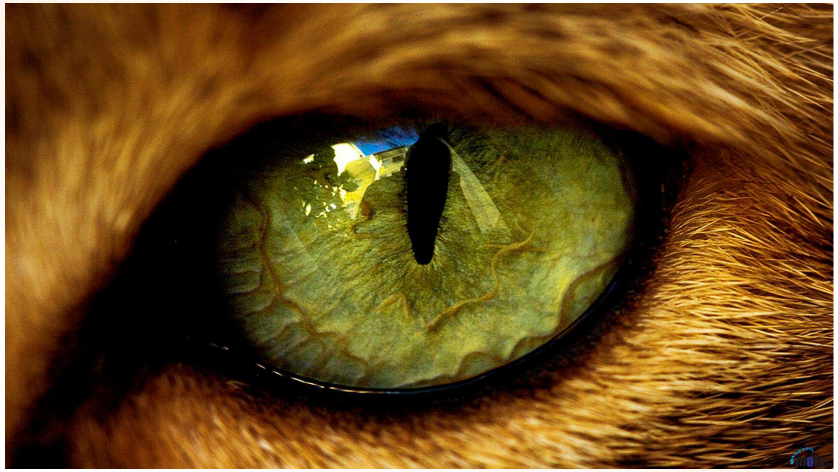
Aberace oka
z vlnového hlediska

1. Optické aberace
2. Zernikovy polynomy
3. Rozklad do Zernikových polynomů
4. Shack-Hartmannův senzor
5. Aberace vlnoplochy
6. i.Profiler firmy Zeiss
7. Prémiová korekce
8. Vliv LOA a HOA na vízus

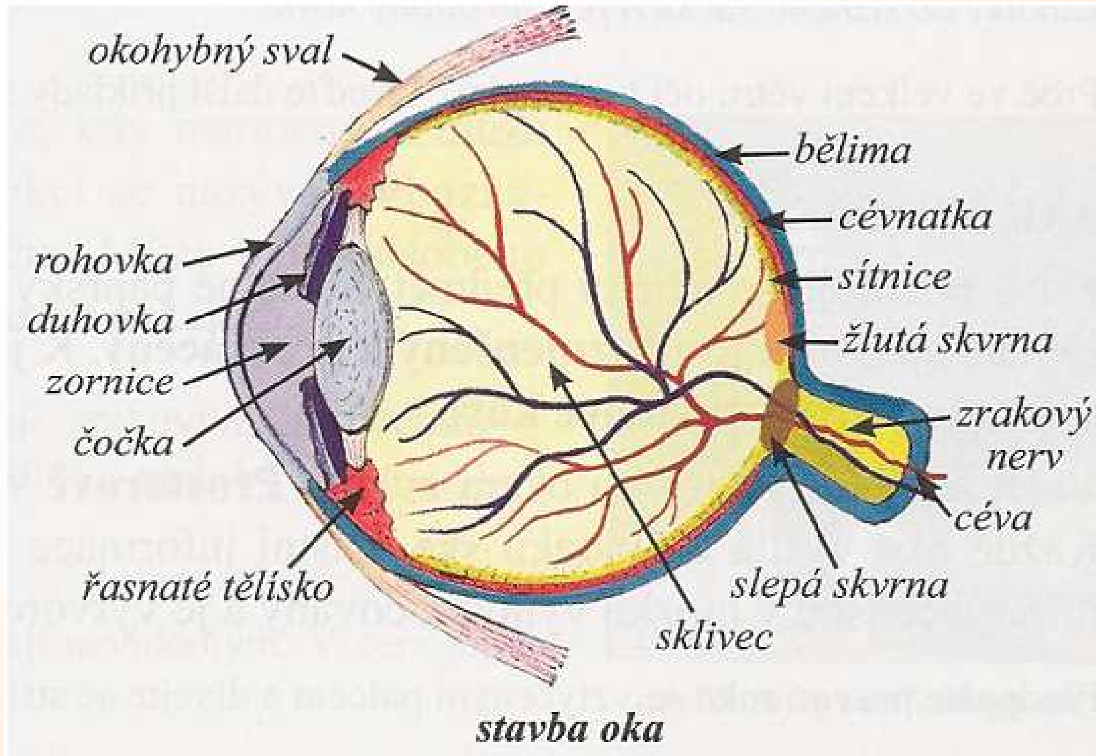
Oko = optický přístroj

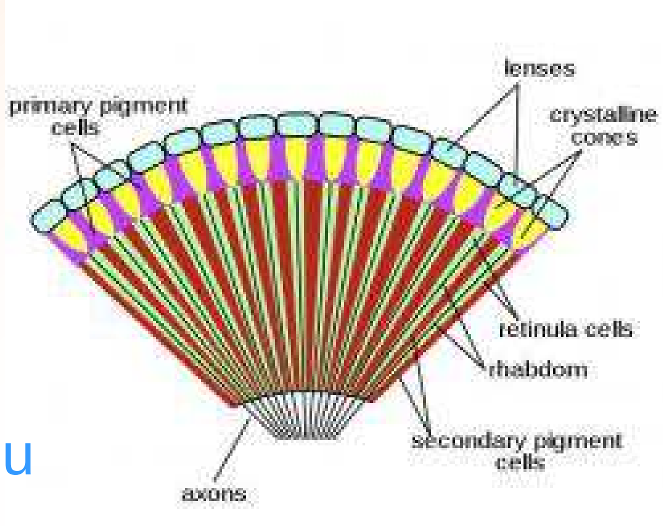


Oko je složitý a citlivý optický přístroj,
má chyby a nedokonalosti jako každý přístroj,
také se časem opotřebovává.

Evolučně se oko vyvíjí k dokonalosti (většinou).

Komorové oko savců





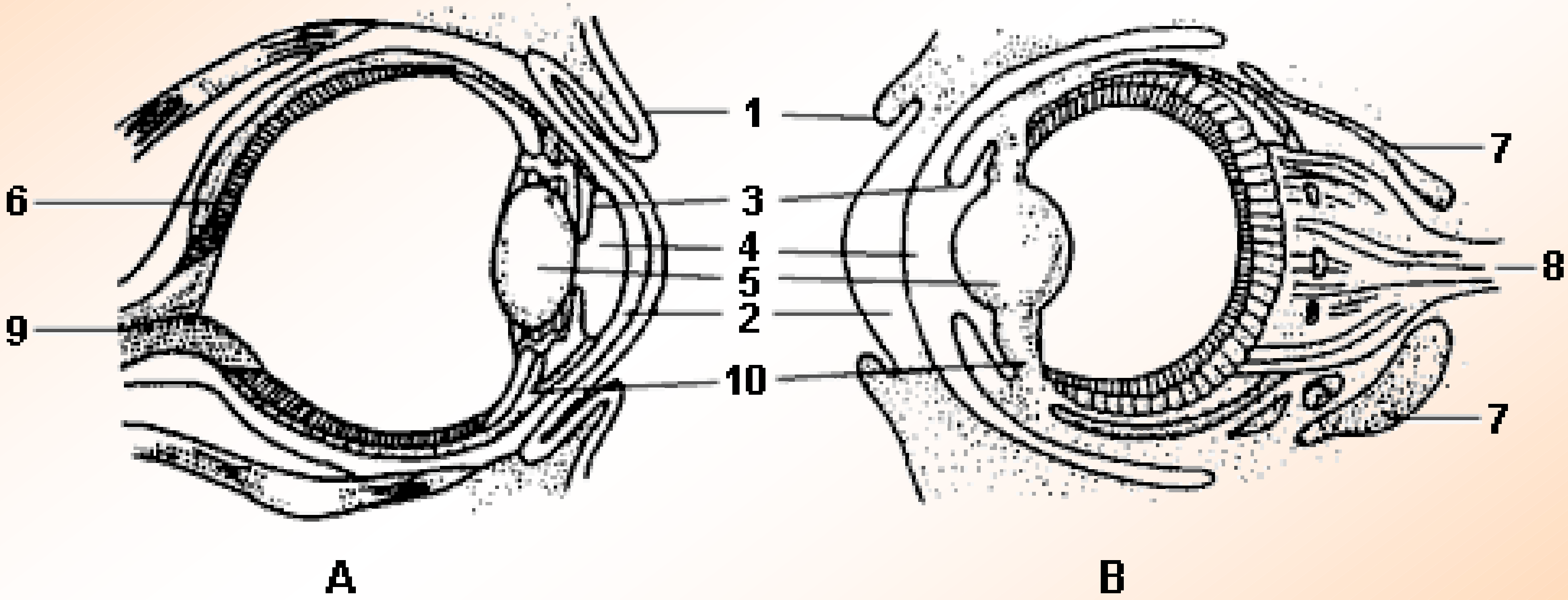
Složené oko hmyzu

Oko plaza

Oko hlemýždě

Oko hlavonožce

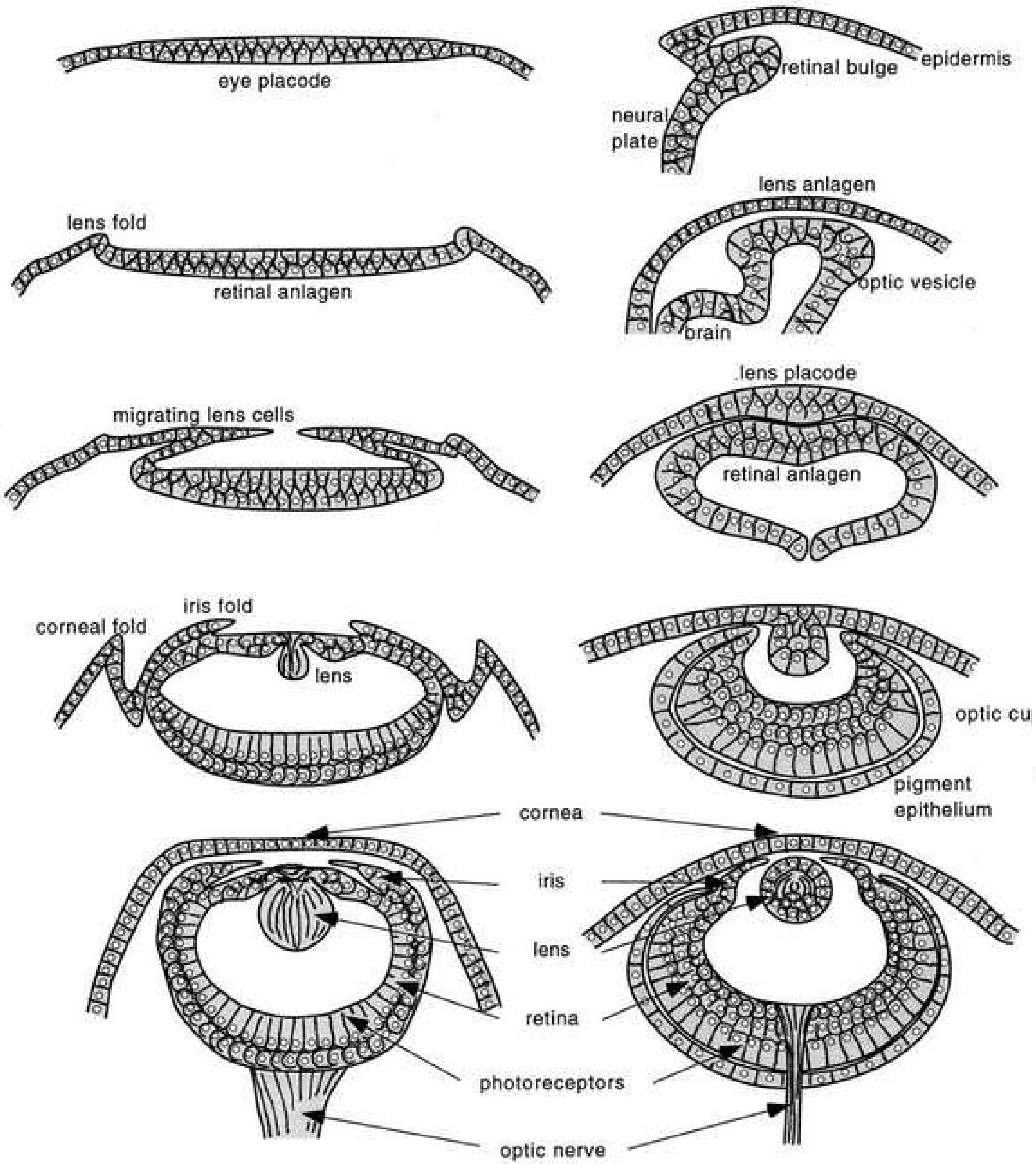
se evolučně vyvíjelo zcela jinak,
oční nerv neprochází sítnící,
nemá slepou skrnu



Obr. Komorové oko stavovcov (A) a chobotnice (B)
1 - očné viečko, 2 - rohovka, 3 - dúhovka, 4 - zrenica, 5 - šošovka, 6 - sietnica,
7 - chrupka, 8 - zrakové ganglium, 9 - zrakový nerv, 10 - ciliárne svaly

Vývoj oka

Hlavonožci | Obratlovci



Optické aberace

Aberace = odchylka, odklon
Optické aberace = odchylka, vada, chyba od ideálního zobrazení

Klasické dělení aberací:

1. aberace paprskové:

chromatické (barevné) aberace:

disperze optického prostředí $n(\lambda)$, modrá se láme více než červená

monochromatické aberace:

zobrazení je stigmatické (bodové) jen při užití paraxiálních paprsků
aberace širokého svazku paprsků (sférická vada, koma)
aberace šikmého svazku paprsků (astigmatismus, zklenutí pole, zkreslení)

2. aberace vlnové:

difrakce (ohyb) světla:

omezené průměry optických svazků, apertury, clony

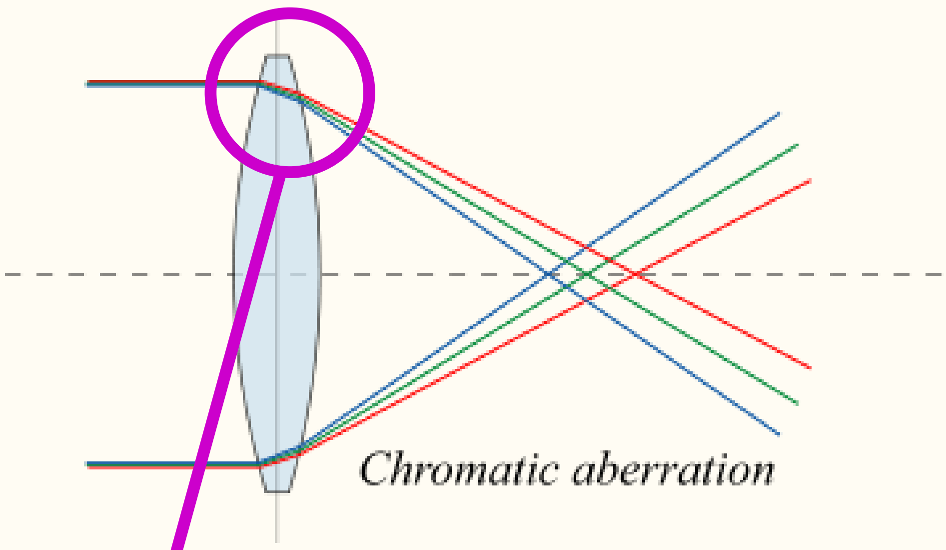
interference, koherence

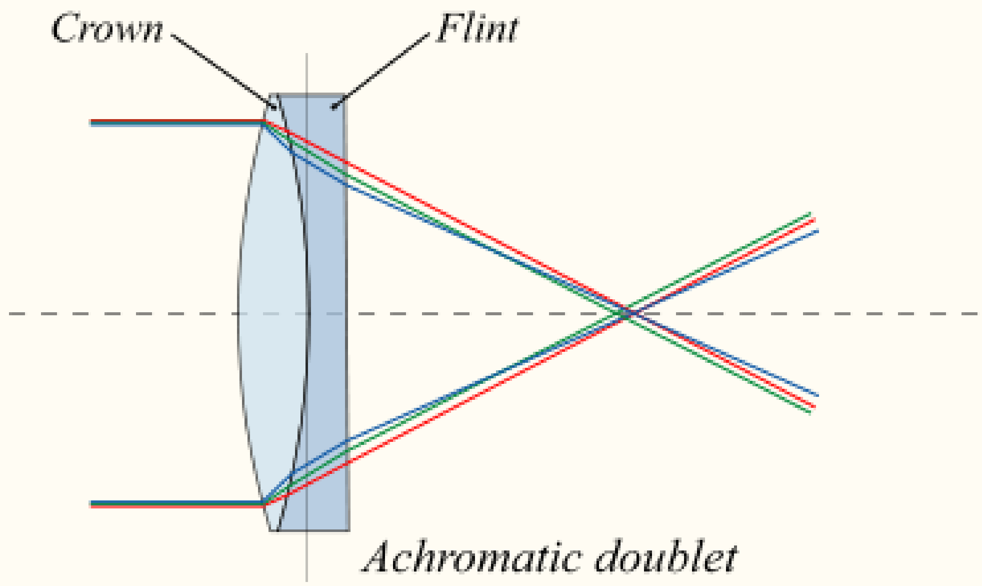
3. aberace technologické + materiálové

Justáž, chyby ve výrobě, tolerance, šlíry a nehomogenity, …

Všechny aberace se projeví poruchou vlnoplochy, všechny lze proto měřit a popisovat z vlnového hlediska! → analýza vlnoplochy, aberometrie

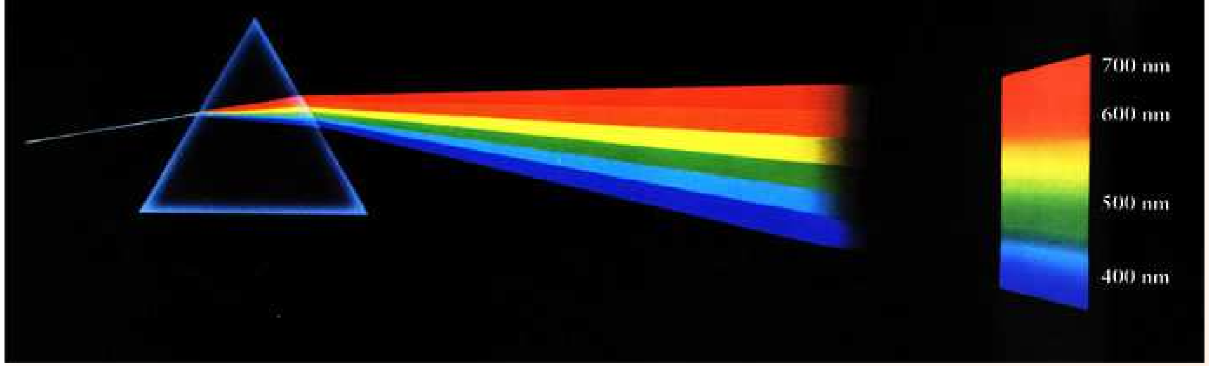
Paprskové aberace
chromatické aberace

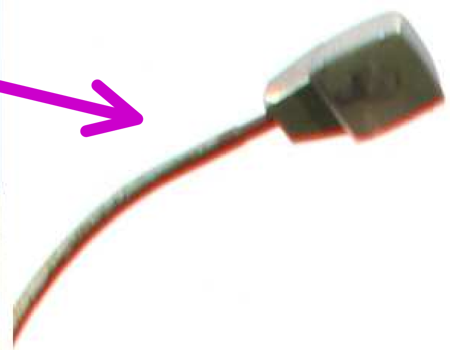


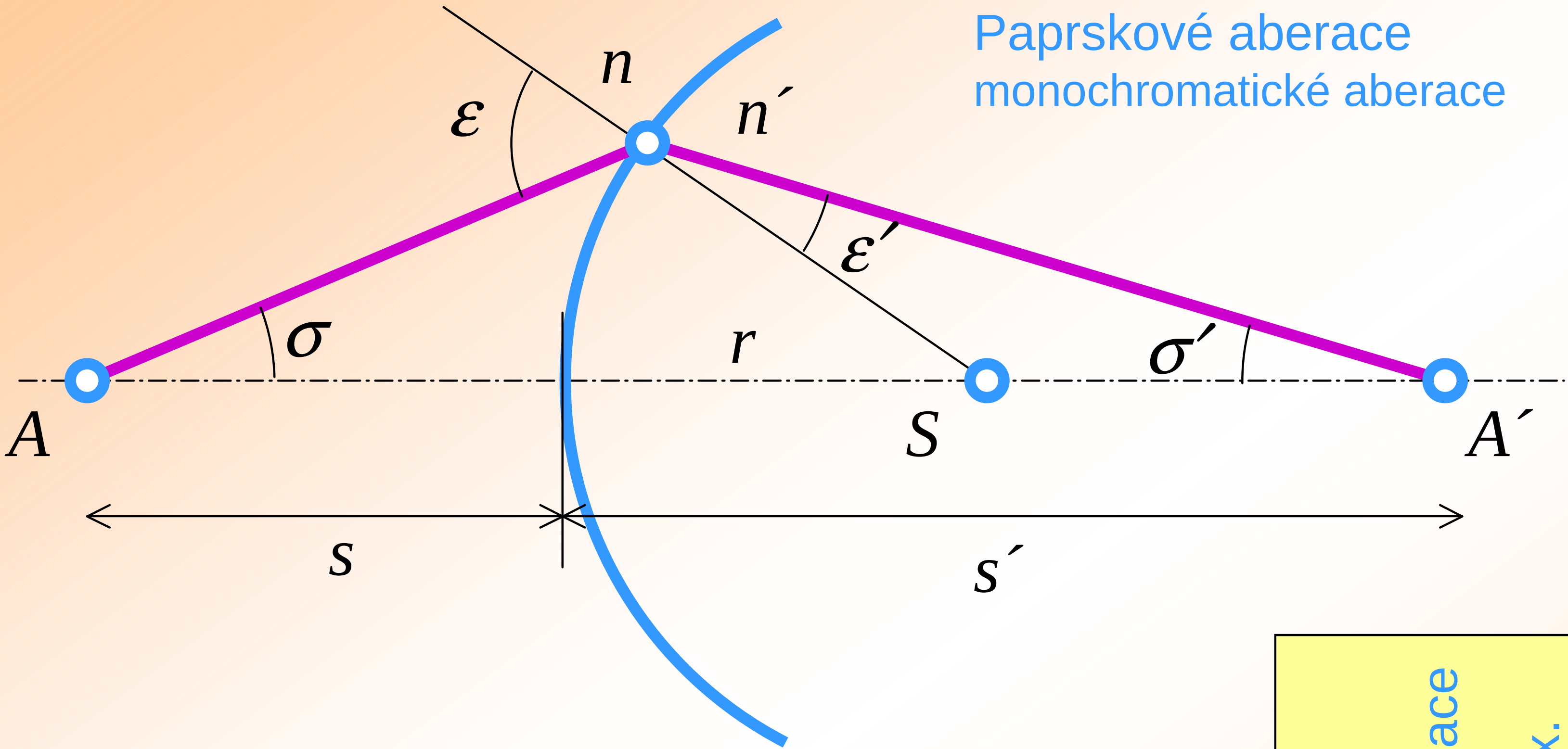


disperze světla

spektrum







Paprskové aberace
monochromatické aberace

Pro tangenciální paprsky a jednu lámavou plochu platí :

$$\sin\varepsilon = \frac{r+s}{r}\sin\sigma \to \sin\varepsilon' = \frac{n}{n'}\sin\varepsilon \to \sigma' = \varepsilon - \varepsilon' - \sigma \to s' = r\left(1 + \frac{\sin\varepsilon'}{\sin\sigma'}\right),$$

ale pouze když $\sin\varepsilon \approx \varepsilon, \sin\varepsilon' \approx \varepsilon', \sin\sigma \approx \sigma, \sin\sigma' \approx \sigma,$

tj. pro paraxiální paprsky, odtud vychází s' nezávislé na σ, σ'

zobrazovací rovnice : $$\frac{n'}{s'} + \frac{n}{s} = \frac{n'-n}{r}$$

paraxiální aproximace

Seidelova aprox.

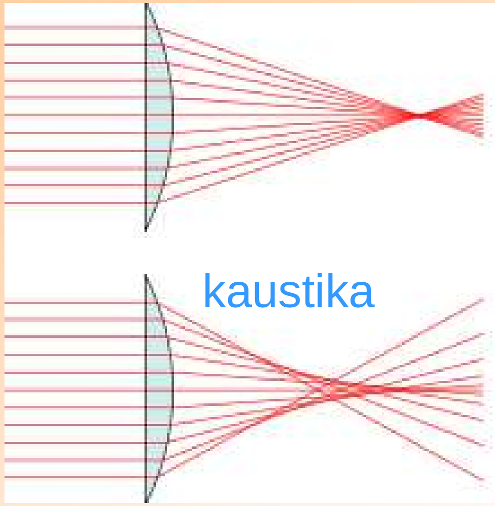
aprox. 5. řádu

aprox. 7. řádu

$$\sin x \approx x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \ldots$$

Stigmatické zobrazení pouze pro paraxiální paprsky !!!

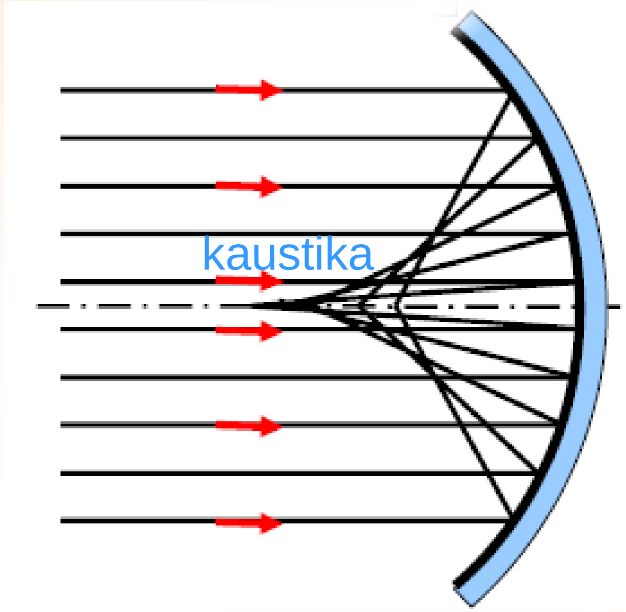
Monochromatické aberace

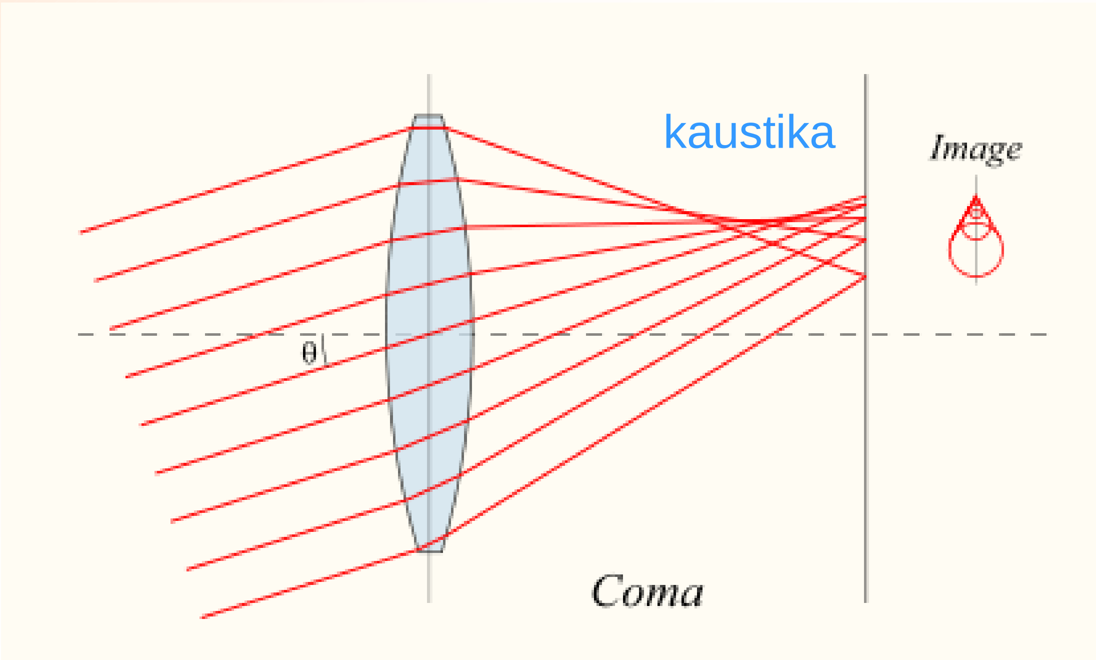


sférická vada nebo otvorová vada

=

symetrická aberace širokých svazků





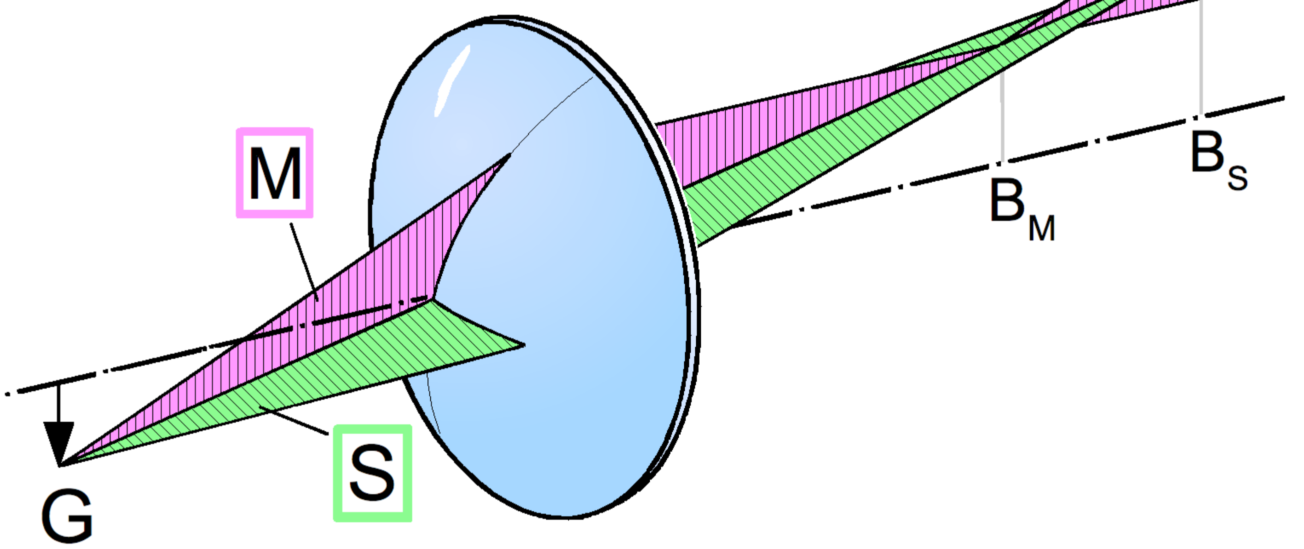
koma

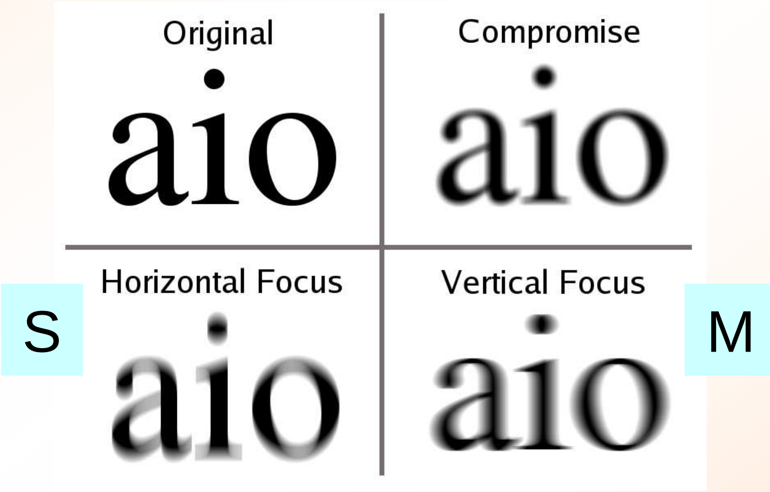
=

asymetrická aberace šikmých a širokých svazků

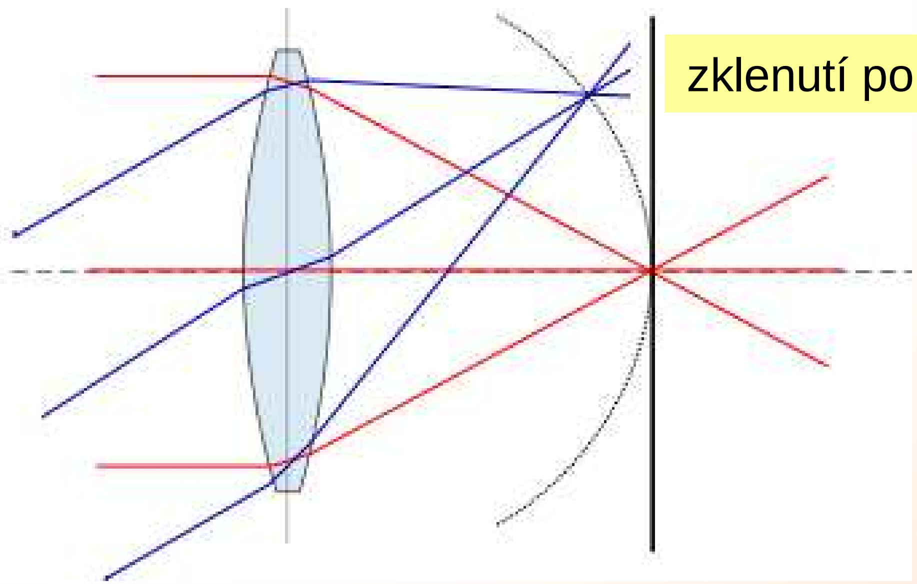
astigmatismus

Meridiální (tangenciální) a sagitální fokála

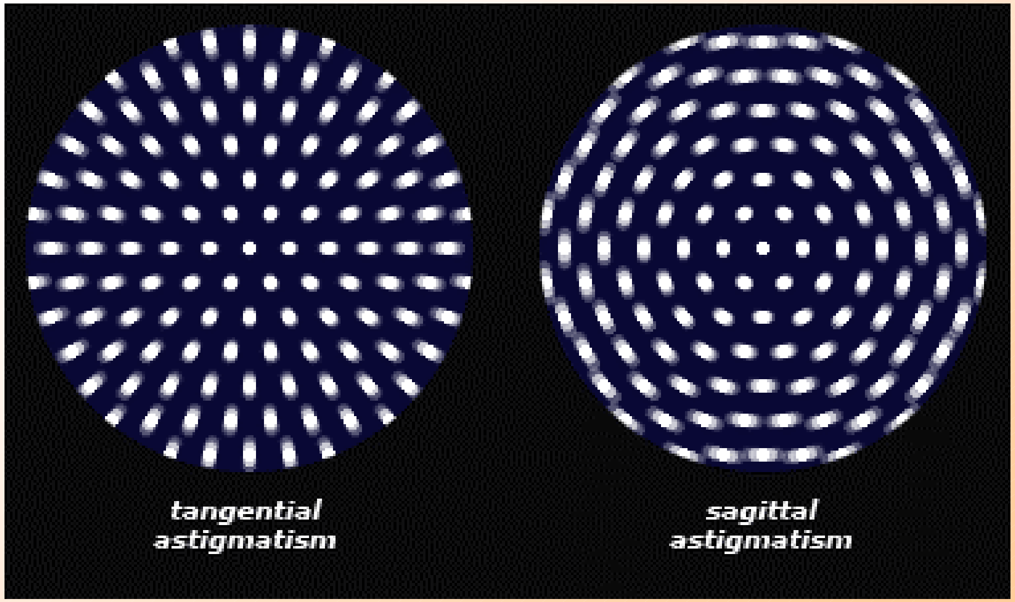




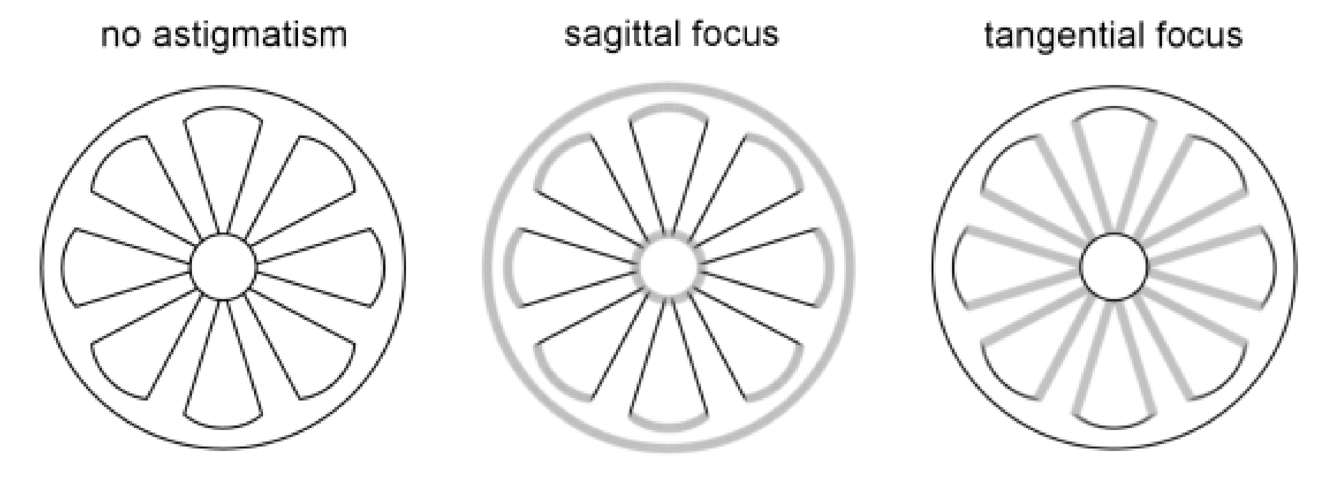
zklenutí pole



astigmatismus v celém zorném poli



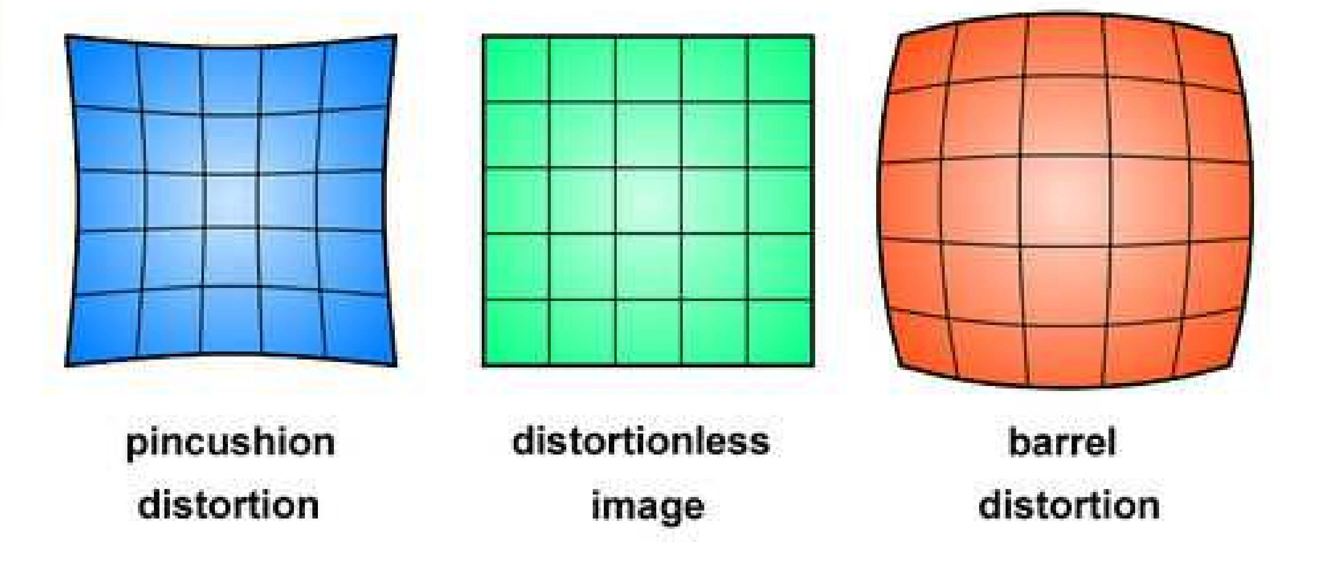
astigmatismus



zkreslení

poduškovité zkreslení

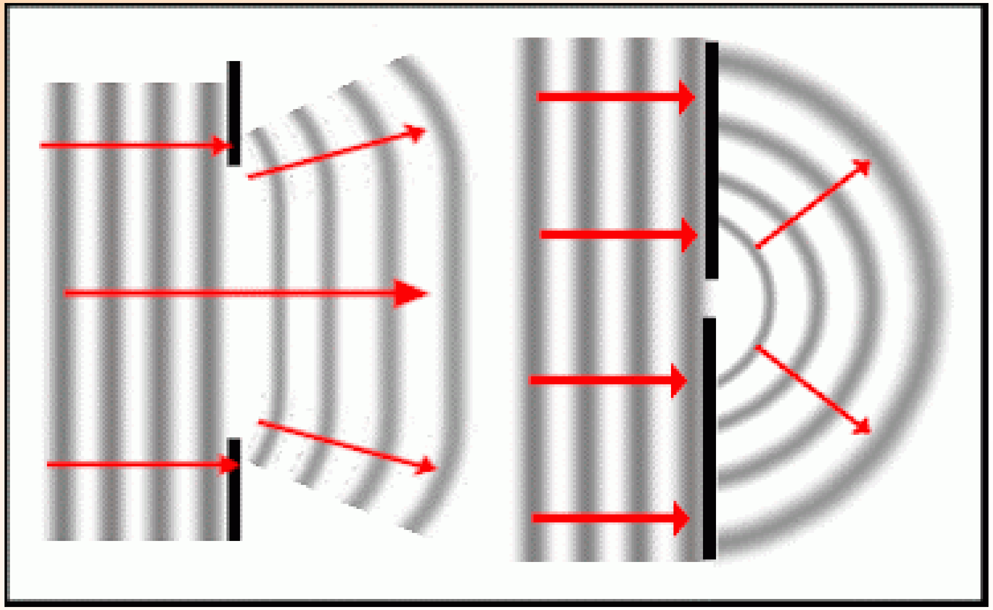
soudkovité zkreslení

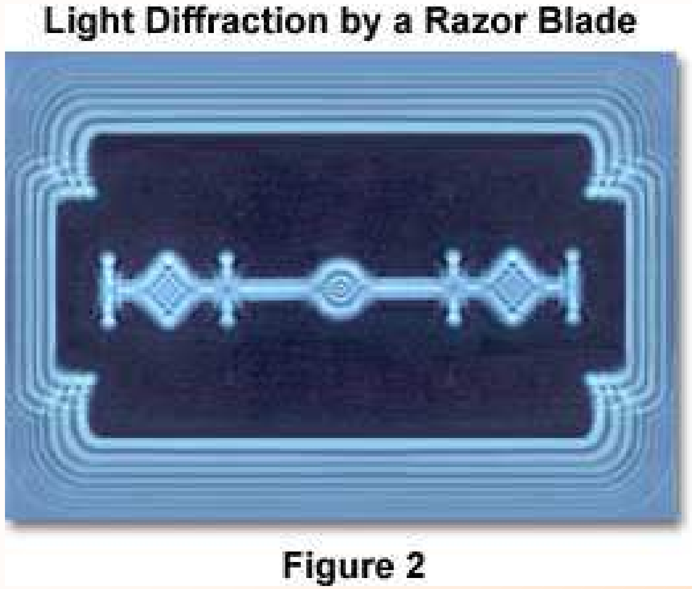


Paprskové aberace jsou do značné míry odstranitelné! → optický průmysl

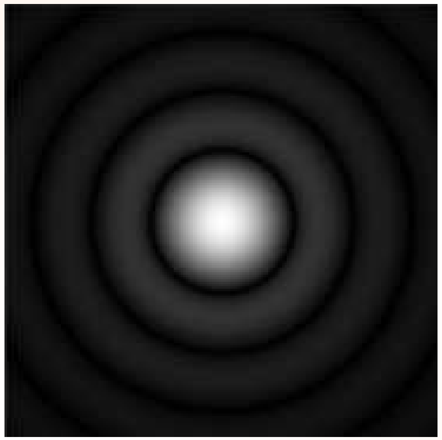
Vlnové aberace (jsou neodstranitelné!)

difrakce

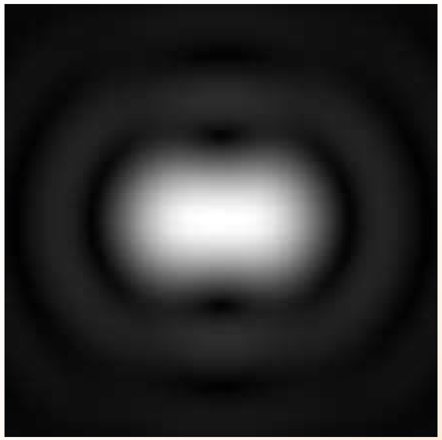




1 bod



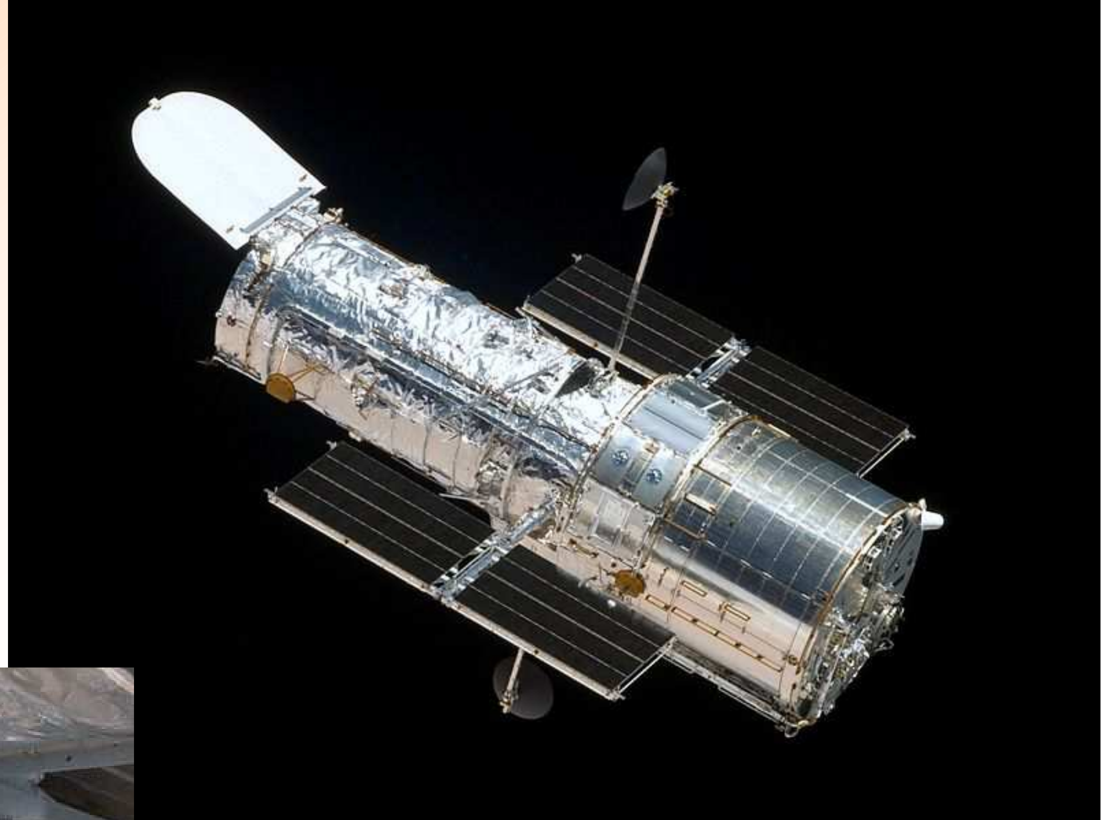
2 bod



Difrakční limita
(Rayleigho kritérium)

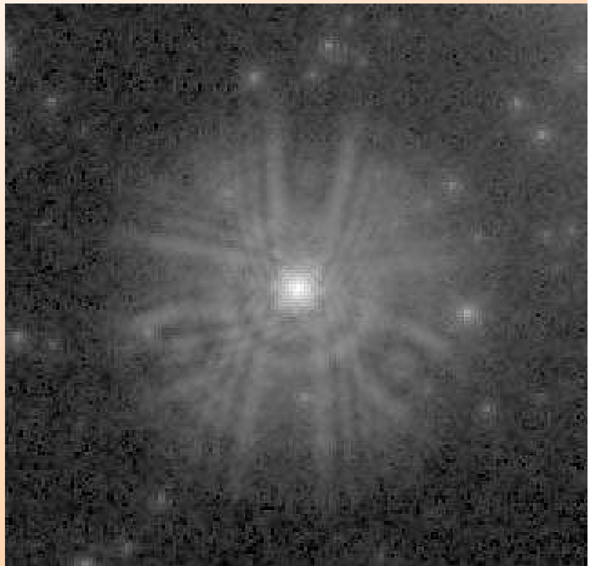
$$\psi \approx 1.22\frac{\lambda}{D} \approx \frac{120''}{D[\mathrm{mm}]}$$

Hubble space telescope HST
D ≈ 2.4 m, f ≈ 57.6 m
vynesen na oběžnou dráhu roku 1990
600 km nad Zemí
Celkové náklady 10 mld $ = 200 mld Kč
očekávané rozlišení 0.1″
(pozemské dalekohledy jen 1″)



Leštění primárního zrcadla
RMS ≈ $\lambda/65 \approx 0.008\ \mu m$

PSF



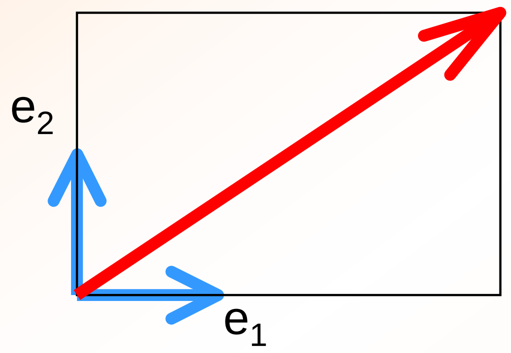
1990 Až na oběžné dráze zjištěna sférická aberace hlavního zrcadla, rozlišení jen 1″
Zrcadlo bylo vybroušeno vinou testovacího zařízení (posunutého o 1.3 mm) chybně
1993 HST dostal „brýle“ (tj. 2 korekční zrcadla k odstranění sférické vady)

obraz před a po korekci roku 1993

Zernikovy polynomy

Ortogonální funkce:

Vektor **A** rozkládáme do souřadných vektorů $\mathbf{e}_1,\mathbf{e}_2,\mathbf{e}_3$
a přiřazujeme mu složky A_1,A_2,A_3
a pak platí $\mathbf{A} = A_1\mathbf{e}_1 + A_2\,\mathbf{e}_2 + A_3\,\mathbf{e}_3$
souřadné vektory $\mathbf{e}_1,\mathbf{e}_2,\mathbf{e}_3$ jsou obvykle
vzájemně kolmé a normované



$\mathbf{A} = 3e_1 + 2e_2$
nebo
$\mathbf{A} = (3,2)$

***

Podobně v matematické analýze vybíráme vhodnou soustavu funkcí f_n a libovolnou funkci $f(x)$ můžeme do nich rozložit jako řadu $f = c_1 f_1 + c_2 f_2 + c_3 f_3 + \ldots$
Například funkci sinus rozložíme do mocnin x^n jako Taylorovu řadu:

$$\sin x \approx x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} - \frac{x^7}{7!} + \ldots$$

Nebo obdélníkovou funkci rect(x) do harmonických funkcí sin nx jako Fourierovu řadu:

$$\operatorname{rect}(x) \approx \frac{4}{\pi}\left(\sin x + \frac{\sin 3x}{3} + \frac{\sin 5x}{5} + \frac{\sin 7x}{7} + \ldots\right)$$

Nejvhodnější jsou vzájemně kolmé funkce f_n, například Besselovy funkce, Hermiteovy či Legendrovy polynomy anebo **Zernikovy polynomy** $Z_n^m(x,y)$, které jsou **ortogonální na jednotkovém disku** a po vhodném normování i ortonormální. Díky ortogonalitě na jednotkovém disku se Zernikovy polynomy používají hodně v optice (kruhové pupily, apertury, čočky atd.)

Matematická definice:

Funkce $f(x,y)$ a $g(x,y)$ jsou vzájemně kolmé (ortogonální) v oblasti S, pokud platí:

$$\boxed{\int_S f(x,y)\,g(x,y)\,\mathrm{d}x\mathrm{d}y = 0}$$

Symbolika není jednoznačná!

Používají se různé způsoby indexování Zernikových polynomů (např. modální index *j*), my se držíme nejobvyklejšího značení Z_n^m se dvěma indexy:

dolní **hlavní index** (radiální) *n* určuje řád polynomu

a horní **vedlejší index** (azimutální) *m* určuje úhlovou frekvenci (četnost) maxim a minim,

přitom platí $m = -n, -n+2, -n+4, \ldots, n-2, n$
(pro dané *n* tedy existuje *n*+1 povolených hodnot *m*)

Tedy *n* a *m* jsou vždy **obě současně sudá nebo lichá**, např. Z_3^{-3} nebo Z_4^2, ale nikdy ne Z_1^0 nebo Z_4^3

V kartézských souřadnicích se skutečně jedná o **polynomy!**

Frits Zernike
1888 – 1966
Nobelova cena 1953
za objev fázově
kontrastní
mikroskopie

Normované Zernikovy polynomy:

$$Z_0^0 = 1$$

$$Z_1^{-1} = 2y \qquad Z_1^1 = 2x$$

$$Z_2^{-2} = \sqrt{6}\,2xy \qquad Z_2^0 = \sqrt{3}\left(2x^2 + 2y^2 - 1\right) \qquad Z_2^2 = \sqrt{6}\left(x^2 - y^2\right)$$

$$Z_3^{-3} = \sqrt{8}\left(3x^2 y - y^3\right) \qquad Z_3^{-1} = \sqrt{8}\left(3x^2 y + 3y^3 - 2y\right) \qquad Z_3^1 = \sqrt{8}\left(3x^3 + 3xy^2 - 2x\right) \qquad Z_3^3 = \sqrt{8}\left(x^3 - 3xy^2\right)$$

V kartézských souřadnicích se skutečně jedná o **polynomy** $Z_n^m(x,y)$.

V polárních souřadnicích $Z_n^m(\rho,\theta)$ jde ale o součin radiálního polynomu $R_n^m(\rho)$ a azimutální harmonické funkce cos $m\theta$ nebo sin $m\theta$, například:

$$Z_2^2 = \sqrt{6}\left(x^2 - y^2\right) = \sqrt{6}\rho^2\left(\cos^2\theta - \sin^2\theta\right) = \sqrt{6}\rho^2\cos 2\theta$$

nebo

$$Z_3^1 = 3x^3 + 3xy^2 - 2x = \left(3x^2 + 3y^2 - 2\right)x = \left(3\rho^3 - 2\rho\right)\cos\theta,$$

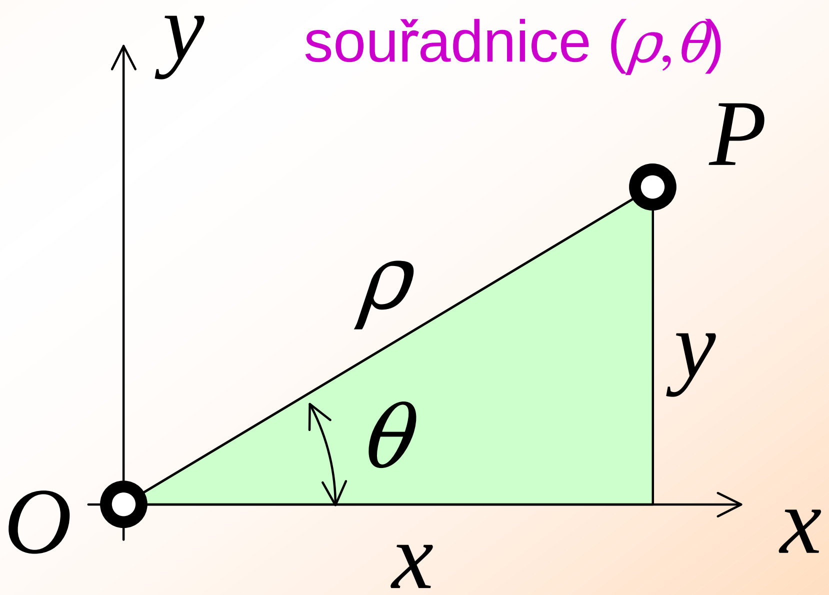
kde

$$x = \rho\cos\theta$$

$$y = \rho\sin\theta$$

$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2}$$

Polární (x,y) a kartézské souřadnice (ρ,θ)



POZOR:
Existují a v literatuře se používají i nenormované či jinak normované Zernikovy polynomy!

POZOR:
Pupila oka je různá, průměr typicky 2 až 6 mm, pro použití Zernikových polynomů nutno vždy přeškálovat pupilu na jednotkový kruh

Normované Zernikeho polynomy Z_n^m

0. a 1. řádu

$Z_0^0 = 1$ píst

$Z_1^{-1} = 2\rho\sin\theta$ náklon vertikální

$Z_1^{1} = 2\rho\cos\theta$ náklon horizontální

2. řádu

$Z_2^{-2} = \sqrt{6}\rho^2\sin 2\theta$ astigmatismus (šikmý)

$Z_2^{0} = \sqrt{3}\left(2\rho^2 - 1\right)$ defokus

$Z_2^{2} = \sqrt{6}\rho^2\cos 2\theta$ astigmatismus (vertikální)

3. řádu

$Z_3^{-3} = \sqrt{8}\rho^3\sin 3\theta$ trefoil

$Z_3^{-1} = \sqrt{8}\left(3\rho^3 - 2\rho\right)\sin\theta$ koma vertikální

$Z_3^{1} = \sqrt{8}\left(3\rho^3 - 2\rho\right)\cos\theta$ koma horizontální

$Z_3^{3} = \sqrt{8}\rho^3\cos 3\theta$ trefoil

4. řádu

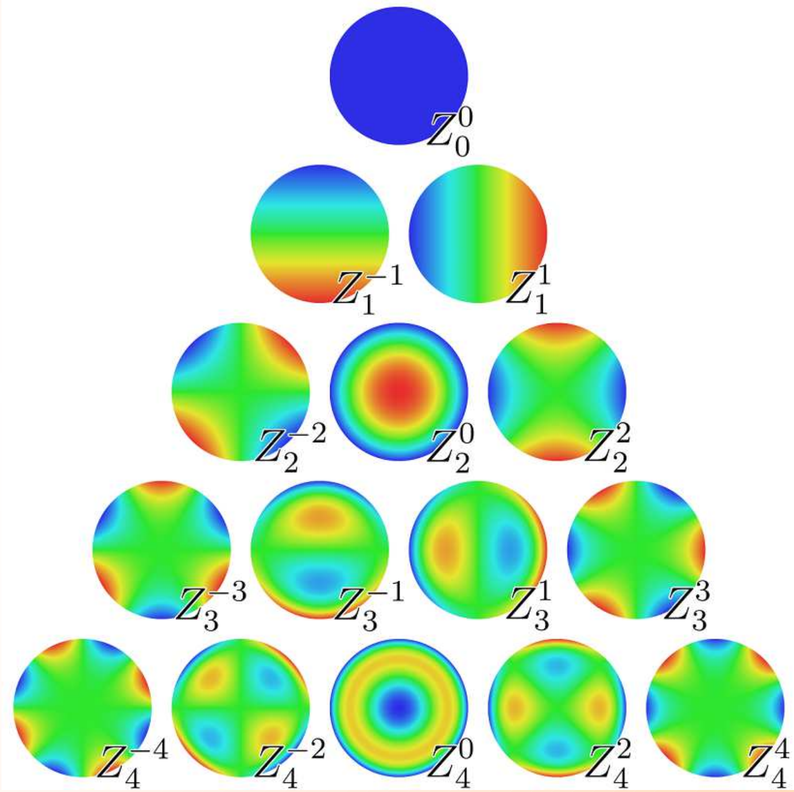
$Z_4^{-4} = \sqrt{10}\rho^4\sin 4\theta$ tetrafoil (šikmý)

$Z_4^{-2} = \sqrt{10}\left(4\rho^4 - 3\rho^2\right)\sin 2\theta$ sekundární astigmatismus (šikmý)

$Z_4^{0} = \sqrt{5}\left(6\rho^4 - 6\rho^2 + 1\right)$ sférická aberace

$Z_4^{2} = \sqrt{10}\left(4\rho^4 - 3\rho^2\right)\cos 2\theta$ sekundární astigmatismus (vertikální)

$Z_4^{4} = \sqrt{10}\rho^4\cos 4\theta$ tetrafoil (vertikální)



Zernikovy polynomy (faktorizace v ρ a θ)

sudé (kladné)

$$Z_n^m(\rho,\theta) = R_n^m(\rho)\cos(m\theta)$$

liché (záporné)

$$Z_n^{-m}(\rho,\theta) = R_n^m(\rho)\sin(m\theta)$$

kde

$$0 \le \rho \le 1$$

$$0 \le \theta \le 2\pi$$

Zernikovy polynomy komplexní

$$Z_n^m(\rho,\theta) = R_n^m(\rho)\mathrm{e}^{\mathrm{i}m\theta}$$

$$\text{kde } R_n^m(\rho) = \sqrt{\frac{2n+2}{1+\delta_{m0}}} \times \sum_{k=0}^{\frac{n-|m|}{2}} \frac{(-1)^k (n-k)!}{k!\left(\frac{n+|m|}{2}-k\right)!\left(\frac{n-|m|}{2}-k\right)!}\rho^{n-2k}$$

je radiální funkce

a kombinace $n \pm |m|$ je vždy sudá

Počet $(n+1)$ Zernikeho polynomů daného řádu n je zřejmý:

Například polynom druhého řádu $n = 2$ obecně

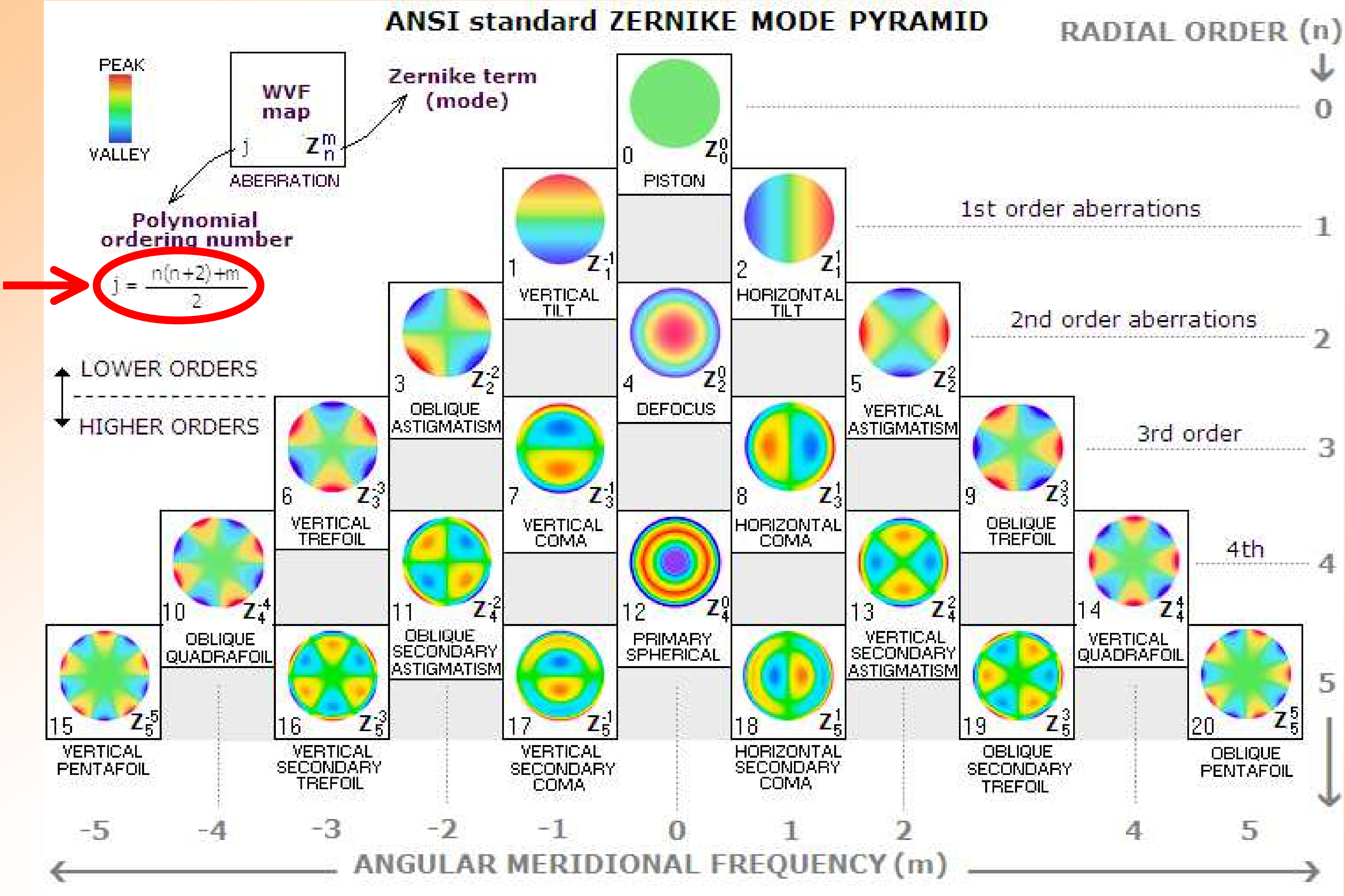
$$Z_2^m = ax^2 + bxy + cy^2 + dZ_1^{+1} + eZ_1^{-1} + fZ_0^0$$

má právě $n+1 = 3$ další nezávislé koeficienty a,b,c

(3 další nezávislé funkce x^2, xy a y^2 na jednotkovém kruhu),

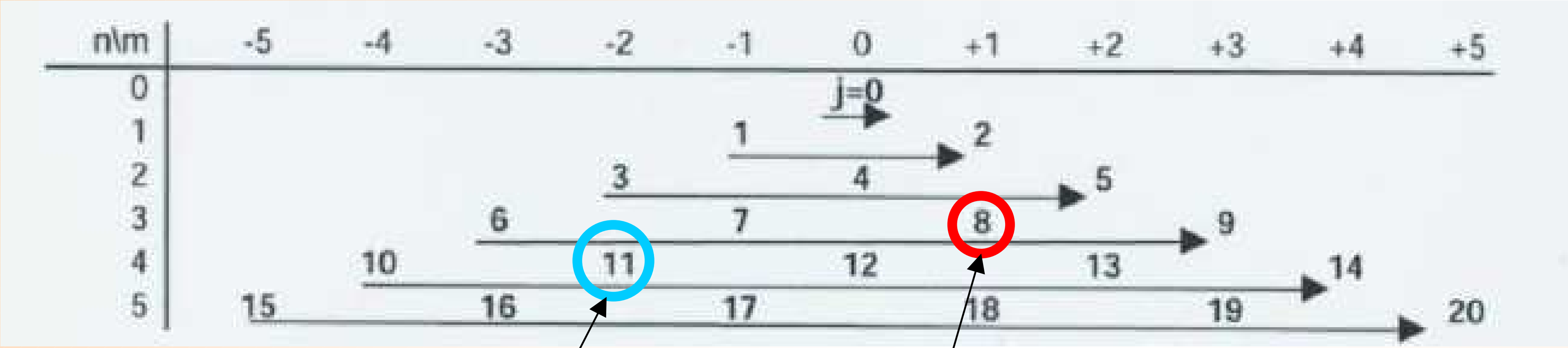
a proto existují právě 3 možné hodnoty vedlejšího indexu $m = -2,0,2$

pro Zernikeho polynomy druhého řádu Z_2^m



ANSI standard ZERNIKE MODE PYRAMID
RADIAL ORDER (n)
PEAK
VALLEY
WVF map
ABERRATION
Zernike term (mode)
Polynomial ordering number
$j = \frac{n(n+2)+m}{2}$
LOWER ORDERS
HIGHER ORDERS
0 PISTON
1 VERTICAL TILT
2 HORIZONTAL TILT
3 OBLIQUE ASTIGMATISM
4 DEFOCUS
5 VERTICAL ASTIGMATISM
6 VERTICAL TREFOIL
7 VERTICAL COMA
8 HORIZONTAL COMA
9 OBLIQUE TREFOIL
10 OBLIQUE QUADRAFOIL
11 OBLIQUE SECONDARY ASTIGMATISM
12 PRIMARY SPHERICAL
13 VERTICAL SECONDARY ASTIGMATISM
14 VERTICAL QUADRAFOIL
15 VERTICAL PENTAFOIL
16 VERTICAL SECONDARY TREFOIL
17 VERTICAL SECONDARY COMA
18 HORIZONTAL SECONDARY COMA
19 OBLIQUE SECONDARY TREFOIL
20 OBLIQUE PENTAFOIL
1st order aberrations
2nd order aberrations
3rd order
4th
ANGULAR MERIDIONAL FREQUENCY (m)

Přepočet indexů j → n,m



modové číslo : $\boxed{j = \dfrac{n(n+2)+m}{2}}$

radiální číslo (řád) : $n = \left\lfloor \dfrac{-1+\sqrt{1+8j}}{2} \right\rfloor$ zaokrouhli dolů

úhlové číslo (frekvence) : $m = 2j - n(n+2)$

Například $n = 3, m = 1$ dává $j = (3*5+1)/2 = 8$ a tedy $\boxed{Z_3^1 = Z_8}$

a naopak $j = 11$ dává $n = \left\lfloor \dfrac{-1+\sqrt{1+8*11}}{2} \right\rfloor = \lfloor 4.22 \rfloor = 4$

a $m = 2*11 - 4*6 = -2$ a tedy $\boxed{Z_{11} = Z_4^{-2}}$

Rozklad funkce do Zernikeho polynomů, Zernikeho koeficienty

Aberační funkci W rozkládáme do Zernikeho polynomů Z_n^m

$$W = \sum_{m,n} c_n^m Z_n^m = c_0^0 Z_0^0 + c_1^{-1} Z_1^{-1} + c_1^1 Z_1^1 + c_2^{-2} Z_2^{-2} + c_2^0 Z_2^0 + c_2^2 Z_2^2 + \ldots,$$

tak dostaneme Zernikovy koeficienty c_n^m.

Díky ortonormalitě Z_n^m se snadno najdou **Zernikeho koeficienty** c_n^m k funkci $W = \sum_{m,n} c_n^m Z_n^m$.

Pokud W vynásobíme $Z_{n'}^{m'}$ a vystředujeme přes jednotkový disk, dostaneme

$$\overline{W Z_{n'}^{m'}} = \sum_{m,n} c_n^m \overline{Z_n^m Z_{n'}^{m'}} = \sum_{m,n} c_n^m \delta_{nn'} \delta_{mm'} = c_{n'}^{m'}$$

tedy pro hledané Zernikovy koeficienty c_n^m platí :

$$c_n^m = \overline{W Z_n^m}$$

Ve skutečnosti aberometr počítá podle vzorce :

$$c_n^m \approx \frac{1}{N} \sum_{k=1}^{N} W(x_k, y_k) Z_n^m (x_k, y_k),$$

kde se sčítá přes celou mřížku N bodů (x_k, y_k)

POZOR!

Zernikeho koeficienty c_n^m závisí na velikosti R pupily!

$$c_n^m \propto R^n$$

Matematická definice:

ortogonalita :

$$\overline{Z_n^m Z_{n'}^{m'}} = \delta_{nn'} \delta_{mm'}$$

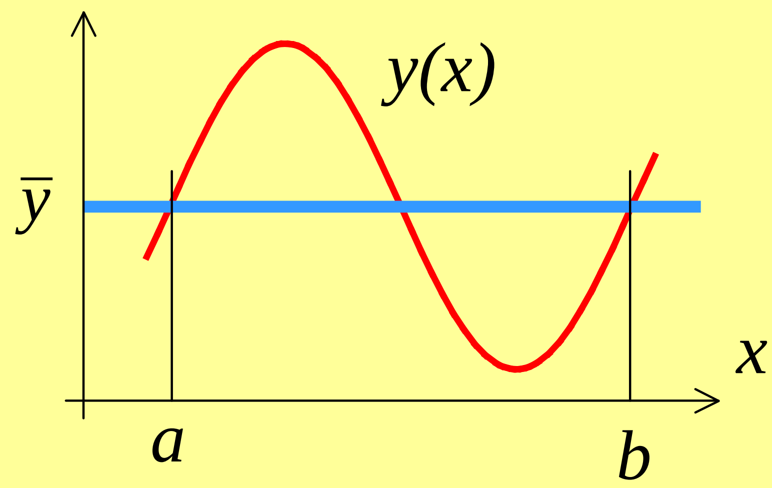
norma :

$$\overline{Z_n^m Z_n^m} = 1,$$

kde $\overline{W}$ značí střední hodnotu funkce W přes jednotkový disk S :

$$\overline{W} = \frac{1}{S} \int_S W \mathrm{d}S$$

Střední hodnota $\bar{y}$
funkce $y(x)$
na intervalu (a,b)



Výpočet střední hodnoty:

Například:

$$\bar{1} = \frac{1}{S}\int 1\mathrm{d}S = \frac{1}{S}S = 1,$$

$$\bar{x} = \frac{1}{S}\int x\mathrm{d}S = 0, \text{ (plyne ze symetrie, } Z_0^0 = 1 \text{ a } Z_1^1 = 2x \text{ kolmé)}$$

$$\bar{y} = \frac{1}{S}\int y\mathrm{d}S = 0, \text{ (tedy } Z_0^0 = 1 \text{ a } Z_1^{-1} = 2y \text{ kolmé)}$$

$$\overline{xy} = \frac{1}{S}\int xy\mathrm{d}S = 0, \text{ (tedy } Z_1^1 = 2x \text{ a } Z_1^{-1} = 2y \text{ kolmé)}$$

ale

$$\overline{x^2} = \frac{1}{S}\int x^2\mathrm{d}S = \frac{1}{S}\int_0^{2\pi}\int_0^1 \rho^2\cos^2\theta\,\rho\mathrm{d}\rho\mathrm{d}\theta = \frac{1}{\pi}\int_0^1\rho^3\mathrm{d}\rho\int_0^{2\pi}\cos^2\theta\,\mathrm{d}\theta = \frac{1}{\pi}\frac{1}{4}\pi = \frac{1}{4}$$

a podobně $\overline{y^2} = \frac{1}{4}$ (tedy normované $\boxed{Z_1^{-1} = 2y}$ a $\boxed{Z_1^1 = 2x}$), a proto také

$$\overline{2\rho^2 - 1} = \overline{2x^2 + 2y^2 - 1} = 2\overline{x^2} + 2\overline{y^2} - 1 = 2\frac{1}{4} + 2\frac{1}{4} - 1 = 0, \text{ (tedy } Z_0^0 = 1 \text{ a } Z_2^0 = \sqrt{3}\left(2\rho^2 - 1\right) \text{ kolmé)}$$

Podobně :

$$\overline{x^4} = \overline{y^4} = \frac{1}{\pi}\int_0^1 \rho^5 \mathrm{d}\rho \int_0^{2\pi} \cos^4\theta \,\mathrm{d}\theta = \frac{1}{\pi}\frac{1}{6}\frac{3\pi}{4} = \frac{1}{8},$$

$$\overline{x^2 y^2} = \frac{1}{\pi}\int_0^1 \rho^5 \mathrm{d}\rho \int_0^{2\pi} \cos^2\theta \sin^2\theta \,\mathrm{d}\theta = \frac{1}{\pi}\frac{1}{6}\frac{\pi}{4} = \frac{1}{24},$$

$$\overline{\rho^4} = \overline{\left(x^2 + y^2\right)^2} = \overline{x^4 + 2x^2 y^2 + y^4} = \frac{1}{8} + 2*\frac{1}{24} + \frac{1}{8} = \frac{1}{3}.$$

Protože $\overline{\left(2\rho^2 - 1\right)^2} = \overline{4\rho^4 - 4\rho^2 + 1} = 4*\frac{1}{3} - 4*\frac{1}{2} + 1 = \frac{1}{3}$,

bude normovaný polynom $\boxed{Z_2^0 = \sqrt{3}\left(2\rho^2 - 1\right),}$ a protože

$$\overline{\left(x^2 - y^2\right)^2} = \overline{x^4 - 2x^2 y^2 + y^4} = \frac{1}{8} - 2\frac{1}{24} + \frac{1}{8} = \frac{1}{6}$$

nebo $\overline{(xy)^2} = \overline{x^2 y^2} = \frac{1}{24}$,

bude normovaný polynom $\boxed{Z_2^2 = \sqrt{6}\left(x^2 - y^2\right)}$ a $\boxed{Z_2^{-2} = \sqrt{24}xy = \sqrt{6}\,2xy.}$

Protože $\overline{\left(x^2 - y^2\right)(xy)} = \overline{x^3 y - xy^3} = 0$ budou Z_2^2 a Z_2^{-2} kolmé

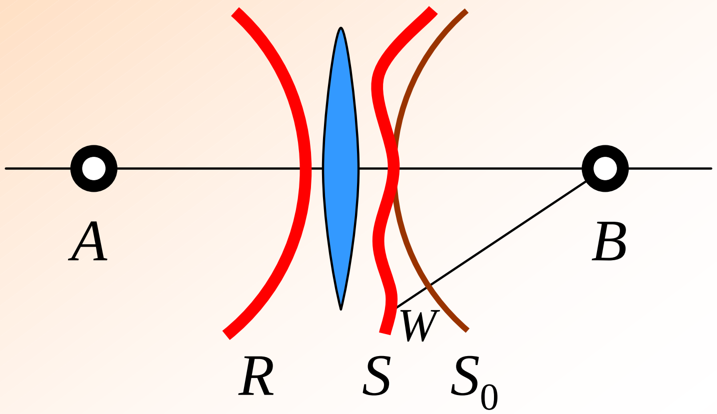
a podobně protože $\overline{\left(2\rho^2 - 1\right)(xy)} = \overline{2x^3 y + 2xy^3 - xy} = 0$ budou Z_2^0 a Z_2^{-2} kolmé.

Aberační funkce

Aberace je možno zkoumat paprskově (Seidel) nebo vlnově (Airy, Fraunhoffer, Abbe, Zernike)
Analýza vlnoplochy (wavefront analysis, aberometry)
Aberační funkce (vlnové aberace) *W*

Vlnoplocha

Množina bodů o stejné fázi, obvykle sféra nebo rovina



Ideálně z bodu *A* vycházející sférická vlnoplocha *R* se transformuje na čočce ve sbíhavou sférickou vlnoplochu S_0, která vytvoří bodový obraz *B*.
Reálně se místo sférické vlnoplochy S_0 pozoruje porušená vlnoplocha *S* a jejich rozdíl $W = S - S_0$ představuje **aberační funkci** (vlnovou aberaci)
Místo bodu *B* dostaneme v obrazové rovině rozmazanou plošku
Vlnové aberace se měří v obrazovém prostoru za optickým přístrojem (u oka to nejde!)

Aberační funkce z hlediska paprskové optiky :

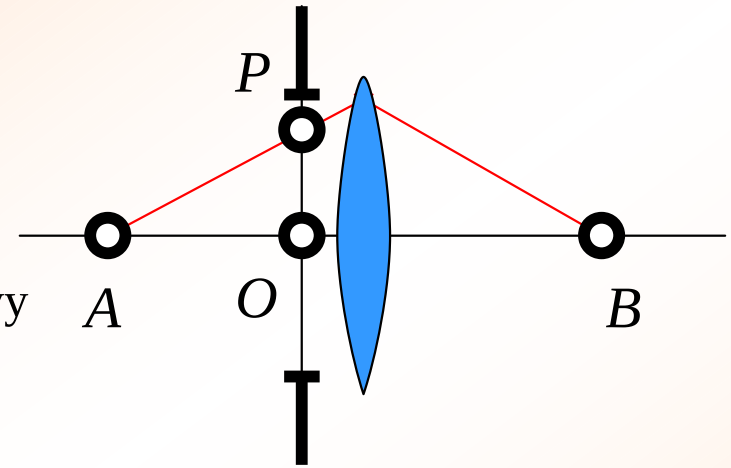
$W(x,y)=W(P)=l(P)-l(O)$

kde $l(P)=l(APB)$ a $l(O)=l(AOB)$ jsou optické dráhy $l=\int n ds$

a $P=(x,y)$ a $O=(0,0)$ jsou body ve vstupní pupile optické soustavy

Ideální soustava má podle Fermatova principu $W(x,y)=0$,

reálná soustava má $W(x,y)\neq 0$.

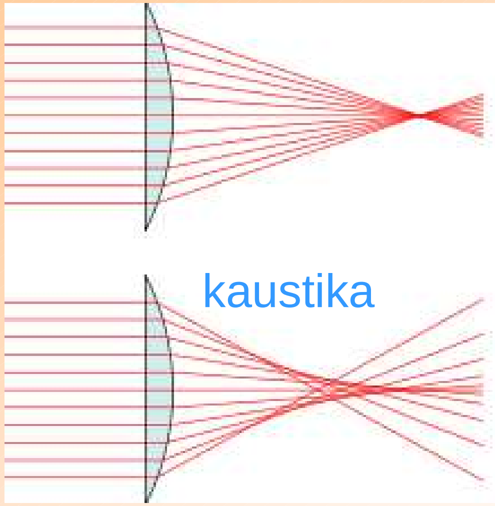


Obecně z definice je $W(0,0)=W(O)=0$.

Zdroje aberací oka:

Nepravidelnosti a nerovnoměrnosti oka, především rohovky a čočky, tj. asféričnost lámavých ploch a nehomogenity optických médií, dále třeba disperze, odchlípení sítnice …

Monochromatické aberace (Seidelova aproximace)



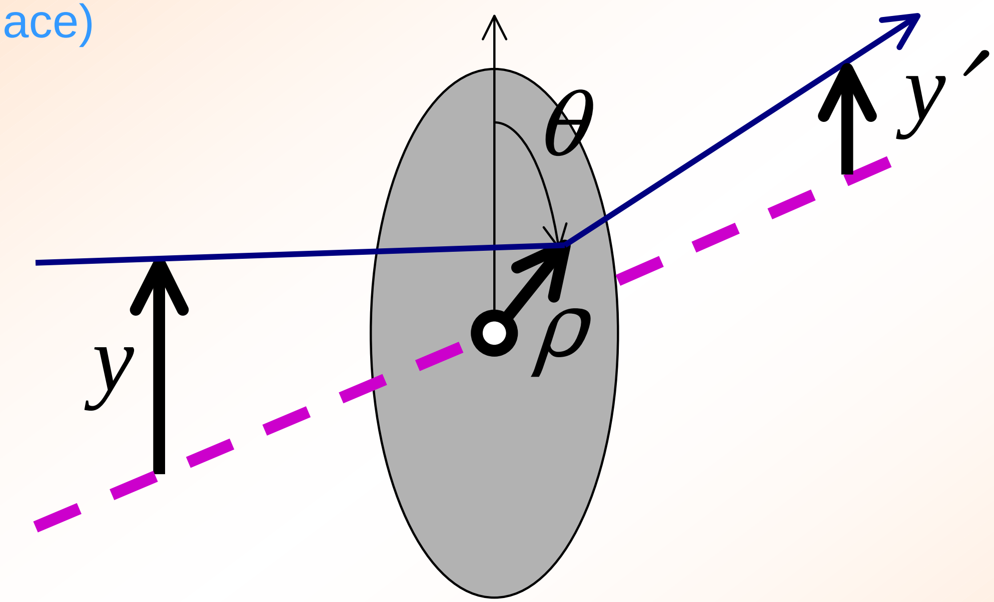
sférická vada

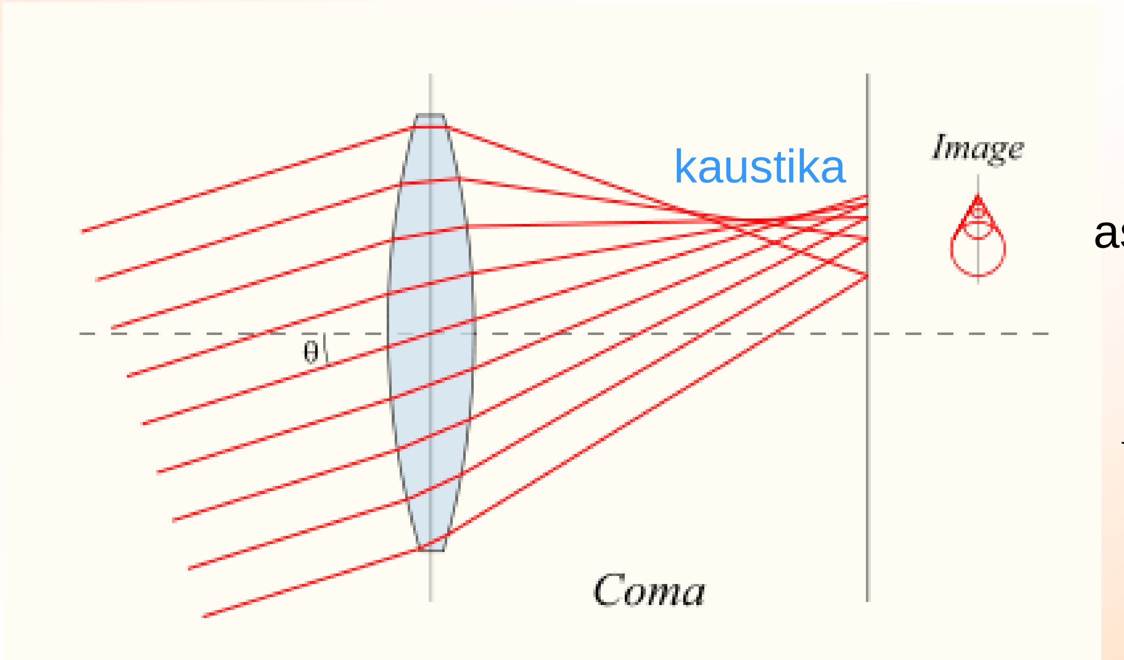
=

symetrická aberace širokých svazků

$$W \propto \rho^4$$

$$W \propto Z_4^0$$





koma

=

asymetrická aberace šikmých a širokých svazků

$$W \propto y\rho^3 \cos\theta$$

$$W \propto Z_3^1$$

astigmatismus (simplex)

$$W \propto y^2 \rho^2 \cos^2 \theta$$

$$W \propto Z_2^2 \oplus Z_2^0$$

astigmatismus (mixtus)

$$W \propto y^2 \rho^2 \cos 2\theta$$

$$W \propto Z_2^2$$

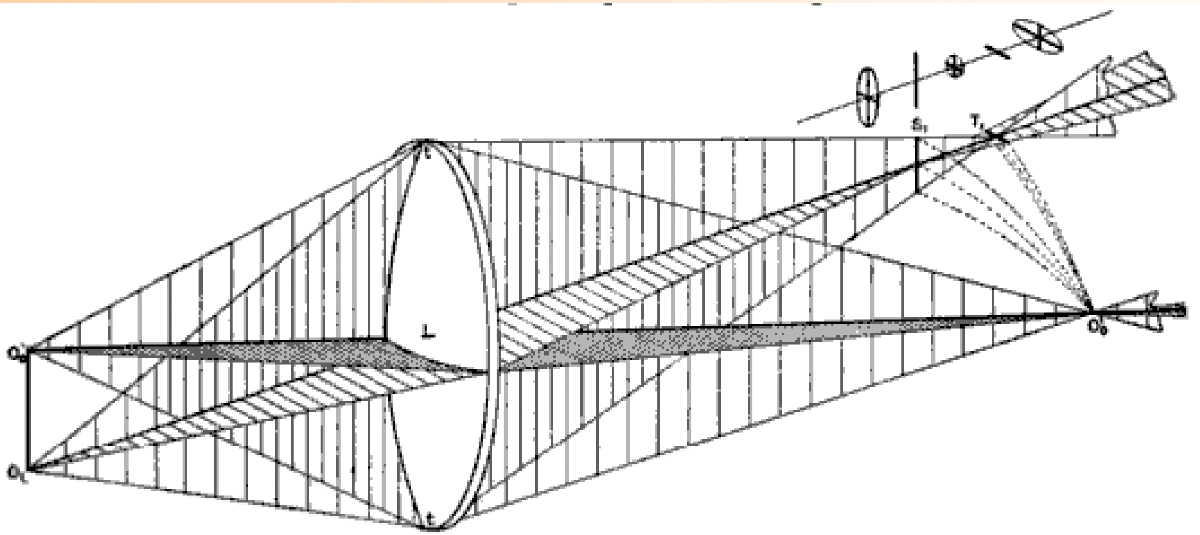
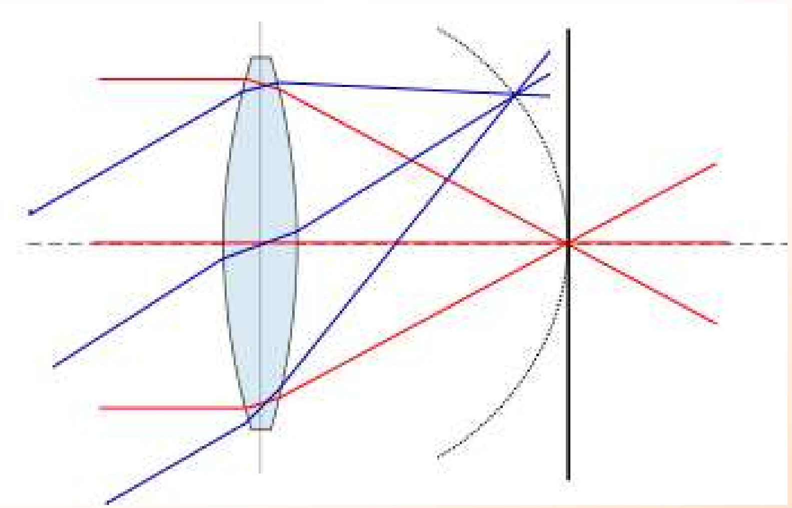


Fig. 22.

zklenutí pole

$$W \propto y^2 \rho^2$$

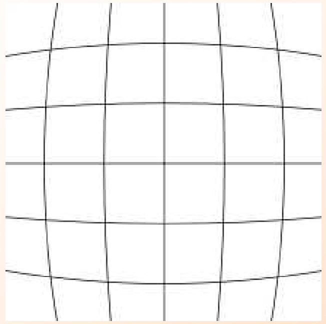
$$W \propto Z_2^0$$



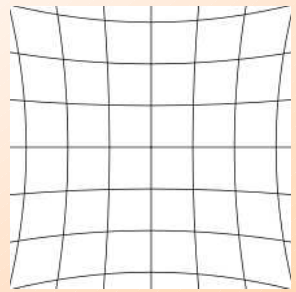
zkreslení

$$W \propto y^3 \rho \cos \theta$$

$$W \propto Z_1^1$$



soudkovité

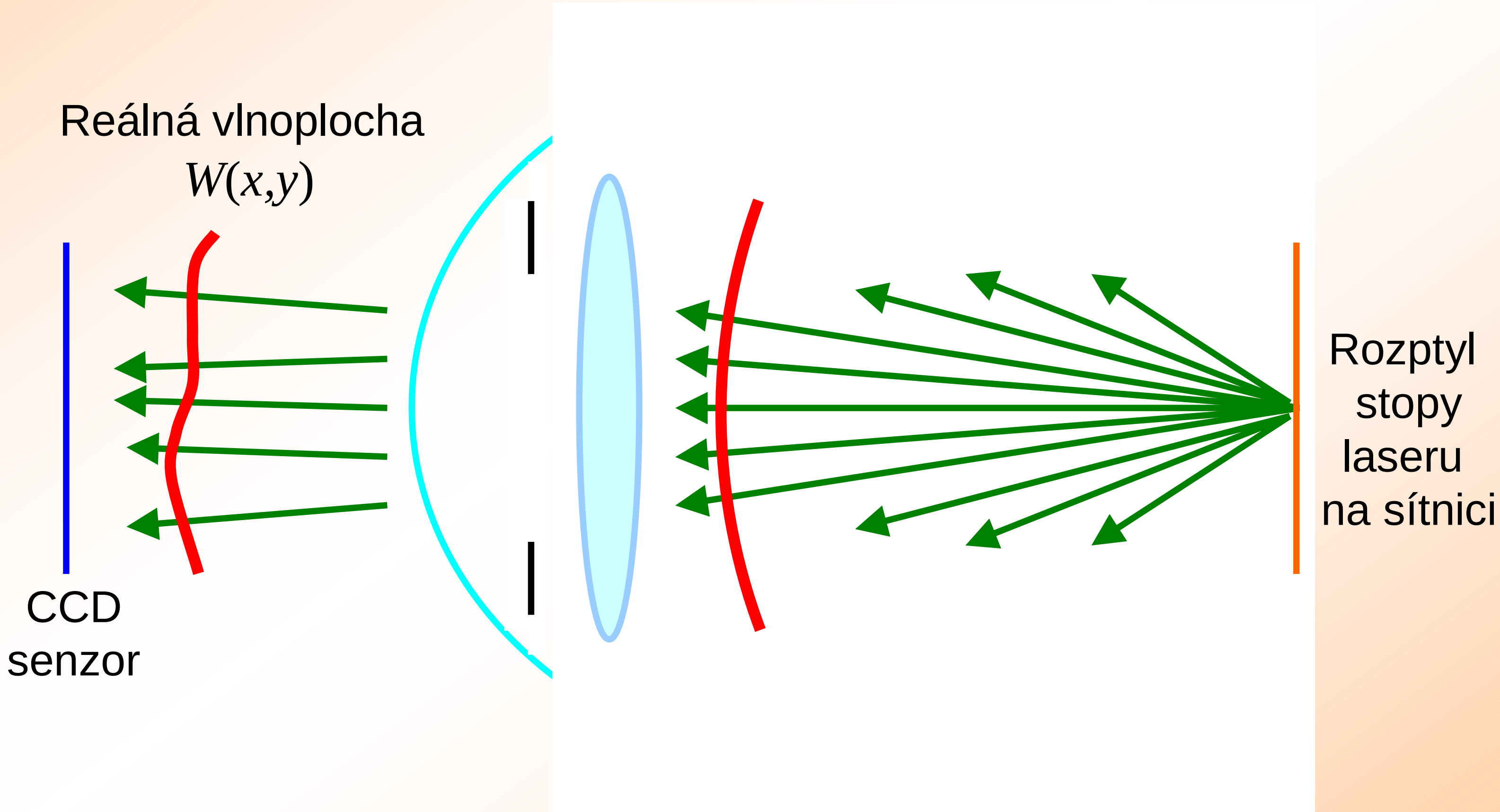


poduškovité

Aberometrie oka metodou wavefront analysis

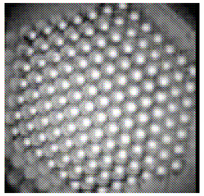
Zkoumáním vlnoplochy (wavefront analysis) se měří i aberace oka, jen se musí vytvořit umělý zdroj světla na sítnici a využije se obrácený chod paprsků

Automaticky a objektivně měří aberace oka aberometr (wavefront aberometer), který využívá Shack-Hartmannův senzor a rychlou numerickou analýzu vlnoplochy



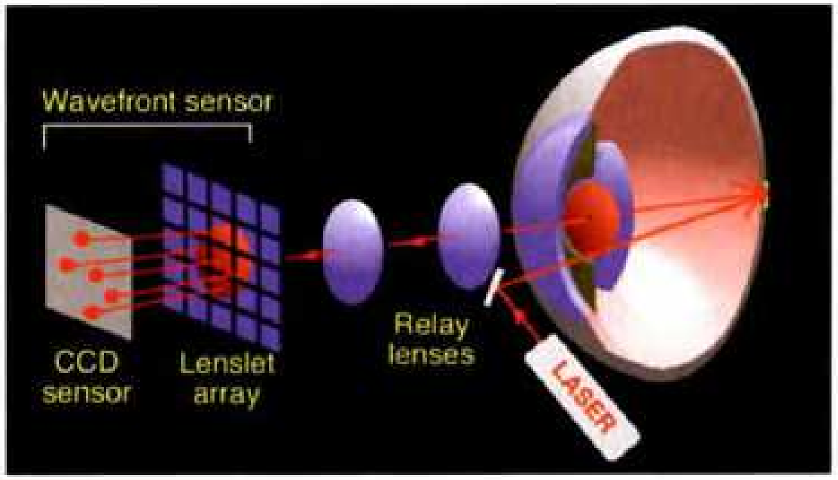
Shack-Hartmannův senzor

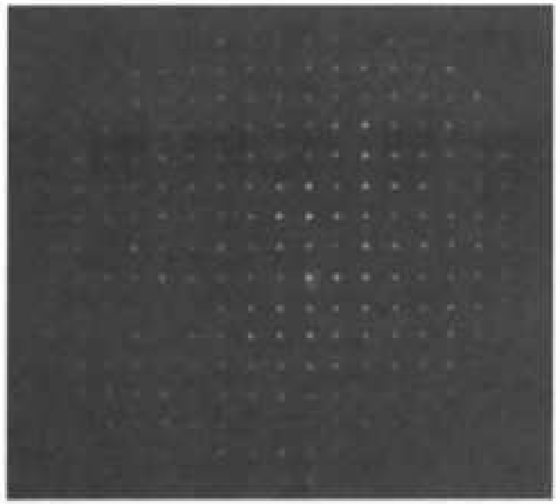
Apertura s mřížkou malých čoček (typicky rozměr mikročočky 0.1 mm)
Dopadá-li neporušená rovinná vlna, dostaneme za SHS pravidelnou mřížku bodů
Dopadá-li porušená vlna, bude mřížka nepravidelná a body rozmazané



maska mikročoček

Laserem se osvětlí sítnice oka, stopa se zobrazí SH senzorem na CCD snímač o rozměru apertury oka
U dokonalého oka se dostane rovinná vlna a tedy pravidelná mřížka





Obraz porušené mřížky na CCD snímači

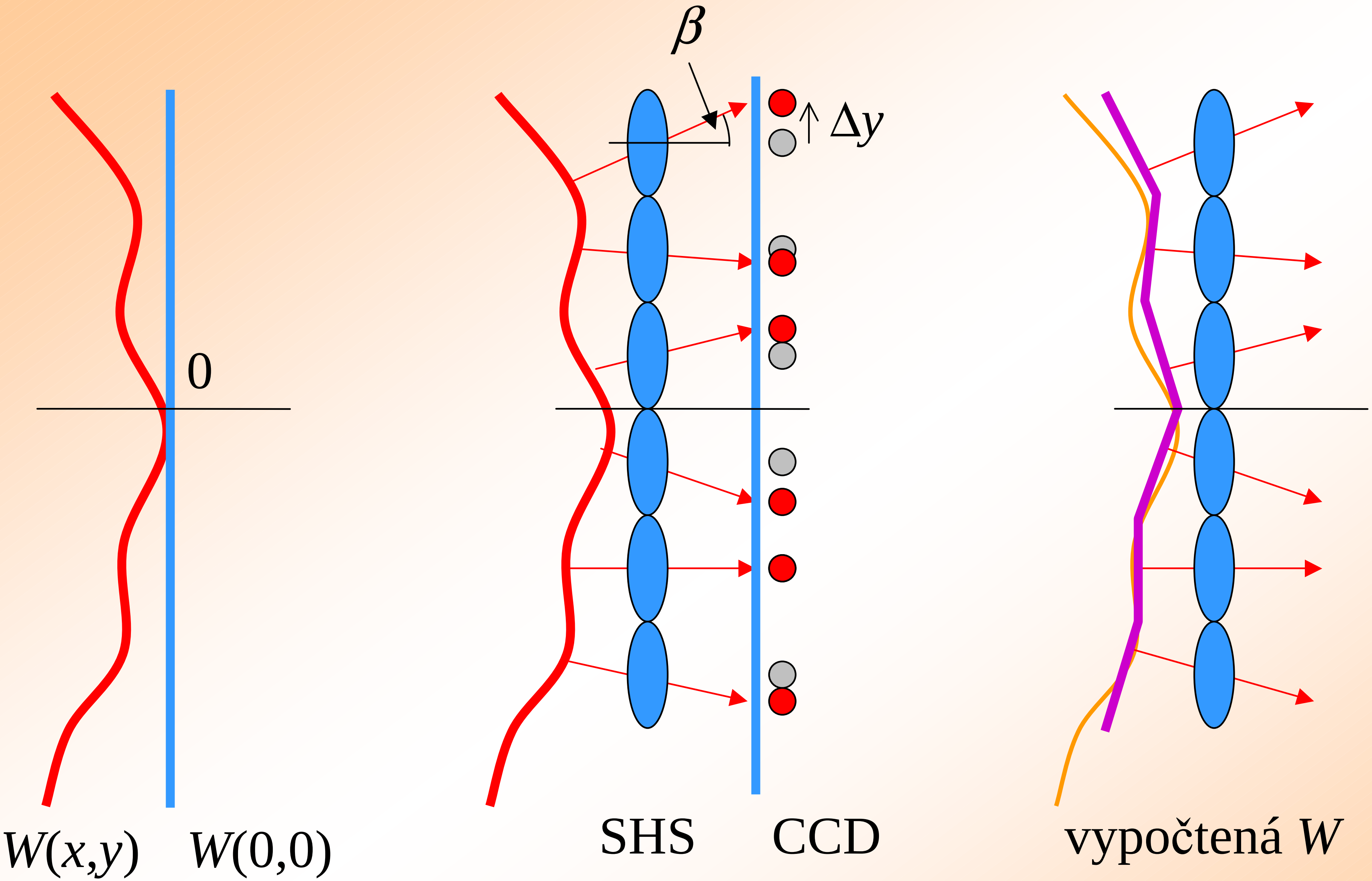
aberační funkce $W = l - l_0$ se najde ze sklonů

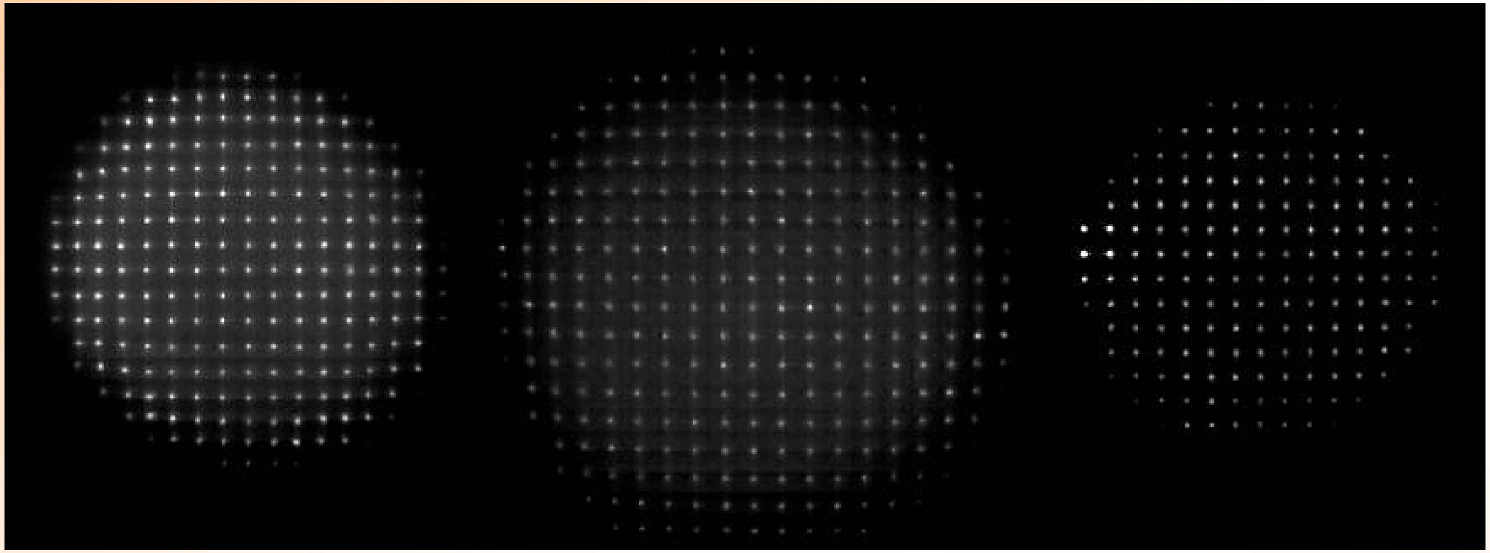
$$\alpha(x,y) = \frac{\partial W}{\partial x} \approx \frac{\Delta x}{f}, \quad \beta(x,y) = \frac{\partial W}{\partial y} \approx \frac{\Delta y}{f}$$

numericky pomocí křivkového integrálu

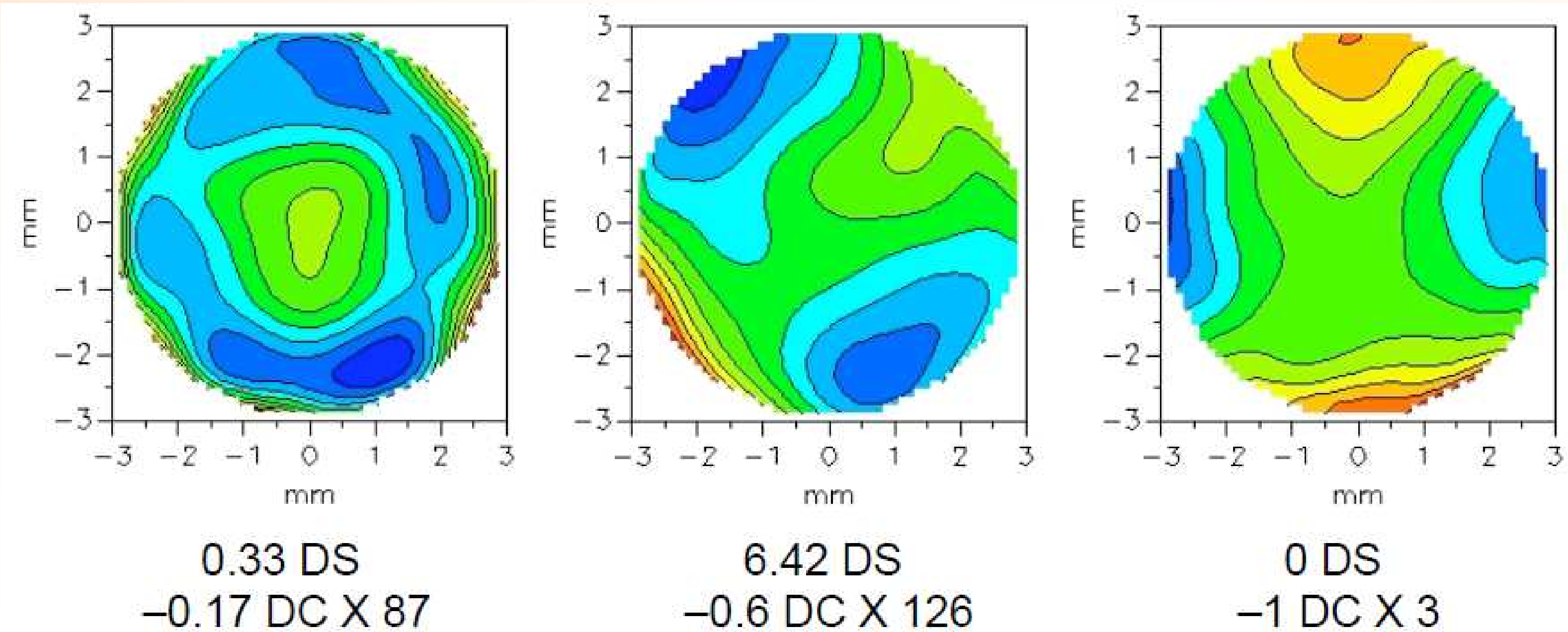
$$W(x,y) = \int_{(0,0)}^{(x,y)} (\alpha \mathrm{d}x + \beta \mathrm{d}y)$$

Práce s aberační funkcí W je nepohodlná (příliš rozsáhlá matice dat, málo názorná), proto se provádí rozklad aberační funkce do Zernikeho polynomů a pracuje se dále jen s Zernikeho koeficienty.


β
Δy
0
W(x,y)
W(0,0)
SHS
CCD
vypočtená W



Shack-Hartmann sensor image



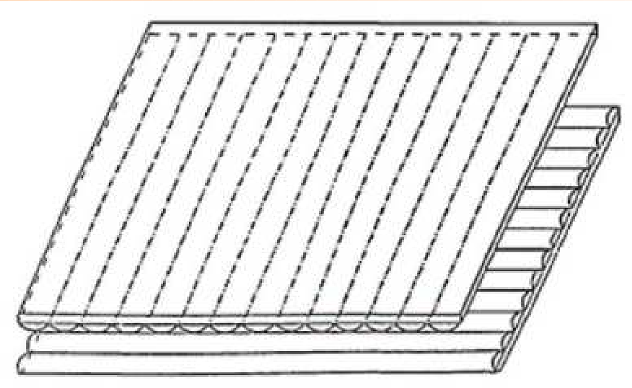
Wavefront maps

Z historie Shack-Hartmannova senzoru

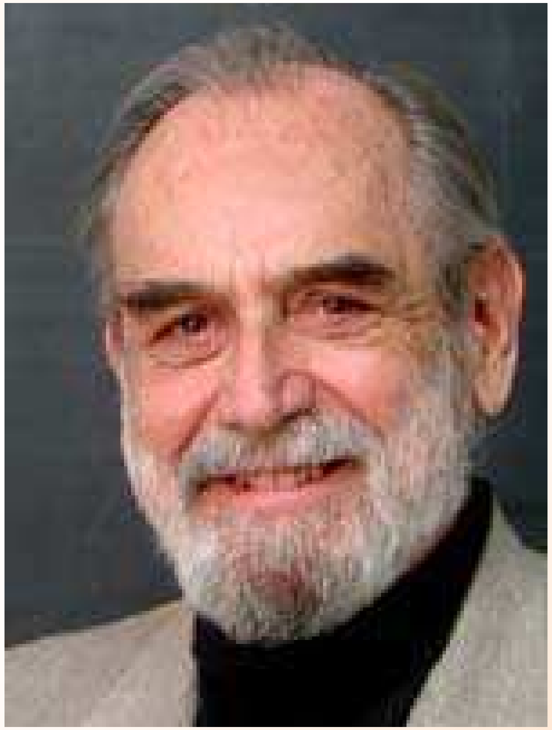
Johannes Franz Hartmann, astrofyzik, kolem roku 1900 používá na testování kvality objektivů masku s několika malými otvory (Hartmannova maska, Scheinerova maska)

Během studené války snaha o zlepšení kvality satelitních špionážních snímků vede k vzniku adaptivní optiky, ta potřebuje znát velikost deformace vlnoplochy po průchodu atmosférou, proto koncem 60. let **Roland Shack** a **Ben Platt** vylepšují Hartmannovu masku řadou malých čoček.

Kolem roku 1985 (**Josef Bille**, Heidelberg) první aplikace SHS v oftalmologii: topografie rohovky, později aberometrie oka

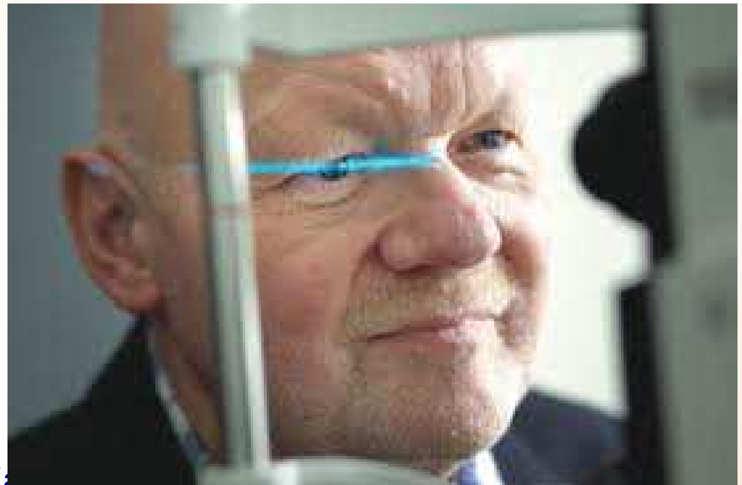


První komerční masky pro SHS



Roland Shack
1927 - *

Johannes Franz Hartmann
1865 - 1936



Josef Bille 1944 - *

Kvantifikace aberace – RMS aberační funkce (RMS wavefront error)

$$\mathrm{RMS}=\sqrt{\overline{(\Delta W)^2}}=\sqrt{\overline{(W-\overline{W})^2}}=\sqrt{\frac{1}{N}\sum_{k=1}^{N}\left(W(x_k,y_k)-\overline{W}\right)^2}$$

RMS je směrodatná odchylka (odmocnina z variance) vlnové aberace (aberační funkce *W)* na apertuře. Místo aberační funkce W pracujeme raději s Zernikeho koeficienty c_n^m, díky ortonormalitě Zernikeho polynomů platí:

$$\mathrm{RMS}=\sqrt{\overline{(W-\overline{W})^2}}=\sqrt{\overline{\left(\sum_{n>0}\sum_m c_n^m Z_n^m\right)^2}}=\sqrt{\sum_{n>0}\sum_m\sum_{n'>0}\sum_{m'}c_n^m c_{n'}^{m'}\overline{Z_n^m Z_{n'}^{m'}}}$$

ale $\overline{Z_n^m Z_{n'}^{m'}}=0$ pro $n\neq n'$ a $m\neq m'$ a $\overline{Z_n^m Z_{n'}^{m'}}=1$ pro $n=n'$ a $m=m'$, takže

$$\mathrm{RMS}=\sqrt{\sum_{n>0}\sum_m\left(c_n^m\right)^2}=\sqrt{\left(c_1^{-1}\right)^2+\left(c_1^{1}\right)^2+\left(c_2^{-2}\right)^2+\left(c_2^{0}\right)^2+\left(c_2^{2}\right)^2+\ldots}$$

jen c_0^0 z rozvoje vypadne, neboť $\overline{W}=c_0^0$

platí také

$$\mathrm{RMS}=\sqrt{\overline{(W-\overline{W})^2}}=\sqrt{\overline{W^2}-\overline{W}^2}$$

Je-li aberace dána pouze sférou (defokus),

platí $W=c_2^0 Z_2^0$, takže $\mathrm{RMS}=\left|c_2^0\right|$.

Je-li aberace dána pouze zkříženým cylindrem (astigmatismus mixtus),

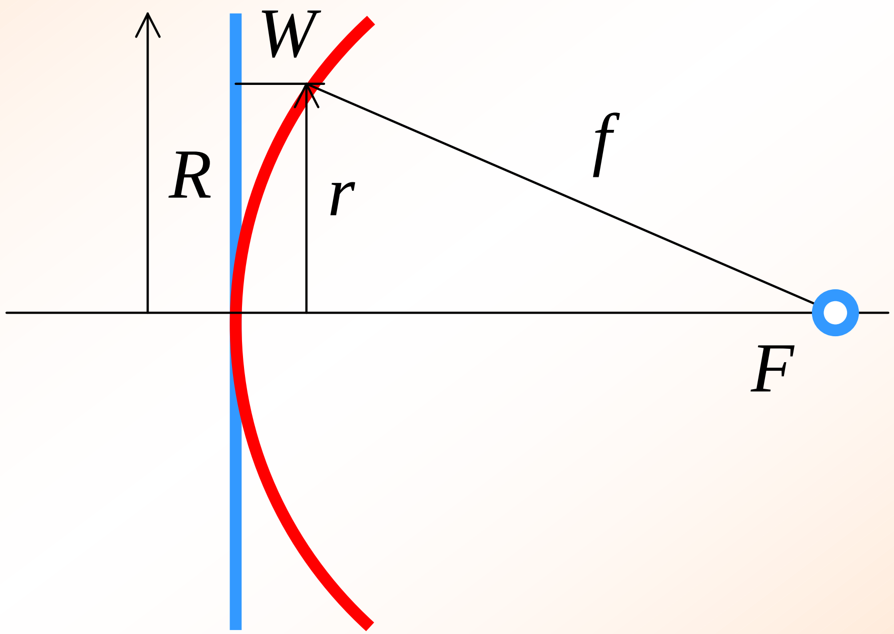
platí $W=c_2^{\pm2}Z_2^{\pm2}$, takže $\mathrm{RMS}=\left|c_2^{\pm2}\right|$

Je-li aberace dána pouze sférou i cylindry,

platí $W=c_2^0 Z_2^0+c_2^{-2}Z_2^{-2}+c_2^2 Z_2^2$, takže $\mathrm{RMS}=\sqrt{\left(c_2^{-2}\right)^2+\left(c_2^{0}\right)^2+\left(c_2^{2}\right)^2}$.

Ekvivalentní defokus

Pro sférickou vlnoplochu o poloměru $f = 1/M$ platí



$$W(r) = f - \sqrt{f^2 - r^2} \approx \frac{r^2}{2f} \approx \frac{1}{2} M r^2$$

a tedy $\overline{W} = \dfrac{MR^2}{4}$ a $\overline{W^2} = \dfrac{M^2 R^4}{12} \rightarrow \mathrm{RMS} = \sqrt{\overline{\Delta W^2}} = \dfrac{MR^2}{4\sqrt{3}}$

Ideální čočka o lámavosti M změní rovinnou vlnoplochu ve sférickou o poloměru $f = 1/M$, takže defokus vlnoplochy v dioptriích je $M = \dfrac{4\sqrt{3}}{R^2}\mathrm{RMS}$

Pro obecnou aberaci definujeme **ekvivalentní defokus** stejným předpisem

$$M_e = \frac{4\sqrt{3}}{R^2}\mathrm{RMS}$$

Ekvivalentní kroužek rozostření

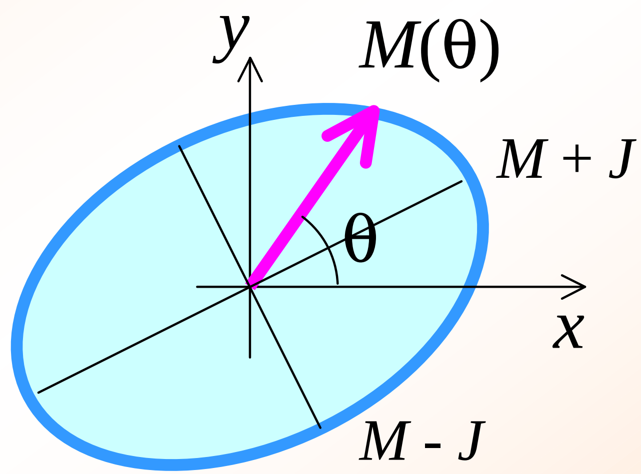
Podobně definujeme **ekvivalentní kroužek rozostření** (blur circle diameter) v úhlové míře

$$B_e = 2RM_e = \frac{8\sqrt{3}}{R}\mathrm{RMS} \quad (\text{v mrad})$$

vízus $V \approx \dfrac{2'}{\sqrt{2'^2 + B_e^2}} \approx \dfrac{2'}{B_e}$ $\quad (1' \approx 0.29\,\mathrm{mrad})$

Příklad: Pro směrodatnou odchylku vlnoplochy RMS $= 1\,\mu$m a pupilu 5 mm ($R = 2.5$ mm)
$\rightarrow M_e \approx 1.1$ D a $B_e \approx 5.5$ mrad $\approx 19'$ a vízus 0.10

Vztah mezi sférou a cylindrem a Zernikovými polynomy



Obecně pro vlnoplochu ve tvaru kvadriky (astigmatismus compositus) platí:

$$W=\frac{1}{2}M\left(x^2+y^2\right)+\frac{1}{2}J_0\left(x^2-y^2\right)+\frac{1}{2}J_{45}2xy, \qquad (*)$$

tj. lámavost ve směru 0° (osa x) je $W=\frac{1}{2}(M\pm J_0)x^2 \rightarrow M(0)=M+J_0$,

ve směru 90° (osa y) je $W=\frac{1}{2}(M-J_0)y^2 \rightarrow M(90°)=M-J_0$,

a ve směru ± 45° ($y=\pm x$) je $W=\frac{1}{2}(M\pm J_{45})r^2 \rightarrow M(\pm 45°)=M\pm J_{45}$,

obecně ve směru θ je $x=r\cos\theta$ a $y=r\sin\theta$ a tedy $W=\frac{1}{2}M(\theta)r^2$, kde

obecná lámavost je $\boxed{M(\theta)=M+J_0\cos 2\theta+J_{45}\sin 2\theta}$

Výsledný cylindr je

$$J=\sqrt{J_0^2+J_{45}^2}$$

takže **maximální a minimální lámavost** je $M\pm\sqrt{J_0^2+J_{45}^2}$ a pozoruje se ve směru $\tan 2\theta=\frac{J_{45}}{J_0}$

Aberační funkci (*) lze přepsat pomocí Zernikových polynomů 2. řádu do tvaru

$$W=c_2^0\left(Z_0^2-Z_0^2(0,0)\right)+c_2^2Z_2^2+c_2^{-2}Z_2^{-2}=c_2^0 2\sqrt{3}\frac{x^2+y^2}{R^2}+c_2^2\sqrt{6}\frac{x^2-y^2}{R^2}+c_2^{-2}2\sqrt{6}\frac{xy}{R^2}$$

a tedy srovnáním obou zápisů $\boxed{M=c_2^0\frac{4\sqrt{3}}{R^2} \text{ a } J_0=c_2^2\frac{2\sqrt{6}}{R^2} \text{ a } J_{45}=c_2^{-2}\frac{2\sqrt{6}}{R^2}}$

Kvantifikace optické kvality oka

(1) číslem

- RMS wavefront error, dokonalé oko RMS = 0
- Ekvivalentní defokus M_e
- Absolutní rozdíl $\Delta W = W_{max} - W_{min}$ (PV-value) podle Rayleigha je pro $\Delta W < \lambda/4$ prakticky dokonalé zobrazení
- Pupilový zlomek (pupile fraction) PF = S/S_0
- Strehlův poměr $S = I/I_0$ (podle Strehla pro S>0.8, prakticky dokonalé zobrazení)

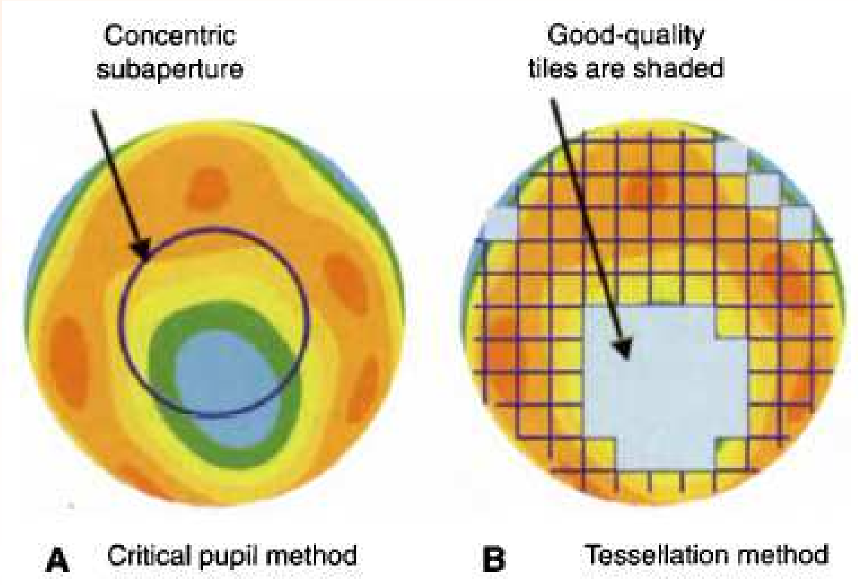
(2) grafem

- Mapa aberačních křížů
- Bodová rozptylová funkce (PSF)
- Optická funkce přenosu (OTF=FT(PSF))
- Modulační přenosová funkce (MTF=|OTF|)

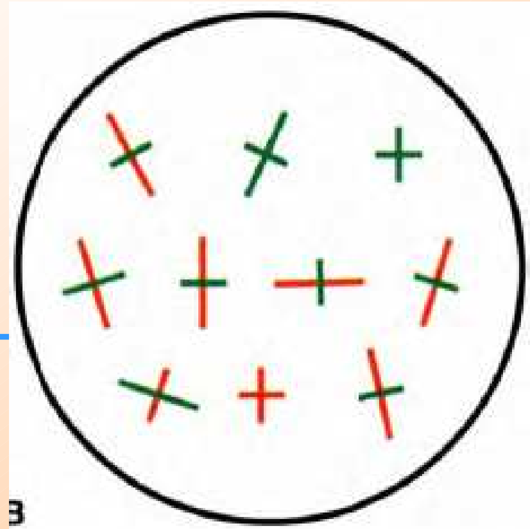
(3) aberační funkcí

- 2D topografie
- 3D zobrazení
- Zernikeho koeficienty

Pupilový zlomek



Mapa aberačních křížů (Power cross map)



ekvivalentní defokus

$$M_e = \frac{4\sqrt{3}}{R^2}\mathrm{RMS}$$

$$= \frac{4\sqrt{3}}{R^2}\sqrt{\left(c_1^{-1}\right)^2 + \left(c_1^{1}\right)^2 + \left(c_2^{-2}\right)^2 + \left(c_2^{0}\right)^2 + \left(c_2^{2}\right)^2 + \ldots}$$

Bodová rozptylová funkce PSF

rozmazaný obraz bodu

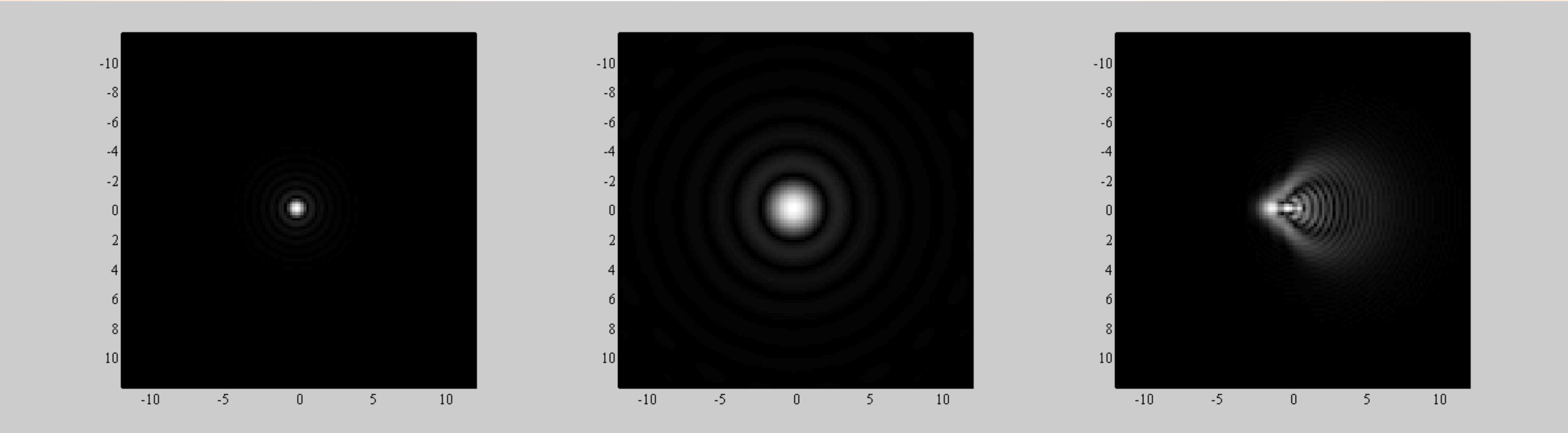
PSF slouží k výpočtu obrazu O obecného předmětu P pomocí konvoluce $\otimes$

$O = P \otimes \mathrm{PSF}$

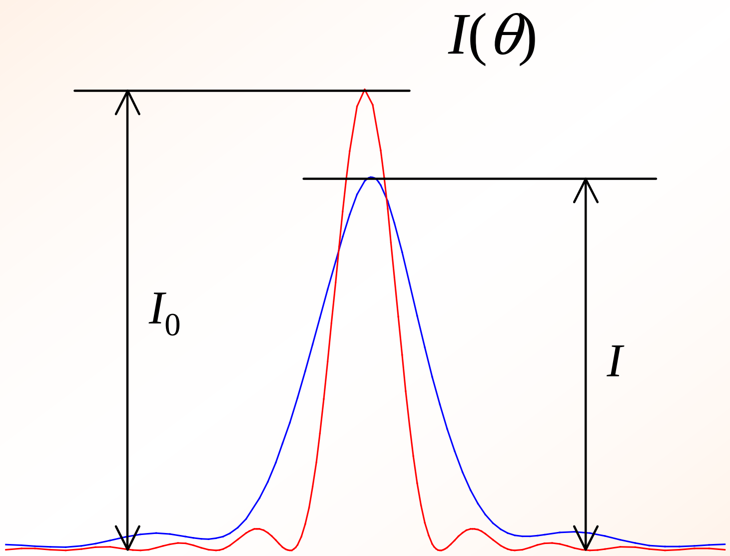
Z Fresnelovy difrakční teorie :

$$\mathrm{PSF}(\alpha, \beta) = \int \exp[\mathrm{i}kW(x, y)]\exp[-\mathrm{i}k(x\alpha + y\beta)]\mathrm{d}x\mathrm{d}y$$

bodová rozptylová funkce



Strehlův poměr



$$\text{Strehlův poměr } S = \frac{I}{I_0} = \frac{\text{maximum reálné intenzity PSP}}{\text{maximum ideální intenzity PSP}}$$

Z Fresnelovy difrakční teorie pro malé RMS plyne:

$$S = \left|\overline{\exp(ikW)}\right|^2 \approx 1 - k^2\mathrm{RMS}^2 \approx \exp\left(-k^2\mathrm{RMS}^2\right)$$

(Maréchalova a Mahajanova aproximace), neboť

$$\left|\overline{\exp(ikW)}\right|^2 = \left|1 + ik\overline{W} - k^2\overline{W^2} + \ldots\right|^2 = 1 - k^2\left(\overline{W^2} - \overline{W}^2\right) + \ldots$$

Strehlovo kriterium pro kvalitní optiku $S > 0.8$

dává $k^2\mathrm{RMS}^2 < 0.2$

neboli $\mathrm{RMS} < \dfrac{\lambda}{2\pi\sqrt{5}} \approx \dfrac{\lambda}{14}$

v optometrii je ale obvykle S << 1

Optická funkce přenosu OTF

OTF=FT(PSF)

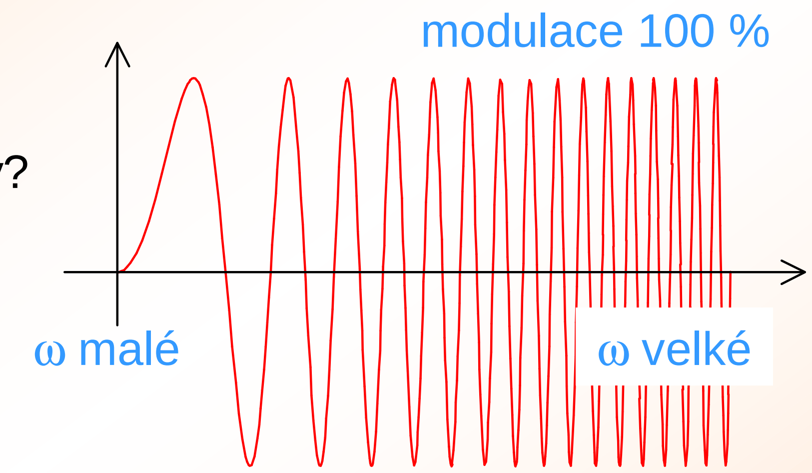
Modulační přenosová funkce MTF

Jak se přenese původně 100% kontrast periodické mřížky?

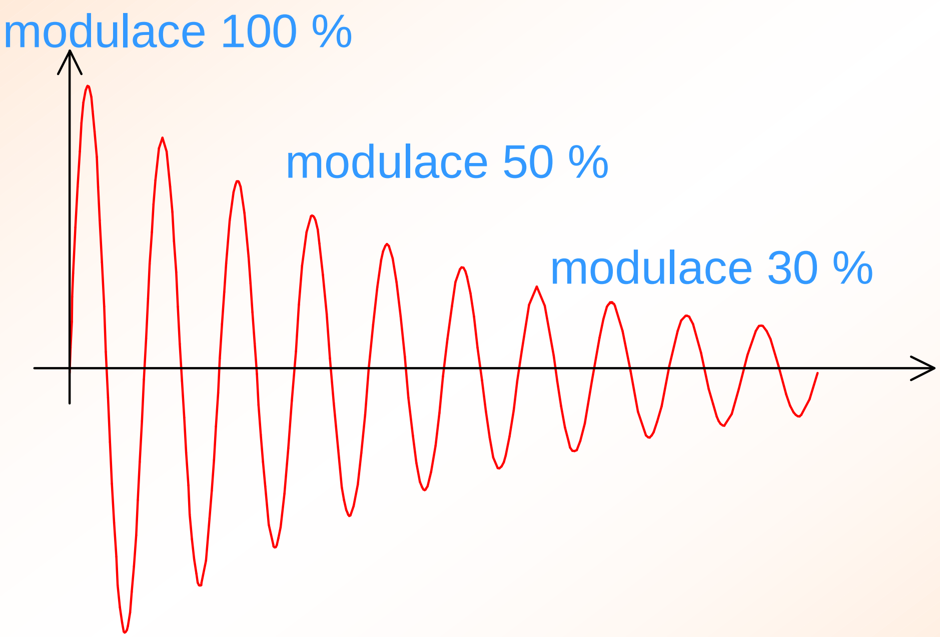
MTF=|OTF|

$$\text{kontrast} = \mathrm{MTF}(\omega) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

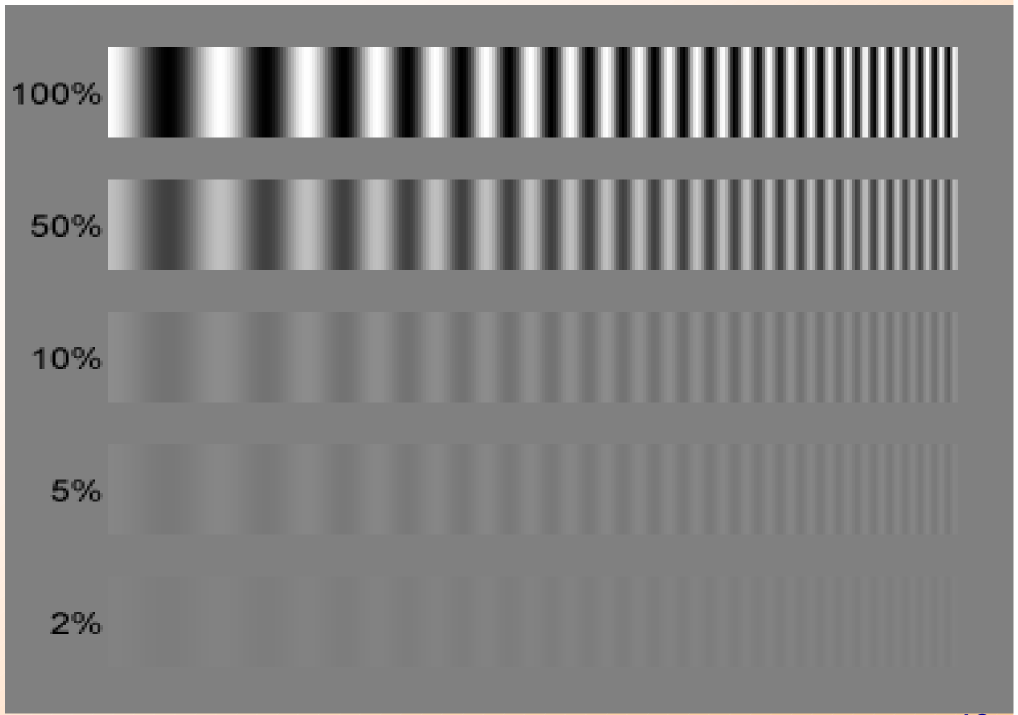
Prostorová frekvence



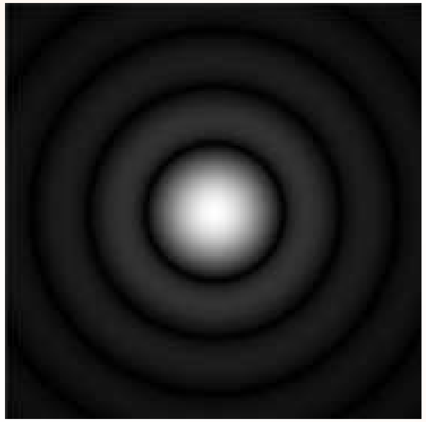
Kontrast (modulace)



kontrast + frekvence



Teoretické hodnoty PSF a OTF



Difrakce na kruhové apertuře *D*=2*R*

Airyho disk $\theta \approx 1.22\lambda/D \approx 0.61\lambda/R$

$$\mathrm{PSF} = \left[\frac{2J_1(kR\sin\theta)}{kR\sin\theta}\right]^2$$

$$\mathrm{OTF} = \frac{2}{\pi}\left[\arccos\omega - \omega\sqrt{1-\omega^2}\right],\ \text{kde}\ \ \omega = \frac{\lambda}{D}\nu_\theta$$

mezní prostorová frekvence:

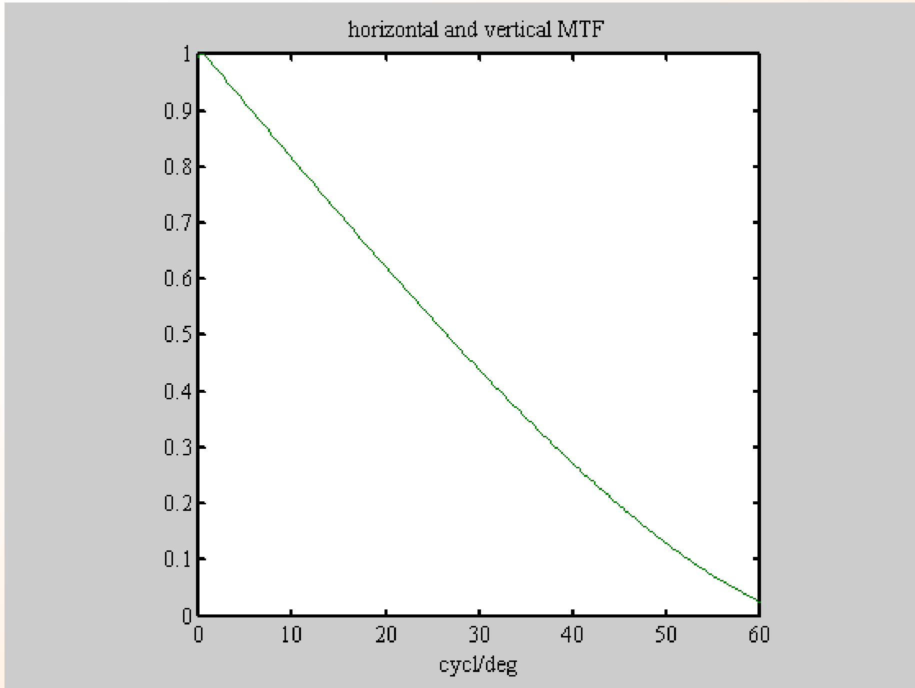
$\nu_\theta = D/\lambda \quad (\omega = 1)$

pro $D = 2$ mm a $\lambda = 555$ nm je mezní frekvence

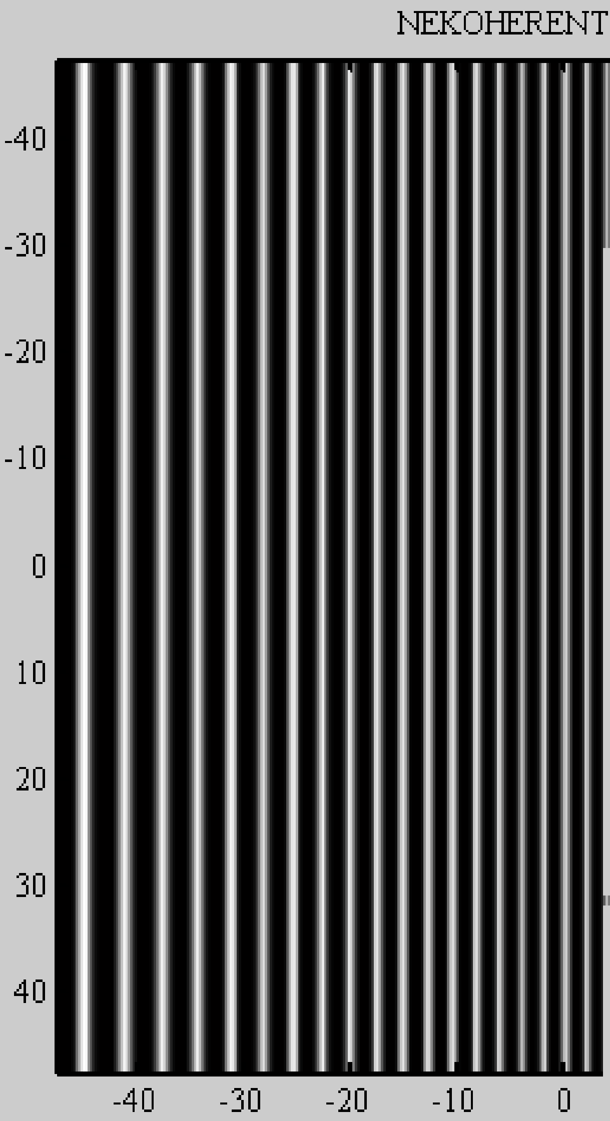
$\nu_\theta \approx 3590$ čar na radián ≈ 63 čar na stupeň

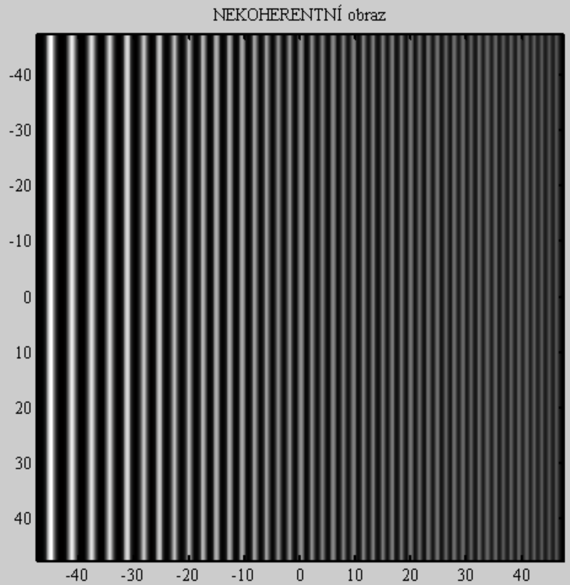
neboli

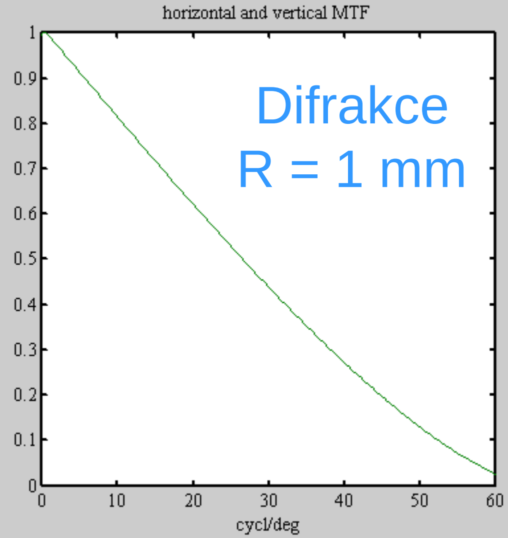
$\nu_\theta \approx 1$ čára na minutu (V ≈ 1)

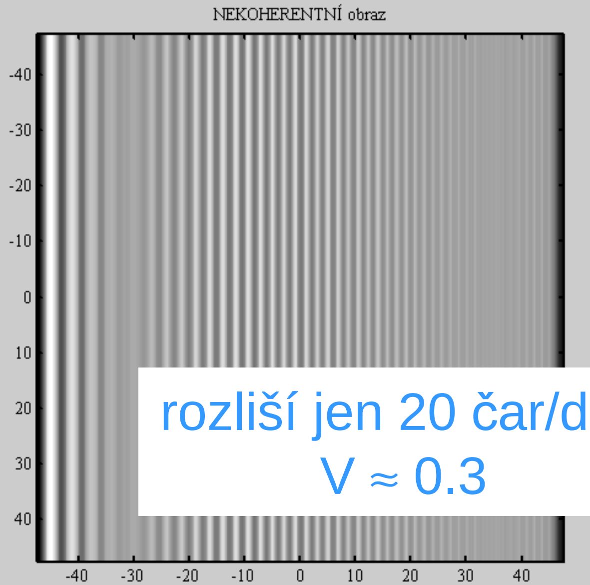


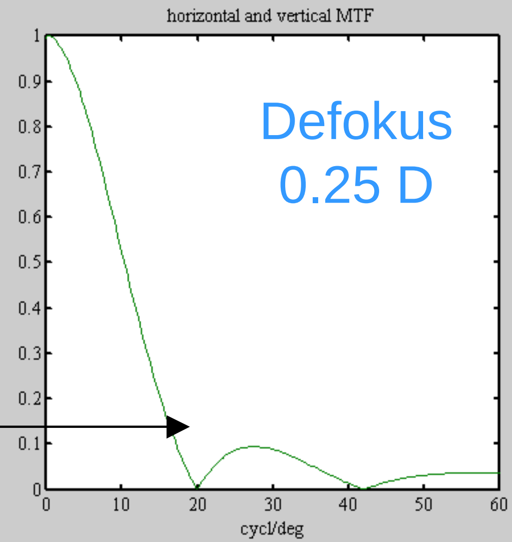
Testovací mřížka
15-40 čar na deg











rozliší jen 20 čar/deg
V ≈ 0.3

Wavefront refraction (prémiová korekce)

Standardně se najde sférocylindrická korekce z Zernikeho koeficientů 2. řádu
(LOA method – odpovídá minimální RMS)
Lepší korekce (prémiová) se dosahuje pomocí oskulační kvadratické plochy
k aberační funkci W ve středu pupily
(HOA method – započtou se i aberace vyšších řádů)

Z Zernikeho koeficientů druhého řádu

$$M = \frac{-c_2^0 4\sqrt{3}}{R^2}$$

$$J_0 = \frac{-c_2^2 2\sqrt{6}}{R^2}$$

$$J_{45} = \frac{-c_2^{-2} 2\sqrt{6}}{R^2}$$

Lepší je oskulační kvadrika

$$M = \frac{-c_2^0 4\sqrt{3} + c_4^0 12\sqrt{5} - c_6^0 24\sqrt{7} + \ldots}{R^2}$$

$$J_0 = \frac{-c_2^2 2\sqrt{6} + c_4^2 6\sqrt{10} - c_6^2 12\sqrt{14} + \ldots}{R^2}$$

$$J_{45} = \frac{-c_2^{-2} 2\sqrt{6} + c_4^{-2} 6\sqrt{10} - c_6^{-2} 12\sqrt{14} + \ldots}{R^2}$$

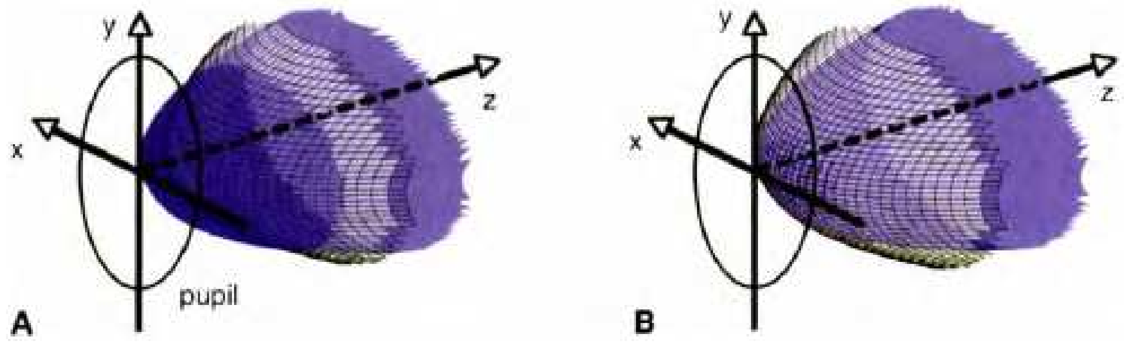
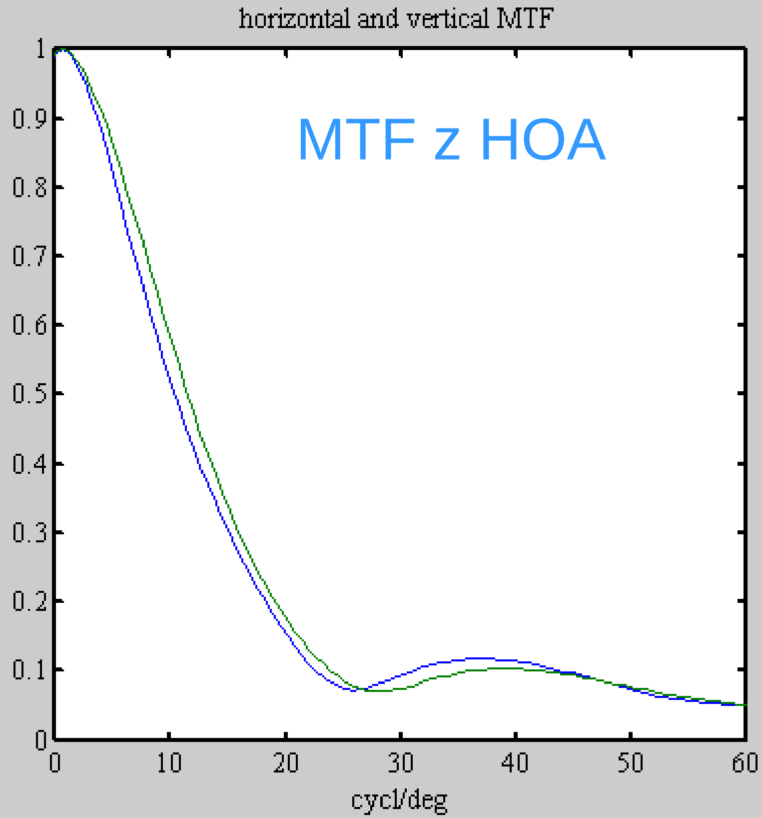
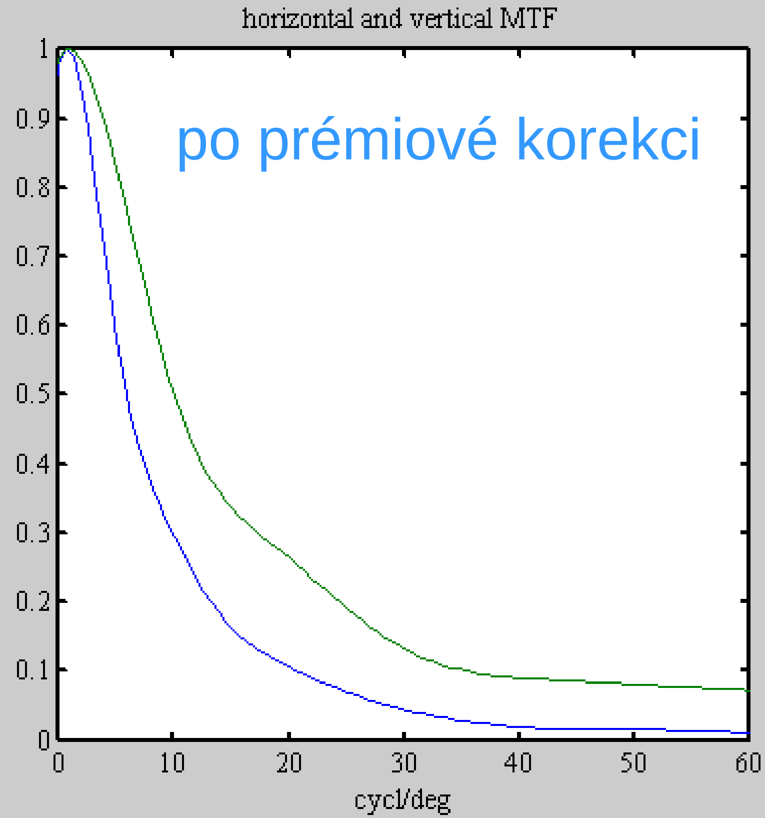
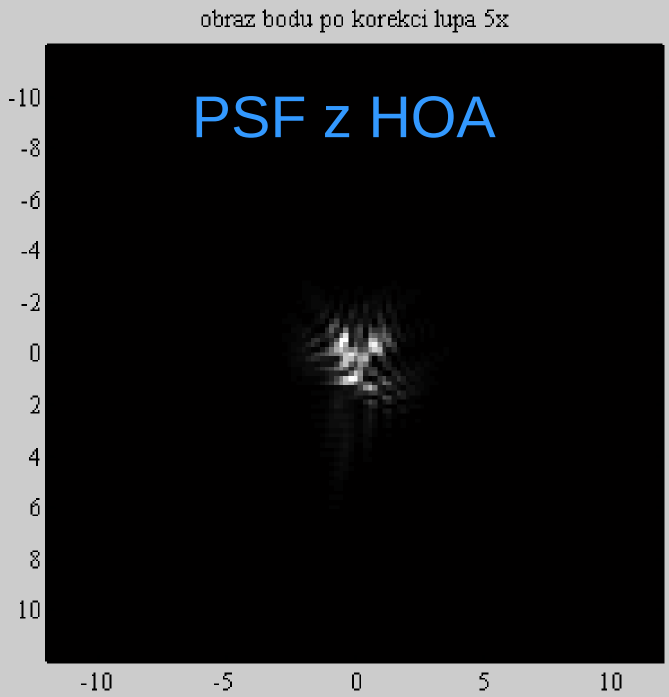


Figure 19-15

Two ways to determine an equivalent quadratic surface (mesh) for a given wavefront aberration function (solid surface). A, Minimizing the sum of squared deviations between the fitted surface and the measured surface. B, Matching the curvature at the origin in every meridian.


horizontal and vertical MTF
MTF z HOA
cycl/deg


horizontal and vertical MTF
po prémiové korekci
cycl/deg


obraz bodu po korekci lupa 5x
PSF z HOA


obraz bodu po prémiové korekci lupa 5x
po prémiové korekci

i.Profiler firmy Zeiss

Plně automatický multifunkční přístroj:

- **Aberometrie** (Shack-Hartmann)
  - Analýza LOA, HOA, autorefraktometr
  - 1 500 měřicích bodů
  - Doba měření: 0.2 s
- **Topografie rohovky** (Placido projektor)
  - Topografie, keratometrie
  - 6 144 analyzovaných bodů
- **Grafické výstupy**
  - LOA, HOA, topografie, 3D zobrazení
  - PSF, MTF, Zernikovy koeficienty atd.

WFAberrometer

Okulární Zernikeho koeficienty

Pravé

Pacient	Bajer	Jiri	728	20 Feb 2012

1

ZEISS

Velikost Zornice : 5.7 mm
Apertura : 5.0 mm
PD : 67.8 mm
Vertex : 12.0 mm

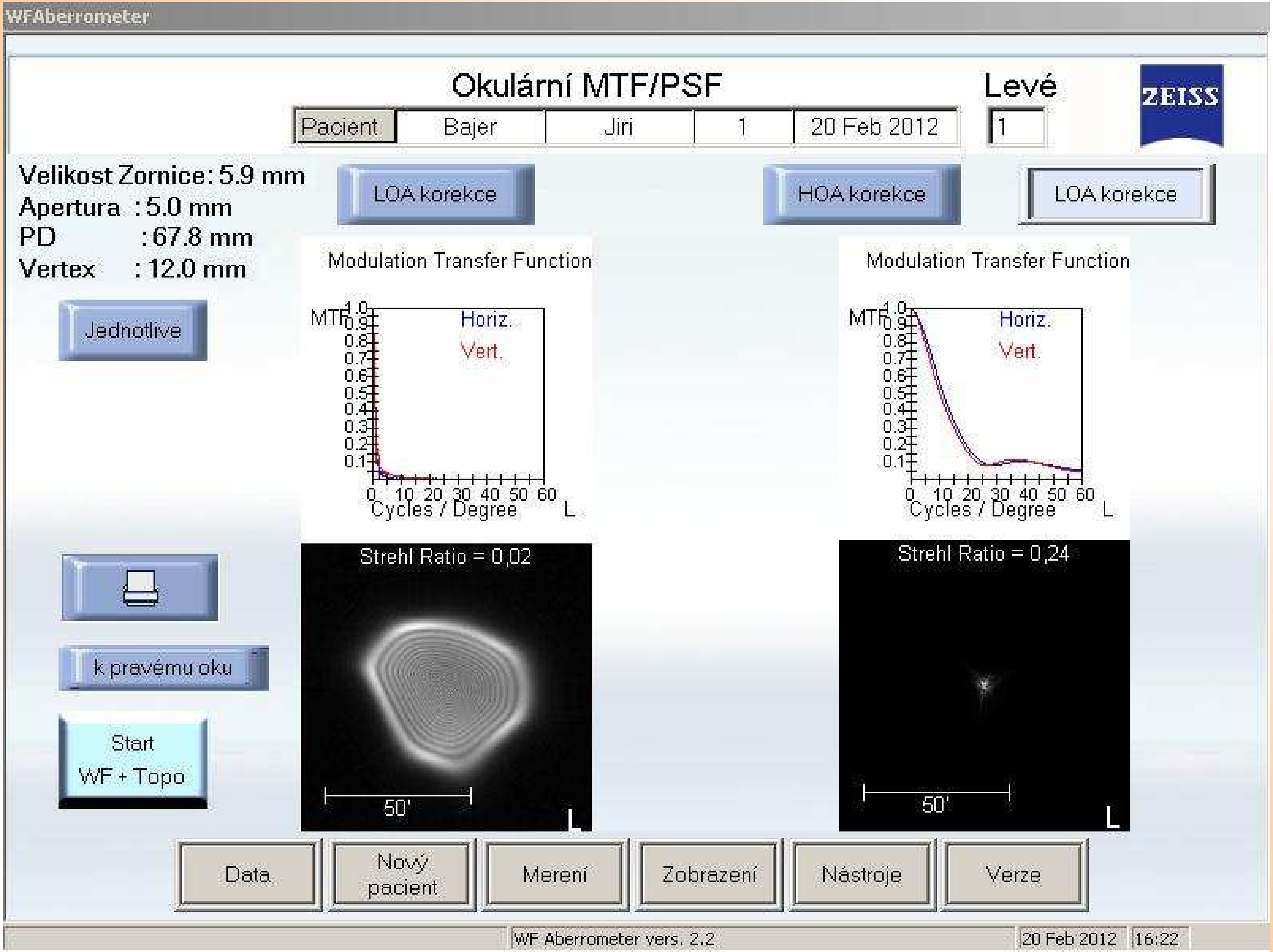
k levému oku

	Popis	Hodnota	Pravé oko - rozsah = 1,81
Z(0,0)	Piston	0,00 µm	
Z(1,±1)	Tilt	2,32 µm @ 164°	
Z(2,±2)	Astigmatism	0,48 µm @ 5°	
Z(2,0)	Defocus	3,15 µm	
Z(3,±3)	Trefoil	0,22 µm @ 35°	
Z(3,±1)	Coma	0,04 µm @ 157°	
Z(4,±4)	Tetrafoil	0,05 µm @ 17°	
Z(4,±2)	Astigmatism II	0,03 µm @ 45°	
Z(4,0)	Sph. Aberration	-0,02 µm	
Z(5,±5)	Pentafoil	0,05 µm @ 58°	
Z(5,±3)	Trefoil II	0,01 µm @ 74°	
Z(5,±1)	Coma II	0,03 µm @ 276°	
Z(6,±6)	Hexafoil	0,03 µm @ 45°	
Z(6,±4)	Tetrafoil II	0,00 µm @ 13°	
Z(6,±2)	Astigmatism III	0,00 µm @ 162°	
Z(6,0)	Sph. Aberration II	0,00 µm	
Z(7,±7)	Heptafoil	0,02 µm @ 4°	
Z(7,±5)	Pentafoil II	0,00 µm @ 66°	
Z(7,±3)	Trefoil III	0,00 µm @ 86°	
Z(7,±1)	Coma IV	0,00 µm @ 332°	

Start
WF + Topo

Data | Nový pacient | Merení | Zobrazení | Nástroje | Verze

WF Aberrometer vers. 2.2 | 20 Feb 2012 | 16:20


WFAberrometer
Okulární MTF/PSF
Levé
ZEISS
Pacient
Bajer
Jiri
1
20 Feb 2012
1
Velikost Zornice: 5.9 mm
Apertura : 5.0 mm
PD : 67.8 mm
Vertex : 12.0 mm
LOA korekce
HOA korekce
LOA korekce
Jednotlive
Modulation Transfer Function
MTF
Horiz.
Vert.
Cycles / Degree
L
Modulation Transfer Function
MTF
Horiz.
Vert.
Cycles / Degree
L
Strehl Ratio = 0,02
50'
L
Strehl Ratio = 0,24
50'
L
k pravému oku
Start
WF + Topo
Data
Nový pacient
Merení
Zobrazení
Nástroje
Verze
WF Aberrometer vers. 2.2
20 Feb 2012
16:22

WFAberrometer

Okulární aberace

Levé

Pacient	Bajer	Jiri	1	15 Jan 2013

1

ZEISS

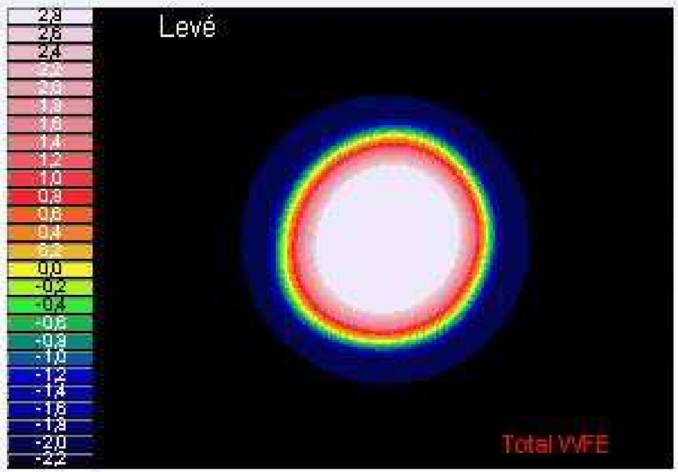
Velikost Zornice: 5.5 mm
Apertura : 5.0 mm
PD : 68.0 mm
Vertex : 12.0 mm

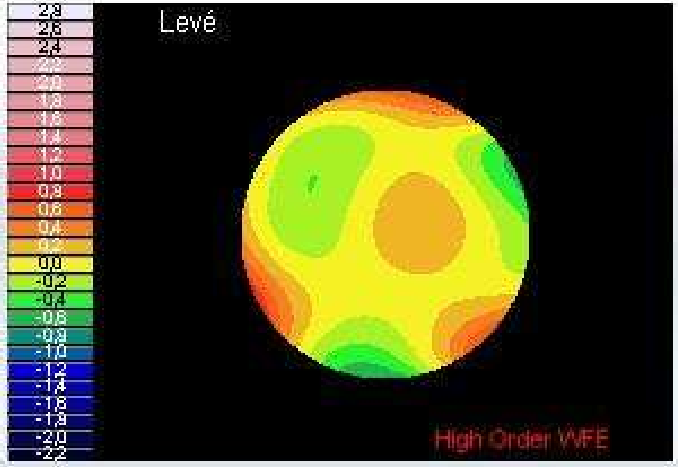
k pravému oku

Refr.	3 mm	5 mm
Sph	-3.50 D	-3.50 D
Cyl	-0.63 D	-0.50 D
AXIS	53	54
AVG	-3.81 D	-3.75 D

C + / -

WF	3 mm	5 mm
RMS	1.21 µm	3.20 µm
LOA	1.21 µm	3.19 µm





Start WF

Data | Nový pacient | Merení | Zobrazení | Nástroje | Verze

WF Aberrometer vers. 2.2 | 15 Jan 2013 | 11:34

```
[SPHERE]
R_3=-3.398516
R_5=-3.334019
R_7=-3.293781
[CYLINDER]
R_3=-0.615004
R_5=-0.500519
R_7=-0.461325
[AXIS]
R_3=0.816539
R_5=0.867523
R_7=0.906448
[ZERNIKE_3]
Z_0=-0.000000000000
Z_1=0.382240709997
Z_2=-1.466803283114
Z_3=-0.135210872787
Z_4=1.152318593138
Z_5=-0.001183182195
Z_6=0.055800977545
Z_7=0.018601591961
Z_8=0.010340324946
Z_9=0.011212580760
Z_10=-0.006120671199
Z_11=0.008322529530
Z_12=0.018026064913
Z_13=0.012687777710
Z_14=-0.000280715277
Z_15=-0.006862435148
Z_16=-0.009616274404
Z_17=-0.014188323501
Z_18=-0.001722684546
Z_19=0.000702381548
Z_20=-0.016277218963
Z_21=-0.008686568514
Z_22=-0.005582453122
Z_23=0.002697417645
Z_24=-0.008119492227
Z_25=0.001112257513
Z_26=0.006110919033
Z_27=-0.000647734736
Z_28=-0.002465287749
Z_29=0.003898117301
Z_30=0.000313300350
```

```
Z_34=0.000649565168
Z_35=-0.004877455409
[ZERNIKE_5]
Z_0=-0.000000000000
Z_1=0.704842968629
Z_2=-2.397245794028
Z_3=-0.301487194773
Z_4=3.100074058252
Z_5=0.052990803891
Z_6=0.176431654252
Z_7=0.000676525441
Z_8=0.022961757719
Z_9=0.078686313014
Z_10=-0.035961851451
Z_11=0.018064670699
Z_12=-0.061282598258
Z_13=0.030873073492
Z_14=0.025676242332
Z_15=-0.003135323077
Z_16=-0.010374974236
Z_17=-0.021051223287
Z_18=-0.001058638942
Z_19=0.000144038772
Z_20=-0.045516809557
Z_21=-0.018981646437
Z_22=0.006336585501
Z_23=-0.004481888459
Z_24=0.001099577219
Z_25=-0.005231054419
Z_26=0.003125714857
Z_27=0.004809080808
Z_28=0.001502612553
Z_29=0.003098773178
Z_30=0.007390189335
Z_31=0.004919203638
Z_32=0.003173571927
Z_33=-0.002682929941
Z_34=0.016259386701
Z_35=-0.015219268995
[ZERNIKE_7]
Z_0=-0.000000000000
Z_1=0.800825970854
Z_2=-2.825944431791
```

2.50µm@164°

0.31µm@140°

0.19µm@22°

Pupila 5 mm

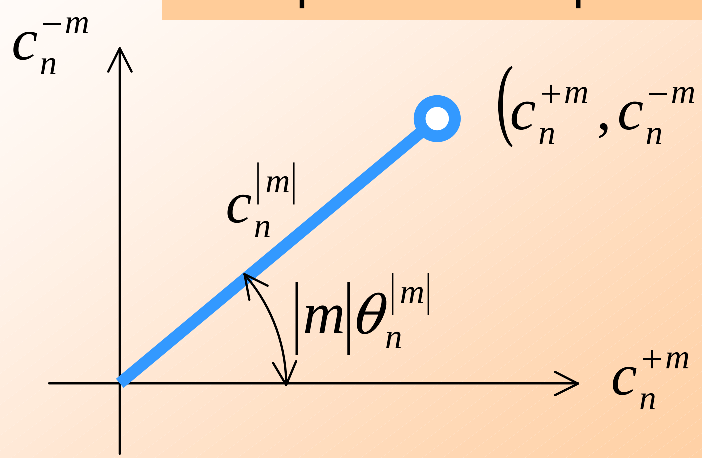
	Popis	Hodnota
Z(0,0)	Piston	0,00 µm
Z(1,±1)	Tilt	2,50 µm @ 164°
Z(2,±2)	Astigmatism	0,31 µm @ 140°
Z(2,0)	Defocus	3,10 µm
Z(3,±3)	Trefoil	0,19 µm @ 22°
Z(3,±1)	Coma	0,02 µm @ 2°
Z(4,±4)	Tetrafoil	0,04 µm @ 76°
Z(4,±2)	Astigmatism II	0,04 µm @ 15°
Z(4,0)	Sph. Aberration	-0,06 µm
Z(5,±5)	Pentafoil	0,05 µm @ 37°

$$\left(c_n^{+m}, c_n^{-m}\right) \rightarrow \left(c_n^{|m|}, |m|\theta_n^{|m|}\right)$$

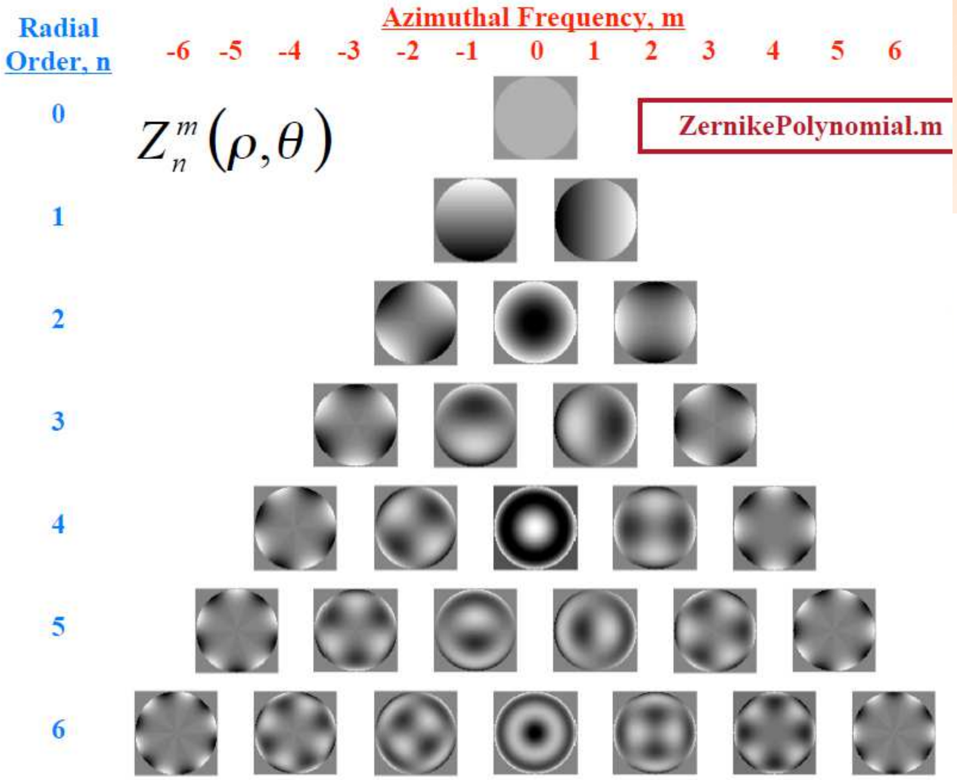
$$c_n^{+m} = c_n^{|m|} \cos|m|\theta_n^{|m|}$$

$$c_n^{-m} = c_n^{|m|} \sin|m|\theta_n^{|m|}$$

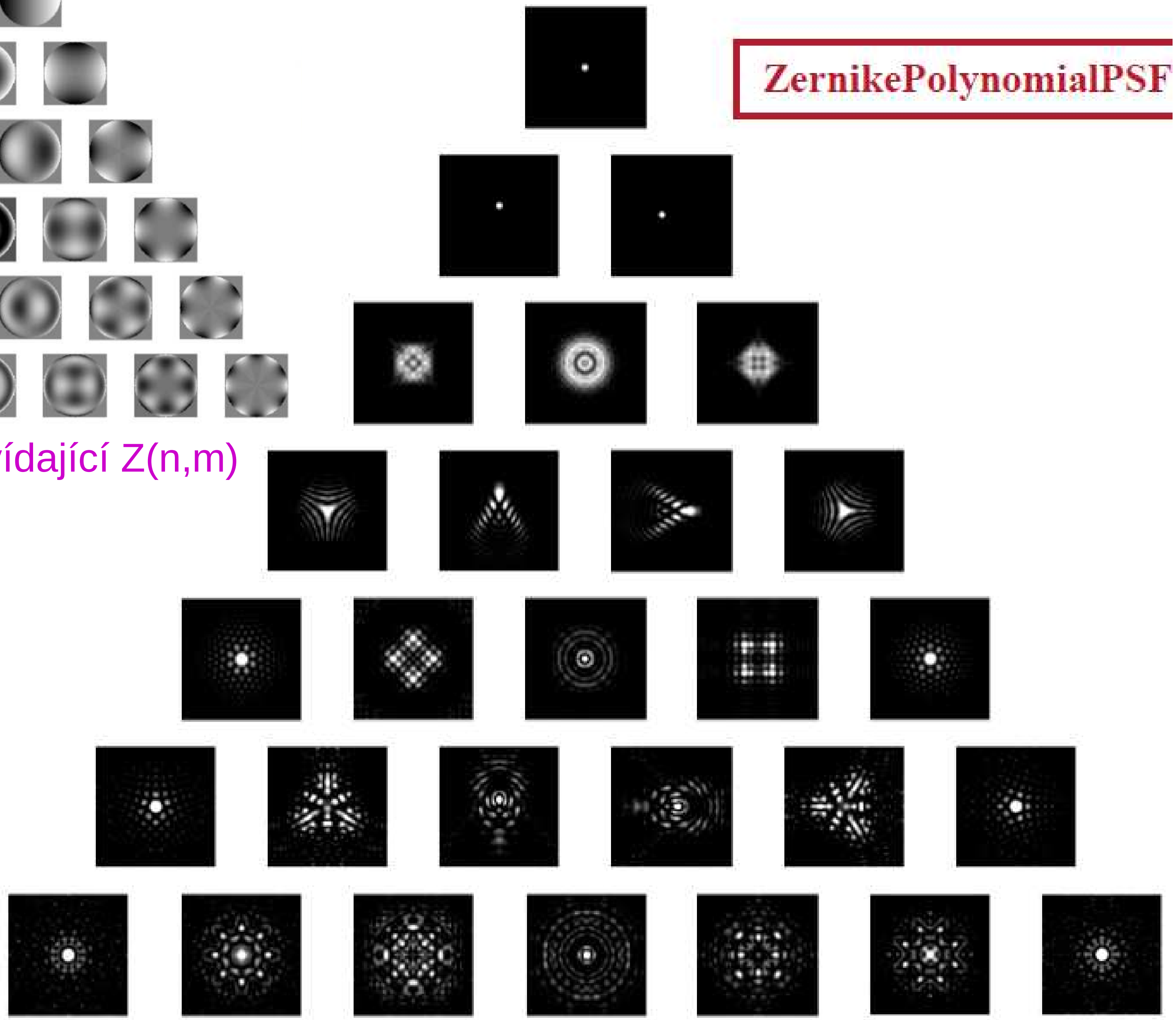
Zernikeho koeficienty v polárním zápisu



PSF odpovídající Z(n,m)



vlnolochy odpovídající Z(n,m)

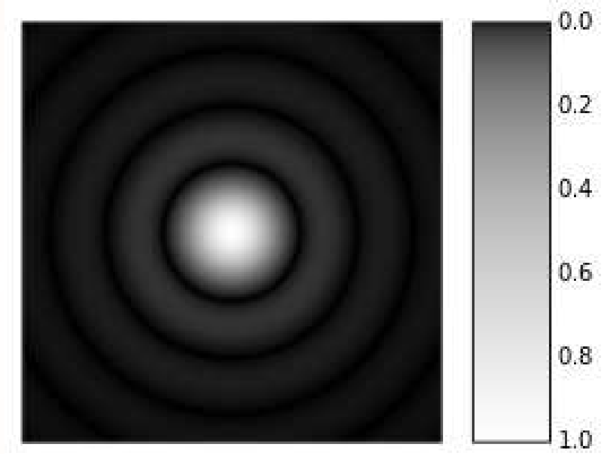


Koherentní osvětlení
Test na temném pozadí

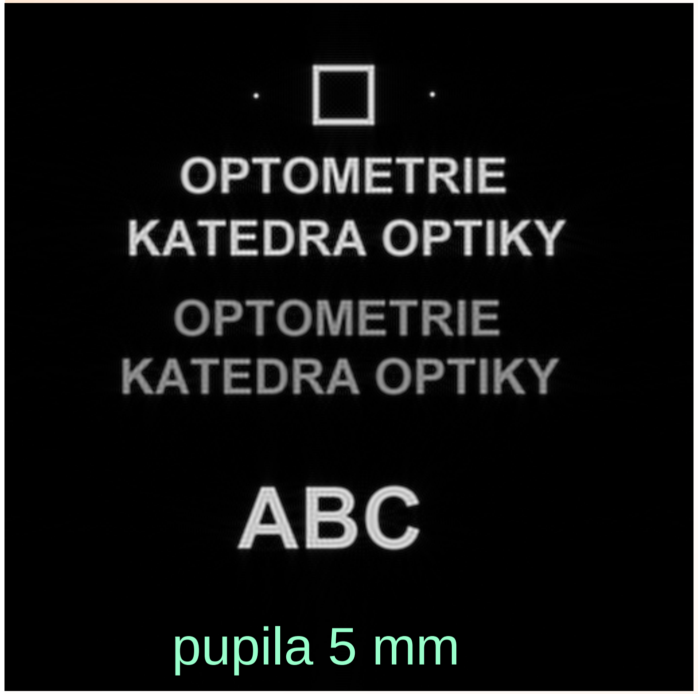
Difrakce

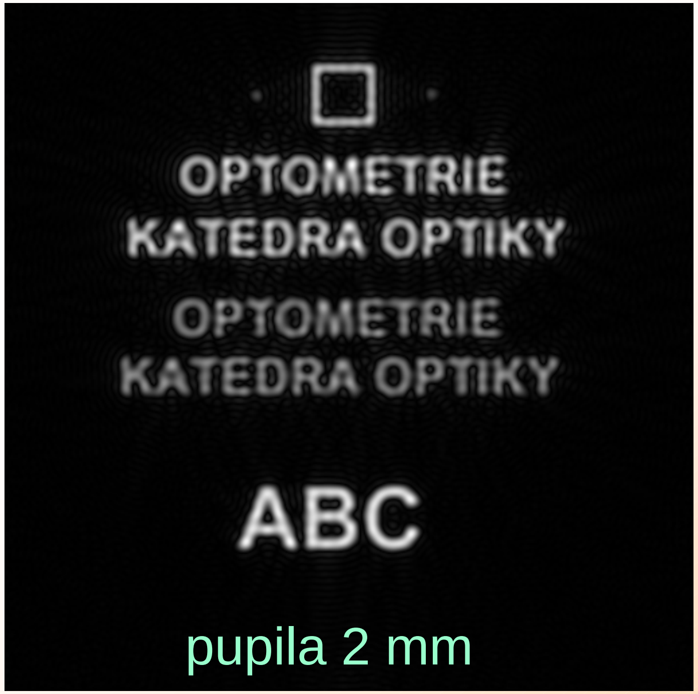
Optický test
pro vízus 1.0 resp. 0.6,
tj. výška 5´ resp. 9´

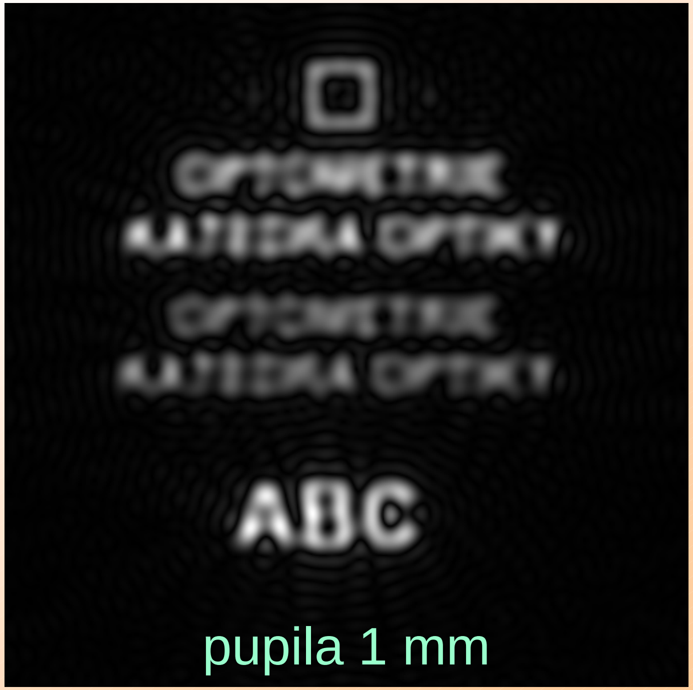
PSF - Airyho disk



Oko bez aberací, pouze vliv difrakce světla



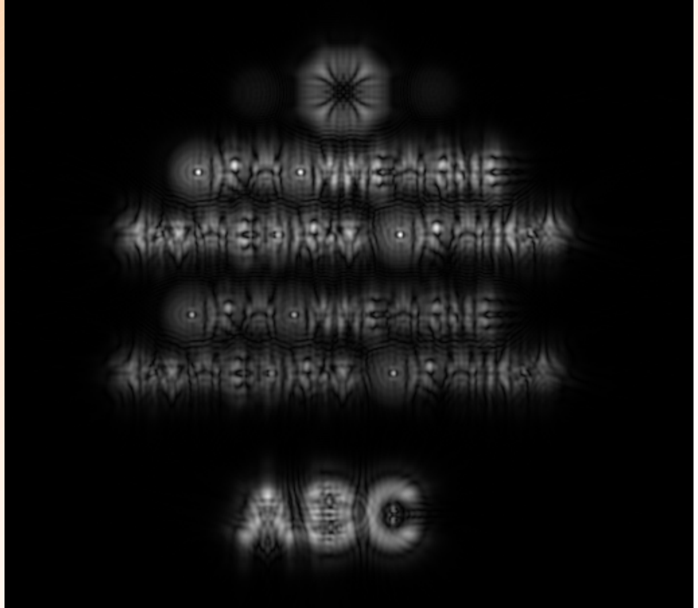




Aberace 2. řádu

všude pupila 5 mm

sféra 0.25 D



sféra 0.50 D

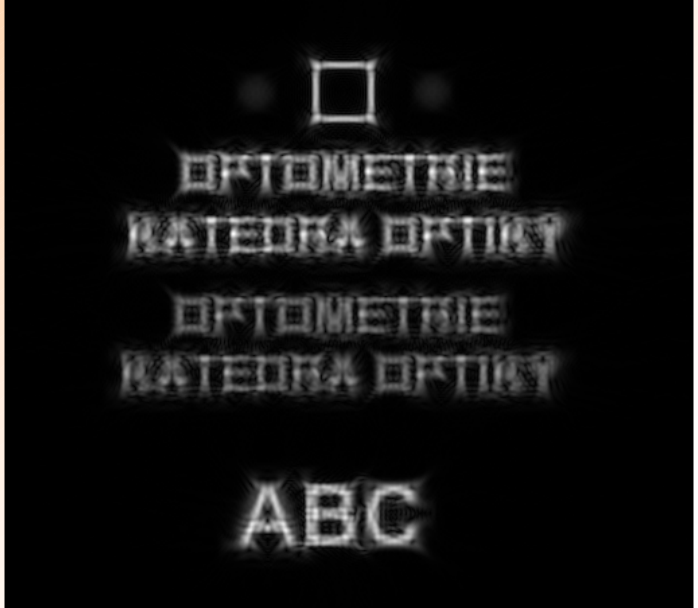
sféra 1.00 D

Sféra a cylindr (astigmatismus prostý)

astigmatismus cyl. 0.25 D

astigmatismus cyl. 0.25 D

Astigmatismus Z_2^{-2} 0.25 D



astigmatismus Z_2^{-2} 0.50 D

astigmatismus Z_2^{-2} 1.00 D

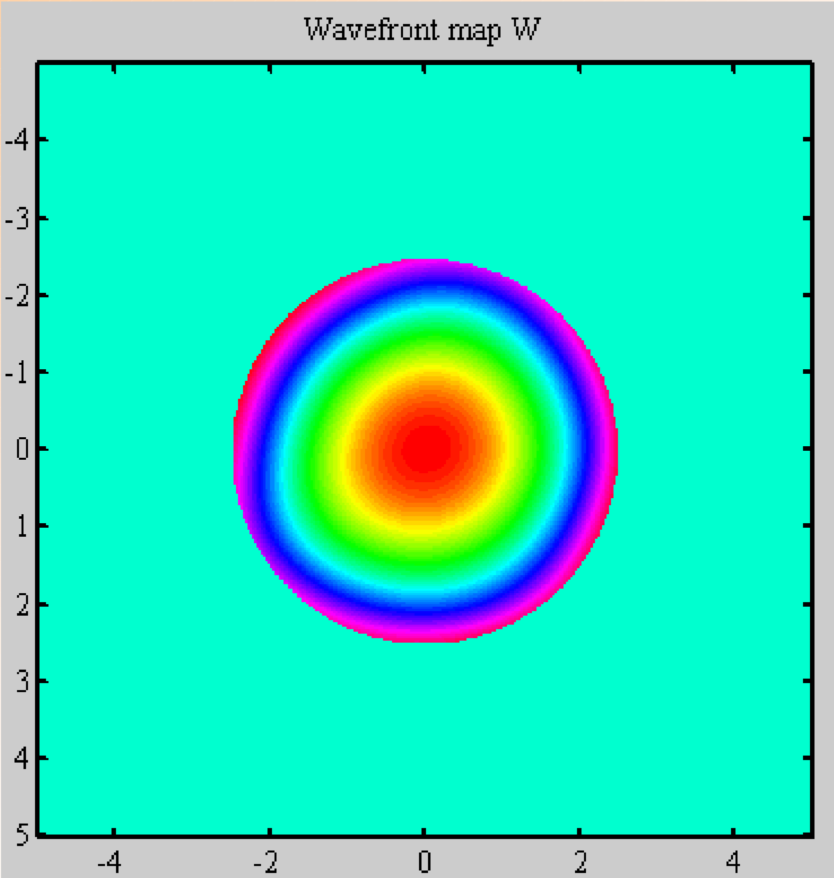
Astigmatismus mixtus

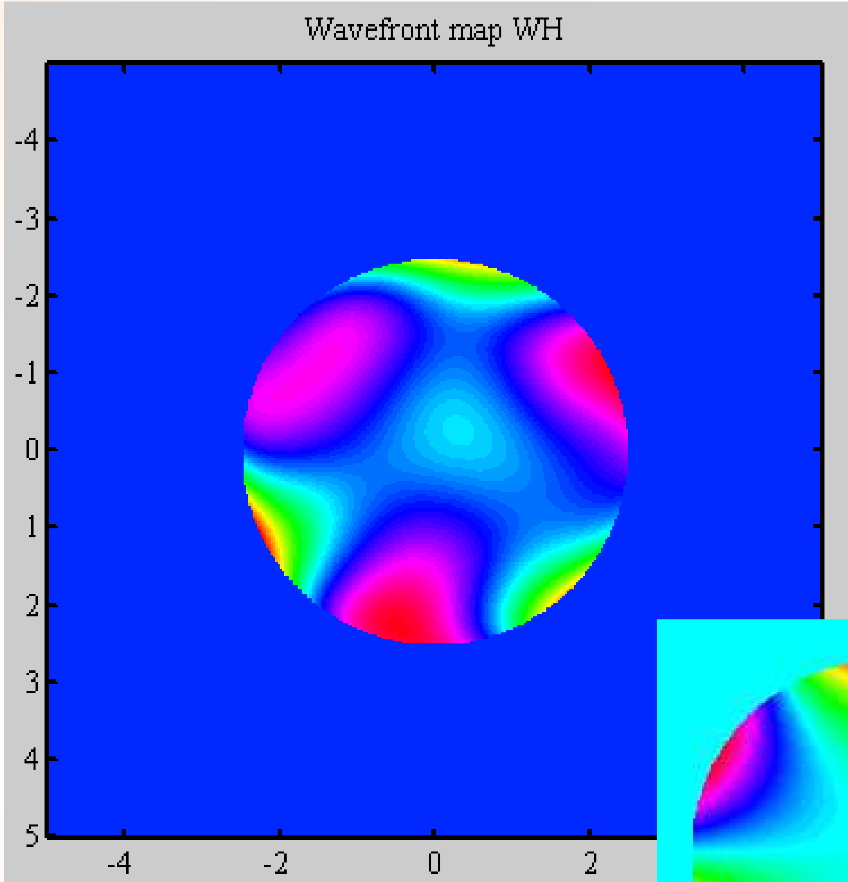
astigmatismus Z_2^{2} 0.25 D

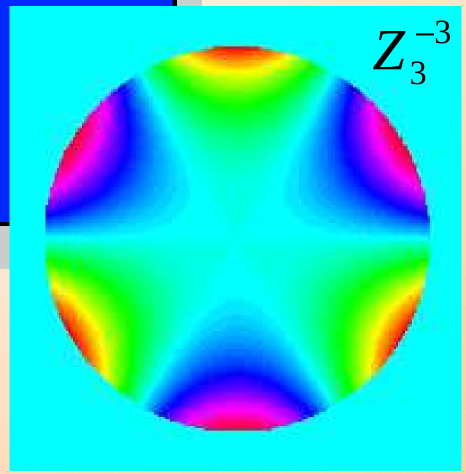
astigmatismus Z_2^{2} 0.50 D

astigmatismus Z_2^{2} 1.00 D

Moje oko







RMS = 3.12 μm
M_e=3.45 D
$V \approx 0.03$

RMS HOA = 0.22 μm
M_e= 0.24 D
$V \approx 0.4$

HOA

RMS = 0.22 μm

HOA - 0.20 D

RMS = 0.28 μm

RMS = 0.39 μm

HOA + prémiová korekce M = -0.27 D, J0 = 0.13, J45 = 0.09

Ekvivalentní defokus 0.25 D

Aberace vyšších řádů

Ekvivalentní defokus 0.25 D

Z(4,0)

Z(4,2)

Z(4,4)

Z(4,-2)

Z(4,-4)

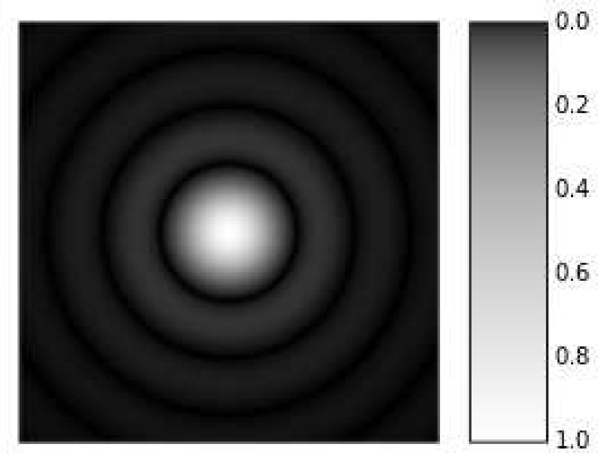
Ekvivalentní defokus 0.25 D

Nekoherentní osvětlení
Test na bílém pozadí

Difrakce

Optický test
pro vízus 1.0 resp. 0.6,
(malá resp. velká písmena)
tj. výška 5´ resp. 9´

PSF - Airyho disk



Oko bez aberací, pouze vliv difrakce světla

pupila 5 mm

pupila 2 mm

pupila 1 mm

Aberace 2. řádu

všude pupila 5 mm

sféra 0.125 D

sféra 0.25 D

sféra 0.50 D

Sféra a cylindr (astigmatismus prostý)

cylindr 0.25 D

cylindr 0.25 D

astigmatismus Z_2^{-2} 0.25 D

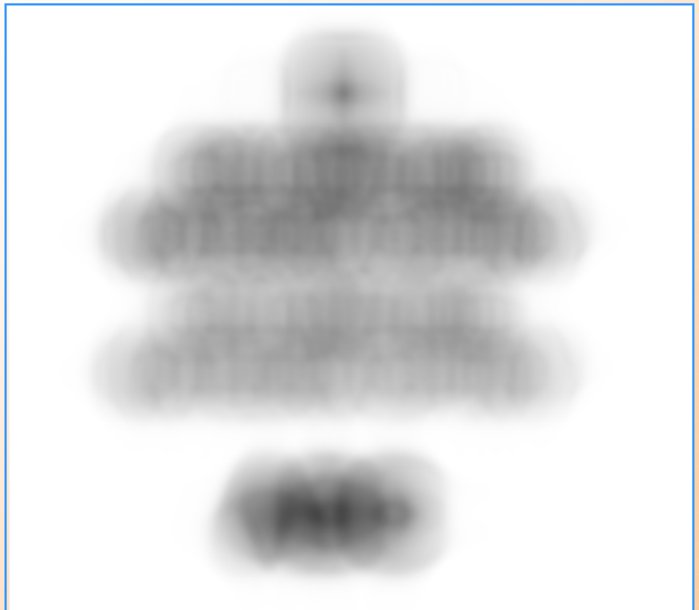
astigmatismus Z_2^{-2} 0.50 D

astigmatismus Z_2^{-2} 1.00 D

Astigmatismus mixtus

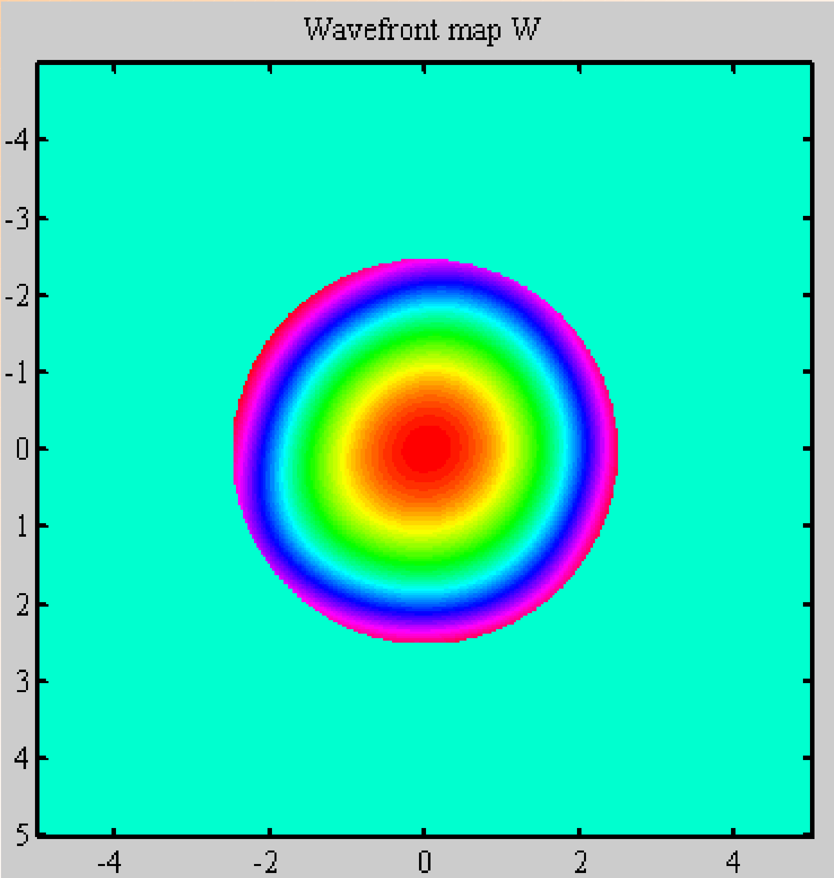
astigmatismus Z_2^{2} 0.25 D

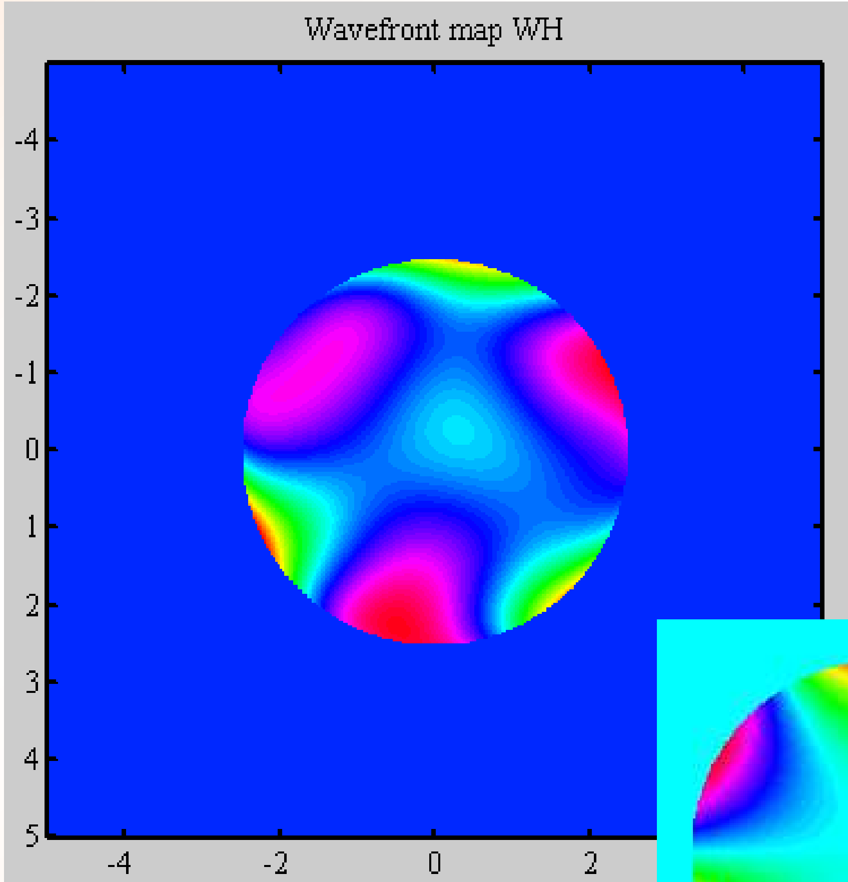
astigmatismus Z_2^{2} 0.50 D

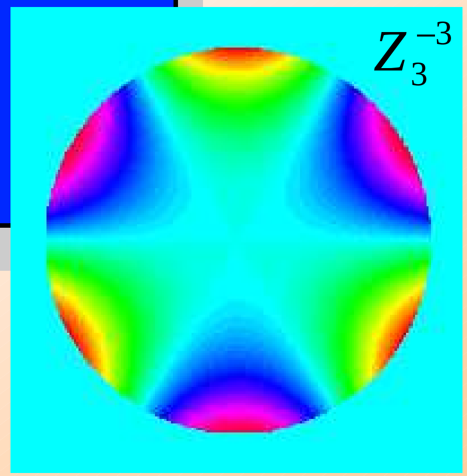


astigmatismus Z_2^{2} 1.00 D

Moje oko







RMS = 3.12 μm

M_e=3.45 D

$V \approx 0.03$

RMS HOA = 0.22 μm

M_e= 0.24 D

$V \approx 0.4$

HOA

RMS = 0.22 μm

HOA - 0.20 D

RMS = 0.28 μm

RMS = 0.39 μm

HOA + prémiová korekce M = -0.27 D, J0 = 0.13, J45 = 0.09

Aberace vyšších řádů

Ekvivalentní defokus 0.25 D

Z(3,1)

Z(3,3)

Z(3,-1)

Z(3,-3)

Ekvivalentní defokus 0.25 D

Z(4,2)

Z(4,4)

Z(4,0)

Z(4,-2)

Z(4,-4)

Ekvivalentní defokus 0.25 D

Z(5,1)

Z(5,3)

Z(5,5)

Z(5,-1)

Z(5,-3)

Z(5,-5)