpunkte fallen zusammen $t = 0$



Winkelvergrößerung $T = \frac{\omega'}{\omega} \triangleright \rightarrow$ Winkel kann sich ändern

2 Positivlinsen

• Teleskope

• Kepler Teleskop: Objektiv + Okular: Bild ist umgedreht

$$\triangleright T = \frac{\omega'}{\omega} = -\frac{f_1}{f_2} < 0 \quad \text{Zwischenbild}$$

• Galilei Teleskop: Objektiv + negativ Linse: Bild ist aufrecht

$$\triangleright T = -\frac{f_1}{f_2} > 0 \quad \text{z.B. Opernglas} \quad \text{Bild hinter der 2. Linse}$$

• Varioskop

Operationsmikroskop mit variablem Arbeitsabstand: Platz für Chirurg

Linsen können verschoben werden $\rightarrow$ ändert sich

Gesamtbrechkraft $\phi = f_1 + f_2 - d f_1 f_2 \triangleright$

Zoomsysteme a) finite-finite

b) infinite-finite

c) infinite-infinite

Zoom: Optisches System mit variabler Brennweite f (bzw. Vergrößerung) und konstanter

Bildlage (Fotographie)

$$\text{Variationsfaktor / Dehnungsfaktor } V = \frac{f_{\max}}{f_{\min}} = \frac{\beta_{\max}}{\beta_{\min}} = \frac{T_{\max}}{T_{\min}} \triangleright$$

Bewegung der Variatorlinse verursacht Defokus: Kompensation, durch die

Bewegung des Kompensators $\rightarrow$ -Variator

Defokus: Bild nicht auf dem Schirm scharf

• Afokaler zoom Ansatz aus Dünnen Linsen

2 Sammellinsen mit feilem Abstand, dazwischen Zerstreuungslinse (beweglich) $\triangleright r \rightarrow f_2 < f_1$

4. Aperturblende

Realer Lichtweg $\rightarrow$ Wo laufen tatsächlich Lichtstrahlen / wo nicht

Aperturblenden begrenzen Licht $\rightarrow$ Realer Lichtkegel

Def: Aperturblenden beschränken den Lichtstrom der vom System aufgenommen wird und damit zur Abbildung beiträgt $\rightarrow$ Größe und Lage der Aperturblende sind wichtig



Größe der Blende $d_{EP} = 2h$!

$\triangle$ Öffnungszahl

Blendenzahl $K = \frac{f'}{2h} = \frac{|f'|}{d_{EP}} = \frac{1}{2 \cdot \sin(u)} = \frac{1}{2NA}$! (für Luft? und Objekt weit entfernt)

$\frac{1}{d_{EP}} = \frac{1}{2NA}$

! Beschriftung bei Fotoobjektiven z.B. 1.4/50 $\rightarrow K = 1,4$ / 50 = f' in mm

! Beschriftung bei Ferngläsern z.B. 10x50mm 10 = Winkelvergrößerung $\rightarrow$ vergr. 50mm = Blendendurchmesser d_{EP}

Belichtungszeit ist proportional zu K^2 ! $\rightarrow$ Blende 1,4 $\rightarrow$ 2 = doppelte Belichtungszeit (Blendeinstellung $\sqrt{2}$ -gestuft)

Numerische Apertur $NA = n \cdot \sin(u)$! Angabe der Aperturgröße immer

Beschriftung bei Mikroskopobjektiven z.B. 60x/0.90 NA: 0.90 Vergrößerung 60x

• Auflösung und Schärferiefe

Beeinflusst durch NA und Aperturblende

was kann
schäuf-
relost
werden

Auflösungsvermögen (nach Abbe für beugungsbegrenzten Fall)

$\Delta x = \frac{0,61 \cdot \lambda}{NA}$!

Schärferiefe: De-fokussierter Bildpunkt (Zerstreuungskreis) wird innerhalb eines

gewissen Bereichs (Pinokgröße, Beugungsgrenze) scharf aufgenommen: Schärferiefe

+/- D_f



abhängig von Blendenzahl K je größer, desto mehr

$A = \frac{\lambda}{\Delta x} = m/N$

ist scharf

Geometrische Schärfentiefe: bestimmt durch Auflösungsgränze δ_g (z.B. Pixelgröße)

$$\Delta D_f = K \delta_g = \frac{\delta_g}{2NA}$$

Beugungsbegrenzte Schärfentiefe: Größe des beugungsbegrenzten Δx_y -Schreibbereichs bei

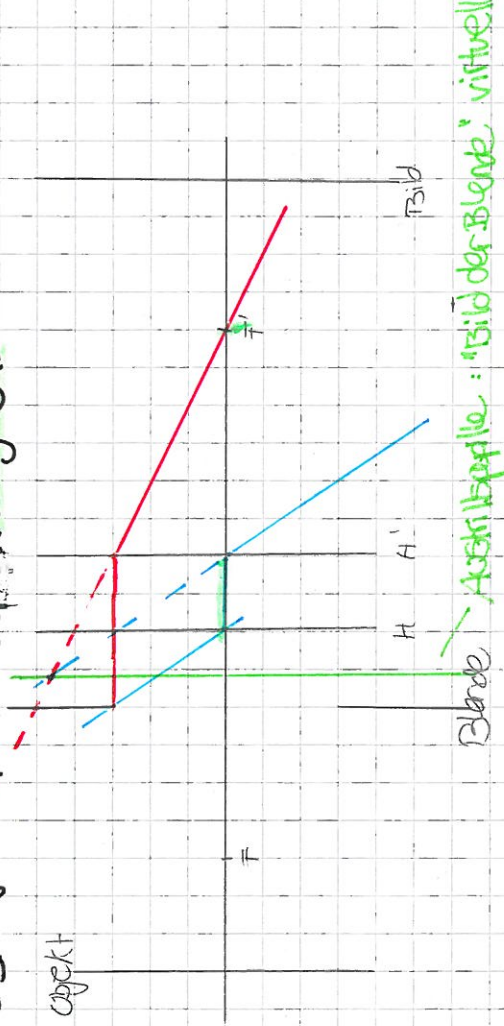
Defokussierung $D_f \propto \frac{1}{NA^2} \propto K^2$!

• Austrittspupille AP

Ist das bildseitige Bild der Aperturblende: wenn man fokussiert durch die Linse schaut.

→ so tun als ob Blende Objekt ist → wenn Blende vor der Linse

→ Abbildung der Aperturblende in Richtung Bild



→ begrenzt den austretenden Lichtstrom

→ Der bildseitige Hauptstrahl schneidet die Achse in der Austrittspupille (rückwärts verlängern) → Das Bild kommt streinbar aus der Austrittspupille

• Eintrittspupille

→ objektseitiges Bild der Aperturblende, wenn Blende vor der Linse:

Aperturblende = Eintrittspupille, da keine Optik davor das Bild verändert

Allgemein: Abbildung der Aperturblende in Richtung Objekt

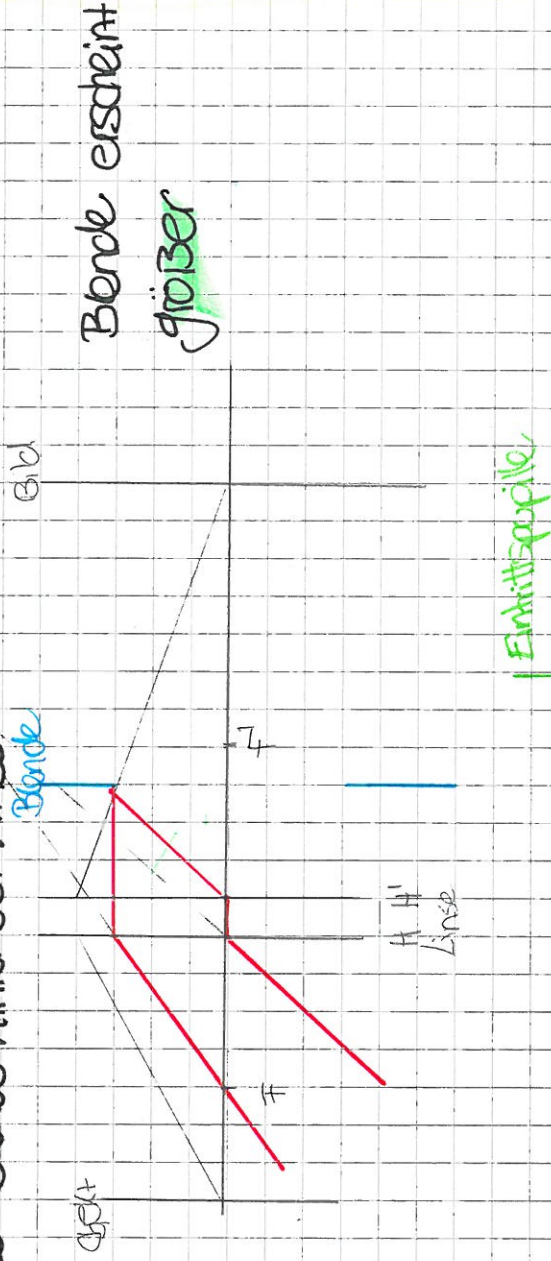
Größe der Eintrittspupille begrenzt den eintretenden Lichtstrom

! $K = \frac{f'}{d_{EP}}$

Optik Übersicht

/ / 8

Skizze: Blende hinter der Linse



Blende erscheint größer

• Pupillengröße und Hauptstrahl

Die Pupillen sind Bilder der Aperturbennde, deshalb kann hier auch die Abbildungsgleichung verwendet werden

Der Hauptstrahl schneidet hier die optische Achse z.B. Teleskop

Beim Kepperteleskop liegt die Austrittspupille im Auge: deswegen kein Bildfeld / Fernrohr

Beim Galilei-Teleskop: Austrittspupille liegt zwischen den 2 Linsen, das Auge kann nicht dort sein → deswegen Schlüsselbohrloch

• Telezentrie

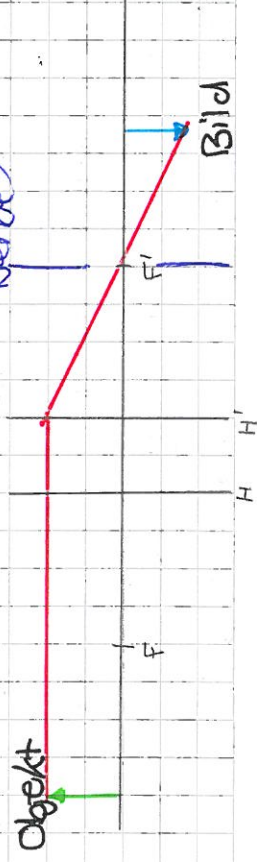
ist der Winkel zw. Hauptstrahl und der opt. Achse

Telezentrisch: Hauptstrahl parallel zur optischen Achse

↳ Eintrittspupille im Unendlichen (wg. Aperturbennde in F')

↳ Hauptstrahl ist objektsseitig parallel zur opt. Achse: jetzt: Telezentrie

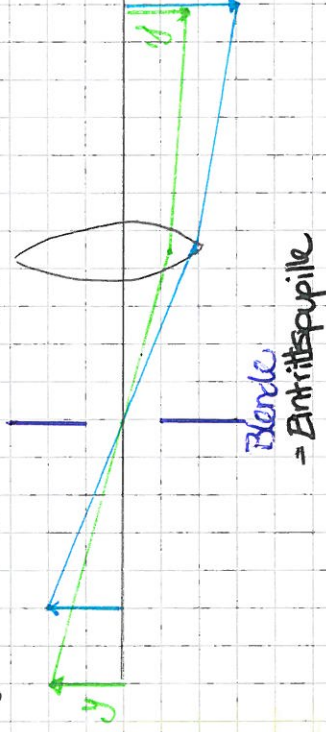
↳ Vergrößerung ist unabhängig vom Objektstand



Nicht Telezentrisch: Hauptstrahl nicht parallel zur opt. Achse $\theta \neq 90^\circ$

Abhängig von Blende

Vergrößerung ist abhängig von Objektsort $\beta = \frac{y'}{y} = f \cdot \frac{1}{s} \quad \nabla$

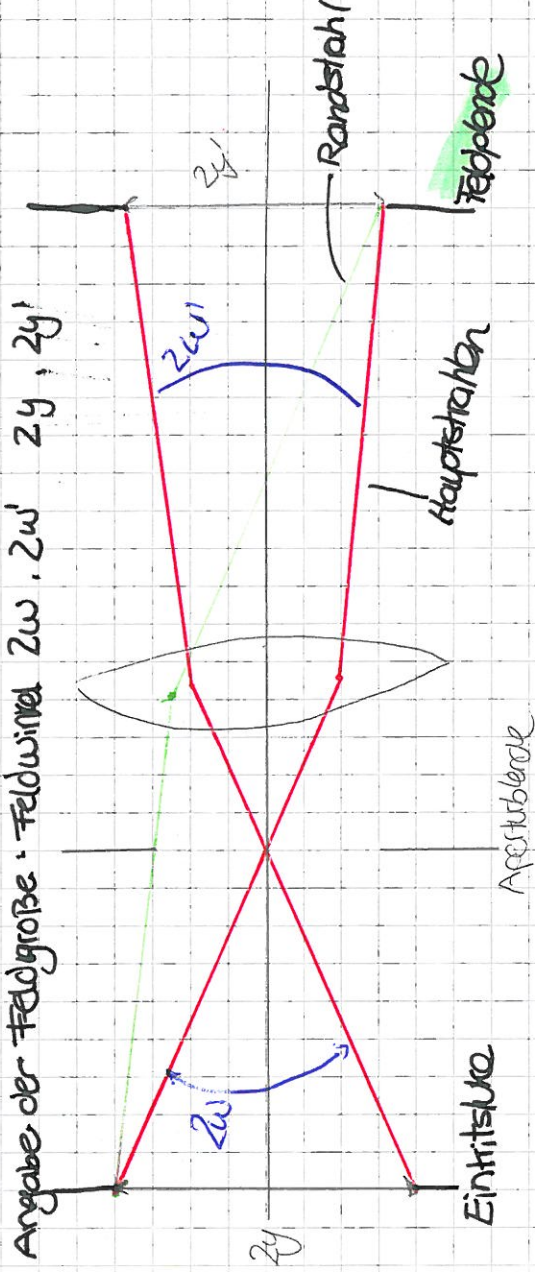


• Feldblende

Begrenzt das sichtbare Feld (limitiert den Hauptstrahl)

Die Bilder der Feldblende heißen Eintritts- und Austrittsluke

Angabe der Feldgröße: Feldwinkel 2ω , $2\omega'$, $2y$, $2y'$



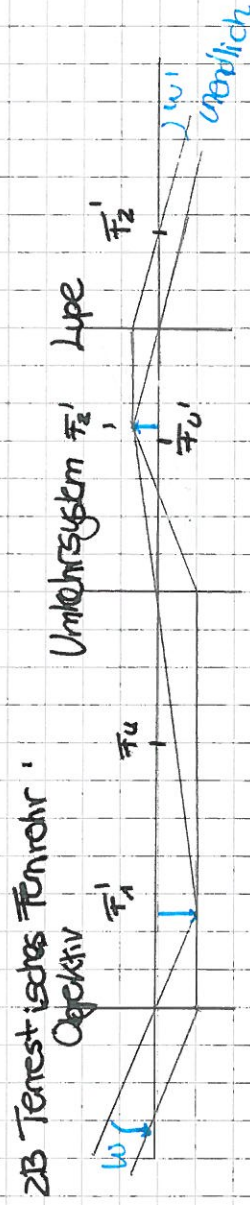
Schfeldzahl: Angabe der Feldgröße bei Okular: Durchmesser des sichtbaren Zwischenbildes (Feldblende) in mm $2B \approx 10 \times 1/22$ bedeutet $10 \times$ Vergrößerung, Durchmesser 22 mm

• Vignettierung

Wenn Begrenzungen nicht mit der Objekt-Bildposition oder Pupile zusammenfällt wird das Strahlbündel feldabhängig beschnitten an anderer Stelle als Blende, Intensität wird am Feldrand reduziert. Kann zur Reduktion von Bildfehlern dienen.

• Zusammengesetzte Systeme

Strahlenkonstruktion nach Leistung: Lage und Größe der Bilder aber: Reale Strahlenknicken nicht ab

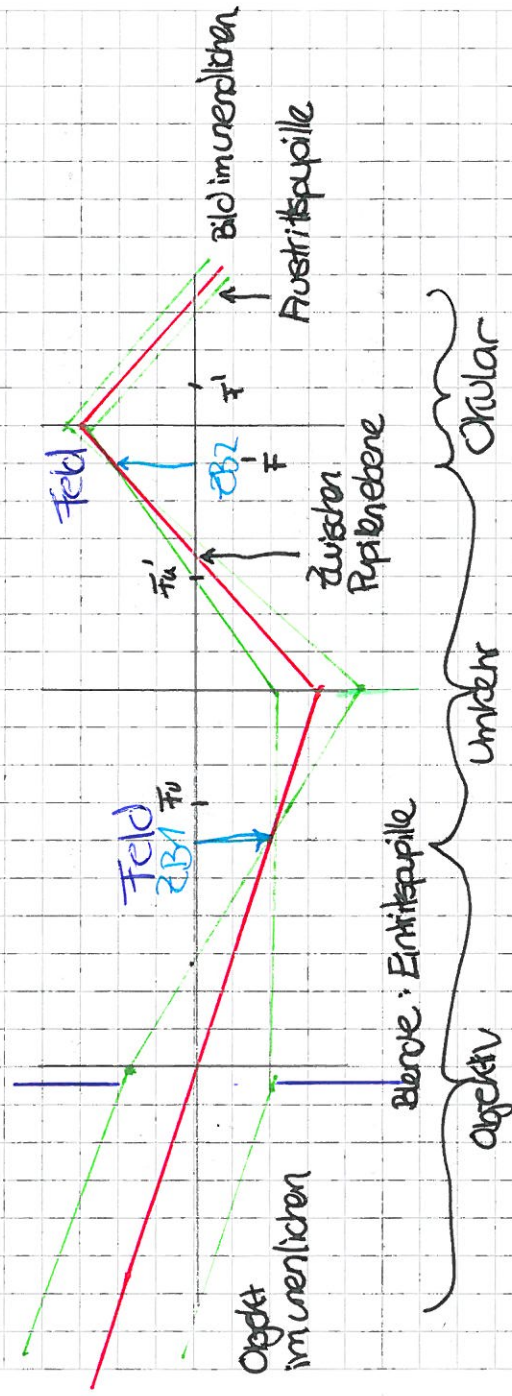


Reale Abbildung: Strahlen die auch wirklich durch das gesamte System

gehen $\rightarrow$ Berücksichtigung von Begrenzungen (Blenden) wichtig!

$\rightarrow$ nur dort Brechung, wo auch Linsen sind.

• Pupillenlage in zusammengesetzten Systemen



$\rightarrow$ Strahlen schneiden sich: verflochtene Strahlengänge

Feldebenen sind Bilder des Objektes (hier treffen sich Randstrahlen) $\rightarrow$ konjugierte Ebenen

Reelle Feld- und Pupillen-Ebenen folgen immer abwechselnd

• Feldlinse

Am Ort des Zwischenbildes: umgitterung zu vermeiden

großes Bildfeld / geringerer Augenabstand für Pupillenabbildung

stören Pupillengröße, wichtig zur Anpassung an Folge-Systeme

Ramsden-Okular: 2 Plankonvexlinsen mit gleicher Brechkraft

Paraxial: kein Einfluss auf Bild, Realität steuert Abbildungsfehler

• Kohärente Beleuchtung

Abbildung der Lichtquelle in der Eintrittspupille der Abbildungsoptik
→ Vorteil: Strukturen der Lichtquelle sind im Bild nicht scharf im Bild

• Kritische Beleuchtung

Abbildung der Lichtquelle in die Bildebene

Bild der Quelle in der Objektebene · Lichtquelle ist im Bild sichtbar (scharf)
dennoch verteilt bei Flächenstrahlen

0.4
0.5

• Geometrische Aberrationen

- Paraxiale Optik: Linearisiertes Brechungsgesetz → ideale Abbildung

Alle Strahlen schneiden sich genau in einem Punkt

- Geometrische Optik: Snelliussches Brechungsgesetz → Nicht-linearität

Strahlen schneiden sich nicht mehr in einem Punkt

Abweichungen heißen Abbildungsfehler / Aberrationen

↳ Klassifikation zur Analyse und Verbesserung

- Physikalische Optik: Licht als Welle: Beugung, Punkt wird in Beugungsschreibern (Airy-Disk) abgebildet, System ist beugungsbegrenzt = geometrische Aberrationen kleiner als Airy-Disk

• Reales System

Durch Design-Software kann eine exakte Strahlenpropagation (Lohre, Paraxiale Näherung) berechnet werden: Nicht alle Strahlen treffen sich in einem Punkt
↳ Abbildungsqualität wird beeinflusst → Bildfehler

• Spot Diagramm

Betrachtet nur einen Objektpunkt, Strahlen gehen alle von einem Punkt aus

↳ Diagramm zeigt Schnittpunkt aller Strahlen in einer Bildebene (2D)

Je nach Wellenlänge und Feld verschiedenen Bewertung durch Durchmesser und RMS-Wert



• Beugungsbegrenztes Punktbild

→ Bildpunkt inklusive Beugungseffekten

Beugungslimit ohne Bildfehler (Abbe) $d \geq \frac{1,22 \cdot \lambda}{NA}$

Beugungsgrenze
Auflösungsgrenze

• Point Spread Function (PSF)

$d_g = \lambda / \sin \alpha$

Bildseitig:

PSF: Bild einer Punktquelle - inklusive Aberrationen und Beugung

Airy-Scheiben: Beugungsbegrenztes Punktbild

Ideal: Airy: nur ein Punkt $\sim \lambda$, Real: viele Bege, $\sim \lambda$

Strehl Ratio (in %): Strehlsche Definitionseigenschaft: Verhältnis der Peakintensität des aberrationsbehafteten Punktbilds zum idealen Beugungsbild

• Modulation Transfer Function (MTF)

MTF: Intensitätskontrast bei Abbildung eines Strichgitters inklusive Beugungseffekten (Airy-Scheibe) und Bildfehler (PSF)

Ortsfrequenz $v = \frac{1}{\text{Periode}}$ max. Grenzfrequenz (ohne Bildfehler) $v_{\max} = \frac{2 \cdot NA}{\lambda} = \frac{1}{\lambda c_0}$

• Darstellung von geometrischen Bildfehlern

- Längsaberration $\Delta x \rightarrow$ in Richtung der opt. Achse

- Quersaberration $\Delta y \rightarrow$ Senkrecht zur opt. Achse



• Wellenfront:

Wellenfront und Strahlenbild sind äquivalent, geometrische Fehler können auch als Wellenfront-Fehler dargestellt werden, ideales Bild: sphärische Wellenfront



(Kugelwelle)

• Wellenaberration

bei Fehlern: Wellenfront sind keine Kreiselemente mehr, sondern eher Elypsen

Differenz heißt Wellenaberration



• Bildschärfe - Fehler

(höhere h)

- Öffnungsfehler: sphärische Aberration: große Öffnung: Strahlen schneiden

sich nicht in einem Punkt, sondern verstreut, man sucht den kleinsten Zerstreuungskreis

-> Debkoseung, Längsabweichung $\Delta s' = s'(h) - s'(0) \propto h^2$! (natürungsweise)

Korrektur: Öffnungsfehler abhängig vom Einfallswinkel: Linsenform optimieren

D: schlecht, 0: gut, $\square$ am besten

• Verteilung der i-Winkel auf mehrere Flächen, d.h. mehrere Linsen (OK)

• Asphäre: Reduziert Brechkraft am äußeren Rand 

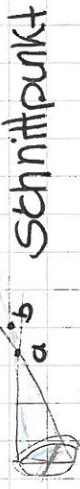
- Koma Zerstreuungskreis nimmt mit Öffnung zu, Zentrum wandert mit zunehmender

Öffnung, Komaerscheinung ähnlicher Spot

Korrektur: verschwindet bei symmetrischen Systemen (pos. und neg. Koma)

- Astigmatismus: Pupille ist 2 Dimensional (x, y), tangential (y-Richtung)

und sagittale (x-Richtung) Strahlen



nicht an einem Punkt. Im Punkt a ist Ringschärfe und speichen unscharf



im Punkt b ist der Ring unscharf und die Speichen scharf

• Bildformfehler

- Bildschalen: kleinster Spot ist in verschiedenen Bildhöhen unterschiedlich angeordnet, Tangential und Sagittal unterschiedlich -> es entstehen Bildschalen

auf denen das ganze Bild am schärfsten abgebildet ist



Astigmatismus: Differenz zw. z.B. tangentialer Bündel und sagittaler

die Tangentialschale liegt vor der Sagittalschale

-> Korrektur: Bildfeldwölbung, wenn S und T schale zusammenfallen: Petzval

scharfe Abbildung auf gekrümmter Ebene: Bildfeldkrümmung mit

Petzval-Radius R_p

• Satz von Petzval

Für ein astigmatismsfreies System aus mehreren Linsen an Luft hat die Bildschale eines ebenen Objektfelds folgende Bildfeldkrümmung

Optik Übersicht

Summe der Brechkräfte $\frac{1}{R_p} = - \sum_k \frac{\phi_k}{n_k}$! ϕ_k : Einzel-Brechkraft

Die Gesamtbrechkraft des Linsensystems ist aber eine der Linsen gewichtete Summe $\phi = \sum_k w_k \cdot \phi_k$! w_k : paraxiales Höhenverhältnis wenn Petzvalkrümmung = 0: Bildfeld ist eben

für positive Brechkräfte, für neg. Brechkräfte sind kleinere Randstrahlhöhe nötig.

Korrektion: durch Zerstreuungslinsen zB Triplet 4 || 0

durch Feldlinse } Bringt Strahlen alle auf eine Ebene

Ohne Feldlinse: Unschärfe am Rand

- Verzeichnung

Kissenförmige Verzeichnung: Linse + Blende  $V > 0$

tonnenförmige Verzeichnung: Blende + Linse  $V < 0$

$$V = \frac{y'_{\text{real}} - y'_{\text{ideal}}}{y'_{\text{ideal}}} \quad (\text{in } \%)$$

Farbfehler

chromatische Bildfehler: Dispersion, Brechungsindex abhängig von λ

(n größer für kleine λ) $\rightarrow$ Blaues Licht wird stärker gebrochen als Rotes

$\rightarrow$ Materialeigenschaften von Glas

Maßzahl der Dispersion: Abbe Zahl $V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$! oder $V_C = \frac{n_e - 1}{n_F - n_C}$!

Optische Größen im Bereich $V = 20 - 90$

Krongläser: geringe Dispersion $\rightarrow$ meist kleinere Brechzahl

Flintgläser: große Dispersion $\rightarrow$ meist höhere Brechzahl

Entstehung: Blaues Licht wird stärker gebrochen $\rightarrow$ s' ist daher kleiner

Farbängfehler: Variation der paraxialen Schnittweite mit der Wellenlänge

$$\Delta s' = s'_{\text{blau}} - s'_{\text{rot}} \quad !$$

chromatische, Variation der Brechkraft ! $\Delta f = \left(\frac{1}{n} - \frac{1}{r_2} \right) (n_d - 1) \frac{n_F - n_C}{n_d - 1}$

$$\Delta f = \frac{f_d}{V_d} \quad ! \text{ Klausur !}$$

- Einzellinse $\Delta s'_{\text{CHL}} = s'_{\text{blau}} - s'_{\text{rot}} < 0$ (Unterkorrektion)

Δ Negativ $\Delta s'_{\text{CHL}} = s'_{\text{blau}} - s'_{\text{rot}} > 0$ (Überkorrektion)

Korrektur: Achromatisierung: Durch Kombination von Pos- und Neg. Linsen unterschiedlicher Dispersion kann man die Schnittweiten für 2. Wellenlängen in Übereinstimmung bringen

Die Abweichung der Schnittweite für die zentrale Farbe bleibt bestehen

→ 'sekundäres Spektrum' 

• Farblängsfehler

Brechkraft 2er dünnen Linsen in Kontakt $J = J_1 + J_2$ Δ

Achromatisierungsbedingung $0 = \Delta f_1 + \Delta f_2 = \frac{f_1}{v_1} + \frac{f_2}{v_2}$ Δ

Einzelbrechkraft $f_1 = \frac{v_1}{v_1 - v_2} f$ Δ

Immer eine Positive und eine

$f_2 = -\frac{v_2}{v_1 - v_2} f$ Δ Negative Linse

Positivlinse (Konv.) v-wert größer

Negativlinse (Konk.) v-wert kleiner

K: Fläche · 2 zw den Linsen

• Farbquerfehler

Chromatische Variation des Hauptstrahlverlaufs, und damit der Bildhöhe auch chromatische Vergrößerungsdifferenz genannt $\Delta y'_{\text{CHL}} = y'_{\text{blau}} - y'_{\text{rot}} \Delta$
Abhängig von Blendenlage, vorderblende: CHV - Unterkorrektur (Rot höher)
Hinterblende CHV - Überkorrektur (Blau größer)

Wenn die Blende auf der Linse ist: kein Beitrag zum CHV

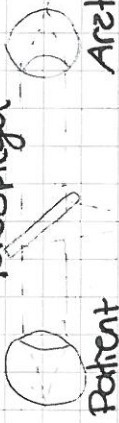
→ Beispiel: Randregnenbogen auf Bildern

0.6 Das Auge

Optthalmologie = Augenheilkunde

-> Auge als wichtigstes Sinnesorgan

1850: Helmholtz findet Augenspiegel: Blick auf die Netzhaut



Akkommodationsbreite

Bereich, in dem Auge scharf stellen kann, max 140pt (abnehmend)

$$\Delta D = \frac{1}{s_{\text{fern}}} - \frac{1}{s_{\text{nah}}}$$

Einsatzspektrum für ophthalmologische Geräte

- Prüfung des Sehvermögens
- Vermessung des Auges
- Untersuchung der vorderen/hinternen Augenabschnitte
- Therapie von Erkrankungen

Wahrnehmung

- einfache Kamera, mit optimal abgestimmter Sensorik und extrem leistungsfähiger Bildverarbeitungssoftware (Gehirn)

Neuronale Sensorik des Auges

Stäbchen - Kontrast

Zapfen - farbempfindlich

Bipolare Zellen -> Ganglienzellen -> Sehnerv

-> Reduktion der Informationskanäle

Fakten

- 80% der Wahrnehmung im Auge, Bildverarbeitungsgeschwindigkeit: 100 Bits/s

Hornhaut = Kornea

Vorderer Augenabschnitt = zw. Kornea und Linse

Hinterer Augenabschnitt = Hinterd. Linse: Glaskörper

Fovea: Ort des Besten Sehens (gelber Fleck)

Papille: Sehnerv verlassendes Auge (Blinder Fleck)

• Tag- / Nachtssehen

Tagssehen: photopisch $\rightarrow$ durch Zapfen, große Sehschärfe (550 nm $\Rightarrow \lambda$)

Nachtssehen: skotopisch: Übergang: Dunkeladaption, geringe Schärfentiefe, schlechte Farbwahrnehmung (500 nm $\Rightarrow \lambda$)

• Die Retina (= Netzhaut) $\hookrightarrow$ Übergangsbereich = mesopisch

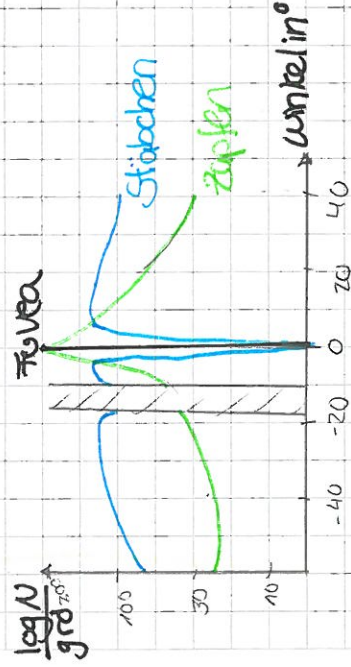
• Zapfen: farbempfindlich, λ ca. 4 μ m, Anzahl $6 \cdot 10^6$, ca. 250 Zapfen pro Nervenzelle

• Stäbchen: viel empfindlicher, ca. $100 \cdot 10^6$, 450 Stäbchen an einer Nervenzelle

• Makula = Gelbflecke

• Fovea = Zentrum

• Verteilung von Stäbchen und Zapfen



• Adaption - Variable Blende

Adaption = Anpassung des Auges an die Helligkeit über den Pupillendurchmesser

Dynamik sehr groß bei mündlicht ca. $D_{\text{mündlicht}} = 8 \text{ mm}$, bei sonnenlicht 2 mm

Je heller es ist, desto mehr sind die Zapfen im Einsatz

• Das Auge als optisches System

Hornhaut ($n = 1,37$), Augenkammer ($n = 1,33 \rightarrow H_2O$), Linse ($n = 1,4$)

$$\text{Formel } \frac{n'}{f'} = \frac{n}{f} = f = \frac{n' - n}{r}$$

Der Brechungsindex ändert sich zw. Luft und Cornea max, dann erst wieder an der Linse

• Vereinfachtes Augenmodell

→ Hauptbrechkraft des Auges an Grenzfläche Luft/Hornhaut

→ Modellierung über einzelne Brechkraft an der Stelle der Hornhaut

$$f_1 = 16,67 \text{ mm} \quad f_2 = 22,22 \text{ mm} \quad r \approx 5,5 \text{ mm} \quad n' = 1,33$$

Gesamtbrechkraft des Auges $f = 59 \text{ dpt}$

$$f = \frac{(n' - n)}{r} = \frac{1}{3 \cdot 0,0065 \text{ m}} = 59 \text{ dpt} \quad \text{Brechkraft Augenlinse}$$

$$D_{\text{Aug}} = 19 - 20 \text{ dpt}$$

Vordere und hintere Brennweite sind unterschiedlich!

$$f' = n' \cdot \frac{f}{r} \approx 22 \text{ mm} \quad f = -\frac{n}{f} \approx -17 \text{ mm}$$

• Akkommodation

Ist die Fähigkeit des Auges auf unterschiedliche Entfernungen zufokussieren

↳ mittels Deformation des Auges

→ Zonulafasern gespannt, Ciliarmuskel entspannt · keine Akkommodation → Fern

→ Zonulafasern entspannt, Ciliarmuskel gespannt · Akkommodation → Nah

Akkommodationstereich: Spanne zw fern und Nahpunkt

$$\Delta D = \frac{1}{\text{Stern}} - \frac{1}{\text{Stroh}} \quad \text{Akkommodationsbreite: Maß für Akk. vermögen}$$

↳ nimmt im Alter ab (zw Kleinkind $\Delta D = 12$, 60 Jahre $\Delta D = 2$)

• Auflösungsvermögen

Abbe-Auflösungslimit → Beugung an der Pupille

$$d_{\text{airy}} = 1,22 \cdot \frac{\lambda}{n \cdot \sin \theta} \quad \sin \theta = \frac{D}{2f} \quad d_{\text{airy}} = 2,44 \cdot \frac{\lambda \cdot f'}{D \cdot n}$$

Für Das Auge gilt: $\lambda = 550 \text{ nm}$, $f' = 22 \text{ mm}$, $n = 1,3$

$d_{\text{airy}} = 5,7 \mu\text{m}$ → Abstand der Sehzellen wird maximal genutzt

Entfernung

$$\Delta \alpha_{\text{Aug}} = \frac{\Delta \alpha_{\text{Aug}} \cdot z^2}{P \cdot \text{Augenabstand}}$$

• Sehschärfe (Visus)

$$\text{Winkelaufösung des Auges } \alpha_c = \frac{\Delta x}{s_o} = n \cdot \frac{d \alpha_y}{f'} = 2,44 \cdot \frac{1}{D} = 0,3 \text{ mrad} = 1'$$

Schärfentiefe: $\text{Visus} = \frac{1}{\alpha}$ $\Rightarrow$ in Winkelminuten
Sehschärfe auch abhängig von:

- Form, Farbe, Lichtdich-
Bildart, Alter,
Aufmerksamkeit

$$\text{Visus} = 1,0 \text{ (normale Schärfentiefe)}$$

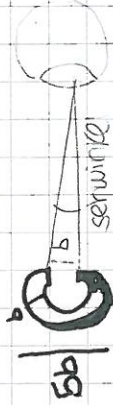
$$\text{Visus} = \frac{1}{\alpha} \sim \text{Diopt}$$

Aberration: Spot-Verarbeitung

• Subjektive Refraktionsbestimmung

Bestimmung der Sehschärfe (Refraktionsbestimmung)

$$\text{Ringöffnung: Visus} = 1 \Rightarrow \text{Winkelaufösung } 1' \rightarrow b = 1,74 \text{ mm in Abstand von } m$$



• Objektive Refraktionsbestimmung

mittels optischen Messgeräten, zur Bestimmung der Brechkraft / Sehschärfe

- Refraktometer, Aberrometer

• Augenkrankheiten

$\rightarrow$ Fehlsichtigkeit, Katarakt (Farbfehler), Retina Degeneration, Glaukom

a) Myopie: Kurzsichtigkeit: Nah: Scharf

b) Hyperopie: Weitsichtigkeit: Fern: Scharf

c) Astigmatismus: Stabsichtigkeit: immer verschärft, unrelativ abhängig

a) Ursachen: Auge zu lang, Cornea zu stark gebogen, Brennweite zu klein

$\rightarrow$ Korrektur: Negativ Linse

b) Ursachen: Auge zu kurz, Cornea zu schwach gekrümmt, Brennweite zu lang

$\rightarrow$ Korrektur durch Positiv Linse

c) Astigmatismus: Ursache: nicht sphärische Form der Cornea / Linse
Fokus für meridional und sagittalebene unterschiedlich
 $\rightarrow$ Zylinderlinse

• Katarakt (Grauer Star)

Trübung der Augenlinse: Behandlung: Linse mit Nadel nach innen gedrückt
Haut: Linsenentfernung, einsetzen einer neuen Linse (Intra-ocular-Linse)

• Erkrankung des hinteren Augenabschnitts

- Diabetische Retinopathie (DR): Netzhauterkrankung in Folge von Diabetes
- Altersbedingte Makuladegeneration (AMD): Erkrankung an der Stelle des schärfsten Sehens
- Glaukom: Druckinduzierte Schädigung des Sehnervs

• Refraktive Chirurgie

- Linsen-basierte Refraktionskorrektur: Implantation von zusätzlichen Interokularlinsen (phake, IOL) und Austausch der natürlichen Linse durch IOL (clear lens extraction)
- Wie Brille im Auge z.B. gegen Grauer Star, Linse auch vor der Phakos Auge: Auge mit natürlicher Augenlinse $\hookrightarrow$ nat. Linse möglich
- Aphakes Auge = Auge ohne natürliche Augenlinse
- gel. IOL: Entfernung der Augenlinse, Befüllung des Augenlinsensackes durch galaktartige Substanz, Vorteil: Akkommodation bleibt erhalten, Nachteil: Biokompatibilität $\Rightarrow$ kaum Angewendet
- Cornea-basierte Refraktionskorrektur
- Radiale Keratotomie (RK): radiale Einschnitte in die Cornea zur Beseitigung von Kurzsichtigkeit und Astigmatismus
- Abtragende Methoden z.B. LASIK (Laser-assisted in situ keratomileusis) konventionell, durch Laser, einen Teil der Linse abtragen
- Femtosekundenlaser

0.7

• Teleskope

Kepler Teleskop: Objektiv + Okular: Bild umgekehrt, positiv Linse

Zwischenbild $\nabla T = \frac{w'}{w} = -\frac{f_1}{f_2} < 0$

Galilei Teleskop: Objekt + negativ Linse = Opernglas, aufrechtes Bild

Schlüssellochbild $\nabla T = \frac{w'}{w} = -\frac{f_1}{f_2} > 0$

• Teleskopobjektiv

Refraktive Hauptobjektive für Fernrohre

• Achromat

• bei höherer Öffnung: Hemiplanare (Achromat mit aplanatisch - Konzentrischen ^④)

Meniskus 

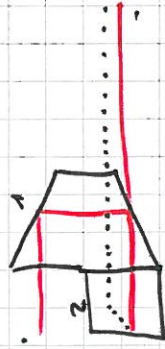
• Terrestrisches Fernrohr / Zickfernrohr

Vergrößerungsfaktor 2-8, Objektiv + Okular + Umkehrsystem - Aufrechtes

Bild, Markierung und Fadenkreuz sind im Zwischenbild



• Bildumkehr über Prismen



2 Porro - Prismen

• Fotoobjektiv: Anforderungen

- Großes Bildfeld, Farbtreue Bildwiedergabe (Korrektur von Farbfehlern)
- Auflösung feiner Details (Begrenzung ist die Korngröße / Pixelgröße die Abbildung ist allgemein nicht beugungsbegrenzt)
- Kompakte, leichte Bauform: Linsen dicht zusammen
- Reduktion von Streulicht, Reflexen, Geisterbildern

• Bildfeldwölbung - Satz von Petzval

Fotoobjektive haben ein großes Bildfeld: Korrektur der Bildfeldkrümmung ist wichtig. Petzval Σ Brechkraft = 0

$$\nabla \frac{1}{R_P} = - \Sigma \frac{f_k}{n_k}$$

f_k : Einzelbrechkraft der dünnen Linsen / Flächen
 n_k : Brechzahl der Linsen, R_P : Petzval-Radius

→ Positive und Negative Linsen notwendig

Trick: Gesamtbrechkraft = Σ der gewichteten Brechkraft

$$\phi = \sum_{k=1}^n \frac{n_k}{f_k} = \Sigma w_k \cdot f_k \quad \nabla$$

Brechkraft-Summe klein → Bildfeldkrümmung klein → Gesamtbrechkraft +

• Triplet - Familie

Cooke Triplet: Alle Bildfehler korrigierbar, quasi symmetrischer Aufbau

→ Farbkorrektur über Glaswahl I II D

es gibt verschiedene Arten von Triplets

• Designfamilien für Fotoobjektive

Doppelgauß-Objektiv I II SD

Dicker Meniskus ist günstig bezüglich Bildfeldwölbung und Petzvalkrümmung

Quasi-Symmetrischer Aufbau, Farbkorrektur durch Achromate

Gauß-Familie siehe folie 12 ∇

• Lupe (wdh)

Lupe ermöglicht vergrößertes sehen aber für hohe Vergrößerungen, sind kleine Brennweiten nötig → deswegen nur kleine Vergrößerungen

$$T = \frac{e}{e_0} = \frac{250\text{mm}}{f_L} \quad \nabla$$

• Wiederholungen

• Aufbau des Mikroskops

Okular - Tubuslinse - Objektiv
↓
10x / 12mm
↓
Sehfeldzahl
 $T = \frac{250 \text{ mm}}{f}$
↓
100x / 0,9
↓
 $B = -\frac{f}{f_{\text{obj}}}$
↓
NA

Kennzeichnung von Mikroskopen

- Name: Plan - Neofluar : Grobe einstellung
 - Vergrößerung zB 100x / 0,95
 - Farb Kodierung black 1x - white 100x
- Design von Mikroskopobjektiven siehe Seite 25

• Immersionsmikroskopie

Typunterscheidung bei Mikroskopobjektiven

- Objektiv ohne Deckglas

- " mit "

- " " in Immersion für hohe Aperturen

→ kleiner Winkel, wenn zu groß: Totalreflexion

Immersion (Flüssigkeit zw Deckglas und Objektiv)

→ Vergrößerung des tatsächlich wirksamen Winkels des Öffnungskreises

→ größere numerische Apertur bedingt höhere Auflösung

→ Vermeidung von Totalreflexion an der Deckglasoberfläche

• Okulare

Kennzeichnung 12,5 / 17,6
→ $D: 17,6 \text{ mm} \rightarrow$ Sehfeldzahl

$$L \rightarrow T = \frac{250 \text{ mm}}{f'_{\text{oku}}} \quad f'_{\text{oku}} (10x) = 25 \text{ mm}$$

Funktion

Abbildung eines reellen Zwischenbilds nach **Unendlich** damit Bild im

Auge betrachtet werden kann (Lupe)

Okular muss an Augenpupille angepasst werden, muss zw. bildlage besitzen, die an das Instrument adaptiert ist

• Beleuchtung

hat Einfluss auf Auflösung und Kontrast

Auflicht (Epi) $\rightarrow$ von oben beleuchtet

Durchlicht (Trans) $\rightarrow$ von unten beleuchtet

Beleuchtungsapertur: Blende vor der Lichtquelle

wenn $NA_{\text{Obj}} = \text{klein}$ ($0,1 \text{ NA}$) Kontrast hoch, wenn groß ($0,6$) Kontrast $\downarrow$

$\hookrightarrow$ bei Auflicht

• Hellfeld / Dunkelfeld im Auflicht

Hellfeld: Gegenlicht: Licht auf komplette Breite

Dunkelfeld: von der Seite beleuchtet (Spinnennetz) Licht nur auf Objekt

• Durchlicht Beleuchtung

Hellfeld: Beleuchtung von unten gegen das Objekt, großer Winkel

Dunkelfeld: Beleuchtung von unten unter ganz flachen Winkeln

• Auflösungsvermögen

Beugungsbegrenzte Auflösungsgrenze $\Delta y \geq 0,61 \cdot \frac{\lambda}{NA}$
Winkelauflösung Auge

$$\alpha_c = n \cdot \frac{d_{\text{airy}}}{f'} = 2,44 \cdot \frac{\lambda}{D} = 0,3 \text{ mrad} = 1' \quad !$$

Winkelauflösung Mikroskop / Lupe

$$\omega = \frac{y}{f} \quad ! \quad \Delta \omega = \frac{\Delta y}{f} \rightarrow \text{Grenzauflösung}$$

$$\Delta \omega = \frac{0,61 \cdot \lambda}{NA \cdot f} = \frac{0,61 \cdot \lambda}{NA \cdot 250 \text{ mm}} \cdot \frac{f}{f} \quad \text{aus } f' = \frac{250 \text{ mm}}{f} \quad T'_{\text{förd.}}$$

Förderliche Vergrößerung: Winkelauflösung = $(2 \times - 4 \times)$ Winkelaufl. Auge

$$\Delta \omega = (2 \dots 4) \cdot \alpha_c \quad !$$

$$T'_{\text{förd.}}: (2-4) \frac{250 \text{ mm } \alpha_c}{\Delta y} = \dots = 500 - 1000 \text{ NA} \quad !$$

$$\approx 10 \times - 30 \times$$

• Stereomikroskope (2 Mikroskope)

2 Typen: Greenough-Typ: Problem Verkipung der Bildebene

↳ jedes Auge, separate Linsen

• Teleskop-Typ: Gemeinsames Hauptobjektiv, danach, getrennt → besser

• Operationsmikroskop

$$T_{\text{OPM}} = \frac{f_{\text{tubul}}}{f_{\text{obj}}} \cdot T_{\text{zoom}} \cdot \frac{250\text{mm}}{f_{\text{ok}}} = 3\times - 15\times$$

→ Ausreichender Arbeitsabstand für Operateur $f_{\text{obj}} = 200 - 400\text{mm}$

Zoomsystem für $T'_{0,4\times-2\times}$

$$\text{Auflösungsvermögen} \Delta x = \frac{0,6\lambda}{NA}$$

NA nicht durch Hauptobjektiv, sondern durch Tubuslinse, zoom & begrenzt

$$D_{\text{zoom}} = \text{ca } 10\text{mm} - 15\text{mm} \quad NA = \frac{D_{\text{zoom}}}{2 f_{\text{obj}}} \approx 0,02 - 0,03$$

→ Auflösungsvermögen $\Delta x = 10 \dots 20\mu\text{m}$

Tiefenaufklärung besser

• Tiefenaufklärung / Stereopsis

wann kann man zw. Davor / Dahinter unterscheiden

$$\alpha = y_p / a \quad \alpha: \text{Stereowinkel}$$

y_p : stereoskopische Parallaxe

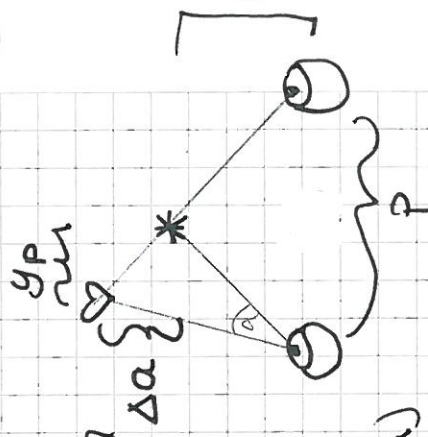
$$\Delta a = \frac{a \cdot y_p}{P} = \frac{a \cdot a^2}{P}$$

a : Entfernung Fixationspunkt

P = Pupillendistanz (ca 65mm)

$\approx 10''$ (experimentell bestimmt)

$\Delta a_{\text{auge}} = 45\mu\text{m}$, Lateral $75\mu\text{m}$



Optik Übersicht

Tiefenaufklärung mit Instrumenten

für Stereomikroskope $\Delta A = \frac{\alpha_{\text{Ints}} \cdot f_o^2}{p} = \frac{\alpha_{\text{Auge}}}{\gamma \cdot \frac{f_r}{f_{ok}}} \cdot \frac{f_o^2}{p}$!

mit $\alpha_{\text{Auge}} = 10''$

f_o = Brennweite Objektiv

p = Stereobasis (Abstand der Kanäle)

γ = Vergrößerung Zoom

f_r = Brennweite Tubulinse, f_{ok} = Brennweite Okular

→ Die Tiefenaufklärung von Operationsmikroskopen liegt im Bereich der Tiefenaufklärung des Auges

Schärfentiefe

→ niedrige NA: großes Sichtfeld mittelmäßig scharf

→ hohe NA: Details mit geringer Schärfentiefe

! $2D_f = \frac{\lambda}{NA^2} + \frac{\delta}{NA} + \text{Akkomodation}$ $\delta = 0,34 \text{ mm}$ (Auge → empirischer Wert)

$2D_f = \frac{\lambda}{NA^2} + \frac{0,34 \text{ mm}}{NA \cdot T_{\text{Opti}}} + \frac{(250 \text{ mm})^2}{T_{\text{Opti}}^2} \left(\frac{1}{s_{\text{fern}}} - \frac{1}{s_{\text{nah}}} \right)$!

→ Schärfentiefe bei Operationsmikroskopen im Bereich von mm

Mikroskop

- 2. Linsig $T_{\text{Mikro}} = \beta_{\text{obj}} \cdot T_{\text{ok}} = \frac{\text{Obj.}}{\text{Okv.}} = \frac{-t}{f_{\text{obj}}} \cdot \frac{250 \text{ mm}}{f'_{\text{okv}}}$!

- 3. Linsig (mit Tubulinse) $T_{\text{Mikro}} = -\frac{f_{\text{Tubus}}}{f'_{\text{obj}}} \cdot \frac{250 \text{ mm}}{f'_{\text{okv}}}$!

$\frac{0.7}{0.8}$

Fouriertransformation

Allg. Funktionen können als Fourierintegral dargestellt werden

= Zerlegung nach periodischen Funktionen ($\sin / \cos$)

$U(x) = \int c(v) \cdot \cos(2\pi xv) \cdot dv + \int s(v) \cdot \sin(2\pi xv) \cdot dv$

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

Darstellung im Ortsraum kann in den Fourerraum umgerechnet werden

und umgekehrt $\rightarrow$ sind äquivalent

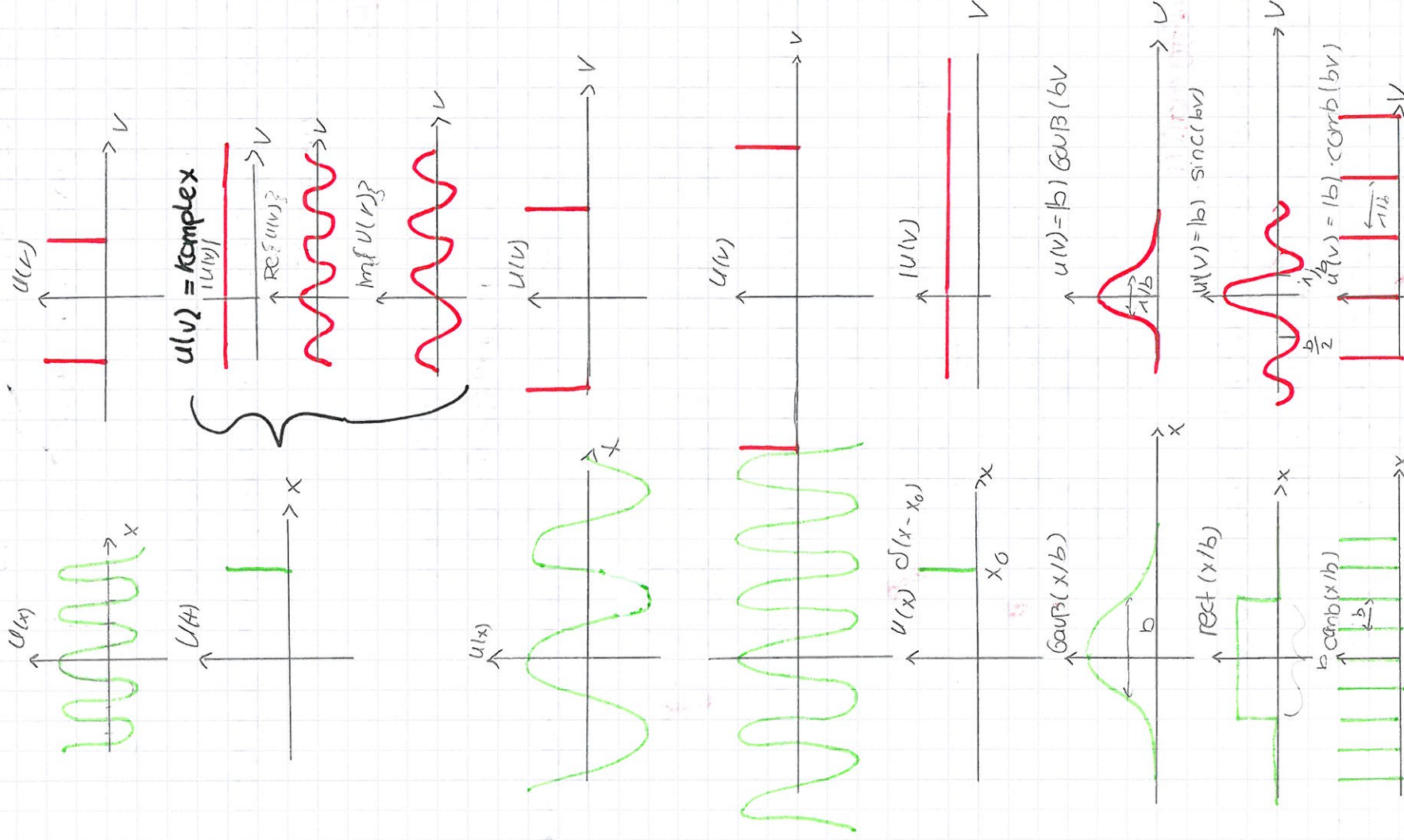
Ortsraum $U(x) = \int U(v) e^{2\pi i x v} dv$!

Fourerraum $U(v) = \int U(x) e^{-2\pi i x v} dx$!

• Beispiele

Ortsraum

Fourerraum = Winkelspektrum



Periodisch (ender Abstand $2B$)

OPTIK Übersicht

• Rechenregeln Fouriertransformation

→ Eine Multiplikation entspricht einer Faltung

• Fouriertransformation in der Optik

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

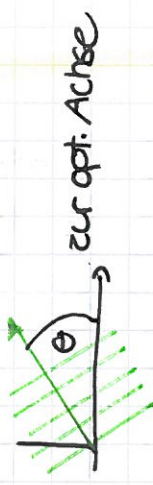
Welle ohne Zeitabhängigkeit in x - z -Ebene

$$E(x, z) = E_0 \cdot e^{i(-k_x \cdot x - k_z \cdot z)}$$

$$E(x, z=0) = E_0 \cdot e^{-i2\pi x v} \quad \text{mit } \tilde{x} = \frac{x}{\lambda}$$

→ eine ebene elektromagnetische Welle entspricht den Elementarfunktionen der Fouriertransformation $\nabla V = \sin(\theta)$

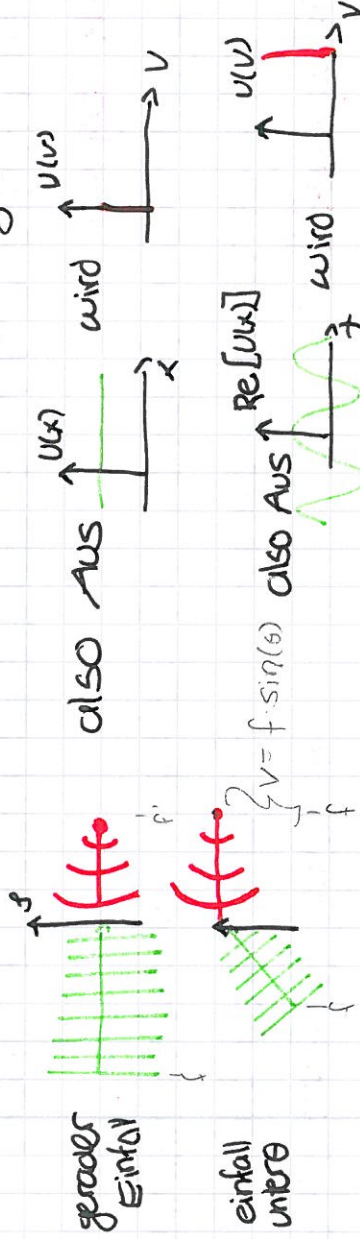
Je größer θ , desto höher die Frequenz



im Ortsraum, und desto weiter weg ist die Auslenkung im Fourierraum

• Einzellinse

= Fouriertransformation: ebene Welle fällt ein → Kugelwelle tritt aus



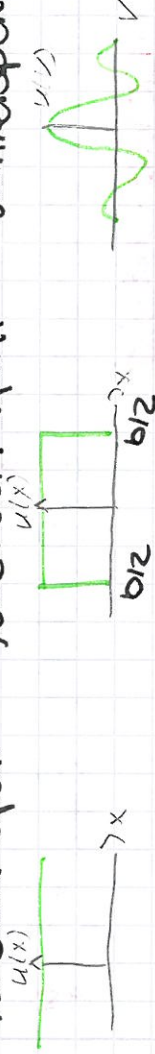
→ Linse übersetzt Winkel in Ort (Bildpunkt) und umgekehrt

• Beugung

(1-fachspalt)

→ Ebene Welle trifft auf Hindernis, Beobachtung: Nach dem Hindernis treten gerade (ebene) aber auch verkippte Wellen auf (Beugung)

Vor dem Spalt → Nach dem Spalt → Winkelspektrum = FT



Nullstellen bei $v = \pm \frac{\lambda}{b}$

$$\Delta \theta = 2 \frac{\lambda}{b}$$

• Einzelspalt:

$$\text{Minima bei } \sin(\alpha) = \frac{k\lambda}{d}$$

$$\text{Maxima} = \sin(\alpha) \approx \frac{(2k+1)\lambda}{2d}$$

• Doppelspalt

Für kleine Spalte $\rightarrow$ FT von 2 Delta-Peaks

$$I(u) \rightarrow \text{Diagramm: zwei Delta-Peaks} \rightarrow I(v) = \cos^2(\pi \cdot v \cdot d/\lambda)$$

Interferenzmuster - Periode $\Delta v = \frac{\lambda}{d}$!

• Beugung am Gitter

Abstand des Gittersperiodisch (eng) $\rightarrow$ Periodischer Abstand der Peaks (weit)

$$b \rightarrow \text{Beugung} \rightarrow 1/b$$

höchste Beugungsordnung bei $\theta = 90^\circ$

$$\Delta \sin \theta_m = v_m = m \cdot \frac{\lambda}{d} = \frac{h \cdot \lambda}{m \cdot d}$$

$\rightarrow$ Stichtag der 3. Ordnung $\rightarrow$ nur eine maximale Schärfe

Konstruktive Interferenz $\Rightarrow d \cdot \sin \theta_m = m \cdot \lambda$ (physikalisch)

$\rightarrow$ unendliches Gitter Beugungsbild ist gefaltet

• 2f-System

$\rightarrow$ Abbildung durch eine Einzellinse von deren Brennpunkt F auf F'

entspricht einer FT: ein solches System heißt 2f-System

• 4f-System

Systeme sind folgen aus 2f-Systemen Standard: Punktlichtquelle

2f-System Objekt-Blenne + 2f-System Blende-Bild = 4f-System

wichtig für Fourier-Raum



Fourier-Raum

System ist eine Folge von FT

Ortsraum $\rightarrow$ Winkelraum $\rightarrow$ Ortsraum

$$v_{\max} = \sin \theta_{\max} = NA$$

Blenne begrenzt den Winkelraum

$\rightarrow$ von $-NA$ bis $+NA$

Nullstellen bei $x \pm \frac{\lambda}{2NA}$!

Breite des eindimensionalen Punktbildes $d_{\text{PST}} = \frac{\lambda}{NA}$!

• 2 Dimensionales Punktbild

- Rechteckblende $\rightarrow$ Bild $\dots$

$$d_{x, \text{PST}} = \frac{\lambda}{NA_x}$$

$$d_{y, \text{PST}} = \frac{\lambda}{NA_y}$$

Optik Übersicht

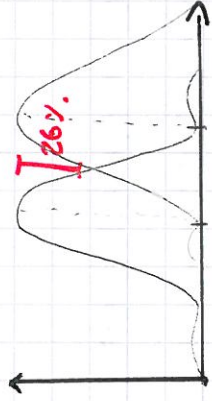
- runde Blende  Beugungsbild: sog. - Airy - strebe

$$\Delta r = \pm 0,61 \cdot \frac{\lambda}{NA} \quad (Nullstellen)$$

breite des beugungsbegrenzten Punktbildes $d_{\text{Airy}} = 1,22 \frac{\lambda}{NA}$!

• Auflösungsgrenze

Rayleigh - Kriterium: 2 Objekte werden als aufgelöst betrachtet, wenn das Maximum des Beugungsschreibens des 1. im ersten Minimum des Beugungsschreibens des 2. Objektpunkts fällt



Auflösungsgrenze bei Abstand

$$\Delta x = 0,61 \cdot \frac{\lambda}{NA}$$

• Bildentstehung nach Abbe

Objekt erzeugt Beugungsordnungen → Linse → Blende wirkt als Tiefpassfilter für hohe Ordnungen → Linse → Bild entsteht durch Interferenz der Beugungsordnung → mind. die 1. Ordnung muss durchgelassen werden

• Modulations - Übertragung

jetzt Periodische Struktur als Ausgangsbild (davor Punkt - Quelle)

Beugungsordnungen - Gitter $\sin \theta_m = m \frac{\lambda}{d}$!

Ganze - Periode $d \geq \frac{\lambda}{NA}$! Ortsfrequenz $\frac{1}{d} \leq \frac{NA}{\lambda}$!

1. Ordnung muss durchgelassen werden $\Delta v_1 = \frac{\lambda}{d} \leq NA$

• Modulation Transfer Function (MTF)

Intensitätskontrast bei Abbildung eines Strichgitters unter Berücksichtigung von Beugung → Kontrast bleibt bis zum Ende der Konstant $\frac{1}{d}$!

→ Maximale Grenzfrequenz für Beleuchtung mit Planwelle $\frac{1}{d} = \frac{NA}{\lambda}$!

↳ Kohärentes Licht

• Inkohärente Beleuchtung

maximale Grenzfrequenz bei inkohärentem Licht $\frac{1}{d} = \frac{2NA}{\lambda}$!

Kontrast nimmt kontinuierlich ab 

Doppelter Beugungswinkel wird transportiert

$$\frac{A}{r} = m \quad N = a \cdot D$$

$$\frac{0.8}{0.9}$$

• Zusammenfassung

- Fourier-Transforme entspricht Übersetzung von Orts- in Winkelraum.
- Einzellinse (2f-System) entspricht FT.
- Begrenzungen im OA führen zu Beugungswinkeln (z.B. Spalt)
- Die OA optischer Systeme entspricht einer Begrenzung im Winkelraum und führt zur Verbreiterung des Punktbildes (Airy-Scheibe)
- Abbildungssysteme sind 4f-Systeme
- OA im Abbildungssystem entspricht somit einer Tiefpassfilterung im Winkelraum
- Die Objektbeleuchtung hat Einfluss auf die Intensitätsverteilung in der Bildebene und damit auf Auflösung und Kontrast

• Spektroskopie - Motivation

- für medizinische Diagnosen: Hautkrankheiten, Entzündungen, Rötungen
- Anregung mit FUV, Laser, spektrale Methoden
- Farbeindruck

Mischfarbiges Licht kann durch Mischung von Rot, Grün, Blau erzeugt werden
 → wird im Auge wieder in einzelne Farbreize zerlegt
 → Stärke der einzelnen Farbreize definiert Farbe

• Spektrale Empfindlichkeitskurve

Verschiedene Farbsysteme: oft gebraucht: normiertes x y z System
 basiert auf Normalbeobachter

Farbkordinate $\left(\frac{1}{3}\right)$ Stärke des Reizes

! Farbeindruck $F(\lambda) = x \cdot \bar{x}(\lambda) + y \cdot \bar{y}(\lambda) + z \cdot \bar{z}(\lambda)$

Farbkordinaten reichen an Definition der Mischfarbenaus

→ Definieren Farbdreieck



weiß = $x = y = z = \frac{1}{3}$ außen herum farbig

Optik Übersicht

• Filter

- Kantenfilter: Lässt bis zu einer bestimmten λ Licht durch, danach blockiert es
- Bandpassfilter: Lässt einen bestimmten Bereich an Wellenlängen durch, davor und dahinter wird das Licht geblockt.

• Dielektrische Schichten

- = Dünne Materialschicht mit Brechungsindex n
- Anwendung $\rightarrow$ Antireflexschichten (AR) auf Linsen
- Spiegeltechnik, Ölfilm, Seifenblase

• Fresnel Reflexionen

Senkrechter Einfall R-Reflexion T=Transmission $\Delta T = 1 - R$

$$R = \left| \frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2} \right|^2 \cdot \text{also Luft-Glas } R = 0,04 \approx 4\%$$

4% des Lichts werden reflektiert

- beispiel: 5 Linsen $\rightarrow$ also 10 flächen

$$\Delta T = (1 - R)^{\text{Flächenzahl}} = (0,96)^{10} = 0,66 \approx 66\%$$

D.h. nur noch 66% wird transmittiert $\rightarrow$ zu wenig $\rightarrow$

deswegen AR-Schichten

$$I_1 = n_1 \cdot I_0$$

• Antireflex Schichten

$$I_1 = R_1 \cdot I_0$$

destruktive
für Interferenz
muss $I_1 = I_0$
gelten

Suche nach Interferenzpaarern, die zusammen destruktive

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

$\rightarrow$ Auslöschung für ungerade Vielfache von $\lambda/2$

AR-Schichtdicke $d = \frac{\lambda \cdot n_{AR}}{4 \cdot n_{AR}}$ einfache AR-Schicht $= \lambda/4$

$\hookrightarrow$ z.B. aus MgF_2 mit $n_{AR} = 1,32$

Intensitäten müssen gleich sein

$$R_1 = \left| \frac{n_0 - n_{AR}}{n_0 + n_{AR}} \right|^2 \approx R_2 = \left| \frac{n_{AR} - n_s}{n_s + n_{AR}} \right|^2 \rightarrow n_{AR} = \sqrt{n_0 \cdot n_s}$$

• Ideale AR Schicht

nur bei einer λ werden 100% transmittiert (Parabel)

ohne AR-Schicht Transmissionsgrad ca. 96% bei 96%.

• Reale AR-Schicht

100% werden nicht erreicht, da es nach Restreflexion gibt

Kurvenverlauf:



• Komplexere Schichten

mehrfachschichten: periodische-Schichtanordnung (Bragg)

Bandpassfilter können realisiert werden

• Jetzt Schräger Einfall von Strahlen

Winkelbeziehung muss einbezogen werden

$$\Delta\phi = 2 \cdot n_{AR} \cdot d \cdot \cos \theta' \quad \text{mit } n_0 = 1 \text{ (Luft)}$$

Interferenzengleicher Neigung löschen sich aus

$$\text{Auslöschung } \Delta\phi = 2 \cdot n_{AR} \cdot d \cdot \cos \theta' = (2m+1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$\text{Verstärkung } \Delta\phi = 2 \cdot n_{AR} \cdot d \cdot \cos \theta' = m \cdot \lambda$$

→ Interferenz ist abhängig von λ und Einfallswinkel

zB Seifenblasen / Ölfilm → Je nach Winkel mal konstruktiv/destruktiv

• Anwendung von Spektrometern

Filter: Grobe Trennung von Farben → nur gewisse Spektralbänder zB Fluoreszenz

Mikroskope

Spektrometer: können spektrale einer Probe über einen gewissen

Bereich vermessen, molekulare Zusammensetzung → Diagnose

Spektrometer: Genaue Vermessung der spektralen Verteilung von Licht

→ wieviel Licht welcher λ

Monochromatoren: spektrale Lichtfilterung sind ähnlich gebaut

Aufbau: Quelle - Beugungsspalt - Linse - Prisma/Gitter - Linse - Selektionsspalt

Dann entweder Detektor - Spektrometer oder Beobachtung - Monochromator

• Spektralapparate

Gitter-Spektrometer und Prismenspektrometer

→ Aufbau gleich

• Winkeldispersion

→ phys. Begründung für Spektrometer

Licht wird Abhängig von λ mit unterschiedlichen Winkeln gebrochen

$$D = \frac{d\theta}{d\lambda}$$

Prisma: Materialdispersion

$$\text{Gitter: Beugung} \quad \sin \theta_m = m \cdot \frac{\lambda}{d} \quad \triangleright$$

• Spektrales Auflösungsvermögen

$A = N \cdot d\lambda$ gibt Fähigkeit an für Lichtwellen mit ähnlichen λ die Intensitätsmaxima nach Durchgang räumlich zu trennen

Spektrolinien sind durch Beugung begrenzt d.h. die

Öffnung des Spektralapparates verursacht Beugungseffekte die Auflösung begrenzen Dispersion $d\theta_D = D \cdot d\lambda \quad \triangleright$

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

Zwei Spektrallinien können noch getrennt werden, wenn das

1. Max im min der 2. Spektrallinie liegt

$$\text{Grenzaufösungsvermögen} \quad d\theta_B = \frac{\lambda}{a} = d\theta_D = D \cdot d\lambda \quad \triangleright$$

$$A = \frac{\lambda}{d\lambda} = a \cdot D = m \cdot N \cdot \underbrace{\text{Beugung}}_{\text{Dispersion}} \quad \triangleright$$

a : Öffnung

verbessern, durch größere Spaltzahl N / Ordnung m oder größere Öffnung / Dispersion

D = Winkeldispersion

• Winkeldispersion Gitter

$$\text{Gittergleichung} \quad \sin \theta_m = m \cdot \frac{\lambda}{d} \quad \triangleright$$

$$D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \theta_m} \quad \triangleright$$

m : Beugungsordnung

d : Gitterperiode

θ : Beugungswinkel

• Auflösungsvermögen Gitter

$$aD = \frac{\lambda}{d\lambda} = A = \frac{m \cdot \lambda}{d} = m \cdot N \quad \triangleright \quad N = \text{Anzahl der Spalte}$$

↳ nur von Ordnung und Anzahl der Spalte abhängig

Je größer N , desto schmaler werden die Maxima und desto kleiner werden die Nebenmaxima

• Freier Spektralbereich Gitter

Wegen der unterschiedlichen Ordnung (m) kommt es zu Überschneidungen der Spektrallinien

Der wellenlangenbereich zw. den Ordnungen wird freier Spektralbereich oder Free spectral range (FSR) genannt

→ Abstand der noch freist. bis zur Überschneidung

$$\nabla \text{FSR} = \frac{\lambda}{m} \quad \text{überlappung wenn } m \frac{\lambda_{\text{rot}}}{d} = (m+1) \frac{\lambda_{\text{blau}}}{d} \quad \nabla$$

$$\rightarrow m(\underbrace{\lambda_{\text{rot}} - \lambda_{\text{blau}}}_{\Delta\lambda = \text{FSR}}) = \lambda_{\text{blau}} \quad \nabla$$

• Prismenspektrometer

$$\text{Gesucht Dispersion } D = \frac{d\theta}{d\lambda} = \frac{d\theta}{dn} \frac{dn}{d\lambda} \quad \nabla$$

Brechzahl Dispersion
Materialdispersion

Strahlenverlauf symmetrisch

$$\text{Brechungsgesetz: } \sin\left(\frac{\alpha}{2} + \theta\right) = n \cdot \sin\left(\frac{\alpha}{2}\right) \quad \nabla$$

$$\frac{d\theta}{dn} = \frac{2 \cdot \sin(\alpha/2)}{\cos(i)} \quad \nabla$$

Winkeldispersion Prisma

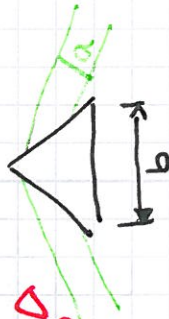
$$D = \frac{d\theta}{dn} \cdot \frac{dn}{d\lambda} = \frac{2 \cdot \sin(\alpha/2)}{\cos(i)} \cdot \frac{dn}{d\lambda} \quad \nabla$$

• Auflösungsvermögen Prisma

Effektive Öffnung des Prismas $a = l \cdot \cos(i) \quad \nabla$

$$\text{Auflösung } A = \frac{\lambda}{d\lambda} = a \cdot D \quad \nabla$$

$$\nabla A = b \cdot \frac{dn}{d\lambda} \quad \text{Materialdispersion}$$



• Hyperspektrale Bildgebung

- ≙ Bildaufnahme & spektrale Information in jedem Bildpunkt (Pixel)
- Abbildung und Spektrometer in einen viele Schritte in verschiedenen Farben
- Scansysteme: Bildzeile wird aufgenommen und spektral zerlegt
⇒ für 3D Info
- Fourier Transform Spektroskope: Interferenzometer wird in jedem Pixel ein Interferenzsignal erzeugt (Auswertung am PC)

• Anwendung

- Geologische Analyse per Satellit
- zum Umweltschutz: Detektieren von giftigen Gasen
- Medtech: Tumoranalyse alternative zum histologischen Schnitt
↳ PC muss jedoch mit Infos gefüttert werden welche & was

0.9
0.10

• Strahlungsfluss / Strahlungsleistung

zB Glühlampe mit 60W → das ist die el. Leistungsaufnahme, P

→ 45W werden als Strahlung in unterschiedliche λ abgegeben

Strahlungsleistung = Energie pro Zeiteinheit [W], die als el. mag.

Strahlung emittiert wird

$$\Phi = \int_{\lambda} \Phi(\lambda) d\lambda \quad [W]$$

Glühlampe ist ein thermischer Strahler (Temp: 2500K)

↳ größter Teil wird in Infrarot emittiert. → nur geringster Teil als sichtbares Licht

für thermische Strahler gilt das Schwarzkörper, Plancksche Gesetz:

$$\Phi(\lambda) \propto \frac{1}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{hc/kT\lambda} - 1} \quad \text{mit } \Phi = \sigma \cdot A T^4 \quad \sigma = \text{Stefan Boltzmann konst.}$$

→ Sonnenoberfläche hat ca 6000K

Leuchtstoffröhren sind Lumineszenzstrahler → Linienspektrum ist abhängig vom Anregungsstand, 20W → hauptsächlich Emission in sichtbares Licht → effizienter als Glühlampen

- LED $\neq$ Lumineszenzdiode sind Halbleiterlichtquellen

↳ Emission über Bänderstruktur im Halbleiter

Weiße-LEDs: schwierig, da eig. immer nur eine bestimmte λ

↳ daher: blaue LED + Lumineszenzmaterialien = weiß

↳ spektrale Breite von LEDs: 6-30 nm (sehr schmal)

→ Die Wellenlänge ist abhängig vom Halbleiter

• Radiometrie

Strahlungsphysikalische Größen, in SI-Einheiten (J, W)
kennzeichnen die Strahlungsenergie bei allen Wellenlängen

• Photometrie

Beschränkung auf sichtbare Spektrum, Auge ist der
Detektor (physiologisch), Gewichtung der Strahlung mit
Empfindlichkeit des Auges bei unterschiedlichen λ

→ spezielle Einheiten (Lumen, Lux, Candela)

• Strahlungsleistung

In der Radiometrie: gesamte Strahlungsleistung

$$\Phi = \int_A \Phi(\lambda) \cdot d\lambda \quad [\text{W}]$$

In der Photometrie: gesamte sichtbare Strahlungsleistung

$$\Phi_v \propto \int_A \Phi(\lambda) \cdot V(\lambda) \cdot d\lambda \quad [\text{lumen} = \text{lm}]$$

$V(\lambda)$ ist unterschiedlich bei Tagsehen / Nachtssehen (Gaußkurven

→ die leicht verrückt sind)

• Strahlungsfluss [W] und Lichtstrom [Lumen]

Radiometrisch: Strahlungsfluss Φ [W] ist Empfänger unabhängig

gibt komplette Strahlungsleistung

Photometrisch: Lichtstrom Φ_v [Lumen] Lichttechnische Größe

Auf das Auge bezogen → Lichtmenge, die vom Auge
wahrgenommen wird (**Lichtleistung**)

Def von Candela: Strahlungsfluss $\Phi = 1 \text{ W}$ bei $\lambda = 555.6 \text{ nm}$ (max beim Tagsehen) entspricht einem Lichtstrom $\Phi_v = 683 \text{ lm}$ (merken!)

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

$V(\lambda)$ kann aus einem $\lambda - V(\lambda)$ Diagramm abgelesen werden

Glimmlampe hat ca. 15-20 lm / Leuchtstoffröhre 80-100 lm (besser)

• Lumen pro el. Watt

$\rightarrow$ Effizienz von Lichtquellen ! $\frac{\Phi_v}{\Phi} = K_m \cdot V(\lambda) \quad [\text{lm/W}]$

auf el. Inputleistung P umgerechnet ! $\eta = \frac{\Phi_v}{P} \quad [\text{lm/W}]$

• Strahlstärke / Lichtstärke

• Radiometrie: Strahlstärke: $I = \frac{d\Phi}{d\Omega} \quad [\text{W/sr}]$

$\hookrightarrow$ Leistung pro Raumwinkel

vollkugel 4π , Halbkugel 2π „wie viel Leistung wird in welche Richtung abgegeben“

• Photometrie: Lichtstärke $I_v = \frac{d\Phi_v}{d\Omega} \quad [\text{lm/sr} = \text{cd}]$

cd = Candela

! $I_v \text{ const} \Rightarrow \Phi_v = I_v \cdot \int d\Omega$

• Raumwinkel: isotrop $\cdot \int_{4\pi} d\Omega$ in alle Richtungen gleich $I(\theta) = \text{const}$

Lambert $\cdot \int_{2\pi} d\Omega \propto \cos \theta$

herkunft der Einheit: 1 Kerze hat ca. 12 lm und ist isotrop

also $I = \frac{12 \text{ lm}}{4\pi} = 1 \text{ cd}$ [Normkerze]

• Licht-isotrope - Lichtquellen: gibt aufschluss über gewebe

$\rightarrow$ Abstrahlcharakteristik ändert sich mit zunehmender Tiefe

• Raumwinkel: $d\Omega = \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\phi = \frac{dA_{\perp}}{r^2} \quad [\text{sr}]$!

r = Radius dA = Fläche θ : Lichtkegeloöffnung: Öffnungswinkel

• Ausstrahlung / Lichtausstrahlung

• Radiometrie: spezifische Ausstrahlung $M = \frac{d\Phi}{dA} \quad [\text{W/m}^2]$

$\rightarrow$ wie viel Leistung wird von welchem Ort emittiert?

Skizze machen

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

• Photometrie: spezifische Lichtausstrahlung $\nabla M_V = \frac{d\Phi_V}{dA}$ [$\text{lm/m}^2 = \text{Lux}$]
einheit $\text{Lux} = 1 \times$ $\rightarrow$ auf Quelle bezogen

• Bestrahlungsstärke / Beleuchtungsstärke

$\rightarrow$ für beleuchtete Flächen ∇I_0 siehe nachst. Seite

Radiometrie: $\nabla E = \frac{d\Phi}{dA}$ [W/m^2] Leistung pro Fläche

$\rightarrow$ wichtig bei Solarzellen E_0 von Sonnenlicht $= 1000 \text{ W/m}^2$

$\rightarrow$ hier ist der Projektionswinkel wichtig

Photometrie: $E_V = \frac{d\Phi_V}{dA}$ [$\text{lm/m}^2 = \text{Lux}$]

helle Sonne $= 10^5 \text{ Lux}$, keinwan ca $100 \pm \text{Lux}$

$E = \frac{I}{r^2}$ ∇ für isotope Quellen nimmt die Bestrahlungsstärke nimmt mit r^2 ab

• Bestrahlung / Belichtung = Dosis

Radiometrie: $H = E \cdot T$ [$\text{Ws/m}^2 = \text{J/m}^2$] ∇

wie viel Energie pro Fläche

Photometrie $\nabla H_V = E_V \cdot T$ [$\text{Lux} \cdot \text{s}$] $E_V = \text{Beleuchtungsstärke}$

z.B. für Belichtung eines Films

• Helligkeit und Leuchtdichte

$L_{LQ} = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA_{LQ}}$ 2 mal ableiten Fläche lm . Auge entscheidend.
 $d\Omega \cdot A_{LQ}$ note Intensität auf kleiner Fläche: geföhntion

Raumwinkel definiert, wie viel Licht ins Auge fällt

Je kleiner Lichtquelle beigl. Intensität, desto heller da Fläche kleiner

• Strahlendichte / Leuchtdichte

Radiometrie: $L = \frac{d^2\Phi}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta}$ [$\text{W/m}^2 \text{sr}$] Maß für Helligkeit
 $\rightarrow$ Strahlendichte

Photometrie: $L_V = \frac{d^2\Phi_V}{d\Omega \cdot dA \cdot \cos\theta}$ [cd/m^2]
 $\cos$: Projektionsfaktor wegen

Sonne: $L = \frac{10^5 \text{ Lux}}{0,001 \text{ sr}} = 10^9 \frac{\text{cd}}{\text{m}^2}$ Vertikippung

Lichtleistung / Etendue

$L = \frac{d\Phi}{dH}$ mit $dH = dA \cdot \cos \theta \cdot d\Omega$ wird als Licht-leistung bzw. Etendue H bezeichnet

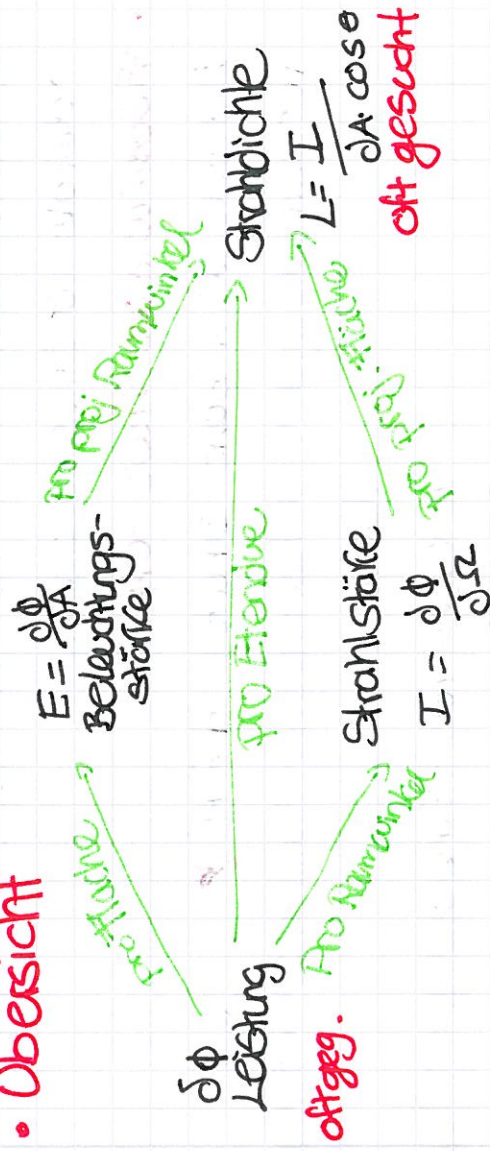
Der Lichtleistung beschreibt die Orts- und Winkelausdehnung.

der Quelle A = Größe der Quelle:

$$H = \pi \cdot A \cdot NA^2$$

Laser hat kleine Etendue und große Helligkeit = gefahrlich

Übersicht



Lambert Strahler

$L = \text{const}$ zB weißes Papier

Lambertsches cos-Gesetz $I(\theta) = L \cdot A \cdot \cos \theta$

↳ Kugel statt halbkreis

Allgemeine Strahlungs-Übertragung

von Sender auf den Empfänger Übertragene Leistung

$$d\Phi = L \cdot \frac{dA_s \cdot \cos \theta_s \cdot dA_E \cdot \cos \theta_E}{r^2}$$

Photometrisches Gesetz: Übertragene Leistung ist gegeben durch

Leuchtdichte, die über projizierte Sender- und Empfängerflächen und deren Abstand r .

Erhaltungsgrößen bei Strahlungs-Übertragung

Flächen sind senkrecht zueinander

→ Etendue bleibt erhalten $dH = dH' \rightarrow \text{Energieerhaltung}$

→ Strahlungsfluss Φ bleibt erhalten $L = L' = \frac{d\Phi}{dH}$ L : Erhaltungsgröße

- **Lichtleitwertanpassung**

Lichtleitwert $H = \pi \cdot A \cdot NA^2$!

Lichtleitwert der Quelle H_{LQ} : 4D Größe der Quelle

Lichtleitwert des Systems H_{sys} : besagt, wie viel davon transportiert werden kann

→ Quelle muss Belichtung angepasst werden

wenn $H_{LQ} > H_{sys}$ → Nicht die komplette Leistung der LED kann verwendet werden → unvermeidlicher Lichtverlust
→ deshalb: Verhältnis anschauen

- **Fläche-Winkel Trade-off**

Lichtleitwert H bleibt erhalten $H = H'$!

bedingt

Verlustfreies System: Verkleinerung der Strahlwinkel → Vergrößerung der Fläche

Verkleinerung der Fläche bedingt Vergrößerung der Winkel

→ Licht kann nicht beliebig konzentriert werden

→ Fläche klein → Winkel groß (90° ist die Grenze)

- **Zusammenfassung**

0.10 Die Leuchtdichte von Lichtquellen kann nicht erhöht werden

0.11

- **Laser in der Medizin**

hohe Intensitäten, spezifische Wellenlängen und spezifische Wechselwirkungen
zeiten → gezielte Wechselwirkungen mit dem Gewebe sind möglich

ZB Laserchirurgie

- **Grundprinzipien**

LASER: "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation"

folgende Prozesse sind wichtig: Energieerzeugung, Absorption, spontane Emission

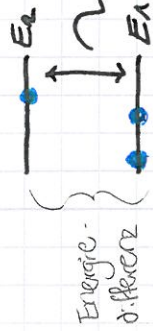
- **Licht als Teilchen**

Photonen Energie $E = h \cdot \omega$! $E = h \cdot \frac{c}{\lambda}$ $\triangleright$ $h = \text{Plancksches Wirkungsquantum}$
→ Teilchen treffen auf Materie

Grundlagen

Laser basieren auf Strahlungsübergängen zwischen diskreten

Energieebenen in Atomen oder Molekülen $\rightarrow$ einfacher Fall: 2 Niveausystem



$$E_{\text{Photon}} = \frac{hc}{\lambda} = E_2 - E_1$$

$$\lambda_{\text{Photon}} = \frac{hc}{E_2 - E_1}$$

$I(z)$ wird nie null
wegen e
wenn $0,001 = I(z)$
nicht ∇

Absorption von Photonen



$I \rightarrow$ we. Absorption

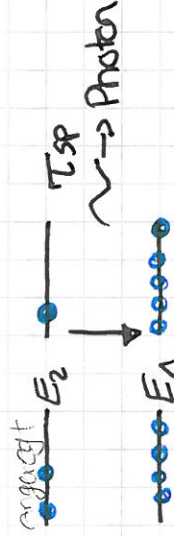
$$dI = -\sigma_{12} \cdot N_1 \cdot I \cdot dz \Rightarrow I(z) = I_0 \cdot e^{-\sigma_{12} \cdot N_1 \cdot z}$$

I = Intensität N_1 : Besetzungszahl Niveau 1

σ_{12} : Wirkungsquerschnitt dz = Weglänge

$$\text{Lambert-Beersches Gesetz } I(z) = I_0 \cdot e^{-\sigma_{12} \cdot N_1 \cdot z} = \langle E^2 \rangle >$$

Spontane Emission von Photonen (= Zerfall des oberen Niveaus)



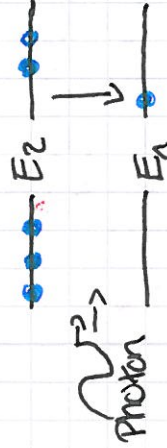
$$\nabla dI_{sp} = \frac{1}{c \tau_{sp}} N_2 \cdot dz \quad (\text{Zerfallsgesetz})$$

Angeregte Photonen sind eher instabil

τ_{sp} : Lebensdauer Niveau 2

N_2 : Besetzungszahl Niveau 2

Stimulierte Emission von Photonen



$$\text{Licht wird erzeugt } \nabla dI = \sigma_{12} \cdot N_2 \cdot I \cdot dz$$

$\rightarrow$ 2 kohärente Photonen

$\rightarrow$ für hohe Intensitäten kann spontane Emission vernachlässigt werden

$$\text{DEL: } dI = \sigma_{12} (N_2 - N_1) \cdot I \cdot dz$$

$$\text{Lösung } I = I_0 \cdot e^{+(\sigma_{12} - \sigma_{21}) N_2 \cdot z}$$

Verstärkungsfaktor g (gain)

$$g = \sigma_{12} (N_2 - N_1) \quad [1/m]$$

$$I = I_0 \cdot e^{g \cdot z} \rightarrow \text{Lichtintensität nimmt exponentiell zu}$$

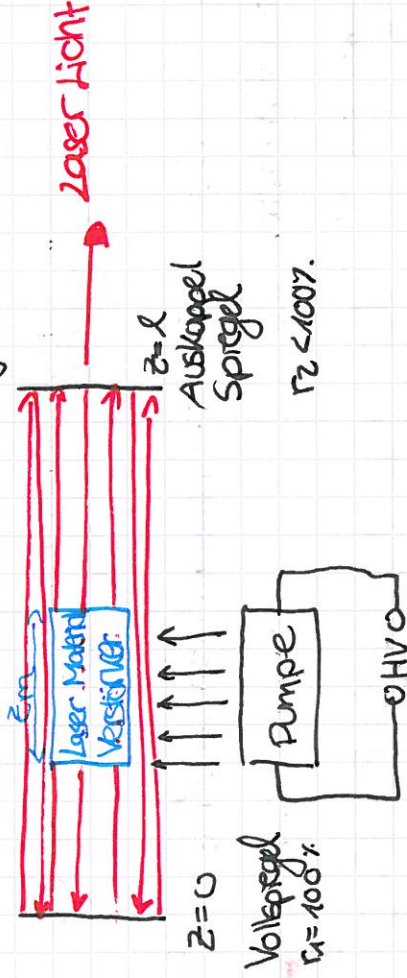
Es ist ein System mit Besetzungsinversion nötig

Mittels eines Pumpmechanismus muss das obere Niveau befüllt werden
z.B. durch Lichtzufuhr (optisch), entladung (elektrisch), oder chemisch.

meistens 3 Niveausysteme. Photonen werden durch externe Energie angeregt.

- **Resonator - Verstärkung mit Rückkopplung**

Rückkopplung über Resonatorspiegel



- **Grundbedingungen LASER**

Grundkomponenten: Verstärkungsmedium (Besetzungsinversion)

- Pump-Mechanismen (Energiezufuhr)

- Resonator (Rückkopplung)

für Medtech: CO_2 -Laser: Gas-Laser, el. gepumpt

Farbstoff-Laser: flüssiges Medium, tlw. chem. gepumpt

Nd-YAG: Halbleiter-Laser: optisch gepumpt (Normal)

- **Lasermode - longitudinal**

Rückkopplung und Verstärkung sorgt dafür, dass sich im stationären Zustand nur stabile Resonatormoden ausbilden



Spiegelabstände $L = m \cdot \frac{\lambda}{2}$!

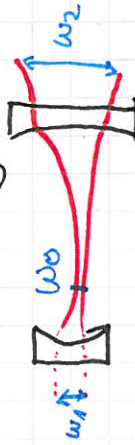
Laserfrequenz $\nu = \frac{c}{\lambda} = m \cdot \frac{c}{2L}$!

Interferenzbildung: Spektrallinien sind sehr dünn

- **Lasermode - transversal**

Die Geometrie (Querschnitt / Krümmung) der Resonatorspiegelsorgt zudem für

Ausbildung von transversalen Moden



Wie sieht es an der Stelle wo aus

Je nach Resonator unterschiedlich

TEM: transverse

Grundmoden 00

elektromagnetische modes

Intensitätsverteilung im Querschnitt

• Gaussmoden

für $TE_{M_{00}}$ -Mode (Grundmode) gilt $A(r) = A_0 \exp\left[-\frac{r^2}{w_0^2}\right]$!

Gausförmige Intensitätsverteilung

$$I(r) = I_0 \cdot \exp\left[-2\frac{r^2}{w_0^2}\right] \quad \text{Strahlradius } w_0 \quad (13,5\% \text{ des } I_{0x})$$

• Ausbreitung von Gaußschen moden

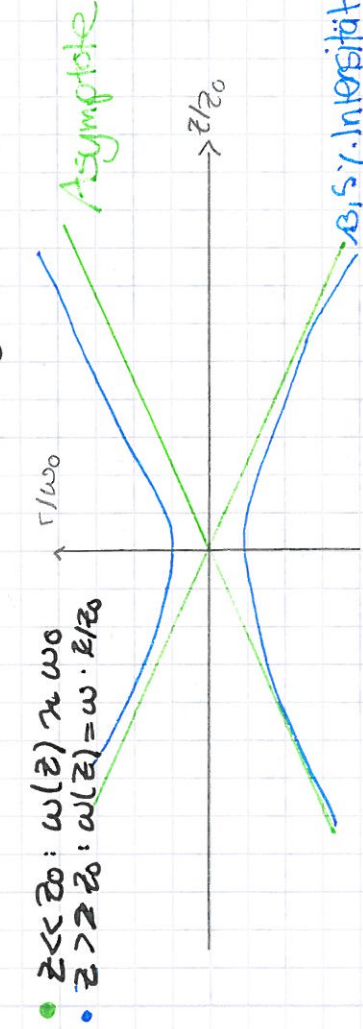
Strahlenradius $w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_0}\right)^2}$! z : Position in z -Richtung

$$z_0 = \frac{\pi \cdot w_0^2}{\lambda} \quad \text{Konfokalkparameter} \quad w_0: \text{Breite der Taillie}$$

"Rayleigh range"

Divergenz $\Theta = \frac{\lambda}{\pi w_0}$! Je mehr einschnürung, desto größer

[Grad] kleiner Laser: große Divergenz Wellenfrontradius



$$R(z) = z + \frac{z_0^2}{z} \quad \text{!}$$

• Charakteristika von Gaussmoden

w_0 = Tailenradius : - Radius kleinster Einschnürung

Θ_0 : Halber Divergenzwinkel - Winkelauflösung des Strahls im Fernfeld

$$\Theta_0 = \frac{\lambda}{\pi w_0} \rightarrow \text{Strahlparameterprodukt } w_0 \cdot \Theta_0 = \frac{\lambda}{\pi} \quad \text{!}$$

Minimale Strahltaillie bei Fokussierung ($\Theta_0 = NA$)

$$w_0 = \frac{\lambda}{\pi NA} \quad \rightarrow \text{kleine Fläche}$$

$\rightarrow$ hohe Belichtungsstärke möglich

$$\rightarrow \text{extrem hohe Leuchtdichten möglich } L = \frac{d\Phi}{H} = \frac{d\Phi}{\lambda z} \quad \text{!}$$

• Zusammenfassung:

Intensitätsverteilung ist gausförmig

Strahlentaillie w_0 bestimmt Divergenz Θ und Ausbreitungsverhalten

Produkt aus beiden bleibt konstant $\Rightarrow$ Strahlparameterprodukt
hohe Bestrahlungsstärken

• Anwendungen

Bestrahlungsstärken $4 \cdot 10^4 - 10^{14} \text{ W/cm}$ (vgl. Sonne $5 \cdot 10^2 \text{ W/cm}$)
Gepulste Laser weisen Pulslängen von μs / fs auf
Wellenlänge bestimmt Eindringtiefe

• Photochemische Wechselwirkung

Vergleichsweise geringe Intensitäten, wie Sonnenbrand
Anregung von Molekülen: Ziel Auflösung einer chem. Reaktion
z.B. PDT (Photodynamische Therapie): Injektion eines Sensibilizers, reichert sich
im Tumor an, Kontrolle über Fluoreszenz, best. Licht zur Tumorzellenzerstörung

• Koagulation und Verdampfung

- Eiweiß denaturiert, hohe Intensitäten bei vergleichsweise langen Wechselwirkungszeiten
- Erwärmung des Gewebes - Photothermische Effekte
- Arten der Gewebeänderungen: · Reversibler Erwärmung (bis 60°C)
· Irreversibler Gewebeveränderung (Koagulation) bei $60 - 100^\circ\text{C}$
 - ↳ erhöhte Streuung, Schrumpfung, Auflockerung
- Karbonisierung: einige 10°C ist starke mech. Schädigung
- Verdampfen (Vaporisation) " : Raucherentwicklung - Abtragung zur Blutstillung, Endovenöse Behandlung, Dermatologie
 - ↳ Krampfadem veröden, Fallenglättung - Laserpeeling

• Photoablation

Kurze Wechselwirkungszeiten (Ausdauer $< \text{therm. Relaxation}$) $\Rightarrow$ Verdampfung
z.B. Lasik, hohe Energien, UV-Laser an der Oberfläche, oberste Schicht unklappen
zertrümmerung von Nieren / Blasensteinen

• Photodisruption im Gewebe

hohe Intensität + Ausdauer von fs, nicht lineare Prozesse
Atome werden ionisiert Plasma-Blase entsteht durch Mini-Explosion $D < 2 \mu\text{m}$
Femtosekunden-Lasik: Plasma-Blasen unter der obersten Schicht, überschüssiges
Gewebe über Schicht entfernen, sehr genau

Laser zu $200 \text{ nm (UV)} - 10 \mu\text{m (IR)}$
Effekt abhängig von Bestrahlungsstärke + Wechselwirkungszeit