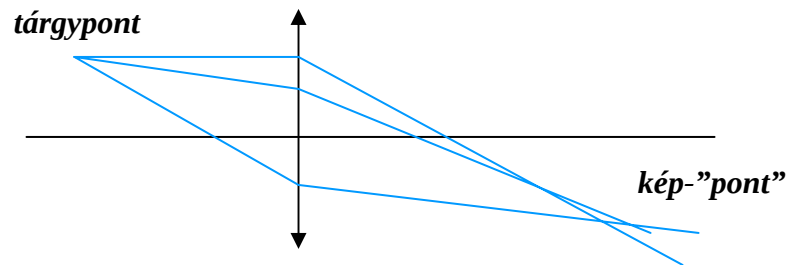


Lencsehibák

Az eddig tárgyalt sugárkövető egyenletek, paraxiális közelítésben első rendig érvényesek. Magasabb rendek figyelembe vételével (nem paraxiális közelítés) nyílik lehetőség a lencsék ill. lencserendszerek leképezési hibáinak elméleti vizsgálatára. Optikai aberrációk esetén egy tárgypontból kiinduló sugarak nem egy pontban fognak találkozni a képtérben, ill. a nagyítás egy adott síkban nem lesz állandó, függ a tárgypont helyzetétől.



A lencserendszerek tervezésénél az aberrációk minimalizálása a leggyakoribb feladat

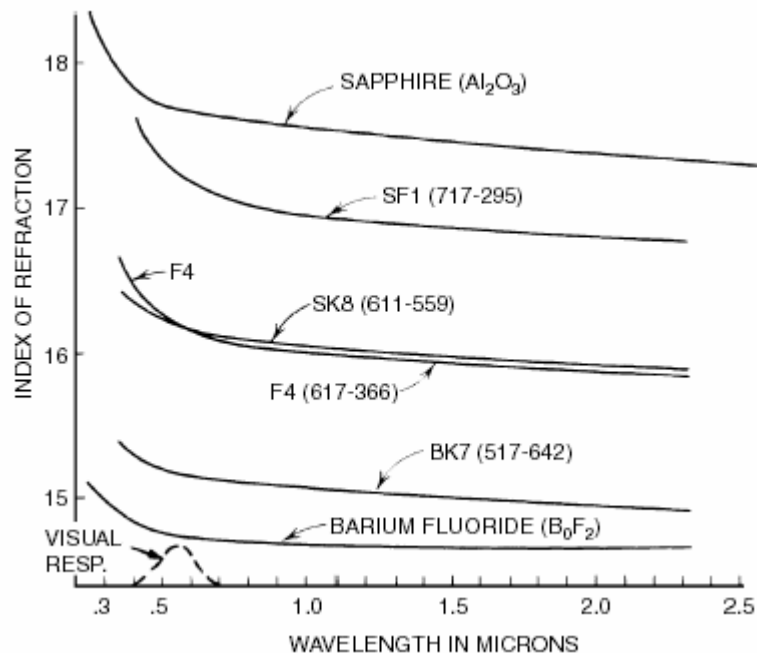
Kromatikus Hiba

pl: spherochromatism

Monoromatikus Hiba

Kromatikus Aberráció

Mivel a törésmutató függ a hullámhossztól, a lencse ill. lencserendszer fókusz távolsága és így a kép helye is függeni fog a hullámhossztól.



Cauchy
$$n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda^2} + \frac{c}{\lambda^4} + \dots$$

Hartmann
$$n(\lambda) = a + \frac{b}{(c - \lambda)} + \frac{d}{(e - \lambda)}$$

Conrady
$$n(\lambda) = a + \frac{b}{\lambda} + \frac{c}{\lambda^{3.5}}$$

Kettler-Drude
$$n^2(\lambda) = a + \frac{b}{c - \lambda^2} + \frac{d}{e - \lambda^2} + \dots$$

Sellmeier
$$n^2(\lambda) = a + \frac{b\lambda^2}{c - \lambda^2} + \frac{d\lambda^2}{e - \lambda^2} + \frac{f\lambda^2}{g - \lambda^2} + \dots$$

Herzberger
$$n(\lambda) = a + b\lambda^2 + \frac{e}{(\lambda^2 - 0.035)} + \frac{d}{(\lambda^2 - 0.035)^2}$$

Old Schott
$$n^2(\lambda) = a + b\lambda^2 + \frac{c}{\lambda^2} + \frac{d}{\lambda^4} + \frac{e}{\lambda^6} + \frac{f}{\lambda^8}$$

OSLO: wavelength 1: primary λ - d

wavelength 2: short λ - F

wavelength 3: long λ - C

n(λ,T,P): alapértelmezett: T=20 C°, P=1 Atm (hőtágulás: L(T+ΔT)=(1+αΔT)*L(T))

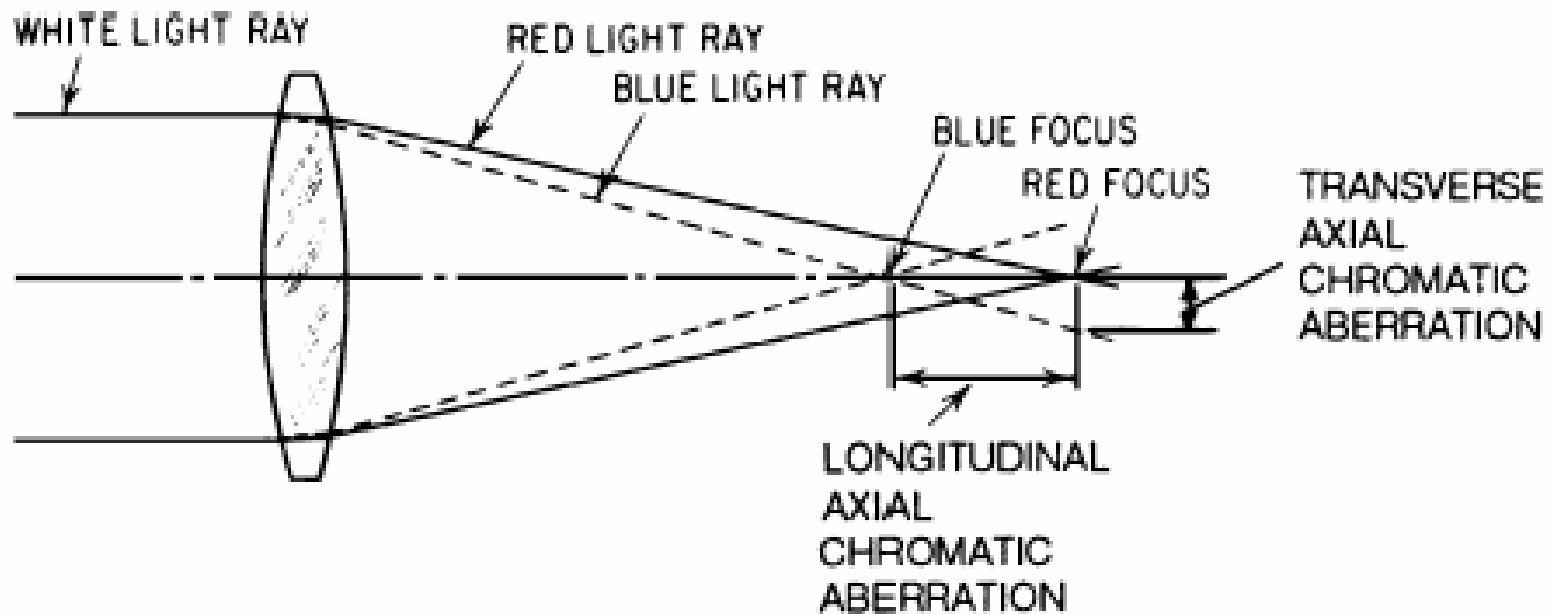
Elsőrendű vagy paraxiális kromatikus hibának két fajtája van:

1. **axiális** vagy **longitudinális** kromatikus aberráció

2. **laterális** kromatikus aberráció

Axiális Kromatikus Aberráció

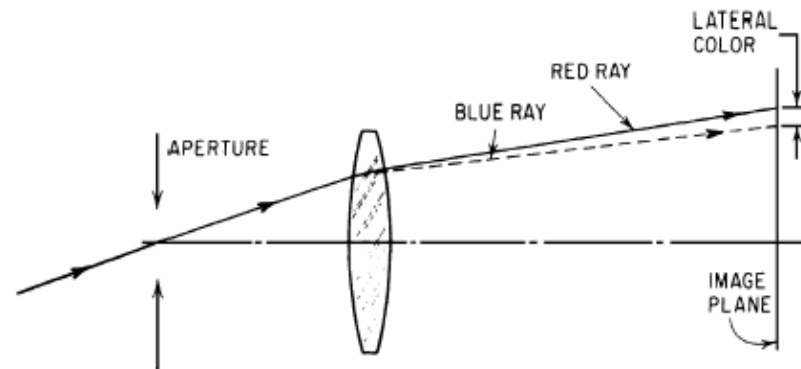
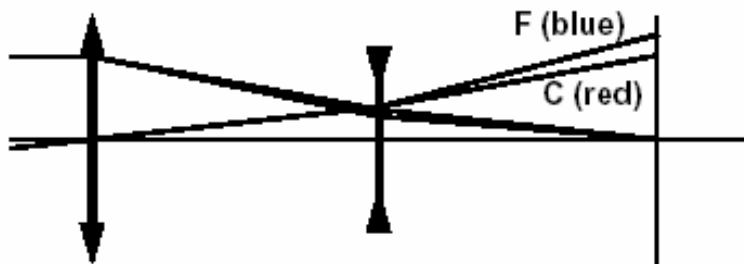
A törésmutató hullámhosszfüggése miatt, a lencse fókusztávolsága függeni fog a hullámhossztól. Mivel az esetek nagy részében a törésmutató csökken a hullámhossz növelésével, a **KÉK** fókuszpont közelebb van a lencséhez mint a **VÖRÖS**. Ebben az esetben negatív vagy alulkorrigált (undercorrected) kromatikus aberrációról beszélünk. Mértékéül választhatjuk az optikai tengelyen való eltolódást (Longitudinal axial color), vagy a nominális képsíkban a rövid és hosszú hullámhosszkomponensek metszéspontjainak távolságát (képen: Transverse axial chromatic aberration, **OSLO**: Primary Axial Color[PAC]).



Lateral Kromatikus Aberráció

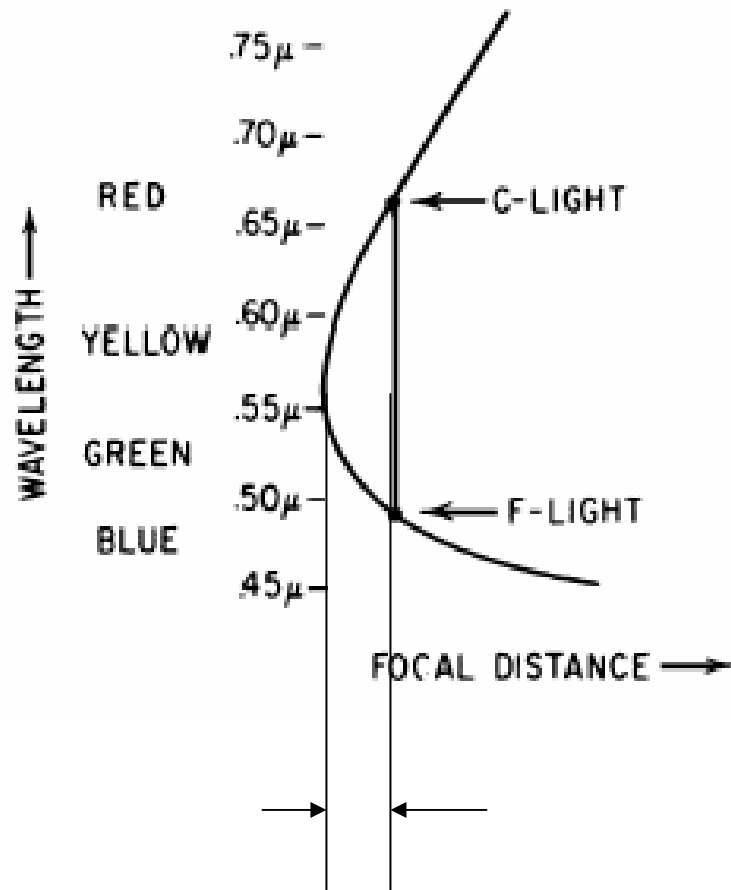
Tekintsünk egy olyan optikai rendszert ami korrigálva van az elsődleges axiális kromatikus hibára, azaz az axiális sugarak egy pontban metszik egymást.

Ekkor a különböző hullámhosszokhoz tartozó effektív fókusz távolságok eltérőek lesznek, és így a nagyítás függeni fog a hullámhossztól. Ezt a hibát elsődleges laterális kromatikus hibának (primary lateral color) nevezzük. A laterális hiba mértékéül választhatjuk a chief sugarak képsíkban vett magasságkülönbségét különböző hullámhosszak esetén. Ha a “kék” kép kisebb mint a “vörös”, akkor negatív, vagy alulkorrigált aberrációról beszélünk.



Secondary Spectrum

Az akromátokat két hullámhosszra optimalizálják. Az ettől eltérő hullámhosszúságú axiális sugarak az optikai tengelyt nem az ideális pontban, hanem attól egy bizonyos távolságban metszik. Ezt a hibát nevezzük secondary spectrum-nak.



Az OSLO megadja a secondary axial color (SAC) és secondary lateral color (SLC) értékét is az 1 ill. 2 indexekkel megadott hullámhosszakra.

Megjegyzés: A három hullámhosszra korrigált lencsét apokromátnak nevezzük.

Secondary spectrum

A kromatikus hiba kiszámolása sugárkövetéssel

Tekintsünk egy BK7-es üvegből készült egyszerű lencsét.

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPE	NOTE
0	--	1.0000e+20	1.7633e+19		AIR	
1	50.731000 F	6.500000 F	15.000000 AF	BK7	F *	
2	-50.731000 F	47.986599	15.000000 F	AIR		
3	--	--	8.847573 S			
*REFRACTIVE INDICES						
SRF	GLASS	RN1	RN2	RN3	VNBR	TCE
1	BK7	1.516800	1.522376	1.514322	64.166410	71.000000

A kromatikus hibát megadhatjuk a sugarak követéséből (Pxt paracs az elsődleges hullámhossz módosításával):

*PARAXIAL	Height	Slope	Angle of incidence	Height	Slope	Angle of incidence
SRF	TRACE	PU	PI	PYC	PUC	PIC
3	PY					
	--	-0.298941	-0.298941	8.847573	0.168629	0.168629
*PARAXIAL TRACE (WAVELENGTH 2)						
SRF	PY	PU	PI	PYC	PUC	PIC
3	-0.157135	-0.302119	-0.302119	8.842187	0.168575	0.168575
*PARAXIAL TRACE (WAVELENGTH 3)						
SRF	PY	PU	PI	PYC	PUC	PIC
3	0.069839	-0.297529	-0.297529	8.849979	0.168654	0.168654
Axial rays				Chief rays		

Primary Axial Color (PAC) = PY(wavelength2)-PY(wavelength3)=-0.157135-0.069839=-0.226974

Primary Lateral Color (PLC) = PYC(wavelength2)-PYC(wavelength3)=8.842187-8.849979=-0.007792

Primary Lateral Color (PLC) << Primary Axial Color (PAC)

A kromatikus hiba kiszámolása felületenként

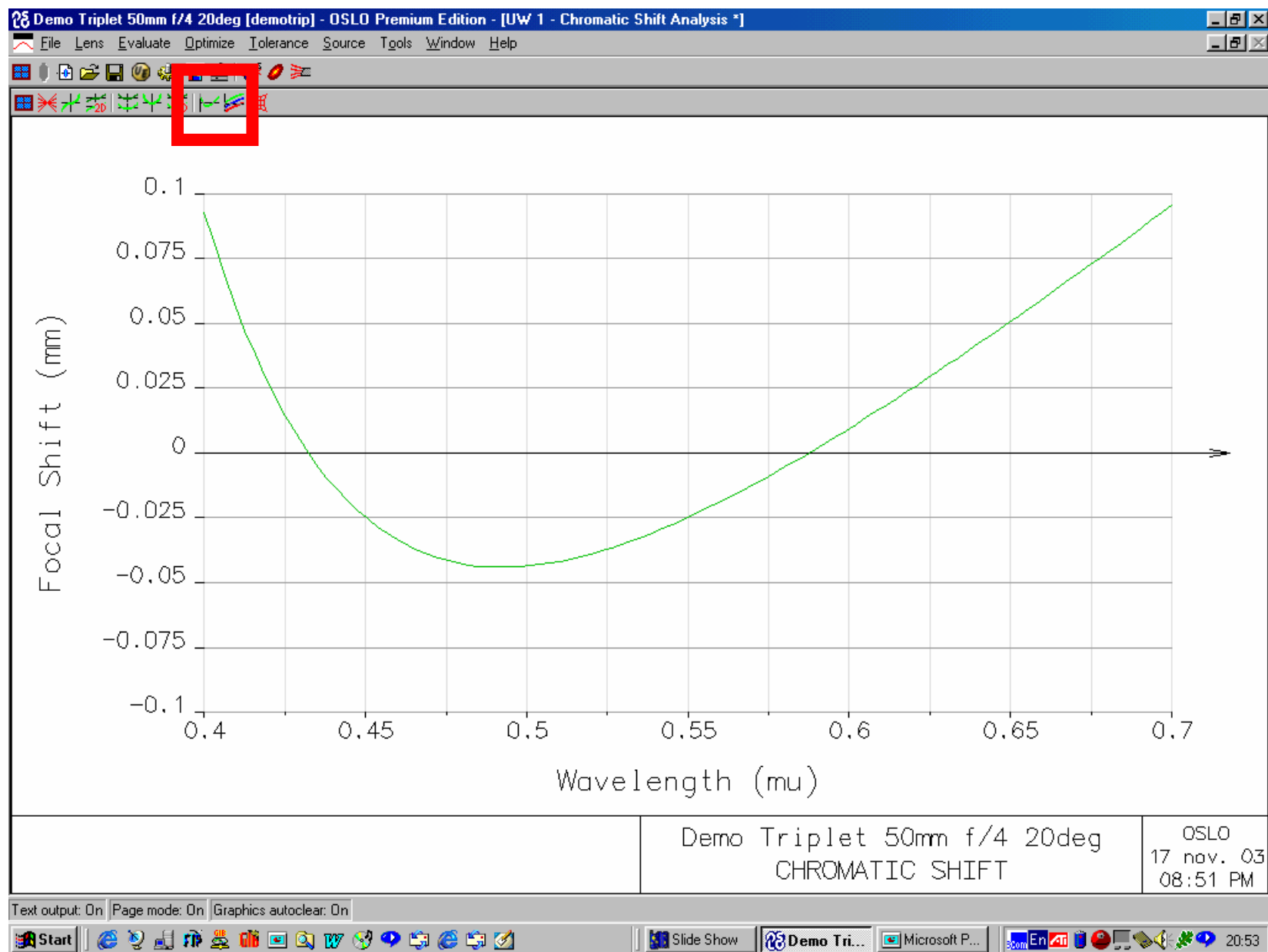
Bár a nyalábkövetés igen hasznos és célravezető, az optimalizációk során mégis gyakran az egyes felületek által okozott kromatikus hibákra is kíváncsiak vagyunk. A lencse eredő hibája az öt alkotó felületek kromatikus hibáinak összege.

Evaluate/Aberration Coefficients/Paraxial Chromatic (Chr parancs):

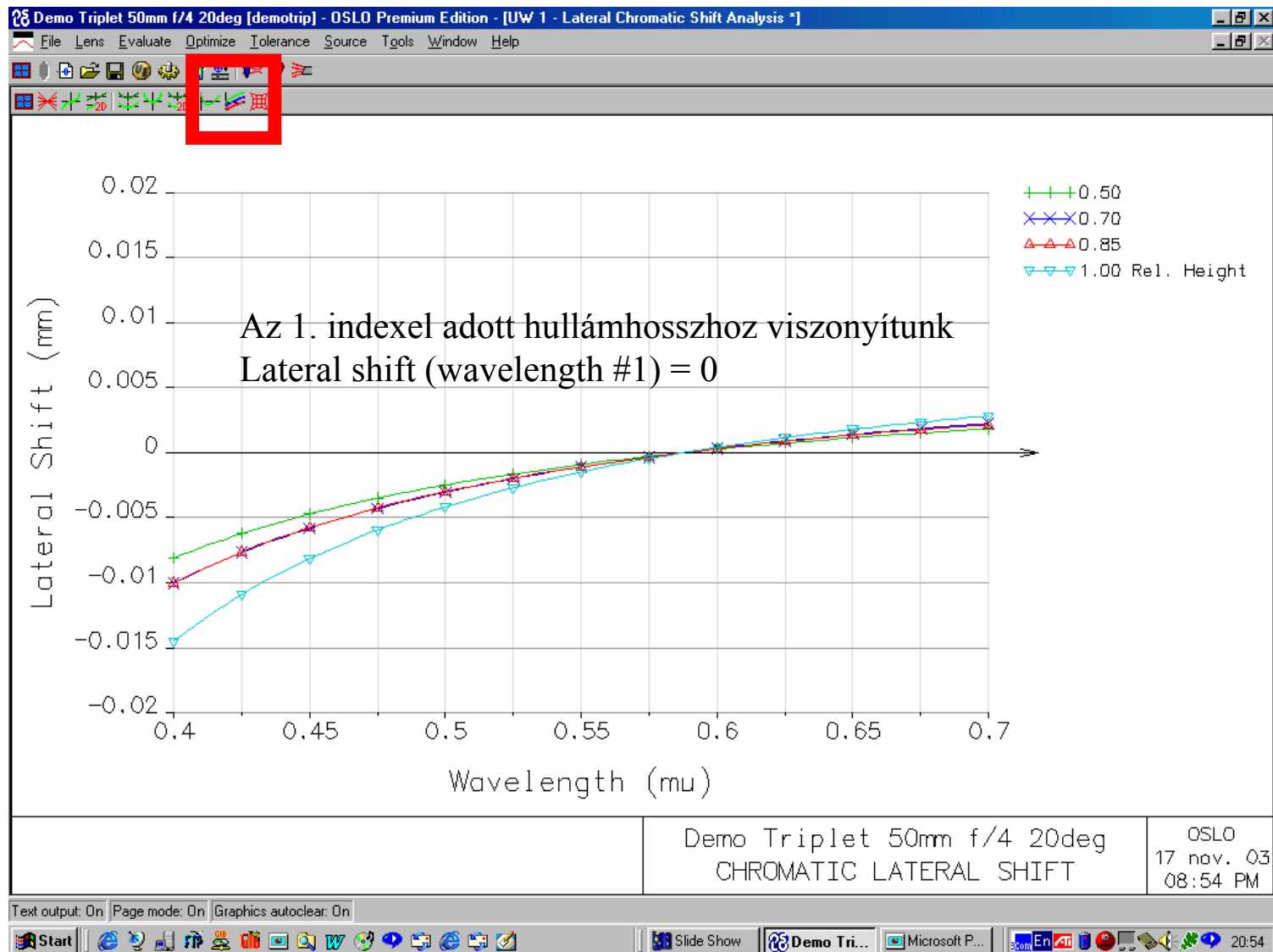
*CHROMATIC ABERRATIONS				
SRF	PAC	SAC	PLC	SLC
1	-0.078779	-0.054544	-0.046980	-0.032527
2	-0.148222	-0.102624	0.039172	0.027122
SUM	-0.227001	-0.157168	-0.007807	-0.005406
	Primary	Secondary	Primary	Secondary
	Axial	Axial	Lateral	Lateral
	Color	Color	Color	Color

A secondary hibáknál az 1 ill. 2 hullámhosszakkal kell számolni!!

Focus shift számolása OSLO-val

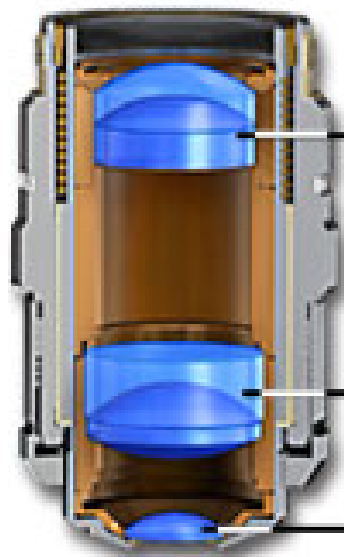


Lateral shift számolása OSLO-val

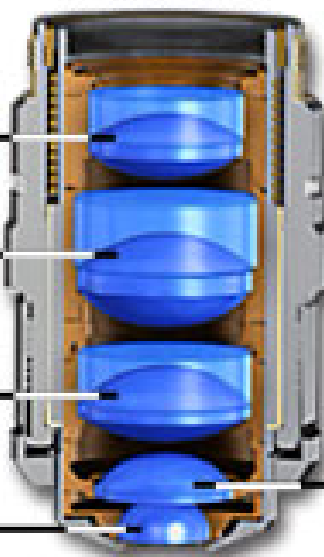


Common Objective Optical Correction Factors

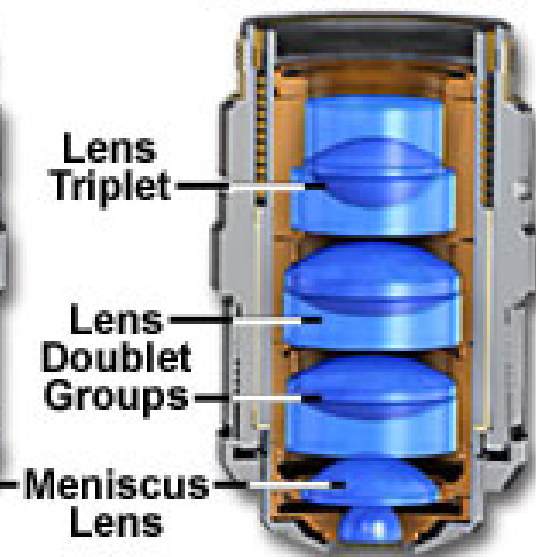
10x Achromat



10x Fluorite



10x Apochromat



Lens
Doublet

Lens
Triplet

Lens
Doublet

Front
Lens

Lens
Triplet

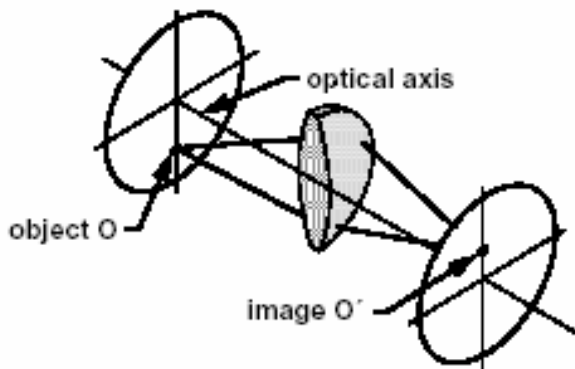
Lens
Doublet
Groups

Meniscus
Lens

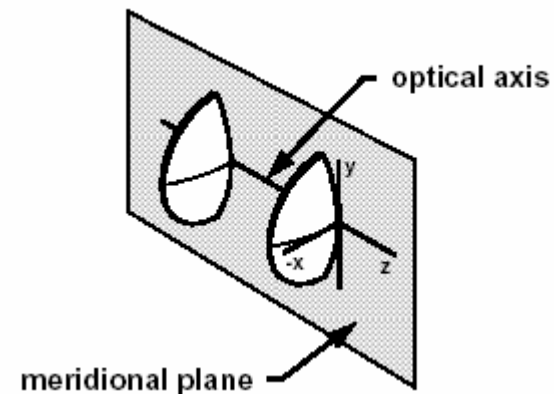
Centrált optikai rendszerek szimmetriatulajdonságai (I)

A centrált optikai rendszerek olyan hengersizmetrikus felületeket tartalmaznak, amelyeknek forgástengelye az optikai tengely. Az ilyen rendszerek invariáns módon viselkednek az optikai tengely körüli forgatásra (akár a felületek különálló forgatására).

Tekintsünk két, az optikai tengelyre merőleges síkot. Ezt a két síkot egymás **konjugált síkjainak** nevezzük, ha az egyik síkba helyezett tárgyról a lencse a másik síkban a tárgy torzulásmentes képét hozza létre. Ebben az ideális esetben, a tárgysík bármely O pontjából kiinduló sugársokaság a képsík egy O' pontjában fog találkozni. Ekkor a leképezést **stigmatikus**-nak nevezzük.



Stigmatikus leképezés

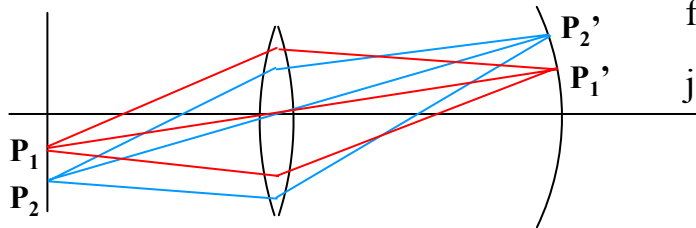


Meridionális sík

Ha O' az O pont egy stigmatikus képe, akkor a két pontot és az optikai tengelyt magába foglaló síkot **meridionális sík**-nak nevezzük.

Centrált optikai rendszerek szimmetriatulajdonságai (II)

Tegyük fel, hogy a tárgysík minden egyes pontjának a leképezése stigmatikus. Az optikai rendszer forgásszimmetriájából következik, hogy a képpontok által meghatározott felület forgásszimmetrikus az optikai tengelyre. Ha a felület nem sík akkor **képsík görbület**-ről (field curvature) beszélünk.



Példa: konfokális mikroszkópban nyalábpásztázás során fontos, hogy a képsík sík legyen, a képsík görbület korrekciója jelentősen megnöveli a lencsék számát:

Objective Correction for Field Curvature

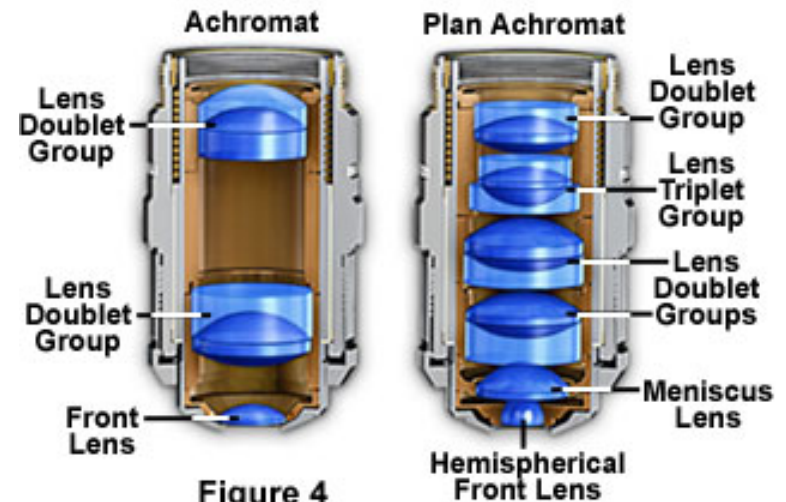
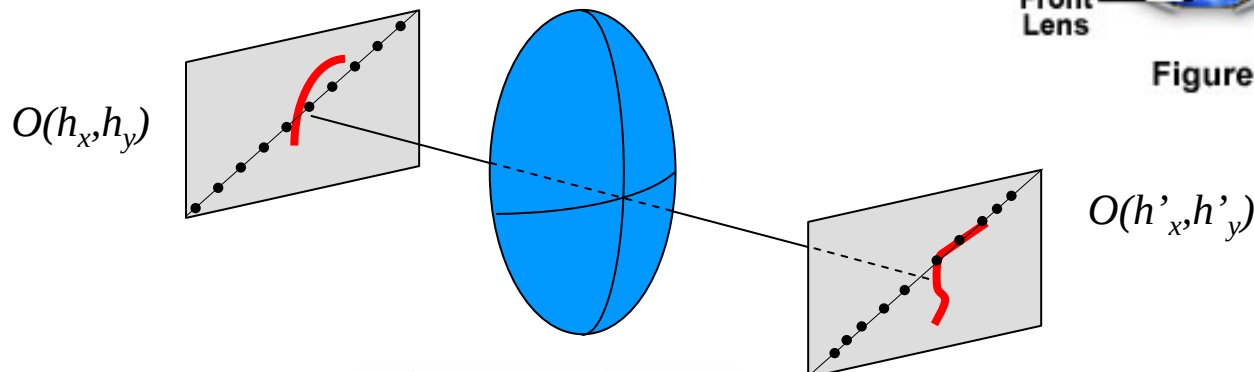


Figure 4

Tegyük fel, hogy a leképezés sztigmatikus és a képpontok egy síkon helyezkednek el. A tárgysíkon lévő görbe képe is görbe de nem ua. ill. nem arányos azzal. Ekkor azt mondjuk, hogy a leképezés **torzult** (distortion).



Ha nincs torzulás akkor: $h'_y = mh_y$ and $h'_x = mh_x$ azaz a nagyítás független a tárgy pont helyétől.

Centrált optikai rendszerek szimmetriatulajdonságai (III)

Tökéletes kép esetén a leképezésnek három feltételnek kell eleget tenni:

- 1. SZTIGMATIKUS**
- 2. KÉPSÍKGÖRBÜLET MENTES**
- 3. TORZULÁSMENTES**

Aberrációk esetén a fent felsorolt hibák közül egyik, vagy esetleg egyszerre több is jelen van, és a

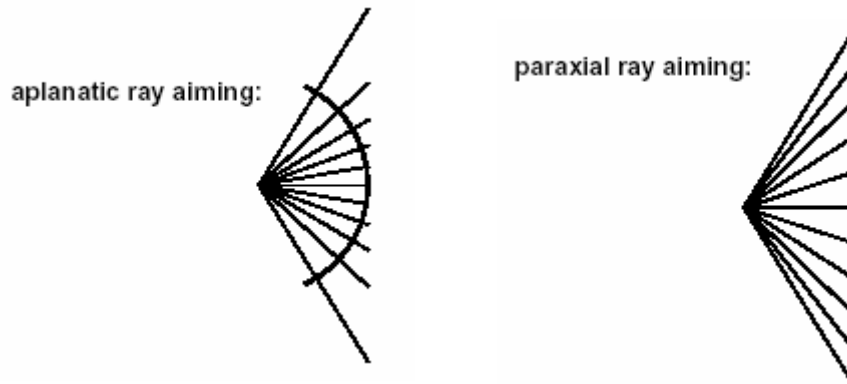
$$h'_y = mh_y \quad \text{and} \quad h'_x = mh_x$$

képlet nem lesz többé érvényes. A képsíkon mért koordináták eltérnek az ideális esettől. Az eltérés mértékéül szokás bevezetni az ε_x , ε_y mennyiségeket amelyeket eltérésnek (displacement) nevezünk:

$$\varepsilon_y = h'_y - mh_y \quad \text{and} \quad \varepsilon_x = h'_x - mh_x$$

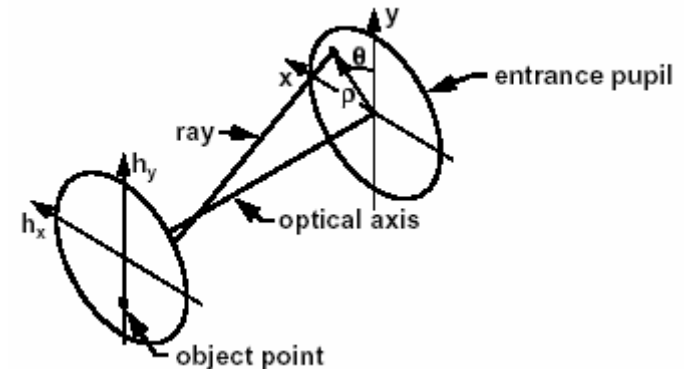
Sugarak megadása

Egy optikai rendszeren áthaladó sugarat megadhatunk két (nem konjugált) sík metszéspontjaival. Mivel az optikai rendszerekben általában a tárgy képére vagyunk kíváncsiak, logikus a tárgysíkot választani az egyik síknak. A másik síknak általában egy olyan gömbfelületet szokás választani amelynek görbületi középpontja a tárgypon. Hopkins után ekkor kanonikus koordinátákról beszélünk. Az OSLO-ban aplanatikus sugárról beszélünk. Paraxiális közelítésben a paraxiális belépő pupillát szokás második felületnek választani.



A két definíció között csak véges tárgytávolság esetén van különbség és kis numerikus aperturák esetén ($NA < 0.5$) elhanyagolható.

Ha a tárgysíkban (h_x, h_y) , koordinátákkal, a belépő apertúrán (x, y) koordinátákkal adjuk meg a sugarat akkor a sugár egyértelmű megadásához 4 koordinátára van szükség. Az optikai rendszerek azonban általában hengersizmetrikusak, és ezért h_x -et nullának választhatjuk. Ez azt jelenti, hogy az optikai rendszert addig forgatjuk míg a tárgypon a meridionális síkban nem lesz. **Ekkor három koordináta (h_y, y, x) egyértelműen definiál egy sugarat.**



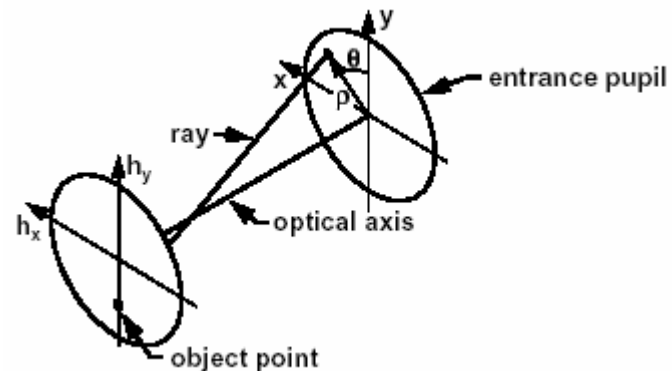
Sugarak megadása

Kihasználva a hengersizimetriát, célszerű az x, y koordinátákat hengerkoordinátákban felírni:

$$y = \rho \cos \theta \text{ and } x = \rho \sin \theta$$

Meridionális sugarak: yz síkban pl. $\Theta=0$ vagy $\Theta=\pi$

Sagitális sugarak: $\Theta = \pi/2$ vagy $\Theta=3\pi/2$



Az OSLO-ban a koordináták normáltak azaz $h=1$ és $\rho=1$.

Entrance beam radius (**EBR**) adja meg a belépő apertúra méretét, azaz a tényleges koordináta kiszámításához a normált koordinátát meg kell szorozni EBR-rel.

Object height (**OBH**) a maximális tárgyméretet adja, így a tárgysíkban a tényleges koordinátaértékek kiszámításához a normált koordinátákat meg kell szorozni OBH-val.

Paraxial Setup Editor < Surface Data

✓ -5.7295779513e-19

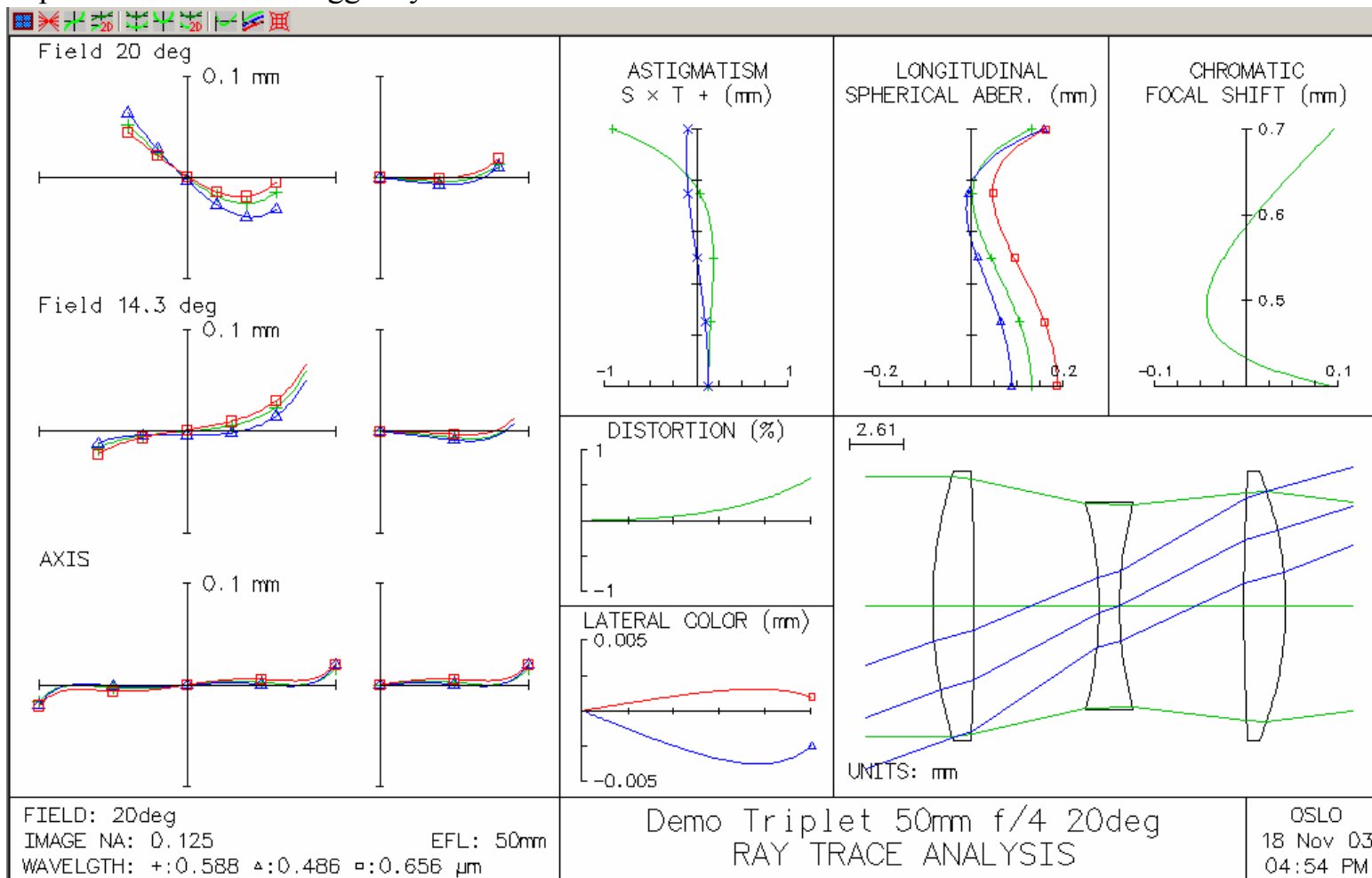
✗

?

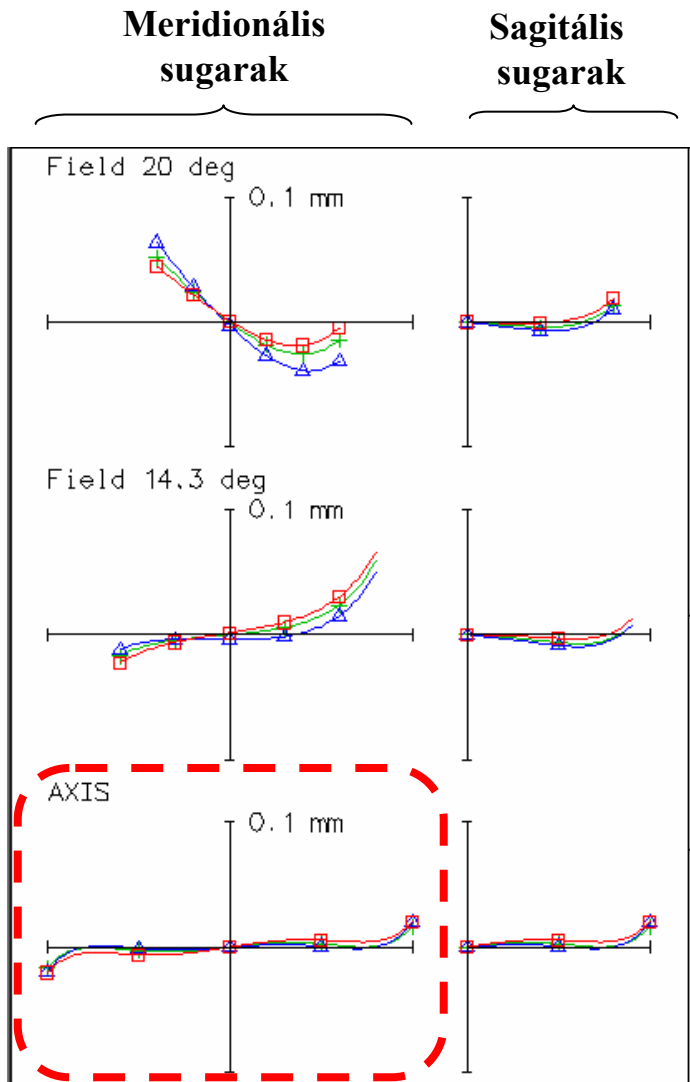
Aperture		Field		Conjugates	
Entr beam rad*	6.250000	Field angle	-5.7296e-19	Object dist	1.0000e+20
Object NA	6.2500e-20	Object height*	1.000000	Object to PP1	1.0000e+20
Ax. ray slope	-0.124999	Gaus image ht	-5.0001e-19	Gaus img dist	43.080554
Image NA	0.124999			PP2 to image	50.000541
Working f-nbr	4.000043			Magnification	0.000000
Aperture divisions across pupil for spot diagram:					17.030000
Gaussian beam	NO	1/e^2 radius on srf 1: sdx		1.000000	sdy 1.000000

Sugármetszet Görbék (I)

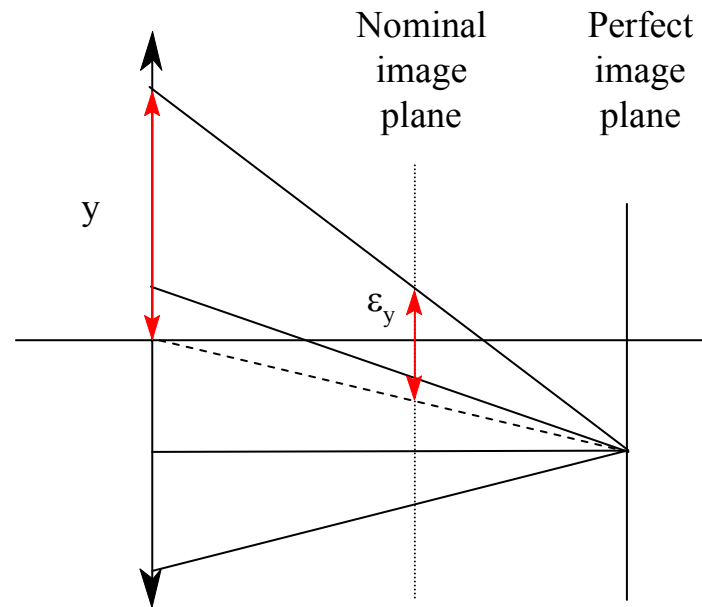
Az optikai aberrációk grafikus megjelenítésére több megoldás is lehetséges. A módszerek egy közös tulajdonsága, hogy az ideális esethez próbál meg viszonyítani, azaz direkt az aberrációt mutatja. Az egyik legelterjedtebb a sugármetszet görbék, amely a displacement-eket (ϵ_x , ϵ_y), mutatja az apertúrakoordináták függvényében.



Sugármetszet Görbék (II)



A meridionális síkban lévő sugarak a hengersizmetria miatt nem hagyhatják el a meridionális síkot. A meridionális sugármetszet görbék ideális esetben konstans 0 függvények. Tökéletes leképezés esetén, ha a kép nem a nominális képsíkban van akkor a meridionális sugármetszet görbe olyan egyenes amely áthalad az origón (feladat: toljuk el a képsíkot és figyeljük meg a sugármetszet görbék változását! (perfect lens: $f=10$, $M=-1$, $t=k=20$, slider window step: 10^{-10}):

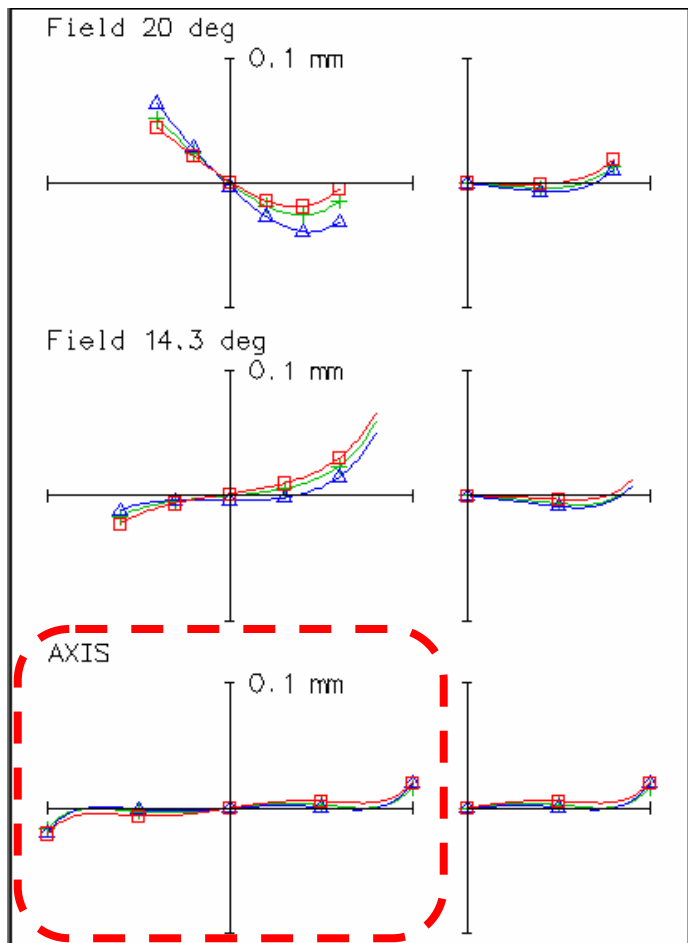


Az OSLO ε_y displacement-et (jelölése: DY) ábrázolja az y normált apertúrakoordináta (jelölése: FY) függvényében. Sagittális sugarak esetén pedig ε_x -et (jelölése: DX) az x (jelölése: FX) függvényében.

Sugármetszet Görbék (III)

Meridionális
sugarak

Sagitális
sugarak

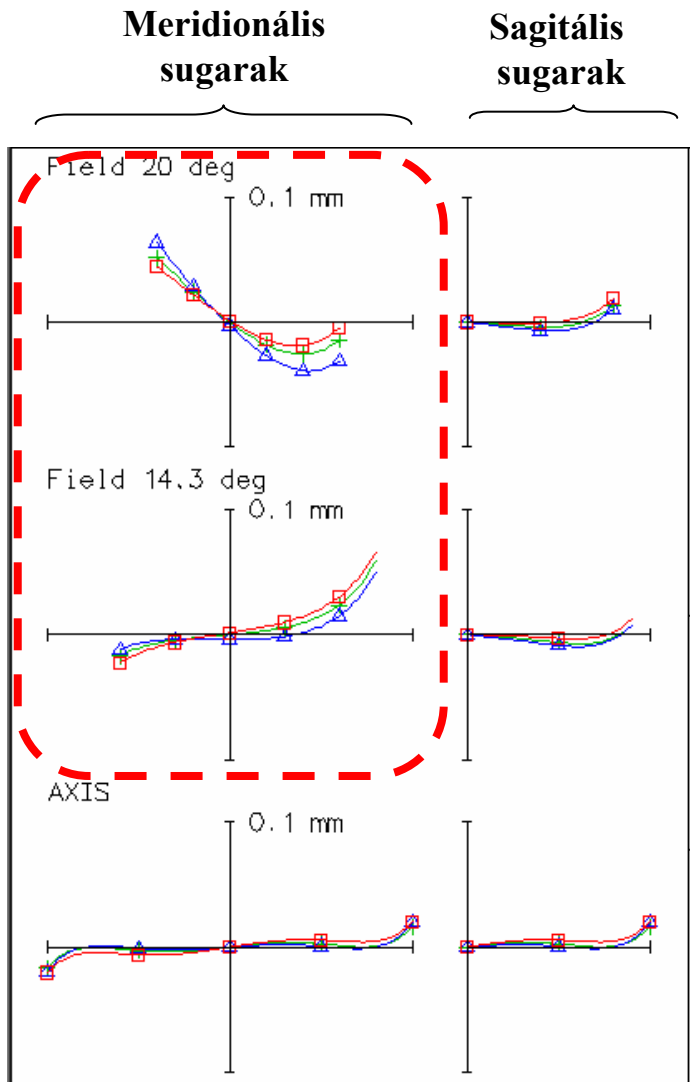


On-axis meridionális sugármetszet:

A hengersizmetria miatt az optikai tengelyről (on-axis) kiinduló sugarakra a meridionális sugármetszet görbe antiszimmetrikus.

A példában szereplő lencse egy viszonylag jól korrigált lencse on axis esetre. A képsík a paraxiális fókuszhoz felel meg. Az apertúra növelésével a displacement is nő, azaz van egy pozitív (overcorrected) alacsony rendű aberrációja. Mivel az apertúra koordináta növelésével a displacement ismét zérus lesz, ezért kell lennie egy magasabb rendű negatív aberrációnak. Ill. nagy apertúrák esetén a displacement határozottan pozitív magasabbrendű aberrációt sejtet. Összességében a szélső sugarakat leszámítva ($\rho < 0.8$) az összes sugár 0.01 mm-en belül van, a szélső sugarak kb. 0.03 mm-re távolodnak el. Azt mondhatjuk tehát, hogy lesz egy kb. 0.01 sugarú fényes foltunk, amelyet egy kb. 0.03 mm sugarú halványabb rész vesz körül.

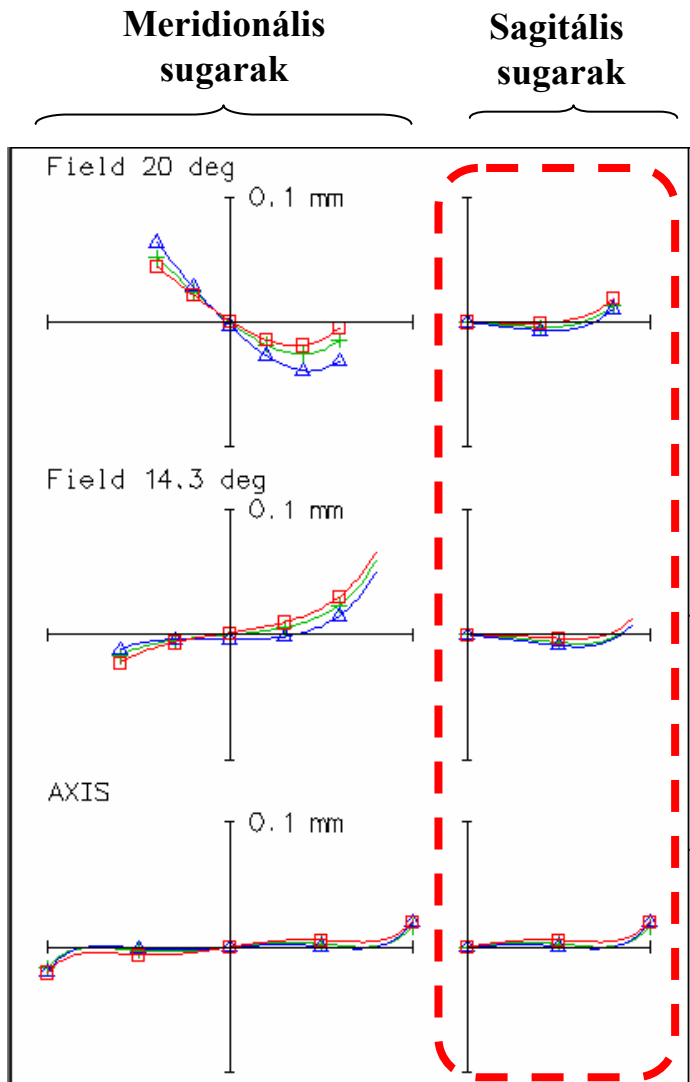
Sugármetszet Görbék (IV)



Off-axis meridionális sugármetszetek:

Az ábra két off-axis tárgyponthoz is mutatja a meridionális sugármetszet görbéket. A tárgyponthoz távolítva az optikai tengelytől jelentősebb aberrációk figyelhetők meg ill. a görbe antiszimmetrikus jellege is megszűnik.

Sugármetszet Görbék (V)



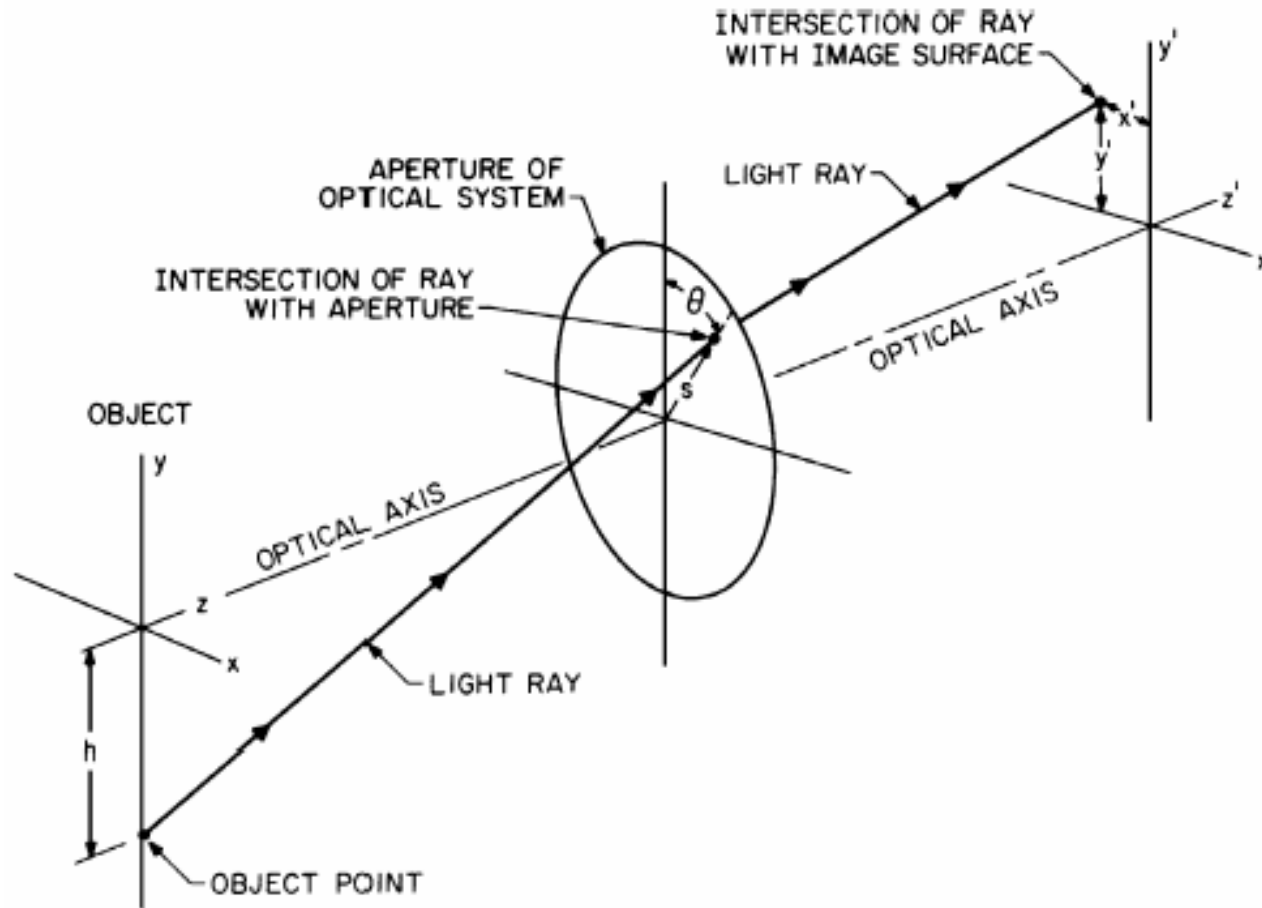
Szagittális sugármetszetek:

Tfh., a tárgy pont a meridionális síkban van. Ekkor elvileg a hengerszimmetria miatt a szagittális sugaraknak a képsíkban nem lehet ε_x komponense. Ennek ellenére általában ε_x nem zéró, tipikusan egy nagyságrenddel kisebb a meridionális sugarakra jellemző eltérésnél.

Szimmetriaokok miatt ha a $(0, x)$ koordinátájú sugár hibája $(\varepsilon_y, \varepsilon_x)$, akkor a $(0, -x)$ koordinátájú sugár hibája $(\varepsilon_y, -\varepsilon_x)$, azaz a képnek szimmetrikusnak kell lennie a meridionális síkra. Ezért szagittális sugármetszetek esetén elegendő a görbe felét kirajzoltatni.

Érdeemes megjegyezni, hogy szagittális esetben az off-axis görbék nem "torzulnak" el annyira az on-axis esethez képest mint meridionális esetben. Ennek az az oka, hogy a lencse szagittális keresztmetszete (a szimmetria) nem változik olyan drasztikusan mint a meridionális.

Az aberrációs ill. Seidel polinom (I)



Tudjuk, hogy három koordináta: h , s és θ egyértelműen definiál egy sugarat, azaz a képsíkban a x' , és y' -vel megadott képpont, ezen változók szerinti Taylor sor alakjában felírható.

Az aberrációs ill. Seidel polinom (II)

A felírás előtt gyűjtsük össze ismét az optikai rendszer hengersizimetriájából adódó következményeket:

1. Ha egy sugár metszi az optikai tengelyt a tárgysíkban, akkor a képsíkban is metszenie kell. Ez az állítás egyenértékű azzal, hogy a meridionális sugár nem hagyja el a meridionális síkot.
2. Azok a sugarak, amelyek a tárgytérben átmennek egy, az optikai tengelyen lévő ponton, és a lencse apertúráját a tengelytől azonos távolságban érik el (egy annuláris aperturát alkotva), a képtérben szintén egy axiális ponton mennek keresztül.
3. A meridionális sík „előtt” haladó sugárnak van egy tükörképe a meridionális sík mögött, amely ugyanúgy terjed, csak x' , és Θ vált előjelet. Azaz a szagitális sugármenetek szimmetrikusak a meridionális síkra.
4. A $\pm h$ -ból induló és a lencse apertúráját alul ($s, 180^\circ - \Theta$) ill. felül (s, Θ) érő nyalábok, ugyanazon x' de ellenkező előjelű y' -nél érik el a képsíkot.

Ezen megfontolásokat figyelembe véve a kép x' , y' koordinátái sorba fejthetők s , Θ és h szerint:

$$\begin{aligned} y' = & A_1 s \cos \theta + A_2 h \\ & + B_1 s^3 \cos \theta + B_2 s^2 h (2 + \cos 2\theta) + (3B_3 + B_4) s h^2 \cos \theta + B_5 h^3 \\ & + C_1 s^5 \cos \theta + (C_2 + C_3 \cos 2\theta) s^4 h + (C_4 + C_6 \cos^2 \theta) s^3 h^2 \cos \theta \\ & + (C_7 + C_8 \cos 2\theta) s^2 h^3 + C_{10} s h^4 \cos \theta + C_{12} h^5 + D_1 s^7 \cos \theta + \dots \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} x' = & A_1 s \sin \theta \\ & + B_1 s^3 \sin \theta + B_2 s^2 h \sin 2\theta + (B_3 + B_4) s h^2 \sin \theta \\ & + C_1 s^5 \sin \theta + C_3 s^4 h \sin 2\theta + (C_5 + C_6 \cos^2 \theta) s^3 h^2 \sin \theta \\ & + C_9 s^2 h^3 \sin 2\theta + C_{11} s h^4 \sin \theta + D_1 s^7 \sin \theta + \dots \end{aligned}$$

Az aberrációs ill. Seidel polinom (II)

$$\begin{aligned}
 y' = & A_1 s \cos \theta + A_2 h \\
 & + B_1 s^3 \cos \theta + B_2 s^2 h (2 + \cos 2\theta) + (3B_3 + B_4) s h^2 \cos \theta + B_5 h^3 \\
 & + C_1 s^5 \cos \theta + (C_2 + C_3 \cos 2\theta) s^4 h + (C_4 + C_6 \cos^2 \theta) s^3 h^2 \cos \theta \\
 & + (C_7 + C_8 \cos 2\theta) s^2 h^3 + C_{10} s h^4 \cos \theta + C_{12} h^5 + D_1 s^7 \cos \theta + \dots
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 x' = & A_1 s \sin \theta \\
 & + B_1 s^3 \sin \theta + B_2 s^2 h \sin 2\theta + (B_3 + B_4) s h^2 \sin \theta \\
 & + C_1 s^5 \sin \theta + C_3 s^4 h \sin 2\theta + (C_5 + C_6 \cos^2 \theta) s^3 h^2 \sin \theta \\
 & + C_9 s^2 h^3 \sin 2\theta + C_{11} s h^4 \sin \theta + D_1 s^7 \sin \theta + \dots
 \end{aligned}$$

Az **A** együtthatót tartalmazó tagokban a változók első hatványon vannak (s, h), a **B** együtthatót tartalmazókban a kitevők összege 3 (s^3, s^2h, sh^2, h^3), a **C** együtthatót tartalmazó tagokban a kitevők összege 5 ($h^5, h^4s, h^3s^2, h^2s^3, hs^4, s^5$), stb. Első rendben 2, másodrendben 5, harmadrendben 7, n -ed rendben

$$\frac{(n+3)(n+5)}{8} - 1$$

db. együttható van.

A páros rendek a hengerszimmetria miatt hiányoznak.

Ideális esetben $x'=0$ ill. $y'=A_2h$ egyenleteknek kellene teljesülni, ahol A_2 a nagyítást adja. Minden más tag a tranzverzális aberráció egy tagja.

Az A-s tagok adják a paraxiális vagy első rendű leképezés egyenleteit

A B-s tagok adják a harmadrendű (Seidel vagy primary) aberrációs tagokat:

B1: szférikus aberráció,

B2: coma

B3: asztigmatizmus

B4: Petzval hiba

B5: torzulás

Az aberrációs ill. Seidel polinom (III)

Ha harmadrendű, azaz a Seidel aberrációkra korrigálva van a lencserendszer akkor az ötödrendű együtthatókra igaz, hogy:

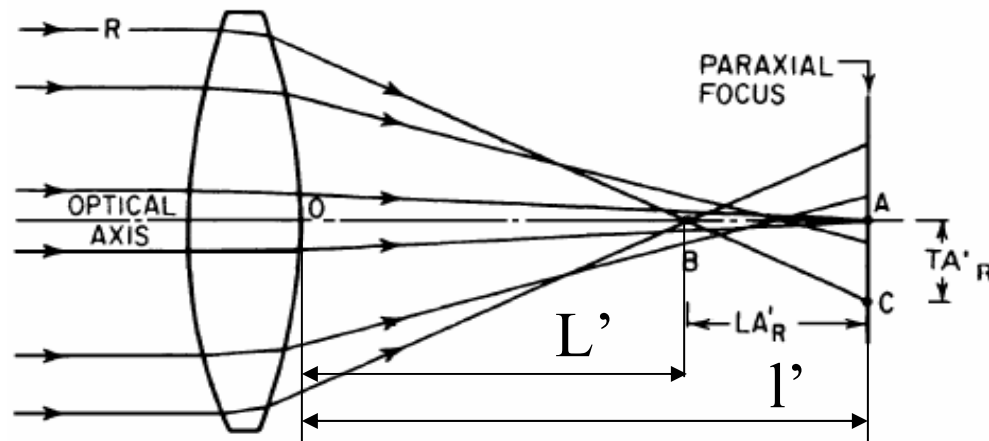
$$C_2 = 3/2 * C_3$$

$$C_4 = C_5 + C_6$$

$$C_7 = C_8 + C_9$$

Azaz a harmadfokú tagok kiesése bizonyos értelemben egyszerűsíti a rendszert magasabb rendekben is.

A Seidel aberrációk - A szférikus aberráció



A paraxiális fókuszpont és a tengelymetszet távolságát nevezzük **longitudinális szférikus aberrációnak**:

$$LA' = L' - l'$$

De szokás a paraxiális fókuszban az optikai tengelyre merőlegesen is felmérni, ekkor laterális vagy tranzverzális szférikus aberrációról beszélünk. Ennek mértékéül az ábrán is látható TA' - szokás venni.

Mivel a szferikus aberráció mértéke függ az apertúra méretétől, ezért mint a szférikus aberráció egy tipikus mértékéül szokás megadni az apertúra szélén áthaladó sugárra (lásd ábrán R sugár) a hibát. Ezt marginal szférikus aberrációnak nevezzük, jele: LA_m , ill. TA_m .

A tranzverzális és a longitudinális szférikus hibákat összekötő egyenlet:

$$TA'_R = -LA' \tan U'_R = -(L' - l') \tan U'_R$$

A kromatikus hibához hasonlóan LA' előjelétől függően itt is beszélhetünk negatív (undercorrected), vagy pozitív (overcorrected) szférikus hibáról.

A szférikus aberráció sugármetszet görbéi

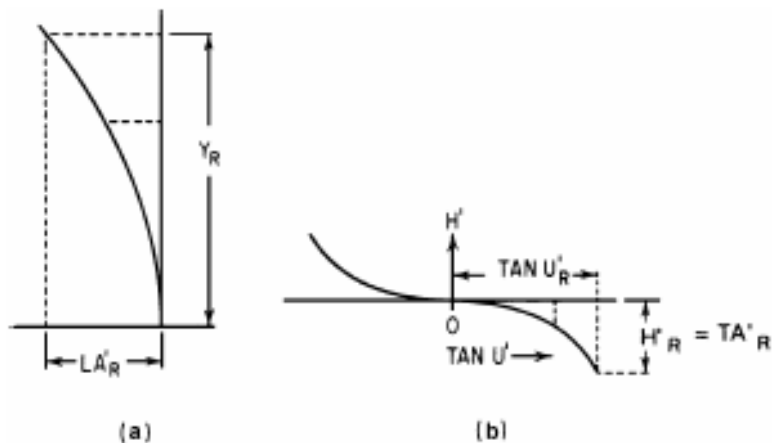
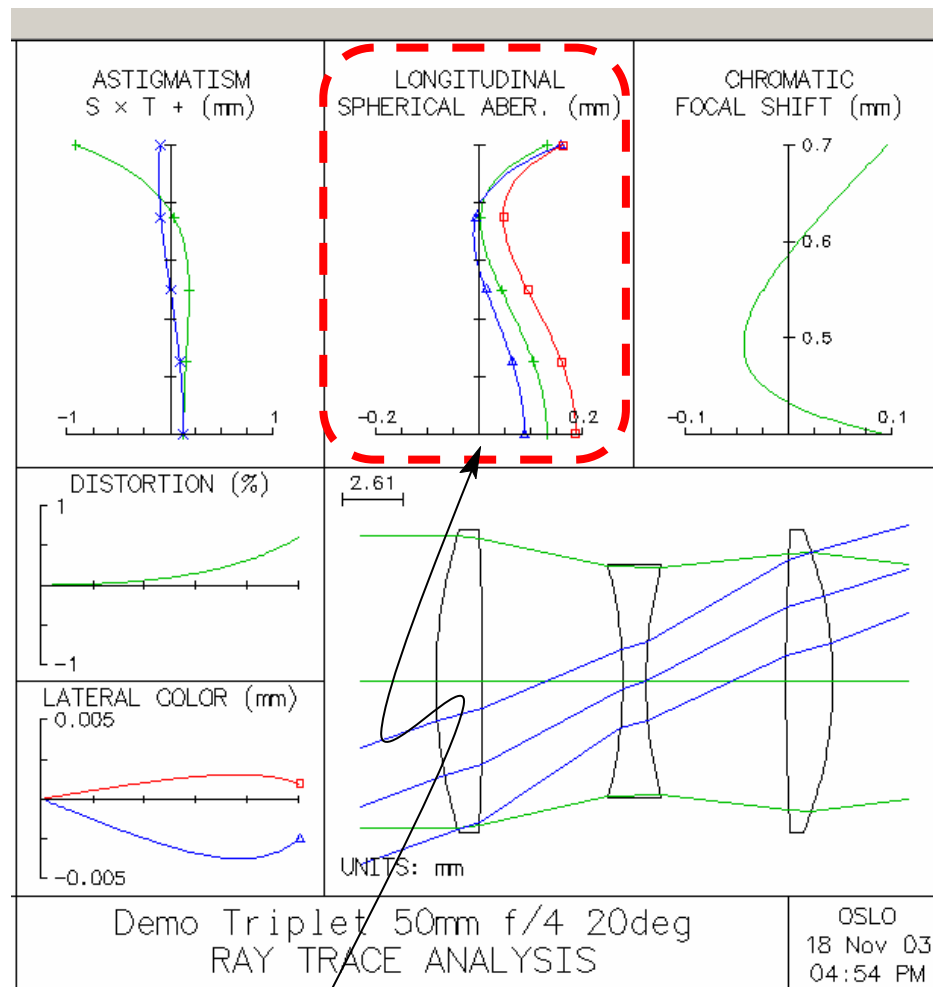


Figure 3.3 Graphical representation of spherical aberration. (a) As a longitudinal aberration, in which the longitudinal spherical aberration (LA') is plotted against ray height (Y). (b) As a transverse aberration, in which the ray intercept height (H') at the paraxial reference plane is plotted against the final ray slope ($\tan U'$).

A tranzverzális ábrázolás egy nagy előnye, hogy ez közvetlenül összehasonlítható a mért ill. megfigyelt folttal.



A képsíkot a paraxiális fókuszba kell tenni, hogy a paraxiális sugarakra a hiba zéró legyen!

Ill. a **pla** paranccsal külön is ki lehet grafikusán tenni

A szférikus aberráció függése az alakfaktortól

$$C = \frac{R_1 - R_2}{R_1 + R_2}$$

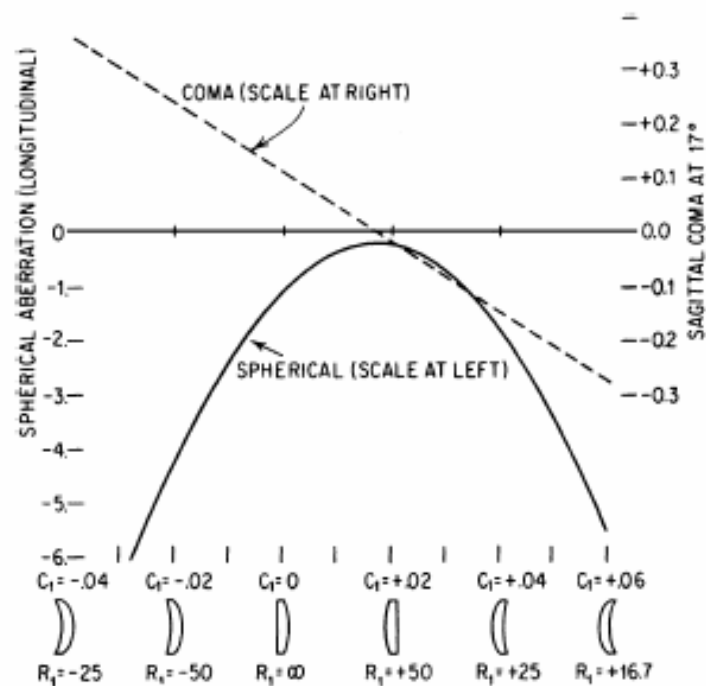


Figure 3.12 Spherical aberration and coma as a function of lens shape. Data plotted are for a 100-mm focal length lens (with the stop at the lens) at $f/10$ covering $\pm 17^\circ$ field.

Ökölszabály: minden felületen legyen egyenlő a törés.

A szférikus aberráció függése az alakfaktortól (I)

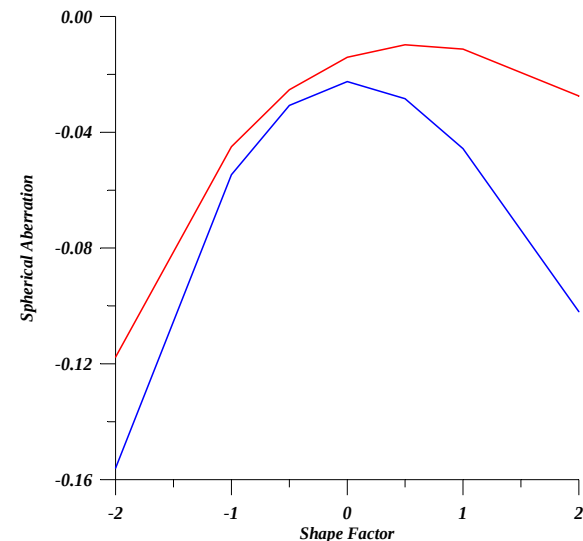
Példa: Tekintsük a következő hét lencsét:

r_1	r_2	S
-10	-3.33	-2
∞	-5	-1
20	-6.67	-0.5
10	-10	0
6.67	-20	0.5
5	∞	1
3.33	10	2

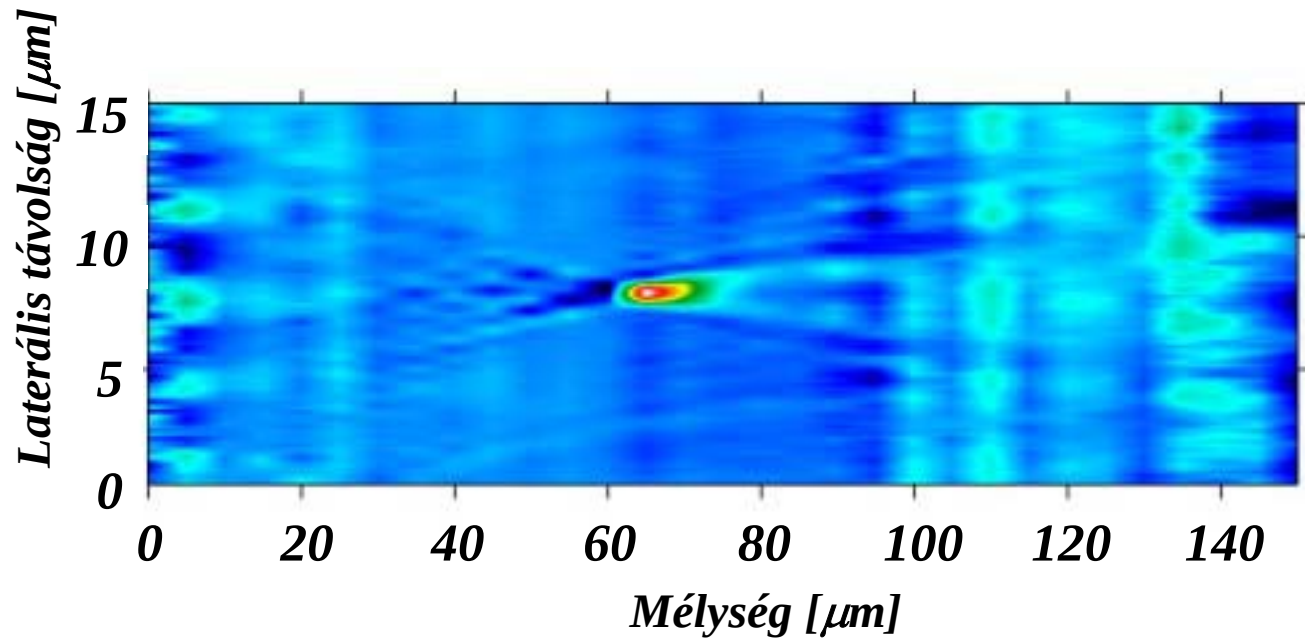
A lencsék vastagsága legyen 2, törésmutatójuk 1.5.

Számítsuk ki a longitudinális szférikus aberrációt OSLO-val, ha a tárgy a végtelenben van. Számítsuk ki a longitudinális szférikus aberrációt OSLO-val, ha a tárgy a 20 egységre van a lencsétől! Mit veszünk észre?

r_1	r_2	S	SA3 ($t=\infty$)	SA3 ($t=20$)
-10	-3.33	-2	-0.1177	-0.156
∞	-5	-1	-0.045	-0.0547
20	-6.67	-0.5	-0.0253	-0.0307
10	-10	0	-0.014123	-0.0225
6.67	-20	0.5	-0.0098	-0.0284
5	∞	1	-0.01129	-0.0457
3.33	10	2	-0.02745	-0.102

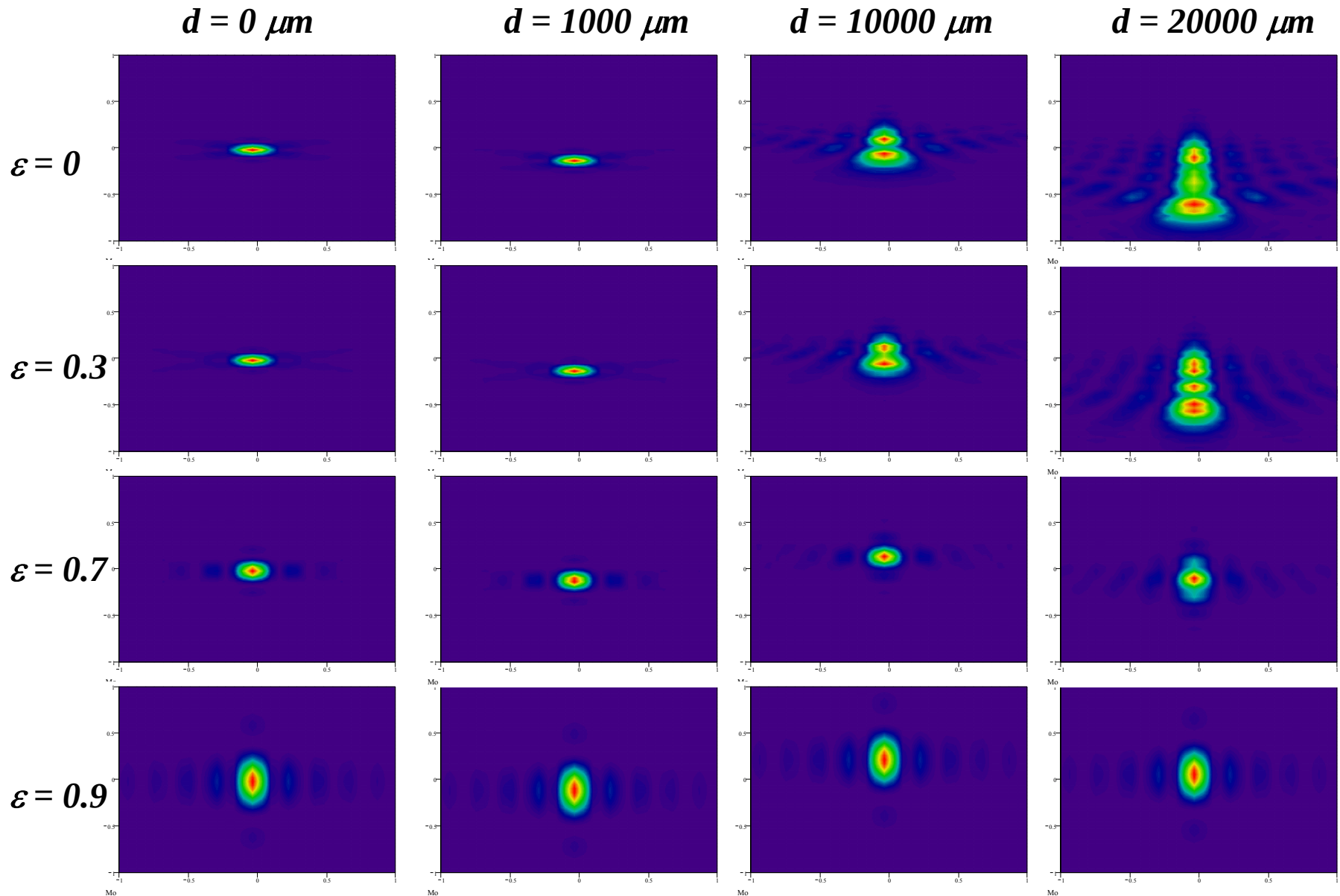


A szférikus aberráció mikroszkópokban (korrigálás fedőlemezre)



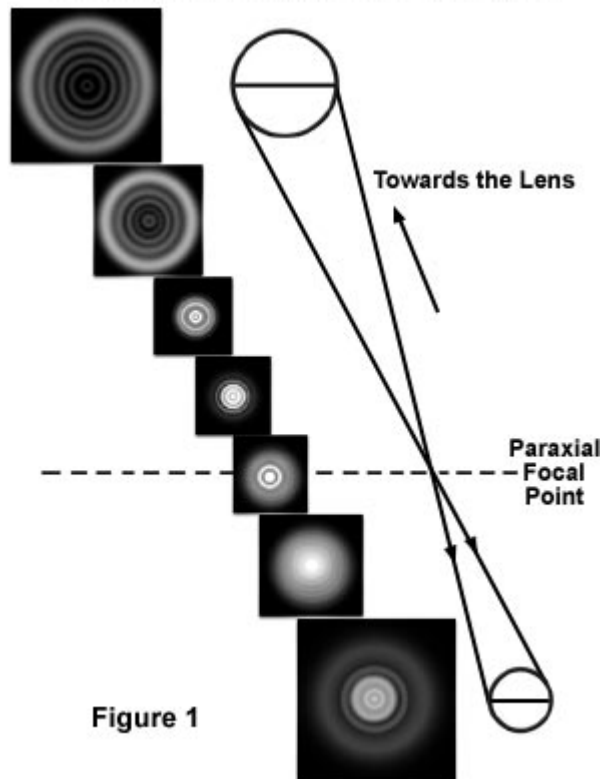
<http://www.olympusmicro.com/primer/java/aberrations/spherical/index.html>

Egy lencse mögé tett d vastagságú lemez által bevezetett szférikus aberráció kiküszöbölése annuláris apertúrával



Kóma és Asztigmatizmus (I)

Abban az esetben, amikor a tárgy pont az optikai tengelyen van (hengerszimmetrikus rendszert feltételezve) a képtérben kialakuló intenzitáseloszlás hengerszimmetrikus kell hogy legyen, függetlenül attól, hogy sztimatikus-e a leképezés. Az ideális képsíkot ekkor is, viszonylag könnyen meg lehet találni.



Ha a tárgy pont lelép az optikai tengelyről, akkor off-axis tárgypontról beszélünk. Ekkor a hengerszimmetria miatt a kialakuló intenzitáseloszlásnak tükröszimmetrikusnak kell lennie. Megszorítások nélkül feltehetjük, hogy a tárgy pont a meridionális síkban van. Ekkor a tükrösík a meridionális sík.

Kóma és Asztigmatizmus (II)

Egy pontszerű tárgyat feltételezve az aberrációk könnyedén két részre oszthatóak abból a szempontból, hogy az apertúrasugár előjelváltozásától hogyan függenek ($\rho \rightarrow -\rho$ azt jelenti, mintha Θ -hoz hozzáadnánk π -t).

Bontsuk fel ε_y -t két tag összegére:

$$\varepsilon_y(\rho, \theta, h) = \varepsilon_s(\rho, \theta, h) + \varepsilon_c(\rho, \theta, h)$$

ahol,

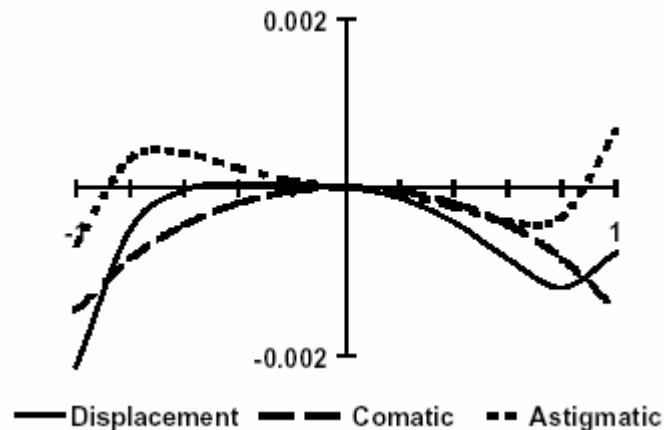
$$\varepsilon_s(\rho, \theta, h) = \frac{1}{2} [\varepsilon_y(\rho, \theta, h) - \varepsilon_y(-\rho, \theta, h)]$$

$$\varepsilon_c(\rho, \theta, h) = \frac{1}{2} [\varepsilon_y(\rho, \theta, h) + \varepsilon_y(-\rho, \theta, h)]$$

Azaz igaz, hogy $\varepsilon_s(-\rho, \theta, h) = -\varepsilon_s(\rho, \theta, h)$, és $\varepsilon_c(-\rho, \theta, h) = \varepsilon_c(\rho, \theta, h)$.

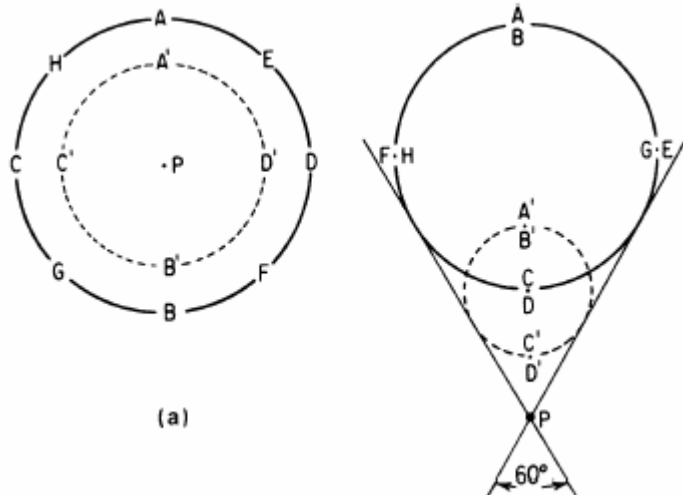
ε_s előjelet vált, azaz a kép szimmetrikus lesz: asztigmia

ε_c nem vált előjelet, azaz ugyanabban a képpontban találkozik a $(-\rho, \theta, h)$, és a (ρ, θ, h) tárgypontról kiinduló sugár.



Kóma és Asztigmatizmus (III)

Annular aperture curved representation



(a)

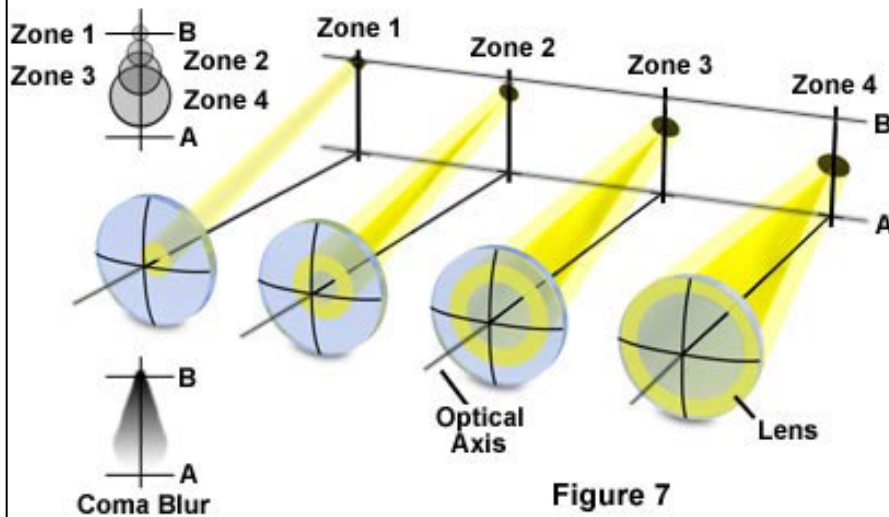
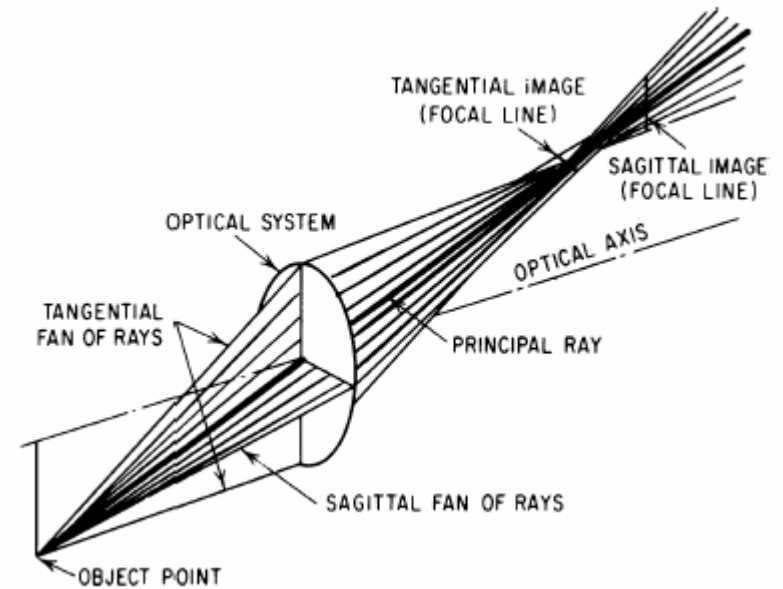
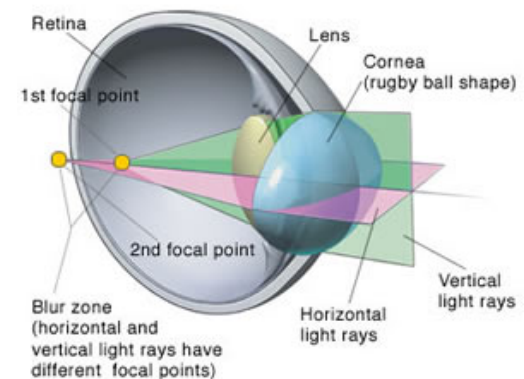


Figure 7



CROSS SECTION OF ASTIGMATIC EYE



Az aberrációk osztályozása

A tranzverzális aberrációkat a ρ és h függésük alapján osztályozhatjuk. Abban az esetben ha az aberráció ρ páratlan hatványától függ, asztigmiáról, ha ρ páros hatványától függ akkor comáról beszélünk. Ha az aberráció függése $\rho^{n-s}h^s$, alakú, akkor azt mondjuk, hogy az aberráció n -ed rendű s -ed fokú kóma ha $(n-s)$ páros, ill. n -ed rendű $(n-s)$ -ed fokú asztigmia ha $(n-s)$ páratlan.

Példa: C_5 függése ρ^3h^2 , azaz ötödfokú, harmadrendű asztigmiát ad!

Zernike polinomok

Az aberrációk leírására ill. jellemzésére a sugármetszet ill. az annuláris apertúra görbéken túl, a fázisfrontra vonatkozó Zernike polinomok a legelterjedtebb eszköz. A Zernike polinomok végtelen számú ortogonális és normált polinomok. Az ortogonalitás miatt a Zernike polinomokra való bontás független a rendtől, ellentétben a klasszikus polinomiális felbontással, ahol a max. rendszámtól erősen függenek az együtthatók. A normálás módja megállapodás kérdése és irodalomról irodalomra változik.

A Zernike polinomok tulajdonságai:

1. Minden Zernike polinom két tényező szorzatára bontható, az első tényező csak ρ -nak, a második csak Θ -nak a függvénye:

$$Z(\rho, \Theta) = R(\rho) * G(\Theta)$$

$G(\Theta)$, folytonos és 2π szerint periódikus függvény. Általános alakja: $G(\Theta) = e^{\pm im\Theta}$.

2. $R(\rho)$ radiális tényező olyan n -ed rendű függvénye ρ -nak, amely nem tartalmaz m -nél kisebb hatványú tagokat.
3. $R(\rho)$ páros/páratlan függvénye ρ -nak ha m páros/páratlan.

A fentiek szerint a radiális tényezőt $R_n^m(\rho)$ -mel jelölve az írhatjuk

ortogonalításra :

$$\int_0^1 R_n^m(\rho) R_{n'}^m(\rho) \rho d\rho = \frac{1}{2(n+1)} \delta_{nn'}$$

normálásra:

$$R_n^m(1) = 1$$

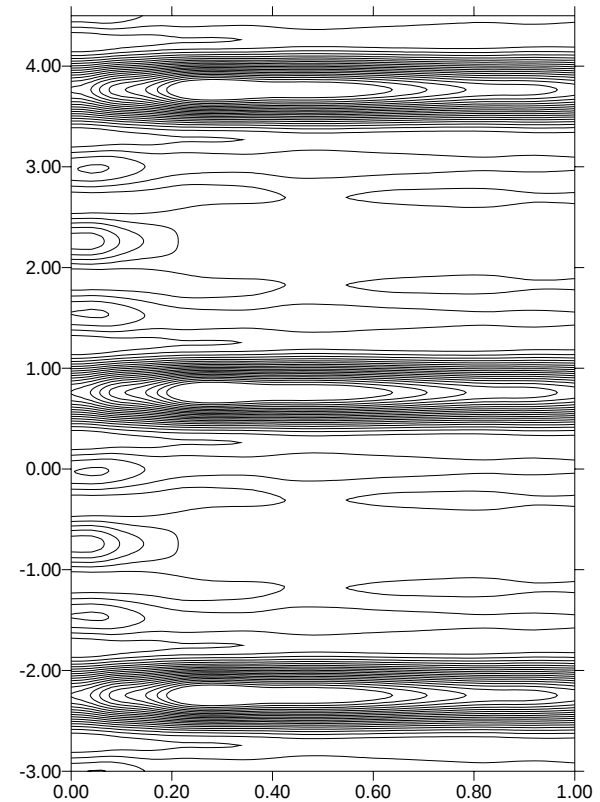
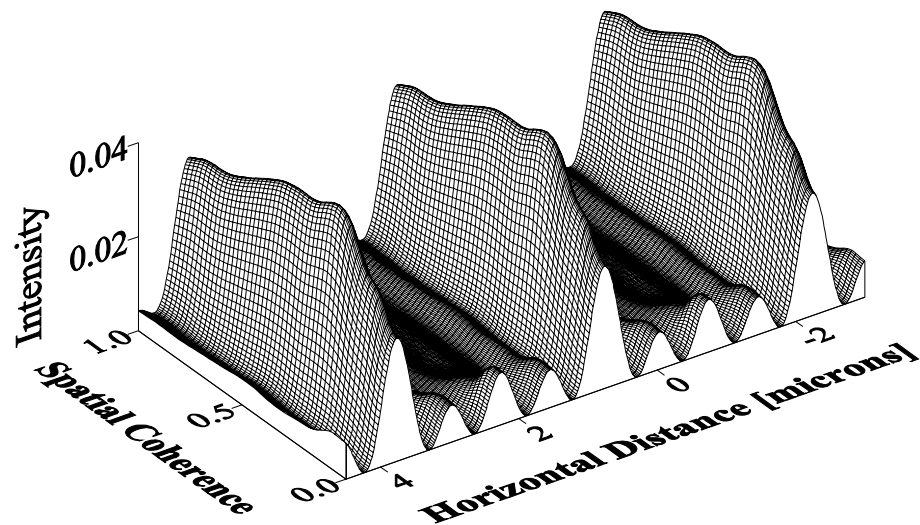
Zernike polinomok

N	m	No.	Zernike polynomial
0	0	0	1
1	1	1	$\rho \cos \theta$
		2	$\rho \sin \theta$
	0	3	$2\rho^2 - 1$
2	2	4	$\rho^2 \cos 2\theta$
		5	$\rho^2 \sin 2\theta$
	1	6	$(3\rho^2 - 2)\rho \cos \theta$
		7	$(3\rho^2 - 2)\rho \sin \theta$
	0	8	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$
3	3	9	$\rho^3 \cos 3\theta$
		10	$\rho^3 \sin 3\theta$
	2	11	$(4\rho^2 - 3)\rho^2 \cos 2\theta$
		12	$(4\rho^2 - 3)\rho^2 \sin 2\theta$
	1	13	$(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3)\rho \cos \theta$
		14	$(10\rho^4 - 12\rho^2 + 3)\rho \sin \theta$
	0	15	$20\rho^6 - 30\rho^4 + 12\rho^2 - 1$
4	4	16	$\rho^4 \cos 4\theta$
		17	$\rho^4 \sin 4\theta$
	3	18	$(5\rho^2 - 4)\rho^3 \cos 3\theta$
		19	$(5\rho^2 - 4)\rho^3 \sin 3\theta$
	2	20	$(15\rho^4 - 20\rho^2 + 6)\rho^2 \cos 2\theta$
		21	$(15\rho^4 - 20\rho^2 + 6)\rho^2 \sin 2\theta$
	1	22	$(35\rho^6 - 60\rho^4 + 30\rho^2 - 4)\rho \cos \theta$
		23	$(35\rho^6 - 60\rho^4 + 30\rho^2 - 4)\rho \sin \theta$
	0	24	$70\rho^8 - 140\rho^6 + 90\rho^4 - 20\rho^2 + 1$

5	5	25	$\rho^5 \cos 5\theta$
		26	$\rho^5 \sin 5\theta$
	4	27	$(6\rho^2 - 5)\rho^4 \cos 4\theta$
		28	$(6\rho^2 - 5)\rho^4 \sin 4\theta$
	3	29	$(21\rho^4 - 30\rho^2 + 10)\rho^3 \cos 3\theta$
		30	$(21\rho^4 - 30\rho^2 + 10)\rho^3 \sin 3\theta$
	2	31	$(56\rho^6 - 105\rho^4 + 60\rho^2 - 10)\rho^2 \cos 2\theta$
		32	$(56\rho^6 - 105\rho^4 + 60\rho^2 - 10)\rho^2 \sin 2\theta$
	1	33	$(126\rho^8 - 280\rho^6 + 210\rho^4 - 60\rho^2 + 5)\rho \cos \theta$
		34	$(126\rho^8 - 280\rho^6 + 210\rho^4 - 60\rho^2 + 5)\rho \sin \theta$
6	0	35	$252\rho^{10} - 630\rho^8 + 560\rho^6 - 210\rho^4 + 30\rho^2 - 1$
		36	$924\rho^{12} - 2772\rho^{10} + 3150\rho^8 - 1680\rho^6 + 420\rho^4 - 42\rho^2 + 1$

Megjegyzés

Miért beszélünk mindig pontszerű tárgyról?



Döntött és eltolt felületek

Surface Data

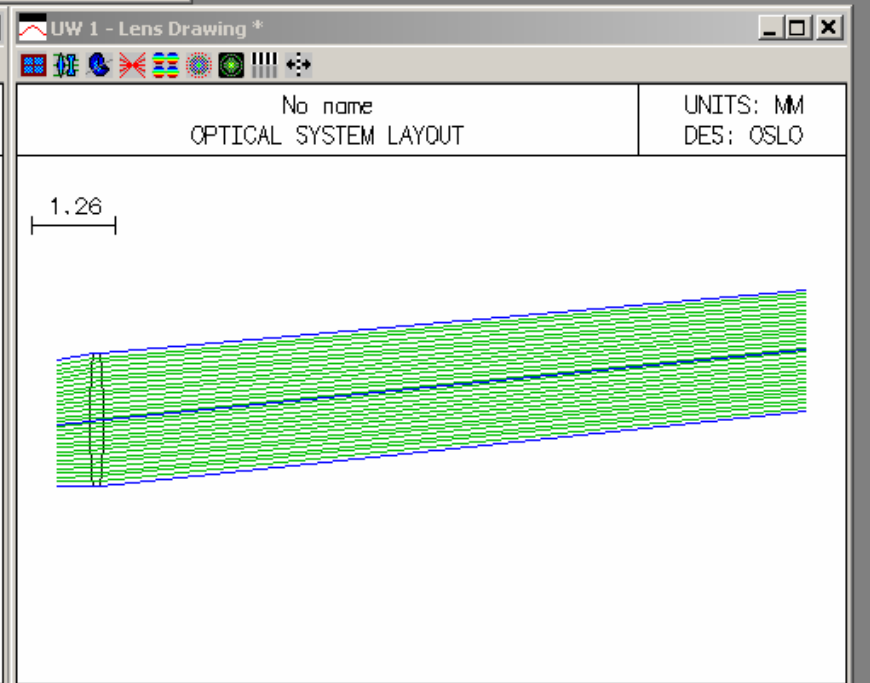
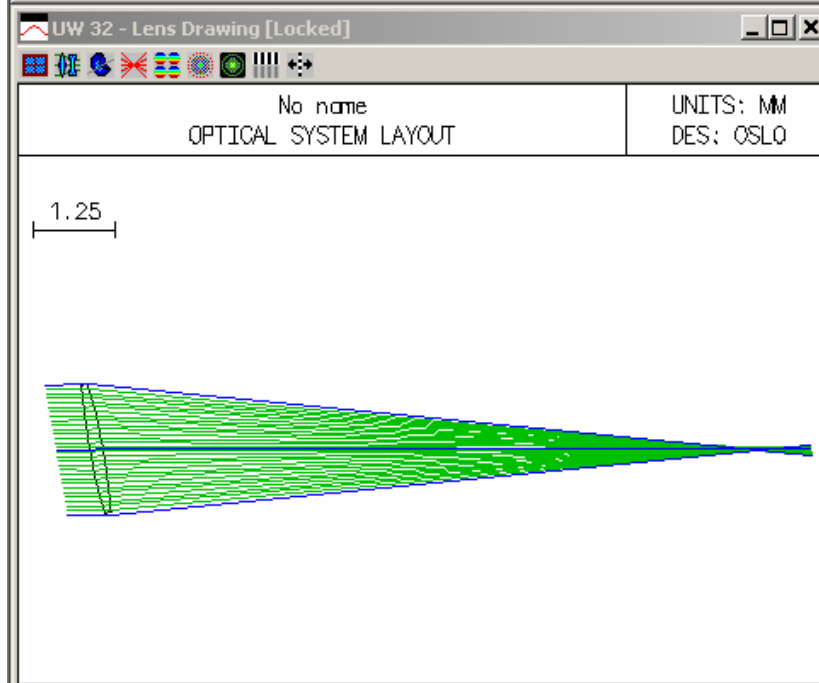
✓
✗
?

Gen Setup Wavelengths Variables Draw Off Group Notes

Lens: No name Efl 9.707997

Ent beam radius 1.000000 Field angle 5.7296e-05 Primary wavln 0.587560

SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	10.000000	1.0000e-05	AIR	
AST	10.000000	0.200000	1.000000	BK7	C
2	-10.000000	0.000000	1.006371	AIR	
IMS	0.000000	10.684862	0.966962		



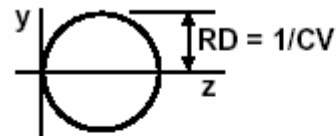
Aszférikus felületek

- Conics

A spherical surface is a special case of the general "quadric of revolution" surface. This family of surfaces is determined by two parameters: the curvature and the **Conic constant**. The type of quadric depends upon the value of the conic constant ([cc](#)) as follows:

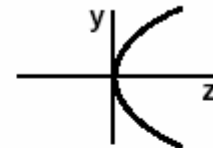
$cc > 0$	Oblate spheroid
$cc = 0$	Sphere
$-1 < cc < 0$	Ellipsoid
$cc = -1$	Paraboloid
$cc < -1$	Hyperboloid

Sphere (CC = 0)



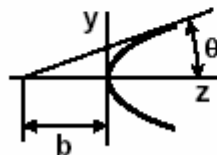
$$z - (CV/2) * [x^2 + y^2 + z^2] = 0$$

Paraboloid (CC = -1)



$$z = (CV/2) * [x^2 + y^2]$$

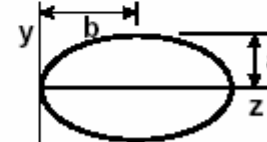
Hyperboloid (CC < -1)



$$\tan \theta = [- (CC + 1)]^{1/2}$$

$$b = -1 / [(CC + 1) * CV]$$

Ellipsoid (-1 < CC < 0)



$$a = 1 / [CV * (CC + 1)^{1/2}]$$

$$b = 1 / [CV * (CC + 1)]$$

Szimmetrikus Aszférikus felületek (I)

- **Standard asphere**

The standard type of aspheric surface (beyond a conic surface) is a rotationally symmetric surface containing terms up to 10th order in the radial coordinate. The deformation coefficients that can be set here are 4th (ad), 6th (ae), 8th (af), and 10th (ag) orders:

$$z = \frac{cvr^2}{1 + \sqrt{1 - cv^2(cc+1)r^2}} + adr^4 + aer^6 + afr^8 + agr^{10}$$

The sign conventions for the aspheric coefficients are the same as for curvature, i.e., the coefficient is positive if it leads to a deformation in the positive z direction (i.e., to the right in a system without any tilted surfaces).

- **General asphere** is an expansion in r^2 :

$$z = \frac{cvr^2}{1 + \sqrt{1 - cv^2(cc+1)r^2}} + as1r^2 + as2r^4 + as3r^6 \\ + as4r^8 + as5r^{10} + as6r^{12} + \dots$$

Szimmetrikus Aszférikus felületek (II)

- **Asphere (all orders)** is an expansion in all orders of H , added to a base conic:

$$z = \frac{cvr^2}{1 + \sqrt{1 - cv^2(cc + 1)r^2}} + as0 + as1H + as2H^2 + as3H^3 + as4H^4 + \dots$$

where

$$H = \left| \sqrt{x^2 + y^2} \right|$$

Aszimmetrikus Aszférikus felületek

- **General asphere** is an expansion in x and y:

$$z = \sum_{i=1}^n z_i$$

where

$$z_i = (as_i)x^j y^k$$

ASP	ASX	10		
AS0:x^0 y^0	AS1:x^1 y^0	AS2:x^0 y^1	AS3:x^2 y^0	AS4:x^1 y^1
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
AS5:x^0 y^2	AS6:x^3 y^0	AS7:x^2 y^1	AS8:x^1 y^2	AS9:x^0 y^3
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
AS10:x^4 y^0	AS11:x^3 y^1	AS12:x^2 y^2	AS13:x^1 y^3	AS14:x^0 y^4
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
AS15:x^5 y^0	AS16:x^4 y^1	AS17:x^3 y^2	AS18:x^2 y^3	AS19:x^1 y^4
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
AS20:x^0 y^5	AS21:x^6 y^0	AS22:x^5 y^1	AS23:x^4 y^2	AS24:x^3 y^3
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
AS25:x^2 y^4	AS26:x^1 y^5	AS27:x^0 y^6	AS28:x^7 y^0	AS29:x^6 y^1
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000
AS30:x^5 y^2	AS31:x^4 y^3	AS32:x^3 y^4	AS33:x^2 y^5	AS34:x^1 y^6
0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000

Hogyan tovább?

Ami kimaradt:

local and global variables

non-sequential ray tracing

exact/real ray tracing