



UNIVERZITA PALACKÉHO V OLMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA

Katedra optiky

Stanislav Pych

**Návrh a analýza optických prvků v programu
OSLO**

Bakalářská práce

Studijní program: B1701 - Fyzika

Studijní obor: Přístrojová optika

Forma studia: Prezenční

Vedoucí práce: Prof. RNDr. Zdeněk Bouchal, Dr.

Termín odevzdání práce: **19.5.2010**

Děkuji RNDr. Zdeněku Bouchalovi za pomoc při zpracování této bakalářské práce, za přínosné rady, poznámky a komentáře, které mi pomáhaly při jejím vzniku.

Obsah

Úvod.....	4
1. Základy geometrické optiky.....	5
1.1 Paraxiální optika.....	7
1.2 Neparaxiální optika.....	9
1.3 Ideální optická soustava.....	12
2. Odrazné plochy.....	14
2.1 Zdroj v konečné vzdálenosti.....	14
2.2 Zdroj v nekonečné vzdálenosti.....	20
2.3 Použití asférických zrcadel	22
3. Lámací plochy.....	24
3.1 Zdroj v konečné vzdálenosti.....	24
3.1.1 Aplanatický meniskus plocha „vrcholová“ - „normálová“.....	27
3.1.2 Aplanatický meniskus plocha „vrcholová“ - „s neskutečným obrazem“.....	28
3.1.3 Aplanatický meniskus obě plochy „normálové“	29
3.1.4 Aplanatický meniskus plocha „normálová“ - „s neskutečným obrazem“	30
3.1.5 Aplanatický meniskus plocha „s neskutečným obrazem“ - „normálová“.....	31
3.1.6 Aplanatický meniskus obě plochy „s neskutečným obrazem“.....	32
3.1.7 Použití aplanatických menisků.....	33
3.2 Zdroj v nekonečné vzdálenosti.....	35
3.2.1 Elipsoidní lámavá plocha.....	35
3.2.2 Hyperboloidní lámavá plocha.....	36
4. Vybrané optické prvky.....	37
4.1 Afokální čočka.....	37
4.2 Skleněná kulička jako optický prvek.....	39
4.2.1 Použití jako mikroskop.....	39
4.2.2 Použití jako zavaděč svazku do optického vlákna.....	40
4.2.3 Retroreflektor.....	41
4.3 Generování Besselovského svazku pomocí axikonu.....	43
Závěr.....	44
Použitá literatura.....	45

Úvod

Optika je jeden z nejstarších oborů fyziky. Její využití v praktickém životě je široké. S optickými přístroji se setkáváme na každém kroku. Jsou součástí různých pohybových senzorů, čteček čárových kódů, používají se k šíření nebo uchovávání informací. S rozvojem optických soustav došlo ke zvýšení nároků na dokonalost jejích jednotlivých prvků. Cílem této práce je seznámení se s programem OSLO a vytvoření návrhu dokonale zobrazujících zrcadel a čoček. Pro návrh optických soustav se používá řada vývojových počítačových programů. Speciální programy, jako jsou ZEMAX nebo OSLO, obsahují mnoho funkcí využitelných k vývoji optické soustavy a k jejímu následnému vyhodnocení. Práce je zaměřena na program OSLO zejména proto, že je využíván při výuce zobrazovacích systémů na katedře optiky. Postupy a řešené úlohy by měly studentům usnadnit přechod od teoretické části učiva k praktickému návrhu.

Pomocí poznatků z geometrické optiky a programu OSLO se budeme snažit přiblížit jednotlivé metody návrhů optických prvků, které minimalizují optické vady. V prvních kapitolách nastíníme problematiku pojmů a výpočtů geometrické optiky. Následně pomocí Fermatova principu určíme plochy, které budou ideálně zobrazovat bod na optické ose. Takové plochy mohou být odrazné nebo lámavé a zdroj světla může být v konečné nebo nekonečné vzdálenosti. Na závěr předvedeme vybrané optické prvky: jednočočkový dalekohled, skleněnou kuličku a kuželovou čočku axikon.

1. Základy geometrické optiky

Geometrická optika je nejjednodušší teorií světla. Světlo je popsáno pomocí paprsků, což jsou prostorové křivky, které udávají směr šíření energie. Ve stejnorodém prostředí se jedná o přímky, které se šíří podél geometrických pravidel. Geometrická optika je jen přibližnou teorií, a tak dostatečně nevysvětluje všechny jevy spojené se šířením světla. Jedná se o část optiky, jenž se nezabývá vlnovými vlastnostmi světla.

Geometrická optika se často uplatňuje při studiu určování polohy a směru paprsku, je tedy užitečná při studiu zobrazování optickými soustavami. Úlohou optické soustavy je přeměnit homocentrický svazek paprsků znovu na svazek homocentrický. To je svazek paprsků, rovnoměrně se šířících z jednoho bodu prostoru. Oblast geometrické optiky je omezena jen na případy přímočarého šíření ve stejnorodém prostředí, na vzájemně se neovlivňující svazky paprsků a na zákonitosti odrazu a lomu na rozhraní dvou prostředí.

Prostředí, ve kterém se odehrávají optické jevy, je charakterizováno veličinou n , která se nazývá index lomu. Ve vakuu je rychlost světla stejná pro všechny vlnové délky, zatímco v látkách je funkcí vlnové délky. Poměr rychlosti světla c ve vakuu k rychlosti v_λ určité vlnové délky λ v jakékoliv látce se nazývá index lomu. Není-li uvedena vlnová délka, obvykle předpokládáme, že index lomu odpovídá žlutému světlu o vlnové délce 587,56 nm. Index lomu je bezrozměrné číslo, ve většině případů větší než 1. Platí, že

$$n = \frac{c}{v} . \quad (1.1)$$

V praxi jsou uváděny vlnové délky pro vakuum. Je tedy lepší zavést pojem optické dráhy, která se ve stejnorodém prostředí rovná součinu geometrické dráhy a indexu lomu.

$$l = ns . \quad (1.2)$$

V případě nestejnorodého prostředí uvažujeme jen malé úseky dráhy, ve kterých je možné považovat index lomu za konstantní. Pak úsek optické dráhy je

$$dl = n \cdot ds$$

a celá optická dráha je

$$l = \int_A^B n \cdot ds . \quad (1.3)$$

Pojem optické dráhy je důležitý pro formulaci Fermatova principu, v němž jsou obsaženy základní zákony geometrické optiky, tj. zákon přímočarého šíření světla, zákon

nezávislosti světelných svazků, zákon odrazu a lomu. Podle tohoto principu se šíří světlo z jednoho bodu v prostoru do druhého po takové dráze, že doba potřebná k proběhnutí této dráhy je extrémní, tj. kratší nebo delší než po jakékoliv ze sousedních drah, nebo je stacionární[2].

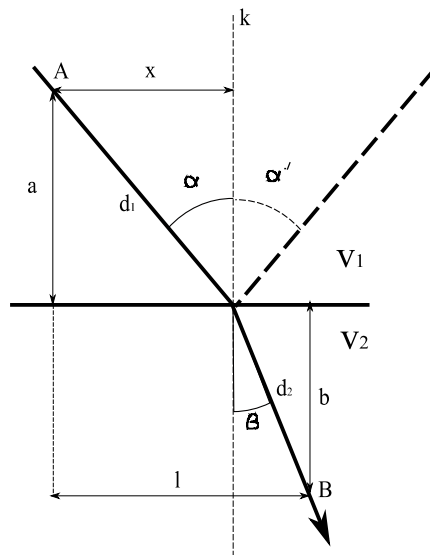
Přímočaré šíření světla v homogenním prostředí plyne přímo z Fermatova principu, protože přímka je nejkratší spojnicí mezi dvěma body. Z Fermatova principu lze také odvodit zákon lomu světla. Vycházíme tedy z předpokladu, že paprsek urazí vzdálenost mezi bodem A v jednom prostředí a bodem B v druhém prostředí za minimální možný čas.

Podle obr.1.1. lze psát pro dráhy ve dvou prostředích, $d_1 = \sqrt{a^2 + x^2}$, $d_2 = \sqrt{b^2 + (l-x)^2}$

a rychlosti $v_1 = \frac{c}{n}$, $v_2 = \frac{c}{n'}$. Pak bude čas k překonání vzdálenosti AB určen jako

$t = \frac{d_1}{v_1} + \frac{d_2}{v_2}$. Minimum funkce $t(x)$ nalezneme pomocí derivace $\frac{dt}{dx} = 0$,

$$\frac{1}{v_1} \frac{x}{d_1} - \frac{1}{v_2} \frac{l-x}{d_2} = 0.$$



Obr. 1.1 Odraz a lom

Z obrázku vyčteme, že $\sin \alpha = \frac{x}{d_1}$, $\sin \beta = \frac{l-x}{d_2}$, proto můžeme psát:

$$\frac{\sin \alpha}{v_1} - \frac{\sin \beta}{v_2} = 0. \tag{1.4}$$

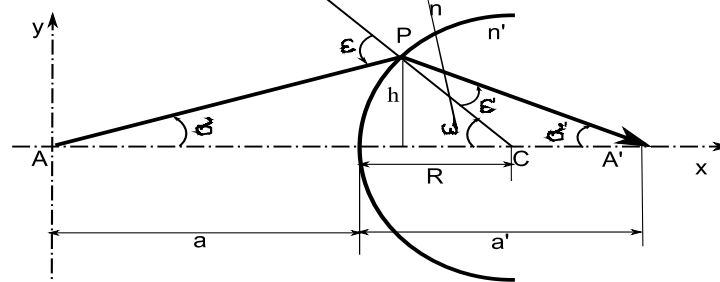
A to je již Snellův zákon lomu. Zákon odrazu je jen zvláštní případ zákona lomu. Předpokládáme-li, že $v_2 = -v_1$, pak zákon odrazu nabývá podoby $\alpha' = -\alpha$.

1.1 Paraxiální optika

Optické prvky jsou často centrovány; to znamená, že leží na společné ose. Šíří-li se paprsky vůči této ose pod malými úhly (přibližně do 2°), můžeme goniometrické funkce sinus a tangens nahradit úhly vyjádřenými v obloukové míře. S tímto zjednodušením pracuje paraxiální optika. Ta slouží především k určení základních parametrů zobrazovacích prvků (ploch) a soustav. S využitím paraxiální optiky mohou být určeny kardinální body optických prvků (ohniskové, hlavní a uzlové body) a sestavena zobrazovací rovnice. Při výpočtech v rámci paraxiální optiky je respektována následující znaménková konvence:

- světlo se šíří zleva doprava
- vzdálenosti jsou ve směru šíření světla kladné, proti směru záporné
- úhly odečítáme od optické osy nebo od kolmice dopadu k paprsku a jsou kladné ve směru otáčení hodinových ručiček
- poloměry křivosti ploch se měří od vrcholu optické plochy směrem ke středu křivosti této plochy; pokud je střed křivosti vpravo od plochy je kladný (ve směru šíření světla)[4].

Optická soustava je definována poloměry křivosti ploch, indexy lomu a vzdálenostmi ploch. Obraz soustavy se vyhledává tak, že se postupně hledá obraz vytvořený první plochou, který slouží jako předmět pro druhou plochu, atd. Proto je třeba znát, jak se předmět zobrazí jednou plochou.



Obr 1.1.1 Sférické rozhraní dielektrických prostředí

Obraz vytvořený sférickým rozhraním, které odděluje dielektrická prostředí o indexech lomu n a n' , vypočítáme, vyjádříme-li si úhly ε a ε' pomocí úhlů σ , σ' a ω . Tedy $\varepsilon = \sigma + \omega$, $\varepsilon' = \omega + \sigma'$. Zákon lomu v paraxiálním prostoru potom vypadá: $n(\omega + \sigma) = n'(\omega + \sigma')$,

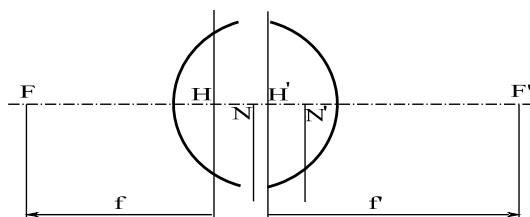
kde pro malé úhly platí $\sigma \cong \tan \sigma \cong \frac{-h}{a}$, $\sigma' \cong \tan \sigma' \cong \frac{-h}{a'}$, $\omega \cong \tan \omega \cong \frac{h}{R}$.

Po úpravách dostaneme: $\frac{n'}{a'} - \frac{n}{a} = \frac{n' - n}{R}$, (1.1.1)

tedy základní zobrazovací rovnici. S tou úzce souvisí optická mohutnost (lámavost). Optická mohutnost sférického rozhraní o poloměru křivosti R , které odděluje prostředí o indexech lomu n a n' , je:

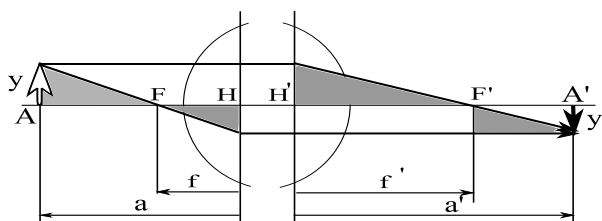
$$K = \frac{n'}{f'} = -\frac{n}{f} = \frac{n'-n}{R}. \quad (1.1.2)$$

Rozhraní dvou prostředí o různých indexech lomu, které ovlivňuje chod paprsků, se nazývá optická plocha. Skládáním optických ploch vzniká optický systém (optická soustava). Každá optická soustava má kardinální body. Jsou to předmětová a obrazová ohniska (F a F'), hlavní body (H a H') a uzlové body (N a N').



Obr. 1.1.2 Kardinální body optické soustavy

Uzlové body splývají s hlavními, je-li soustava z obou stran obklopena stejným prostředím. Obrazové ohnisko F' je paraxiální obraz nekonečně vzdáleného bodového předmětu. Předmětové ohnisko F je předmětový bod, jehož paraxiální obraz leží v nekonečnu. Hlavní body jsou dvojice opticky sdružených bodů, kde příčné zvětšení je rovno jedné. Uzlové body jsou dvojice opticky sdružených bodů, kde je úhlové zvětšení rovno jedné. Předmětová ohnisková vzdálenost f je vzdálenost ohniska F od hlavního bodu H . Obrazová ohnisková vzdálenost f' je vzdálenost ohniska F' od hlavního bodu H' .



Obr. 1.1.3 Optická soustava ve vzduchu určená kardinálními body

Podobnost trojúhelníků říká, že $\frac{y'}{y} = \frac{f}{f-a}$ a $\frac{y'}{y} = \frac{f'-a'}{f'}$.

Po srovnání rovnic máme $\frac{f}{f-a} = \frac{f'-a'}{f'}$.

Odtud dostáváme Gaussovu zobrazovací rovnici $\frac{\mathbf{f}}{\mathbf{a}} + \frac{\mathbf{f}'}{\mathbf{a}'} = \mathbf{1}$. (1.1.3)

Použijeme ji, známe-li ohniskové vzdálenosti a vzdálenost předmětu od předmětového hlavního bodu nebo vzdálenost obrazu od obrazového hlavního bodu.

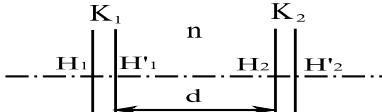
Gaussovu zobrazovací rovnici lze upravit tak, že místo vzdáleností od hlavních bodů použijeme vzdálenosti od ohnisek ($q=AF$ a $q'=A'F'$). Dostaneme tak Newtonovu zobrazovací rovnici.

$$qq' = ff' . \quad (1.1.4)$$

Můžeme ji použít za předpokladu, že známe ohniskové vzdálenosti a vzdálenost předmětu od předmětového ohniska nebo vzdálenost obrazu od obrazového ohniska [8].

Kombinace dvou systémů o známých optických mohutnostech

Známe-li optickou mohutnost dvou systémů o optických mohutnostech K_1 a K_2 , vzdálenost mezi jejich hlavními rovinami d a budeme-li předpokládat index lomu n mezi optickými systémy, pak výsledná mohutnost může být vypočítána ze vztahu:

$$K = K_1 + K_2 - \frac{d}{n} K_1 K_2 . \quad (1.1.5)$$


Obr. 1.1.6. Dvoučlenný systém o známých optických mohutnostech

Budou-li systémy nahrazeny rozhraním dielektrik, lze vztah použít pro určení optické mohutnosti reálné čočky. Potom platí pro rozptylnou čočku $K < 0$, pro spojnou čočku $K > 0$ a pro afokální čočku $K = 0$.

1.2 Neparaxiální optika

Postupy, kterými byly dosud vytvářeny obrazy pomocí čočky, jsou platné pro úzké svazky paprsků v blízkosti optické osy, tedy pro úhly dopadu menší než 2° . Zobrazení jsou také závislá na vlnové délce světla.

Vzrůstá-li šířka svazku, narůstají i odchylky od ideálního zobrazení, které se projevují tím, že obrazem bodu je ploška, obrazem roviny kolmé k ose je rotační plocha, obrazem přímky, která leží v předmětové rovině a neprotíná optickou osu, je obecně křivka. Předmět se také zobrazuje světlem různé vlnové délky na různých místech a v různé velikosti. Uvedené odchylky od ideálního zobrazení se nazývají optické vady zobrazovacích soustav.

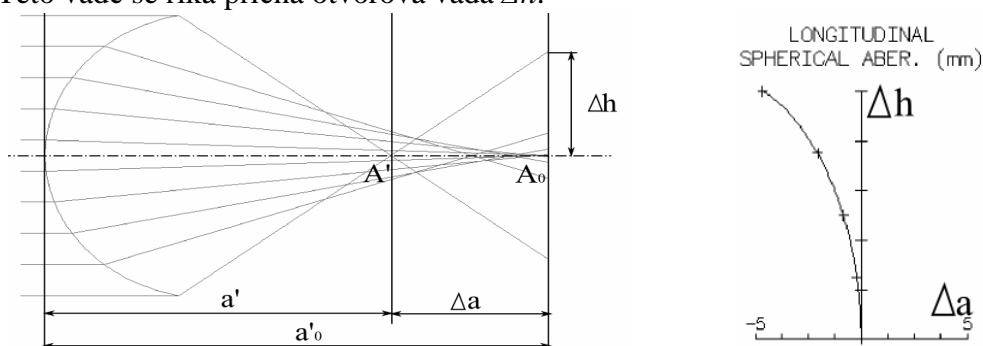
K určení vad je třeba sledovat paprsek probíhající mimo paraxiální prostor. Ve většině případů stačí paprsky probíhající v poledníkové rovině, tj. v rovině určené optickou osou a zobrazovaným bodem. Zkoumání vad se provádí tak, že se sledují vady vznikající při

zobrazení světlem určité vlnové délky (světlo monochromatické) a světlem složeným (např. bílým). Proto se vady optických soustav dělí na vady monochromatické a chromatické.

Při studiu monochromatických vad se sleduje zobrazení osového a mimoosového bodu.

V prvním případě se jedná o otvorovou vadu a v druhém především o zkreslení, astigmatismus, zklenutí a komu.

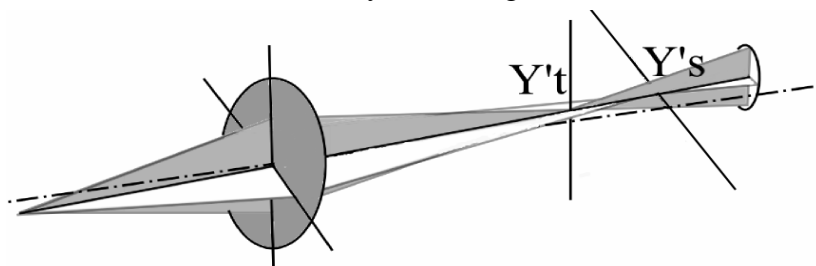
Otvorová vada je způsobena rozdílným zobrazením bodů na optické ose pomocí paraxiálních a neparaxiálních paprsků. Paraxiální paprsek směřuje do bodu A_0' (viz. obr.1.2.1) a paprsky neparaxiální se protínají s optickou osou blíže k ploše rozhraní až do bodu A' , který je dán maximální šířkou svazku. Vzdálenost mezi těmito body na ose je podélná otvorová vada Δa . Neparaxiální paprsek protne rovinu paraxiálního zobrazení v určité vzdálenosti od osy. Této vadě se říká příčná otvorová vada Δh .



Obr. 1.2.1 Příčná a podélná otvorová vada

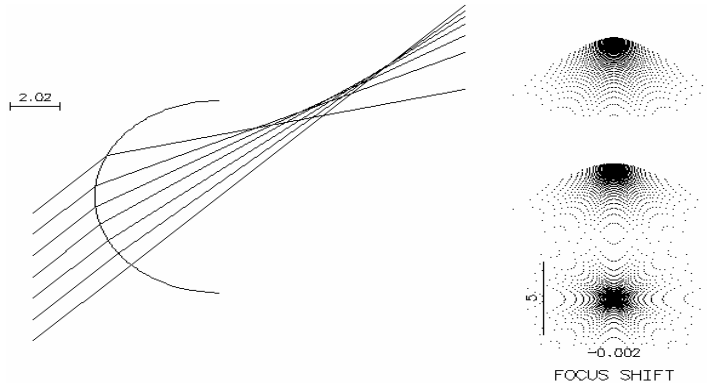
Otvorová vada čoček o stejné ohniskové vzdálenosti a o stejné apertuře je závislá na poloze předmětu, na tvaru čočky a na indexu lomu. Čočky spojné a rozptylné mají opačnou sférickou vadu. Jejich složením do soustavy lze vadu částečně korigovat[2].

Astigmatismus vzniká při zobrazení mimoosového bodu úzkým paprskovým svazkem. Paprsky v rovině poledníkové (tangenciální), tj. v rovině dané zobrazovaným bodem a optickou osou, protnou po průchodu čočkou hlavní paprsek v bodě Y'_t , tedy v tangenciálním obrazu bodu. Paprsky svazku ležící v rovině sagitální, tj. v rovině procházející hlavním paprskem kolmo na tangenciální rovinu, protnou hlavní paprsek v bodě Y'_s , tedy v sagitálním obrazu bodu. Vzdálenost bodu Y'_t a Y'_s nazýváme astigmatismus.



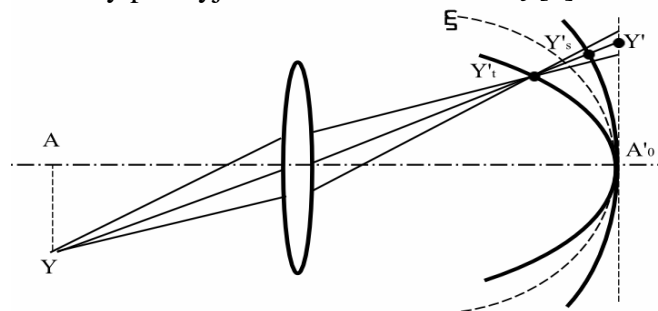
Obr. 1.2.2 Astigmatismus a jeho obrazové body

Koma vzniká při zobrazení mimoosového bodu širokým paprskovým svazkem. Podobně jako u astigmatismu má koma při zaostření šikmého svazku paprsků dva obrazové body, tedy tangenciální a sagitální. Obraz bodu nebude bodový, ale bude neostře ohraničenou kruhově nesymetrickou ploškou ve tvaru „kapky“ [4].



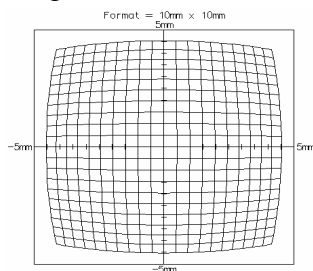
Obr. 1.2.3 Vznik komy

Zklenutí je vada vznikající zobrazením mimoosového bodu úzkým svazkem paprsku. Je to vzdálenost sagitálního a tangenciálního obrazu Y'_t , Y'_s od paraxiální obrazové roviny. Při zobrazení všech bodů předmětové roviny vyplní příslušné obrazové body dvě rotační plochy, které se vzájemně dotýkají v bodě paraxiálního obrazu bodu. Při odstranění astigmatismu se tangenciální a sagitální roviny překryjí na Petzvalově rovině ζ [2].

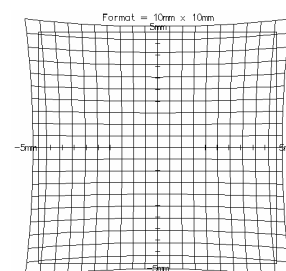


Obr. 1.2.4. Křivost a vznik tangenciální a sagitální roviny

Zkreslení obrazu se projevuje tak, že se přímky zobrazují jako křivky. Dochází tak k soudkovitému nebo poduškovitému zkreslení čtverce. Roste-li zvětšení od středu k okraji, nastává tzv. pozitivní (poduškové) zkreslení. Vyrůstá-li naopak od okraje do středu, nazýváme toto zkreslení negativní (soudkové).



Obr. 1.2.5 Soudkové zkreslení



Obr. 1.2.6 Poduškové zkreslení

U monochromatických vad jsme předpokládali světlo o jedné vlnové délce. Ve většině případů vysílají předměty světlo složené, čímž vznikají barevné vady.

Barevná vada polohy se projevuje tím, že paraxiální obrazy předmětu leží pro různé vlnové délky v různých vzdálenostech od osy. Ideální zobrazení je zachováno, vlnoplocha je kulová. Liší se pouze pozice barevných obrazů bodu podél optické osy.

Barevná vada velikosti se projevuje narušením od vady polohy tím, že při zobrazení mimoosových bodů předmětu závisí velikost obrazu na vlnové délce. Obraz předmětu je pak barevně lemován.

1.3 Ideální optická soustava

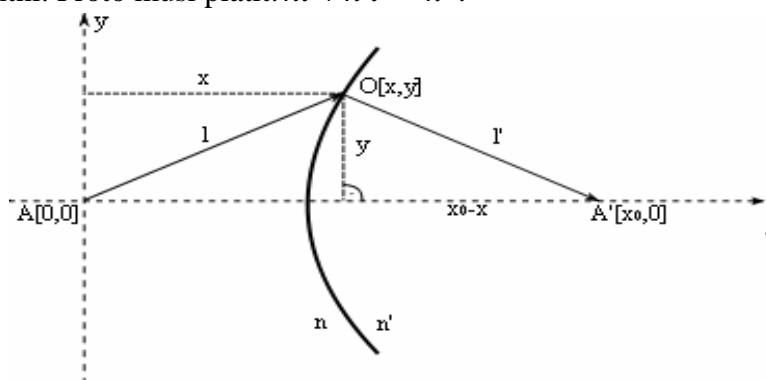
Optickou soustavu považujeme za ideální, jestliže zobrazuje bod jako bod, přímku jako přímku a rovinu jako rovinu, a to i při zvětšení. Optické vady, které způsobují nedokonalé zobrazení, lze korigovat různými metodami, např. tvarováním čoček, rozdělením jedné čočky na více čoček, kombinacemi spojné a rozptylné čočky, posunem clony, náhradou kulových ploch asférickými, atd.

Ideálním zobrazením bodu na optické ose myslíme případ, kdy se bodový monochromatický zdroj zobrazuje optickou plochou opět do ideálně bodového obrazu na optické ose[5]. Plocha musí mít tedy takový tvar, aby světelné paprsky, které transformuje, splňovaly Fermatův princip.

Podle Fermatova principu je doba průchodu paprsku z bodu A do bodu A' (viz. Obr. 1.3.1) extrémní, a proto můžeme říci, že světlo dojde z jednoho bodu do druhého po nejkratší nebo nejdelší dráze[2].

Má-li být svazek paprsků vycházejících z bodu A transformován optickou plochou tak, aby vytvořil bodový obraz A' , pak optická dráha podél všech paprsků musí být podle Fermatova principu konstantní. Proto musí platit: $nl + n'l' = k$.

$$(1.3.1)$$



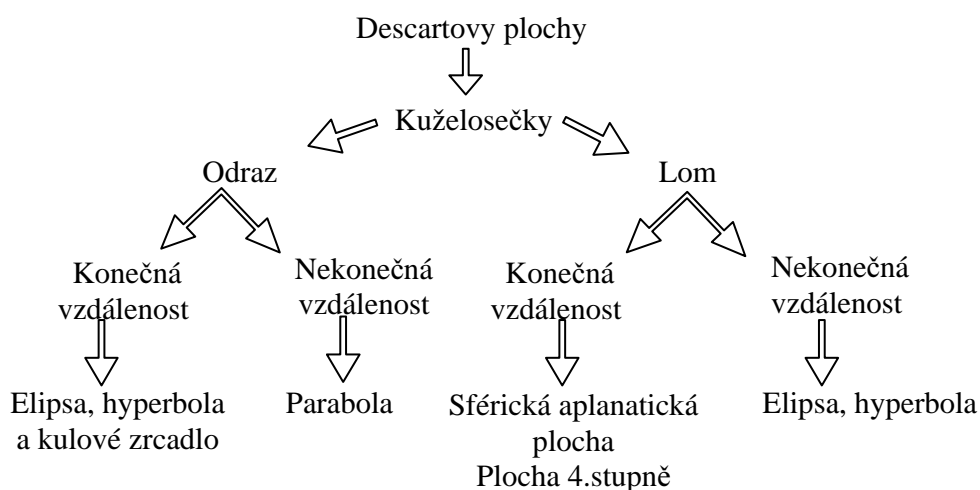
Obr. 1.3.1 Sférické rozhraní prostředí převedené do souřadnicového systému.

Vztah (1.3.1) je zároveň rovnice plochy v bipolárních souřadnicích. Je to rotační plocha a její osa je spojnice AA' , $A(0, 0)$ a $A'(x_0, 0)$, takže rovnice poledníku plochy po úpravě bude

$$4k^2n^2(x^2+y^2) = \left[k^2-n'^2(x_0^2-2x_0x) + (n^2-n'^2)(x^2+y^2) \right]^2 \quad (1.3.2)$$

Tato plocha se nazývá descartova nebo aplanatická plocha. Pro konečné vzdálenosti bodů A, A' je to plocha čtvrtého stupně. Za různých podmínek se může zjednodušit na plochu druhého stupně.

Podmínky zjednodušení jsou dány změnou lámavého prostředí na odrazné nebo přesunem předmětového bodu do nekonečna. Jednotlivé typy descartových ploch jsou znázorněny na následujícím schématu.



Obr. 1.3.2 Schématické znázornění typů descartových ploch

2. Odrazné plochy

Místo čočkových soustav se u některých optických přístrojů používá zrcadel. Ve srovnání s čočkami mají zrcadla některé výhodné vlastnosti. Nemají barevné vady, lze jich použít i v oblastech, kde optická skla již nejsou propustná a jsou lacinější než čočky stejného průměru.

Rozlišujeme dva druhy zrcadel, zrcadla kulová neboli sférická (zvláštní případ pro $R \rightarrow \infty$ je zrcadlo rovinné) a zrcadla asférická (např. paraboloidní, elipsoidní, hyperboloidní). Nejběžnější jsou zrcadla kulová[2].

Parametry asférických zrcadel, které umožňují ideální paprskové zobrazení bodu, mohou být získány z rovnice descartových ploch.

2.1 Zdroj v konečné vzdálenosti

Plocha čtvrtého stupně se zjednoduší na plochu druhého stupně za podmínek, které v určitých případech vykazují specifické optické vlastnosti. Jeden z těchto případů je odraz, při kterém pro index lomu obrazového prostoru platí $n' = -n$. Pro speciální případ zrcadla ve vzduchu navíc platí $n' = -n = -1$. Plocha čtvrtého stupně (1.3.2) v případě odrazu přechází do tvaru:

$$4(k^2 - x_0^2)x^2 + 4k^2y^2 - 4x_0(k^2 - x_0^2)x - (k^2 - x_0^2)^2 = 0 \quad (2.1.1)$$

$$Ax^2 + By^2 + Cx + Dy + E = 0 \quad (2.1.2)$$

Rovnice (2.1.1.) připomíná obecnou rovnici kuželosečky (2.1.2). Podmínky pro rovnice jednotlivých kuželoseček jsou následující:

Elipsa..... $A \cdot B > 0$

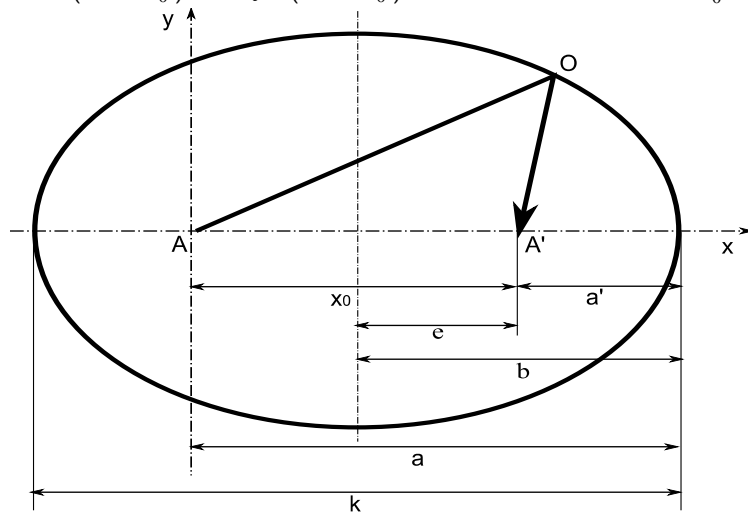
Hyperbola..... $A \cdot B < 0$ (2.1.3)

Kružnice..... $A = 1, B = 1$

Elipsoidní plocha

Z podmíněk (2.1.3) vyplývá pro elipsu: $A \cdot B > 0$, kuželosečku určuje znaménko u A .

$A = (k^2 - x_0^2)$, tedy $(k^2 - x_0^2) > 0$. To znamená $k > x_0$



b ... poloosa elipsy

e ... excentricita

a ... vzdálenost zdroje (předmětu)

od vrcholu zrcadla

a' ... vzdálenost obrazu

od vrcholu zrcadla

k ... konstanta

x_0 ... vzdálenost předmětu a obrazu

Obr. 2.1.1 Chod paprsků elipsoidní odraznou plochou

Před návrhem zrcadla musíme nejprve určit paraxiální vlastnosti soustavy a pak teprve tvarovat plochu. Zobrazovací rovnice (1.1.1) má pro odraz ve vzduchu tvar:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{2}{R} \quad (2.1.4)$$

Pro požadované podmínky paraxiálního zobrazení se z ní dá určit poloměr křivosti oskulační kružnice. Má-li být osový bod A zobrazen bez optických vad, musí být poledník plochy změněn na elipsu, jejíž lineární excentricita e a numerická excentricita ε je určena:

$$\left. \begin{aligned} k &= 2b & b &> e \\ x_0 &= 2e & \varepsilon &= \frac{e}{b} \\ k &> x_0 \end{aligned} \right\} (2.1.5)$$

Do programu OSLO zadáváme tzv. konickou konstantu cc . Ta se vypočítá

$$cc = -(\varepsilon)^2 \quad (2.1.6)$$

V programu OSLO je řešen následující ukázkový příklad. Bodový světelný zdroj ve vzdálenosti 100mm před zrcadlem, se nám zobrazí do vzdálenosti 33,3mm před zrcadlo. Jak bude vypadat ideální zobrazení bodu? Podle obr. 2.1.1 můžeme psát.

$$a = 100mm$$

$$a' = 33,3mm$$

$$x_0 = a - a' = 66,7mm$$

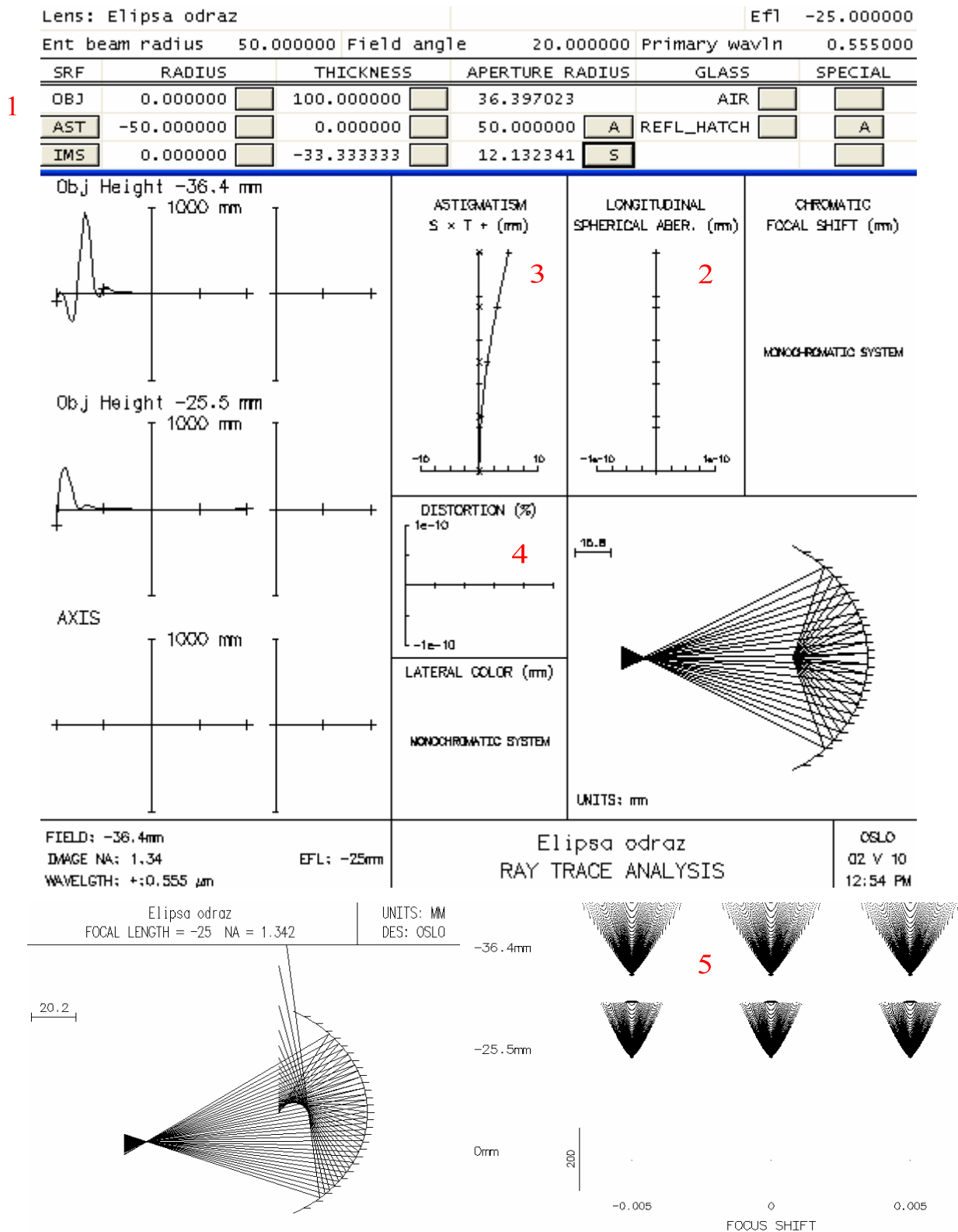
$$k = a + a' = 133,3mm$$

$$\varepsilon = \frac{x_0}{k} = \frac{66,7}{133,3} \approx \frac{1}{2}$$

$$cc = -(\varepsilon)^2 = -0,25$$

$$R = -50mm$$

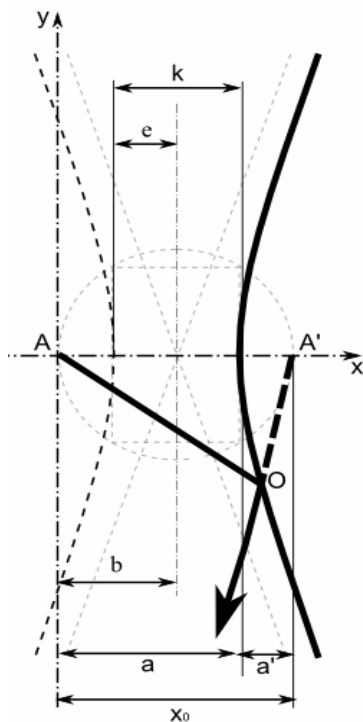
Na obr. 2.1.2 je zadání parametrů zrcadla do programu OSLO (1) a analýza výše uvedeného příkladu. Z této analýzy je patrné, že soustava nemá otvorovou vadu (2), bodový zdroj se zobrazí jako ideální bod. Zobrazení mimoosového bodů je zatíženo komou (5) a astigmatismem (3). Ke zkreslení obrazu (4) nedochází. Barevné vady neuvažujeme.



Obr. 2.1.2 Analýza zobrazení elipsoidním zrcadlem v programu OSLO

Hyperboloidní plocha

Z podmíněk kuželoseček (2.1.3) vyplývá $A \cdot B < 0$, tedy $(k^2 - x_0^2) < 0$.



b ... poloosa hyperboly

e ... excentricita

a ... vzdálenost zdroje (předmětu)

od vrcholu zrcadla

a' ... vzdálenost obrazu

od vrcholu zrcadla

k ... konstanta

x_0 ... vzdálenost mezi předmětem a obrazem

Obr.2.1.3 Chod paprsků hyperboloidní odraznou plochou

Paraxiální podmínky zobrazení určí poloměr oskulační kružnice, asférizace ploch do tvaru hyperboloidu zobrazí osový bod bez optických vad. Parametry tvořící křivky, tedy hyperboly, jsou určeny následovně:

$$k = 2b \quad b < e$$

$$x_0 = 2e \quad \varepsilon = \frac{e}{b}$$

$$k < x_0 \quad cc = -(\varepsilon)^2$$

V programu OSLO je řešen následující ukázkový příklad. Bodový zdroj je umístěný 100mm před hyperboloidním zrcadlem s obrazovou ohniskovou vzdáleností $f' = -25$ mm. Jak bude vypadat ideální zobrazení osového bodu? Z obr. 2.1.3 plynou následující vztahy.

$$\begin{aligned} a &= 100 \text{ mm} \\ f' &= -25 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$a' = \frac{f' a}{a - f'} = -20 \text{ mm}$$

$$x_0 = a + |a'| = 120 \text{ mm}$$

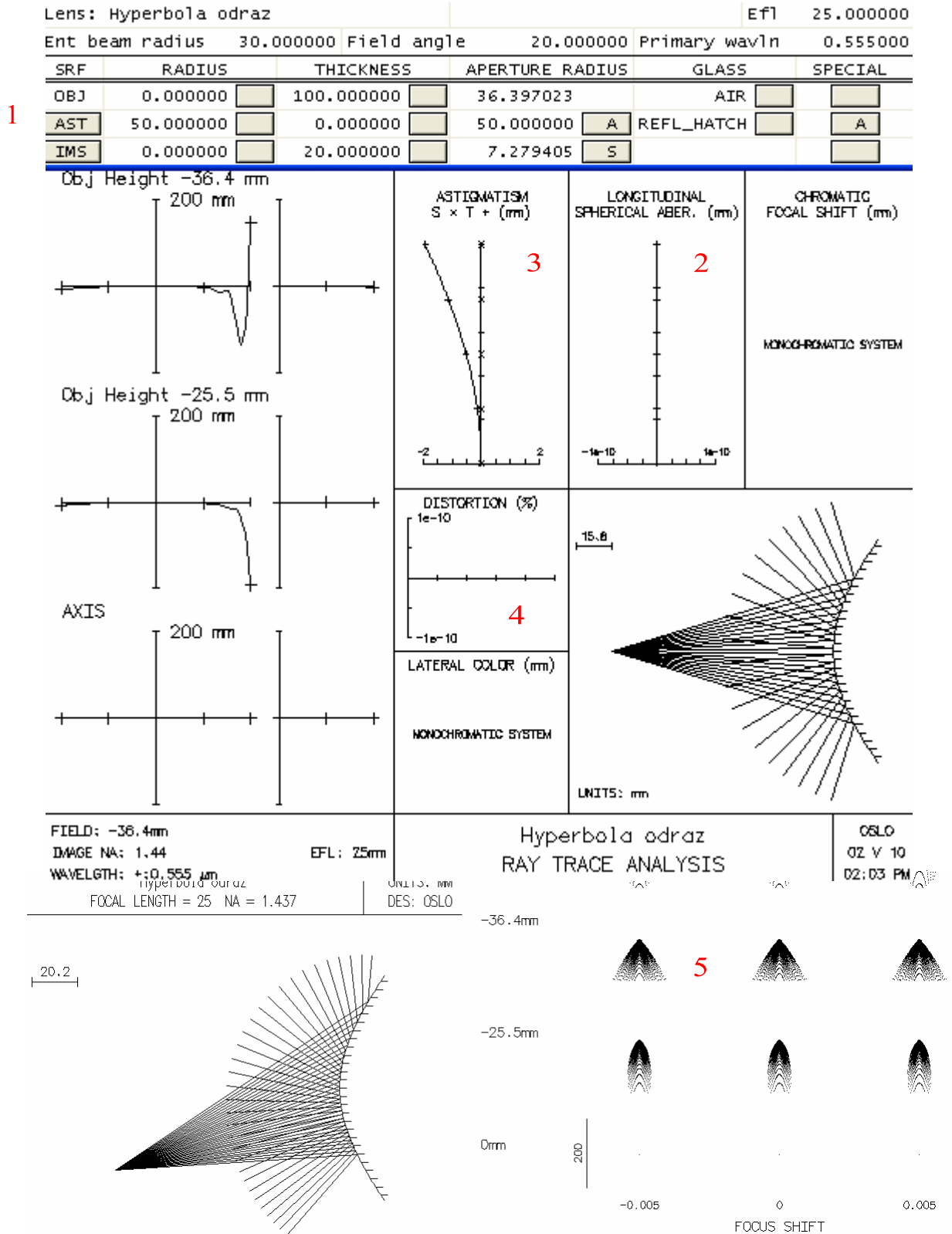
$$k = a - |a'| = 80 \text{ mm}$$

$$\varepsilon = \frac{x_0}{k} = \frac{120}{80} = 1,5$$

$$cc = -(\varepsilon)^2 = -2,25$$

$$\underline{R = 50 \text{ mm}}$$

Obr. 2.1.4 ukazuje zadání parametrů zrcadla do programu OSLO (1) a analýzu uvedeného příkladu. Soustava nemá otvorovou vadu (2), bodový zdroj se zobrazí jako ideální bod. Zobrazení mimoosového bodů je zatíženo komou (5) a astigmatismem (3). K zobrazení obrazu (4) nedochází. Barevné vady neuvažujeme.



Obr. 2.1.4 Analýza zobrazení hyperboloidním zrcadlem v programu OSLO

Kulová plocha

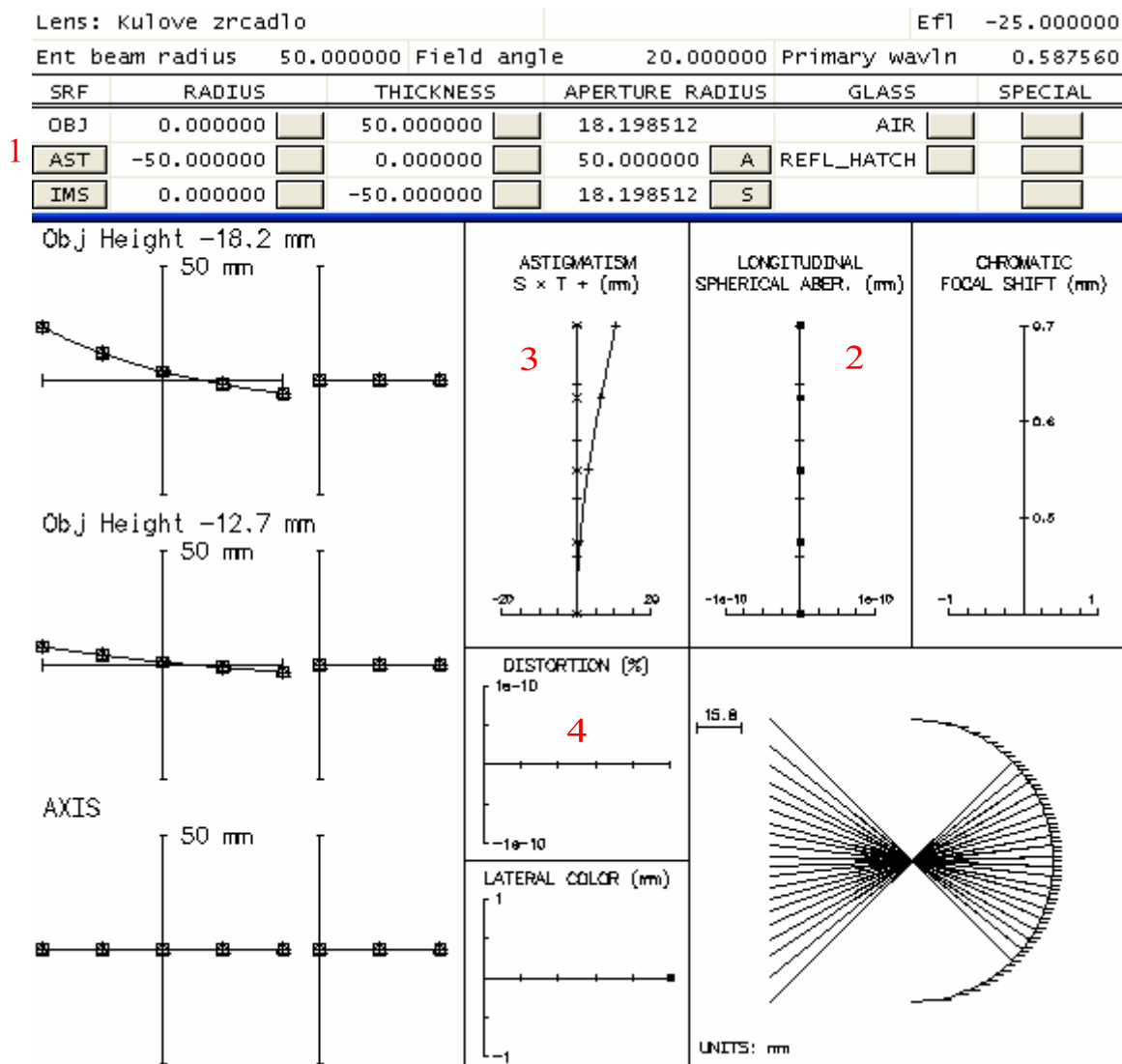
Z podmínek (2.1.2) vyplývá, $A=1, B=1$,

$$4(k^2 - x_0^2) = 1$$

$$4k^2 = 1$$

Řešením je tedy $x_0=0$, což znamená, že geometrická vzdálenost předmětu a obrazu je nulová. Předmět je v tomto případě umístěn do středu křivosti kulového zrcadla a je zobrazen sám do sebe.

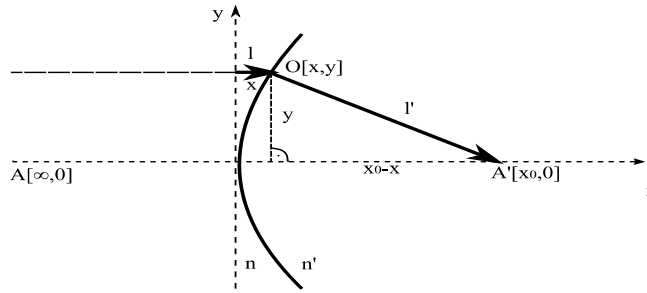
Na obr. 2.1.5 jsou zadány parametry zrcadla do programu OSLO (1) a analýza příkladu. Soustava nemá otvorovou vadu (2), bodový zdroj se zobrazí jako ideální bod. Zobrazení mimoosového bodů je zatíženo astigmatismem (3). Ke zkreslení obrazu (4) nedochází. Barevné vady neuvažujeme.



Obr. 2.1.5 Analýza zobrazení kulovým zrcadlem v programu OSLO

2.2 Zdroj v nekonečné vzdálenosti

Plocha čtvrtého stupně (1.3.2) se v případě odrazu ($n' = -n = -1$) zjednoduší na plochu druhého stupně také tehdy, když je předmět v nekonečnu. V tomto případě je vhodné umístit počátek souřadného systému do vrcholu plochy.



Obr. 2.2.1 Sférické rozhraní prostředí v souřadnicovém systému s předmětem v nekonečnu

Podmínka konstantní dráhy, vyžadovaná Fermatovým principem má v tomto případě tvar

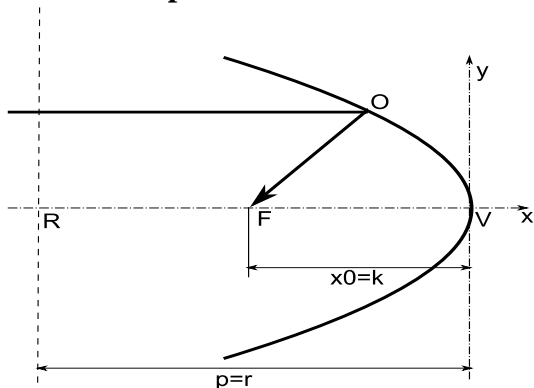
$$nx + n' \sqrt{(x_0 - x)^2 + y^2} = n'x_0 \quad (2.2.1)$$

Po dosazení $n = -n' = 1$ nám vyšla rovnice paraboly s parametrem.

$$4xx_0 = y^2, \quad (2.2.2)$$

$$\text{kde je parametr } p = 2x_0. \quad (2.2.3)$$

Paraboloidní plocha



p ... parametr

r ... poloměr oskulační kružnice

x_0 ... vzdálenost mezi předmětem a obrazem

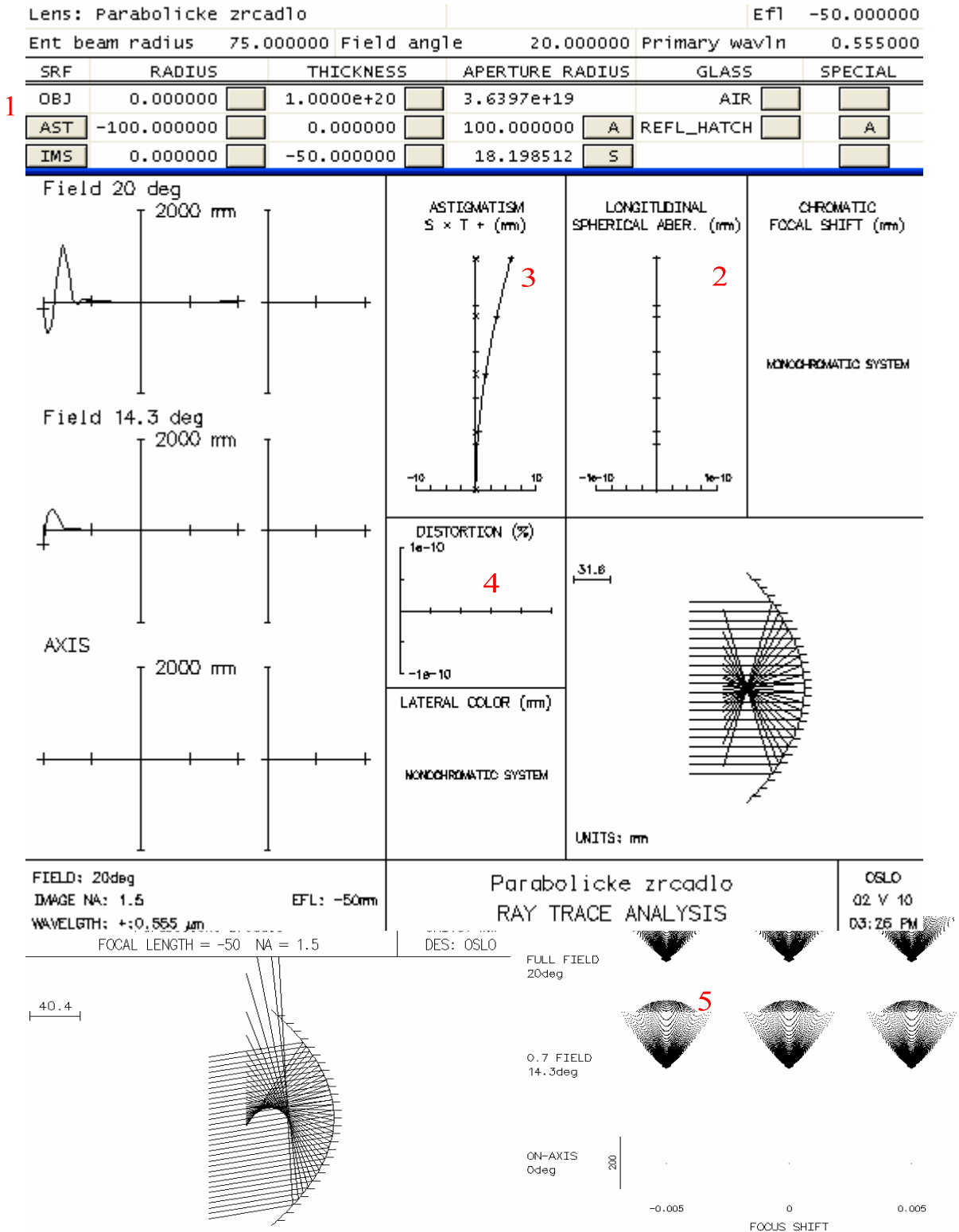
k ... konstanta

Obr. 2.2.2 Chod paprsků odraznou paraboloidní plochou.

V programu OSLO je řešen následující ukázkový příklad. Plošný zdroj dopadá na parabolické zrcadlo. Obrazová ohnisková vzdálenost je $f' = 50\text{mm}$. Jak bude vypadat ideální zobrazení osového bodu? Podle obr. 2.2.2 můžeme psát,

$$\begin{aligned} x_0 &= 50\text{mm} \\ p &= R = 2x_0 = 100\text{mm} & \varepsilon &= \frac{x_0}{k} = \frac{100}{100} = 1 \\ cc &= -(\varepsilon)^2 = -1 \end{aligned}$$

Na obr. 2.2.3 je zadání parametrů zrcadla do programu OSLO (1) a analýza příkladu. Soustava nemá otvorovou vadu (2), zdroj se zobrazí jako ideální bod. Zobrazení mimoosového bodů je zatíženo astigmatismem (3) a komou (5). Ke zkreslení obrazu (4) nedochází. Barevné vady neuvažujeme.



Obr. 2.2.3 Analýza zobrazení paraboloidním zrcadlem v programu OSLO

2.3 Použití asférických zrcadel

Sférických i asférických zrcadel se používá zejména jako objektivu astronomických dalekohledů. Nejjednodušším zrcadlovým objektivem je paraboloidní zrcadlo. Paraboloidní zrcadlo nemá sférickou vadu, takže předměty nekonečně vzdálené zobrazuje ideálně do své ohniskové roviny. Vzhledem k velké komě a astigmatismu je zorný úhel malý. Obraz vytvořený paraboloidním zrcadlem leží na optické ose před zrcadlem. Nejrozšířenější variantou je Cassegrainův objektiv, který kombinuje primární paraboloidní zrcadlo s otvorem se sekundárním hyperboloidním zrcadlem, které zobrazuje předmět skrz otvor v prvním zrcadle. Výhoda tohoto návrhu je v tom, že kombinuje duté a vypuklé zrcadlo. Tedy spojku a rozptylku, jejichž vady mají opačné znaménko, takže funkce je obdobou čočkového dubletu[5].

Cassegrainův objektiv

Paprsky odražené primárním paraboloidním zrcadlem se odráží do hyperboloidního zrcadla a potom do okuláru (viz. obr. 2.3.1). Nejprve musíme určit poloměr křivosti paraboloidního zrcadla. Volíme $R_1 = -500\text{mm}$ o výšce $h_1 = 200\text{mm}$. Hyperboloidní zrcadlo o výšce $h_2 = 40\text{mm}$ a obrazové ohniskové vzdálenosti $f'_2 = 300\text{mm}$. Dle obr. 2.3.1. dopočítáme parametry umístění a poloměr křivosti hyperboloidního zrcadla tak, aby ideálně zobrazilo osový bod,

$$R_1 = -500\text{mm}$$

$$h_1 = 200\text{mm}$$

$$a'_2 = 300\text{mm}$$

$$h_2 = 40\text{mm}$$

$$a_1 = \frac{R_1}{2} = -250\text{mm}$$

$$\frac{h_1}{h_2} = \frac{a_1'}{a_2}$$

$$\frac{200}{40} = \frac{-250}{a_2}$$

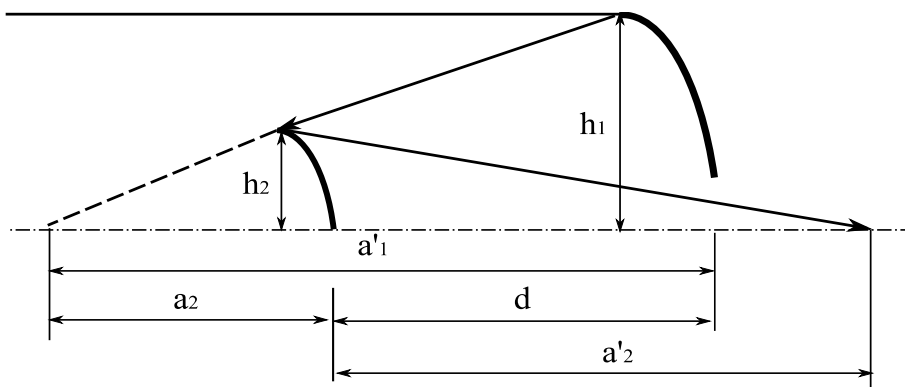
$$a_2 = -50\text{mm}$$

$$k = a_2' + a_2 = 250\text{mm}$$

$$x_0 = a_2' - a_2 = 350\text{mm}$$

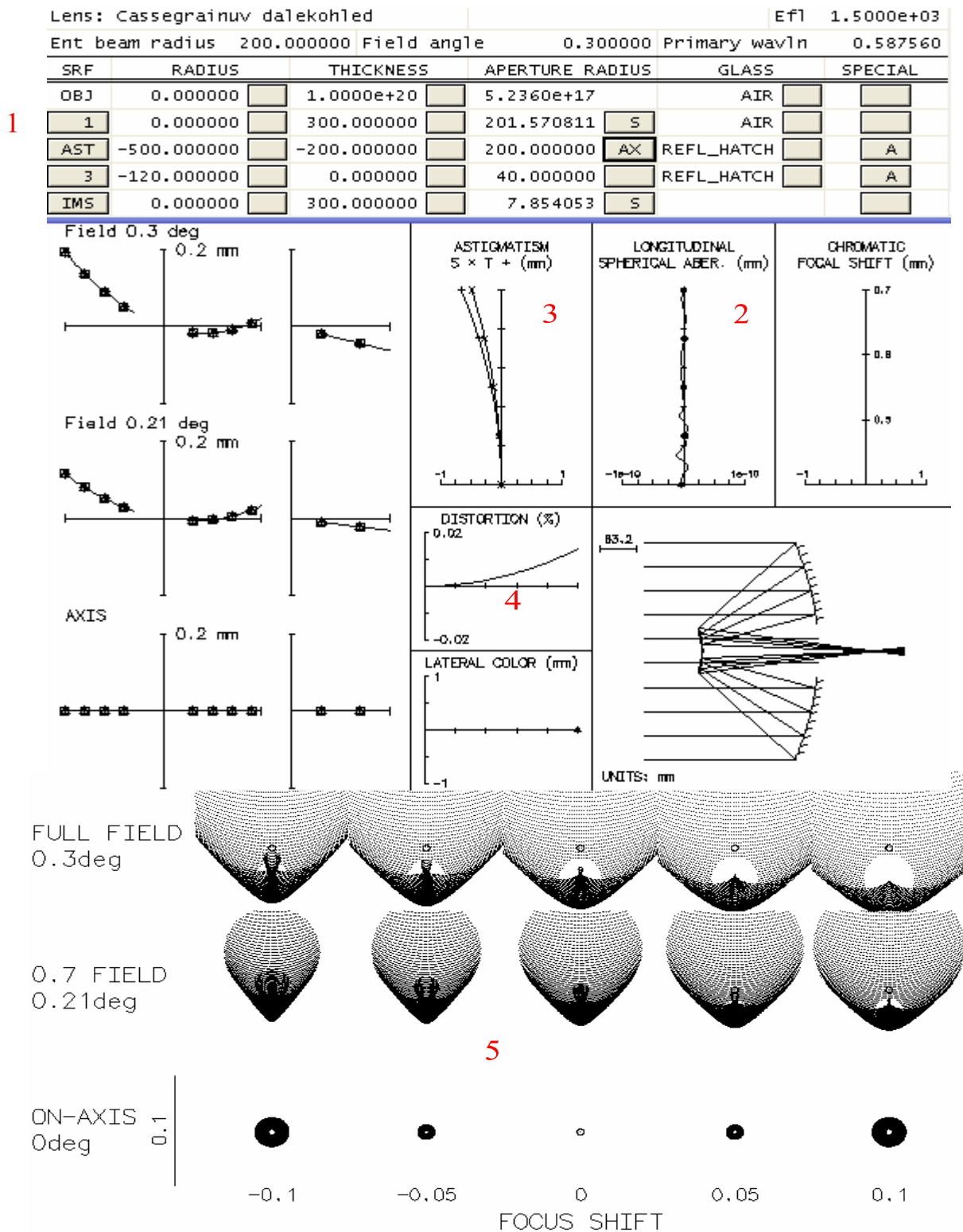
$$cc = -\left(\frac{x_0}{k}\right)^2 = -\left(\frac{350}{250}\right)^2 = 1.96$$

$$\frac{2}{R_2} = \frac{1}{a_2} + \frac{1}{a_2'} = \frac{1}{300} - \frac{1}{50} = -120\text{mm}$$



Obr. 2.3.1 Chod paprsků Cassegrainovým objektivem.

Na obr. 2.3.2 je zadání parametrů objektivu do programu OSLO (1) a analýza příkladu. Soustava nemá otvorovou vadu (2), zdroj se zobrazí jako ideální bod. Zobrazení mimoosového bodu je zatíženo astigmatismem (3) a komou (5). Dochází k poduškovému zkreslení čtverce (4). Barevné vady se neprojevív.



Obr. 2.3.2 Analýza zobrazení Cassegrainovým objektivem v programu OSLO.

3. Lámavé prostředí

Chceme-li ideálně zobrazit bod na optické ose pomocí lámavého prostředí můžeme plochu čtvrtého stupně zjednodušit za podmínek umístění zdroje do nekonečné vzdálenosti nebo do vzdálenosti konečné. Umístěním zdroje v konečné vzdálenosti ale nikdy nezískáme pro reálný předmět reálný obraz. Při umístěním zdroje do nekonečna musíme zase plochy asférizovat.

3.1 Zdroj v konečné vzdálenosti

Rovnice čtvrtého stupně přechází na rovnici druhého stupně za předpokladu že $k=0$.

V tomto případě bude mít rovnice tvar

$$(n^2 - n'^2)(x^2 + y^2) - n'^2(x_0^2 - 2x_0x) = 0$$

$$x^2 + y^2 + \frac{2x_0n'^2x}{(n^2 - n'^2)} - \frac{n'^2x_0^2}{(n^2 - n'^2)} = 0 \quad (3.1.1)$$

Jedná se o rovnici kružnice s středem posunutým v ose x.

$$(x + p)^2 + y^2 = r^2$$

$$x^2 + y^2 + 2px + p^2 - r^2 = 0$$

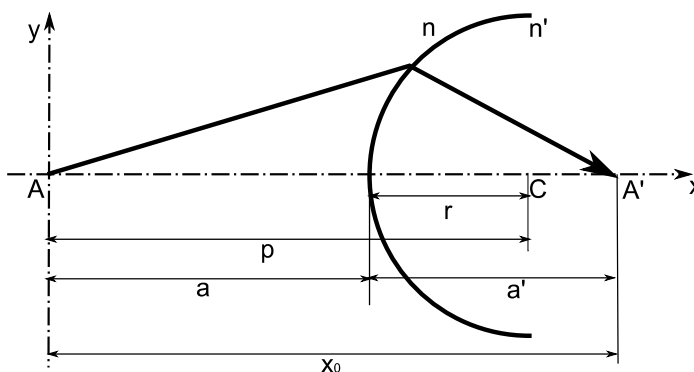
$$p = \frac{x_0n'^2}{(n^2 - n'^2)}$$

$$r^2 - p^2 = \frac{n'^2x_0^2}{(n^2 - n'^2)}$$

$$r = \frac{x_0n'n}{n^2 - n'^2}$$

$$x_0 = \frac{r(n^2 - n'^2)}{nn'}$$

$$p = \frac{n'}{n}r$$



3.1.1 Chod paprsků sférickou plochou

$$a = p - r = \frac{n + n'}{n}r$$

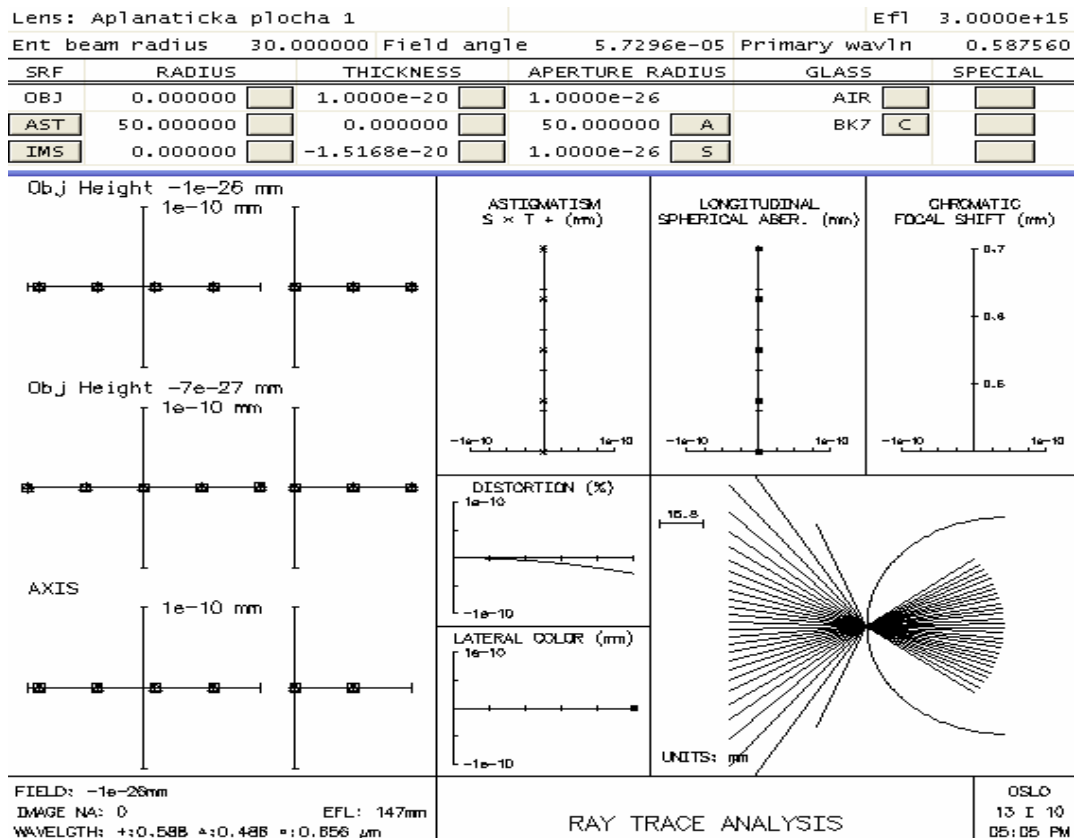
$$a' = x_0 - a = \frac{n + n'}{n'}r \quad (3.1.2)$$

Z těchto výpočtů vyplývá následující aplanatická podmínka

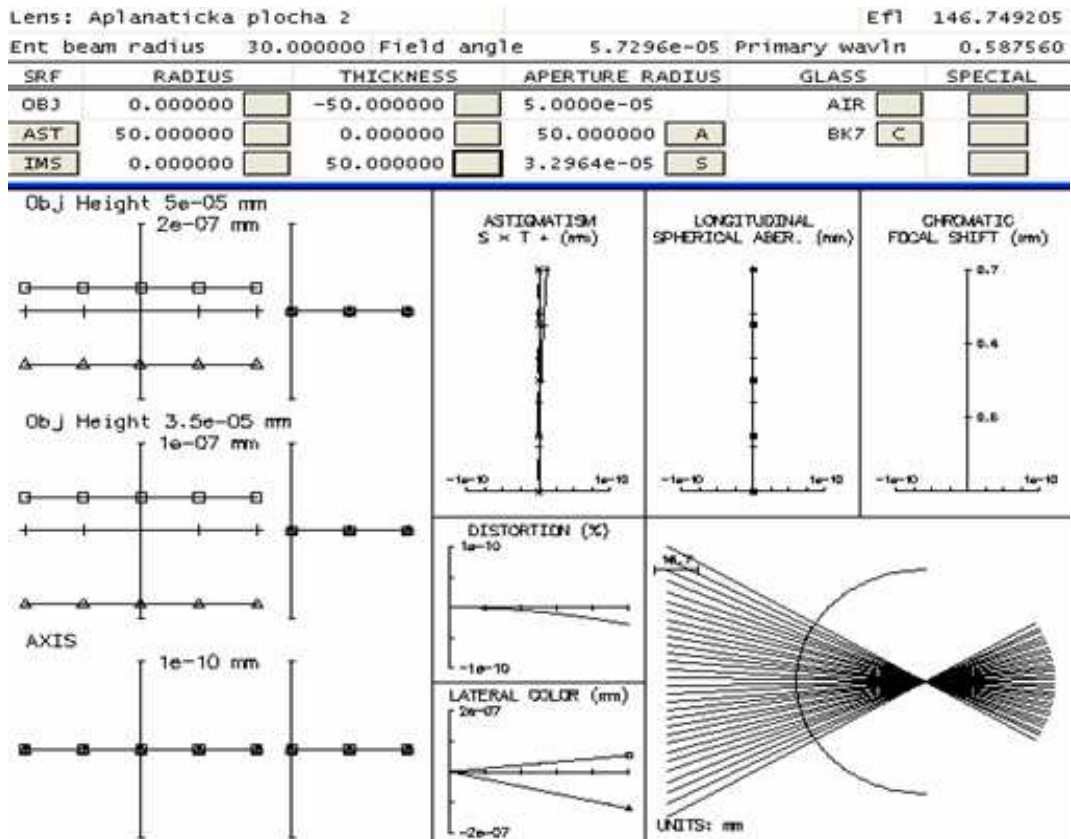
$$an = a'n' \quad (3.1.3)$$

Podmínku (3.1.3) máme splněnu v případech aplanatických ploch. Leží-li předmět ve vrcholu plochy (plocha „vrcholová“) (obr. 3.1.2), potom jsou vzdálenosti předmětu a obrazu od plochy nulové ($a=a'=0$). Předmět může také ležet ve středu křivosti plochy (plocha „normálová“) (obr. 3.1.3), pak máme vzdálenosti předmětu a obrazu od plochy rovny právě poloměru křivosti plochy ($a=a'=r$). Index lomu při lomu je kladný, z toho můžeme usoudit, že vzdálenosti předmětu a obrazu budou mít stejné znaménko a budou ležet na stejné straně od plochy. Reálný předmět tedy zobrazíme jako virtuální obraz (plocha „s neskutečnými obrazy“) (obr.3.1.4). Ve všech případech musí být splněna podmínka (3.1.2).

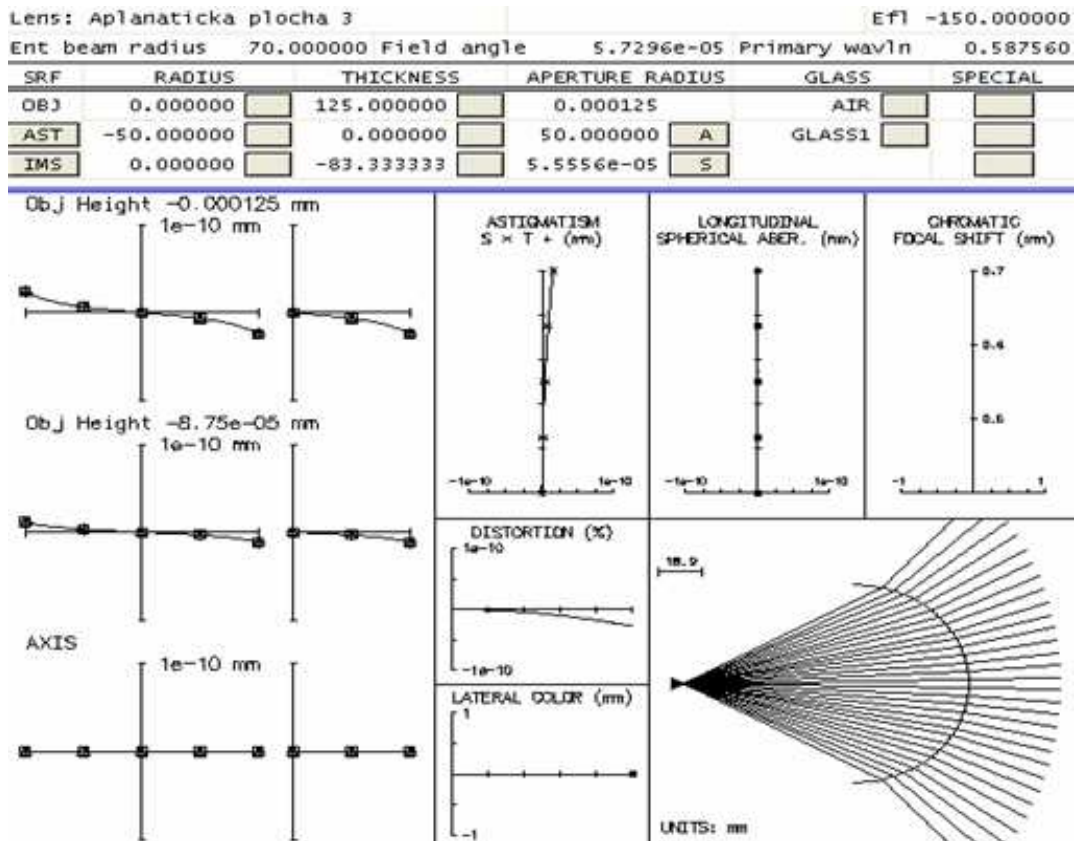
Aplanatické menisky jsou takové čočky, které jsme získali kombinací aplanatických ploch. Menisky jsou čočky ohraničené sférickými plochami, jejichž středy leží na jedné straně. Rozlišujeme spojný kladný meniskus (dutovypuklá čočka) a rozptylný záporný meniskus (vypuklodutá čočka) [4].



Obr. 3.1.2 Simulace „vrcholové“ plochy v OSLO.



Obr. 3.1.3 Simulace „normálové“ plochy v OSLO.



Obr. 3.1.4 Simulace plochy „s neskutečným obrazem“ v OSLO.

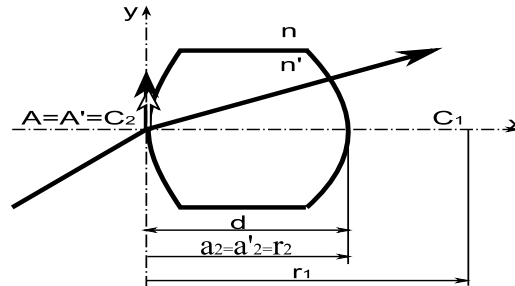
3.1.1 Aplanatický meniskus s první plochou „vrcholovou“ a druhou „normálovou“

Aplanatická čočka tvořená plochou vrcholovou a normálovou může být dvojbypuklá, plaskovypuklá a vydutovypuklá. Všechny tři čočky jsou spojné a základní parametry soustavy se vypočítají se vzorců. Návrh je simulován pro $r_2 = -30\text{mm}$ a $n = 1,5$.

$$s_1 = s'_1 = 0$$

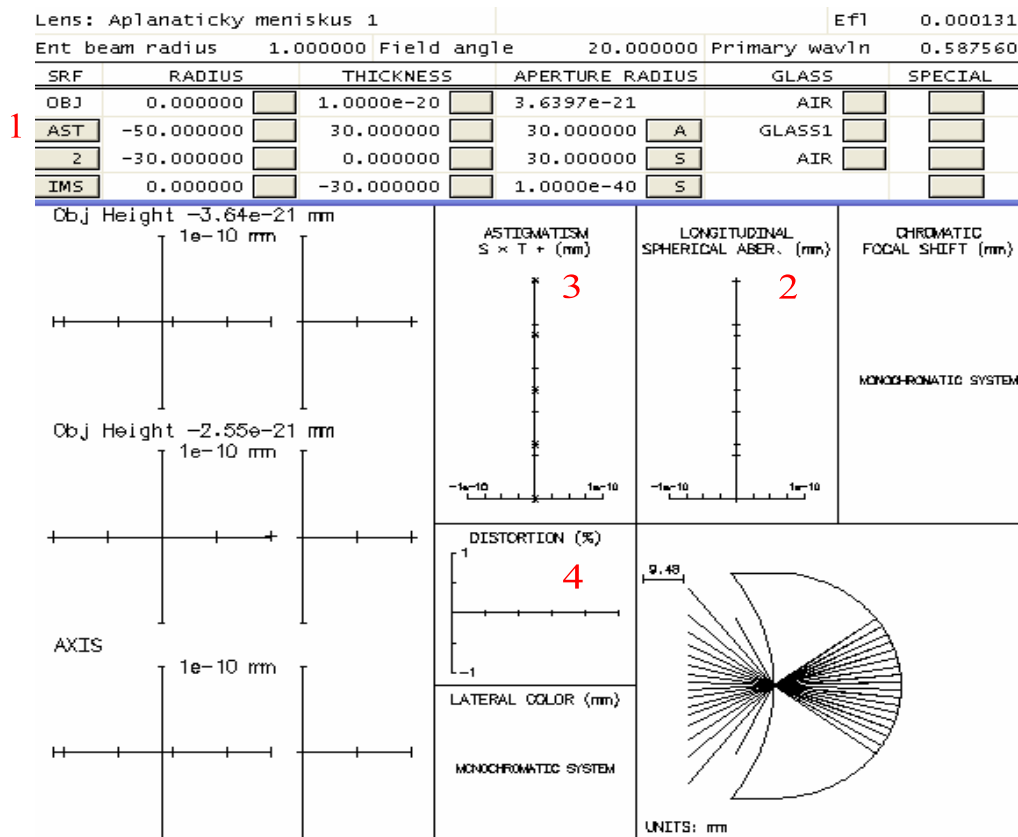
$$s_2 = s'_2 = r_2$$

$$r_2 = -d$$



Obr. 3.1.1.1 Aplanatický meniskus 1

Na obr. 3.1.1.1 je zadání parametrů aplanatického menisku daného typu do programu OSLO (1) a analýza příkladu. Meniskus nevykazuje žádnou otvorovou vadu (2). Vzhledem ke skutečnosti, že je zdroj ve vrcholu první plochy, nemá ani astigmatismus (3), zkreslení (4) a komu. Barevné vady neuvažujeme.



Obr 3.1.1.2 Aplanatický meniskus 1 v OSLO

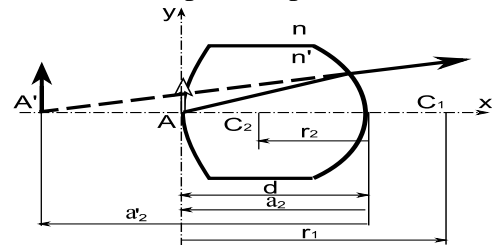
3.1.2 Aplanatický meniskus s plochou „vrcholovou“ druhou „s neskutečným obrazem“

Aplanatická čočka tvořená „vrcholovou“ plochou a plochou „s neskutečným obrazem“ může být dvojevypuklá, vydutovypuklá nebo ploskovypuklá. Všechny tři typy čoček jsou spojně. Použitím plochy „s neskutečným obrazem“ se obraz posune před čočku. Návrh je simulován pro $r_2 = -15\text{mm}$ a $n = 1,5$.

$$a_1 = a'_1 = 0 \quad a_2 = -d$$

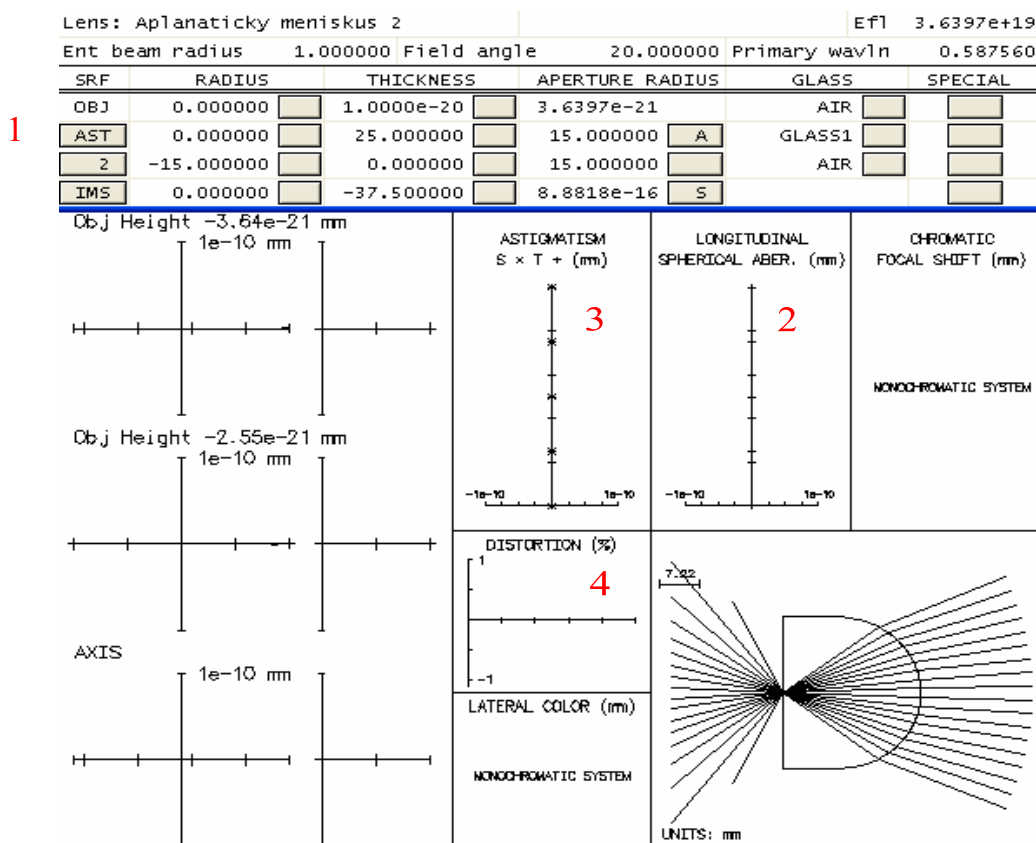
$$a_2 = \frac{n+1}{n} \cdot r \quad r_2 = -\frac{n}{n+1} d$$

$$a'_2 = (n+1) \cdot r$$



Obr. 3.1.2.1 Aplanatický meniskus 2

Na obr. 3.1.2.2. je zadání parametrů aplanatického menisku daného typu do programu OSLO (1) a analýza příkladu. Meniskus nevykazuje žádnou otvorovou vadu (2). Vzhledem ke skutečnosti, že je zdroj ve vrcholu první plochy, nemá ani astigmatismus (3), zkreslení (4) a komu. Barevné vady neuvažujeme.



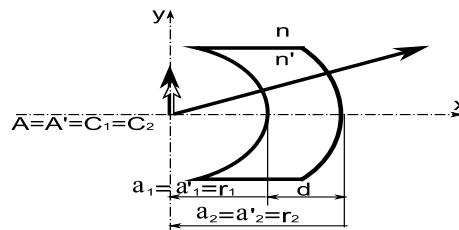
Obr. 3.1.2.2 Aplanatický meniskus 2 v OSLO

3.1.3 Aplanatický meniskus s oběma plochami „normálovými“

Tento tvar aplanatické čočky, můžeme ji označit jako koncentrickou vydutovypuklou, je tvořen plochami „normálovými“. Taková čočka je rozptylná. Návrh je simulován pro $r_1 = -50\text{mm}$, $d = 20\text{mm}$ a $n = 1,5$.

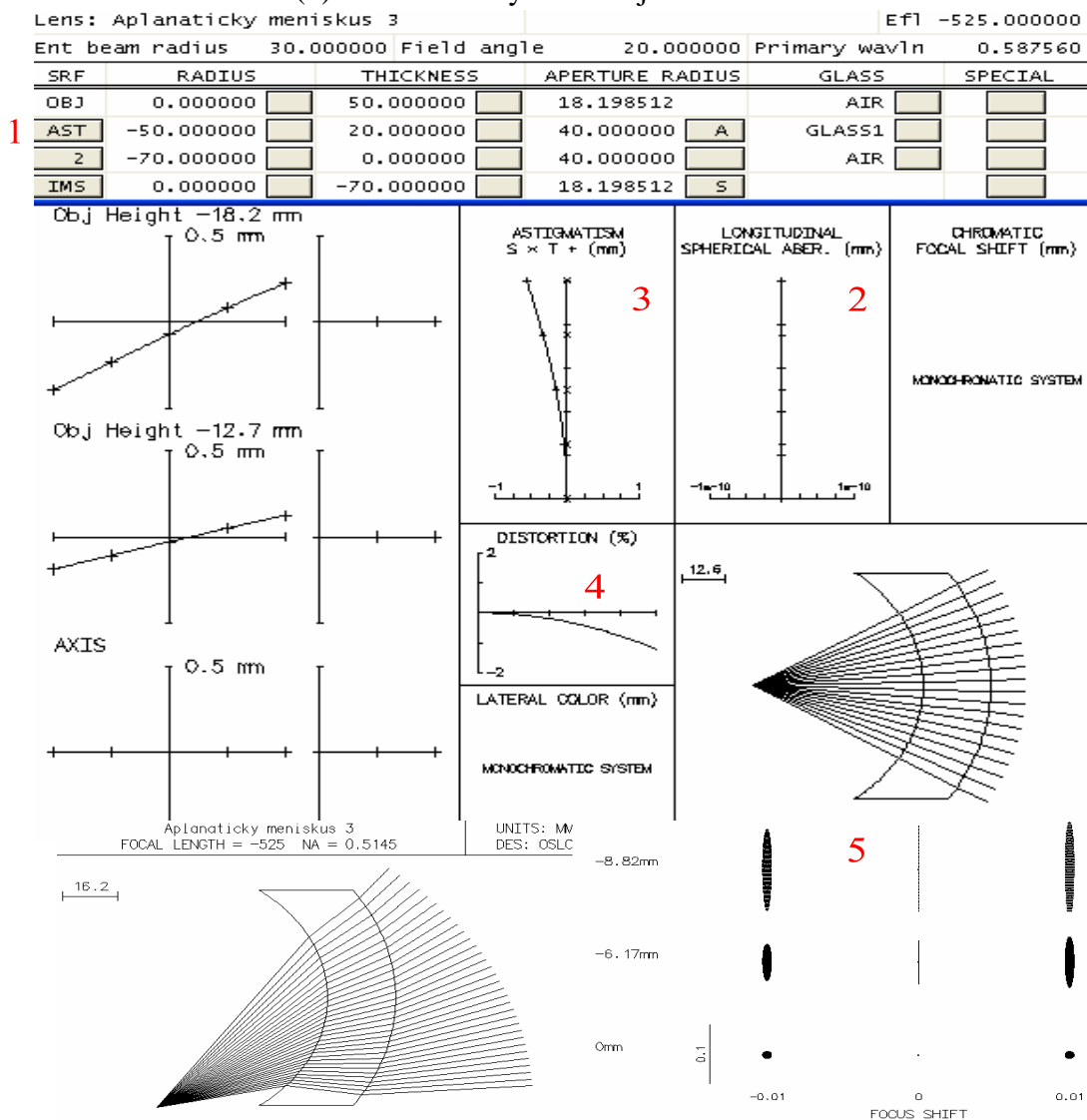
$$a_1 = a'_1 = r_1 \quad d = r_1 - r_2$$

$$a_2 = a'_2 = r_2 \quad r_2 = r_1 - d$$



Obr. 3.1.3.1 Aplanatický meniskus 3

Na obr. 3.1.3.2 je zadání parametrů aplanatického menisku daného typu do programu OSLO (1) a analýza příkladu. Aplanatický meniskus nevykazuje žádnou otvorovou vadu (2). Bod je zobrazen sám do sebe Při zobrazení bodu mimoosovým svazkem paprsků dochází k astigmatismu (3) a komě (5), u které se mimoosový bod zobrazí jako přímka. Čočka má také soudkovité zkreslení (4). Barevné vady neuvažujeme.

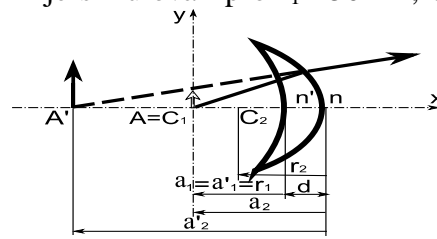


Obr. 3.1.3.2 Aplanatický meniskus 3 v OSLO.

3.1.4 Aplanatický meniskus s plochou „normálovou“ a „s neskutečným obrazem“

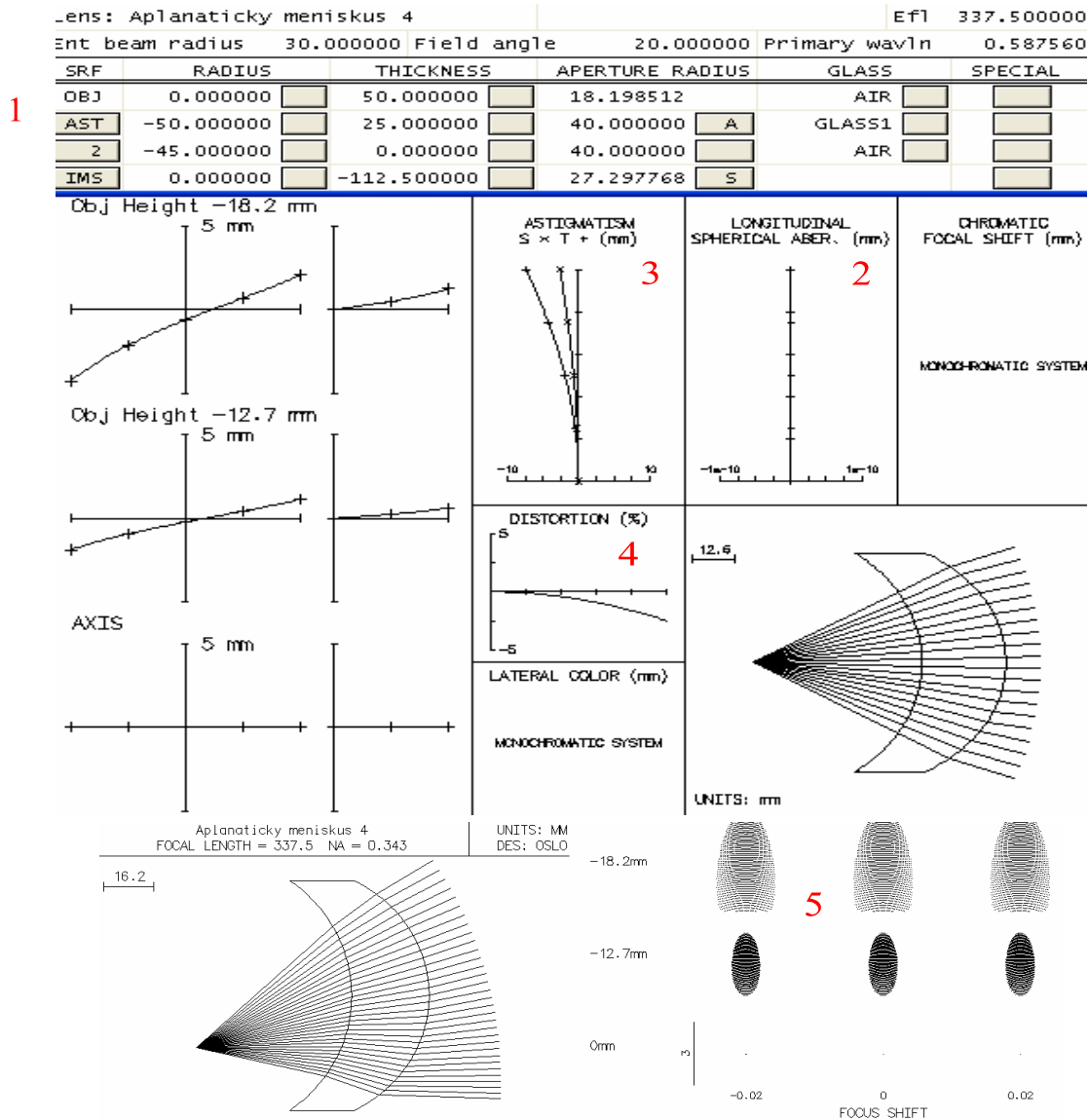
Vydutovypuklá aplanatická čočka je vytvořena kombinací plochy „normálové“ a plochy „s neskutečným obrazem“. Čočka je spojná. Návrh je simulován pro $r_1 = -50\text{mm}$, $d = 25\text{mm}$ a $n = 1,5$.

$$\begin{aligned} a_1 &= a'_1 = r_1 & -r_1 + d &= -a_2 \\ a_2 &= \frac{n+1}{n} \cdot r_2 & d &= r_1 - \frac{n+1}{n} r_2 \\ a'_2 &= (n+1) \cdot r_2 & r_2 &= \frac{n}{n+1} (r_1 - d) \end{aligned}$$



Obr. 3.1.4.1 Aplanatický meniskus 4

Na obr. 3.1.4.2 je zadání parametrů aplanatického menisku daného typu do programu OSLO (1) a analýza příkladu. Aplanatický meniskus nevykazuje žádnou otvorovou vadu (2). Při zobrazení bodu mimoosovým svazkem paprsků dochází k astigmatismu (3) a komě (5). Čočka má také soudkovité zkreslení (4). Barevné vady neuvažujeme.



Obr. 3.1.4.2 Aplanatický meniskus 4 v OSLO.

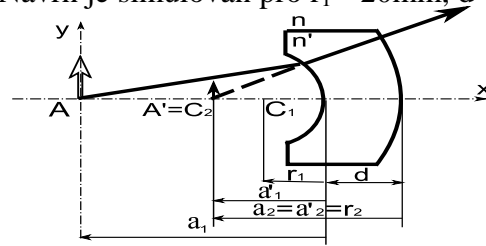
3.1.5 Aplanatický meniskus s plochami „s neskutečným obrazem“ a „normálovou“

Vydutovypuklá aplanatická čočka je vytvořena kombinací plochy „normálové“ a „s neskutečným obrazem“. Čočka je rozptylná. Návrh je simulován pro $r_1 = -20\text{mm}$, $d = 10\text{mm}$ a $n = 1,5$.

$$a_1 = (n+1) \cdot r_1 \quad -r_2 = -a'_1 + d$$

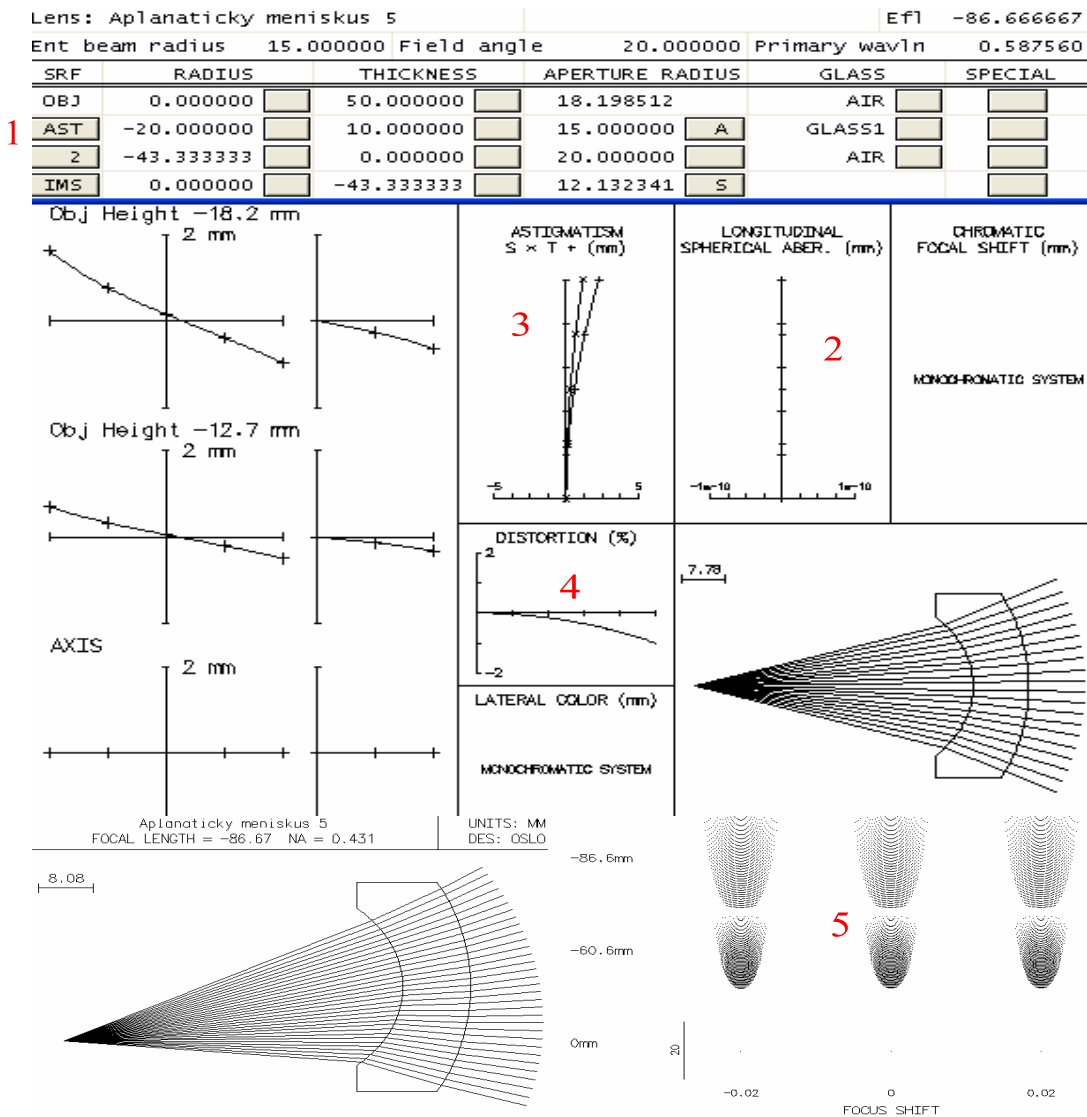
$$a'_1 = \frac{n+1}{n} \cdot r_1 \quad d = \frac{n+1}{n} r_1 - r_2$$

$$a_2 = a'_2 = r_2 \quad r_2 = \frac{n+1}{n} r_1 - d$$



Obr. 3.1.5.1 Aplanatický meniskus 5

Na obr. 3.1.5.2 je zadání parametrů aplanatického menisku daného typu do programu OSLO (1) a analýza příkladu. Aplanatický meniskus nevykazuje žádnou otvorovou vadu (2). Při zobrazení bodu mimoosovým svazkem paprsků dochází k astigmatismu (3) a komě (5). Čočka má také soudkovité zkreslení (4). Barevné vady neuvažujeme.



Obr. 3.1.5.2 Aplanatický meniskus 5 v OSLO.

3.1.6 Aplanatický meniskus s oběma plochami „s neskutečným obrazem“.

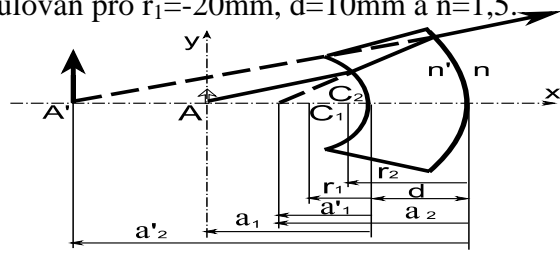
Vydutovypuklá aplanatická čočka je vytvořena kombinací ploch „s neskutečným obrazem“. Čočka je rozptylná. Návrh je simulován pro $r_1 = -20\text{mm}$, $d = 10\text{mm}$ a $n = 1,5$.

$$a_1 = (n+1) \cdot r_1 \quad -a_2 = -a'_1 + d$$

$$a'_1 = \frac{n+1}{n} \cdot r_1 \quad d = \frac{n+1}{n} (r_1 - r_2)$$

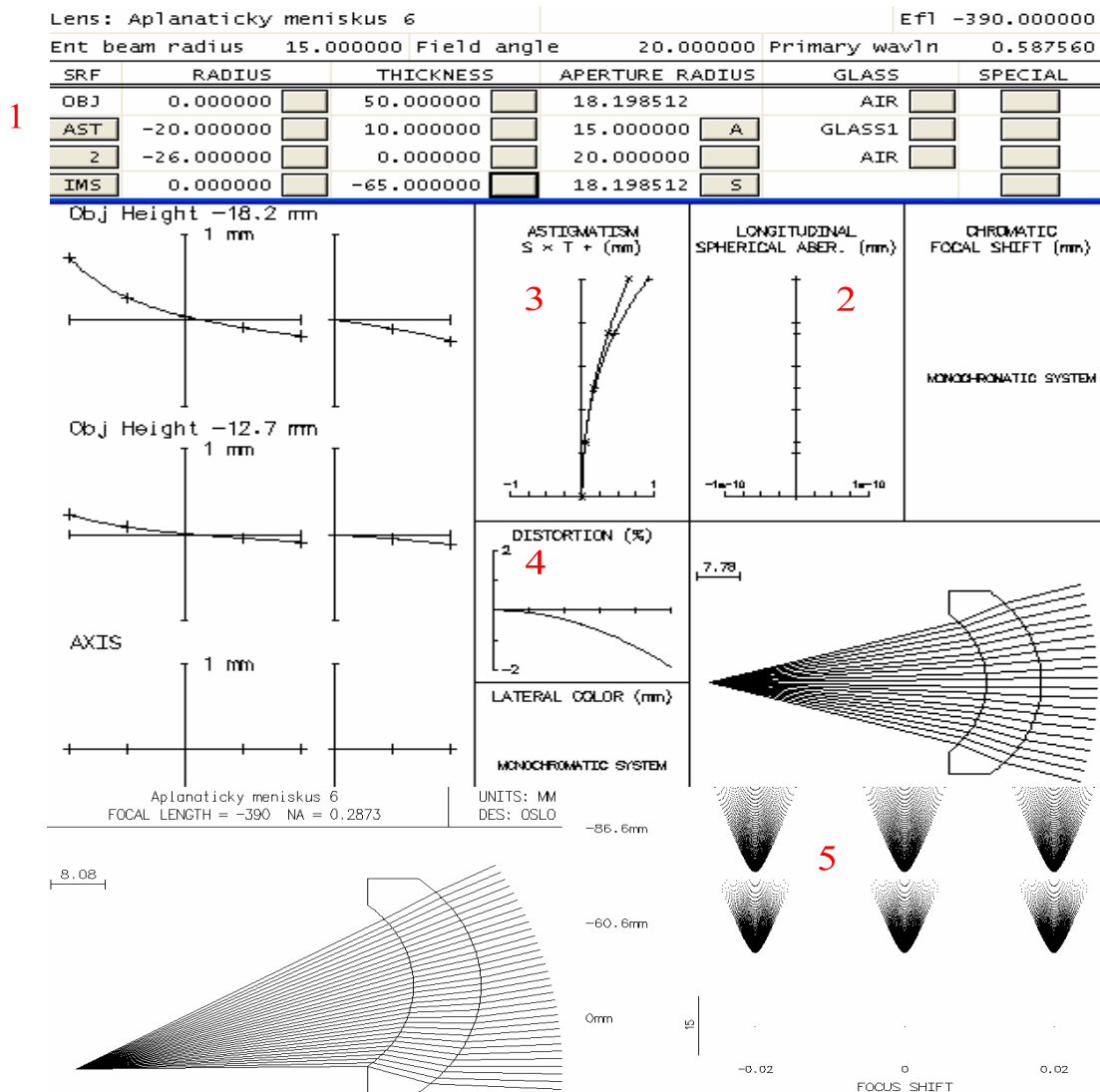
$$a'_2 = \frac{n+1}{n} \cdot r_2 \quad r_2 = r_1 - \frac{n}{n+1} d$$

$$a_2 = (n+1) \cdot r_2$$



Obr 3.1.6.1 Aplanatický meniskus 6

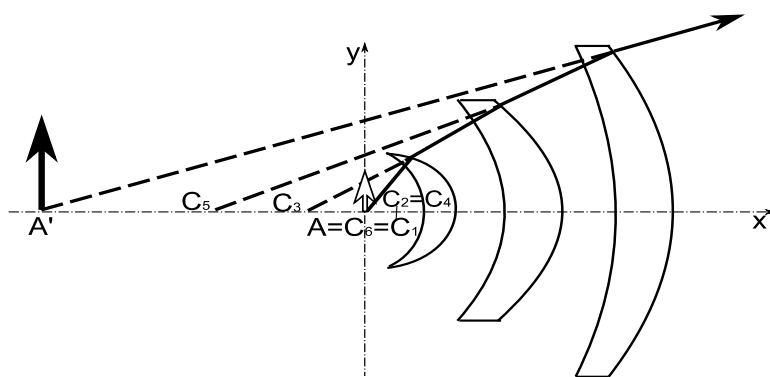
Na obr. 3.1.6.2 je zadání parametrů aplanatického menisku daného typu do programu OSLO (1) a analýza příkladu. Aplanatický meniskus nevykazuje žádnou otvorovou vadu (2). Při zobrazení bodu mimoosovým svazkem paprsků dochází k astigmatismu (3) a komě (5). Čočka má také soudkovité zkreslení (4). Barevné vady neuvažujeme.



Obr. 3.1.6.2 Aplanatický meniskus 6 v OSLO.

3.1.7 Použití aplanatických menisků

Aplanatických menisků se užívá ke korigování optických soustav s velkými aperturními úhly v předmětovém nebo obrazovém prostoru. Jsou tedy použitelné například jako část objektivu zmenšující předmětový aperturní úhel. Z aplanatických menisků v předchozí kapitole vybereme takový, který nám zmenšuje aperturní úhel. Jedná se o spojné menisky. Čočky s první plochou „vrcholovou“ nepřípadají v úvahu, zbývá nám jen meniskus s první plochou „normálovou“ a druhou „s neskutečným obrazem“. Pro ukázkou si zvolíme předmět ve vzdálenosti $a_1 = 10\text{mm}$. Dopočítáme další parametry menisku při vzdálenosti jednotlivých ploch $d=5\text{mm}$ a indexu lomu $n=1.5$



Obr. 3.1.7.1 Chod paprsku objektivem

1.čočka :

$$a_1 = 10\text{ mm}$$

$$R_1 = -10\text{ mm}$$

$$R_2 = \frac{n}{n+1} \cdot (R_1 - d) = -9\text{ mm}$$

2.čočka

$$a'_2 = (n+1) \cdot (R_2) = -22.5\text{ mm}$$

$$R_3 = a'_2 - d = -27.5\text{ mm}$$

$$R_4 = \frac{n}{n+1} \cdot (R_3 - d) = -19.5\text{ mm}$$

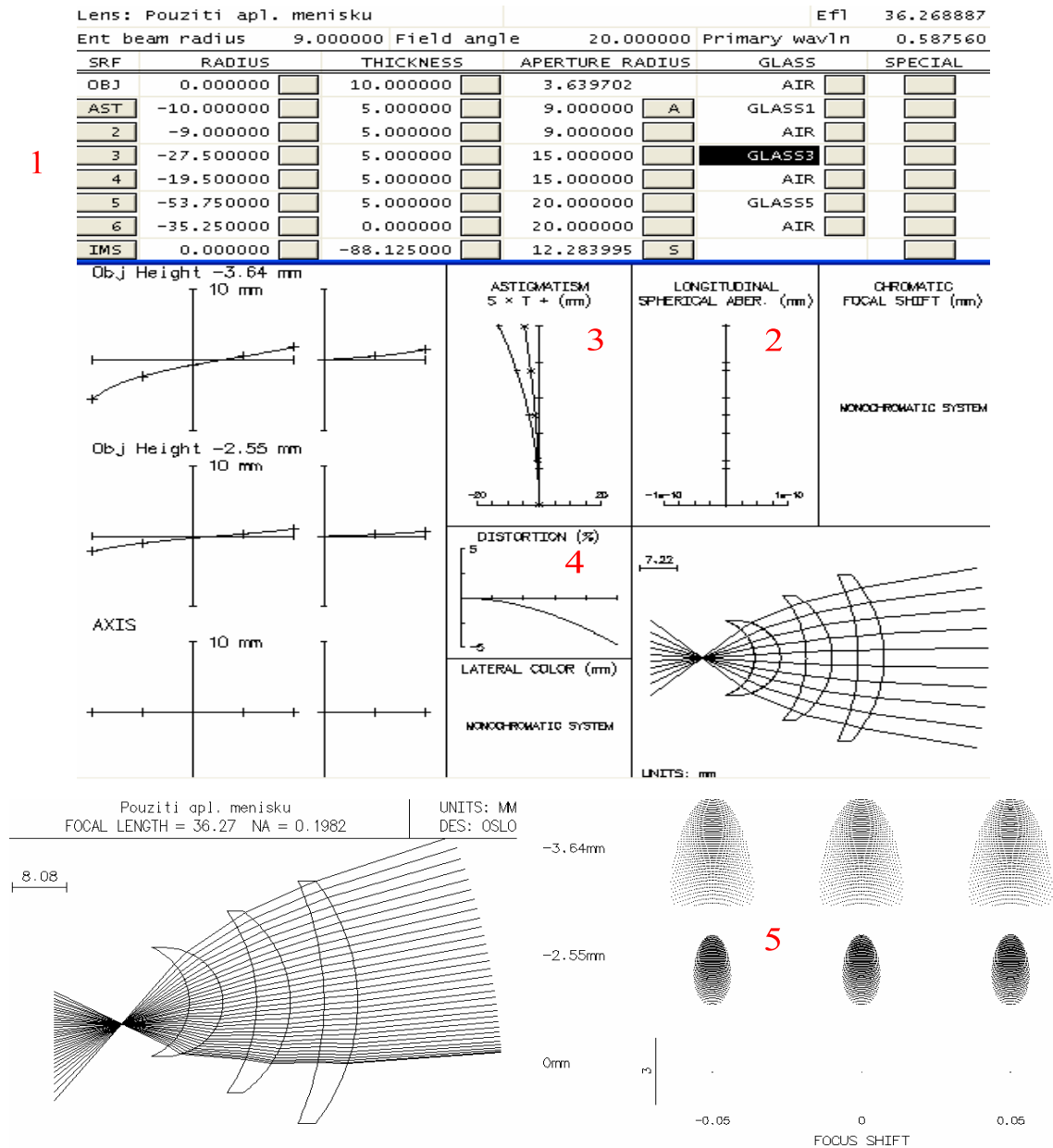
3.čočka

$$a'_4 = (n+1) \cdot (R_4) = -48.75\text{ mm}$$

$$R_5 = a'_4 - d = -53.75\text{ mm}$$

$$R_6 = \frac{n}{n+1} \cdot (R_5 - d) = -35.25\text{ mm}$$

Na obr. 3.1.7.2 je zadání parametrů objektivu do programu OSLO (1) a analýza příkladu. Analýza dokázala, že soustava nemá otvorovou vadu (2). Zobrazení mimoosového bodu je zatíženo komou (5) a astigmatismem (3). Dochází i k soudkovitému zkreslení obrazu (4). Barevné vady neuvažujeme.



Obr. 3.1.7.2 Objektiv složený z aplanatických menisků v OSLO.

3.2 Zdroj v nekonečné vzdálenosti

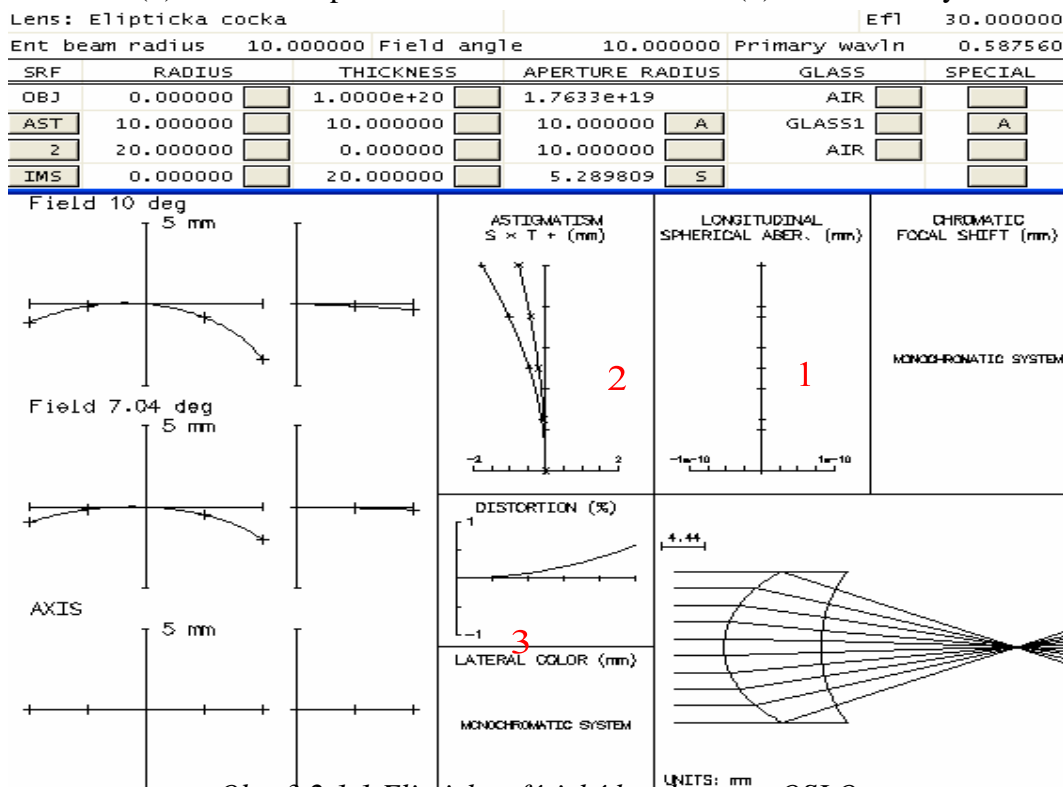
Ideálně zobrazující čočky se zdrojem v nekonečnu fungují jako kondenzory. To jsou spojné čočky nebo soustava čoček, které slouží k rozložení bodového zdroje světla do rovnoměrného a rovnoběžného svazku nebo naopak. Plocha čtvrtého stupně (1.3.2) se nám zjednoduší na plochu druhého stupně (2.2.1). Taková plocha může být, jde-li paprsek z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí, elipsoidní, nebo z hustšího do řidšího, hyperboloidní.

3.2.1 Elipsoidní lámavá plocha $n < n'$

Odvozením z (2.2.1) získáme obecnou rovnici elipsy. Pak excentricitu vypočítáme jako poměr indexů lomu, $\varepsilon = \frac{n}{n'}$, do programu OSLO zadáváme,

$$cc = -\left(\frac{n}{n'}\right)^2. \quad (3.2.1.1)$$

Kondenzor elipticko-sférický požaduje, aby sférickou plochou procházely paprsky lomené elipsoidní plochou normálově. Návrh je simulován pro $r_1=20\text{mm}$, $d=10\text{mm}$ a $n=1,5$. Na obr. 3.2.1.1 je zadání parametrů čočky do programu OSLO (1) a analýza. Ta dokázala, že soustava nemá otvorovou vadu (2). Zobrazení mimoosového bodu je zatíženo komou (5) a astigmatismem (3). Dochází k poduškovému zkreslení obrazu (4). Barevné vady neuvažujeme.



Obr. 3.2.1.1 Elipticko-sférický kondenzor v OSLO.

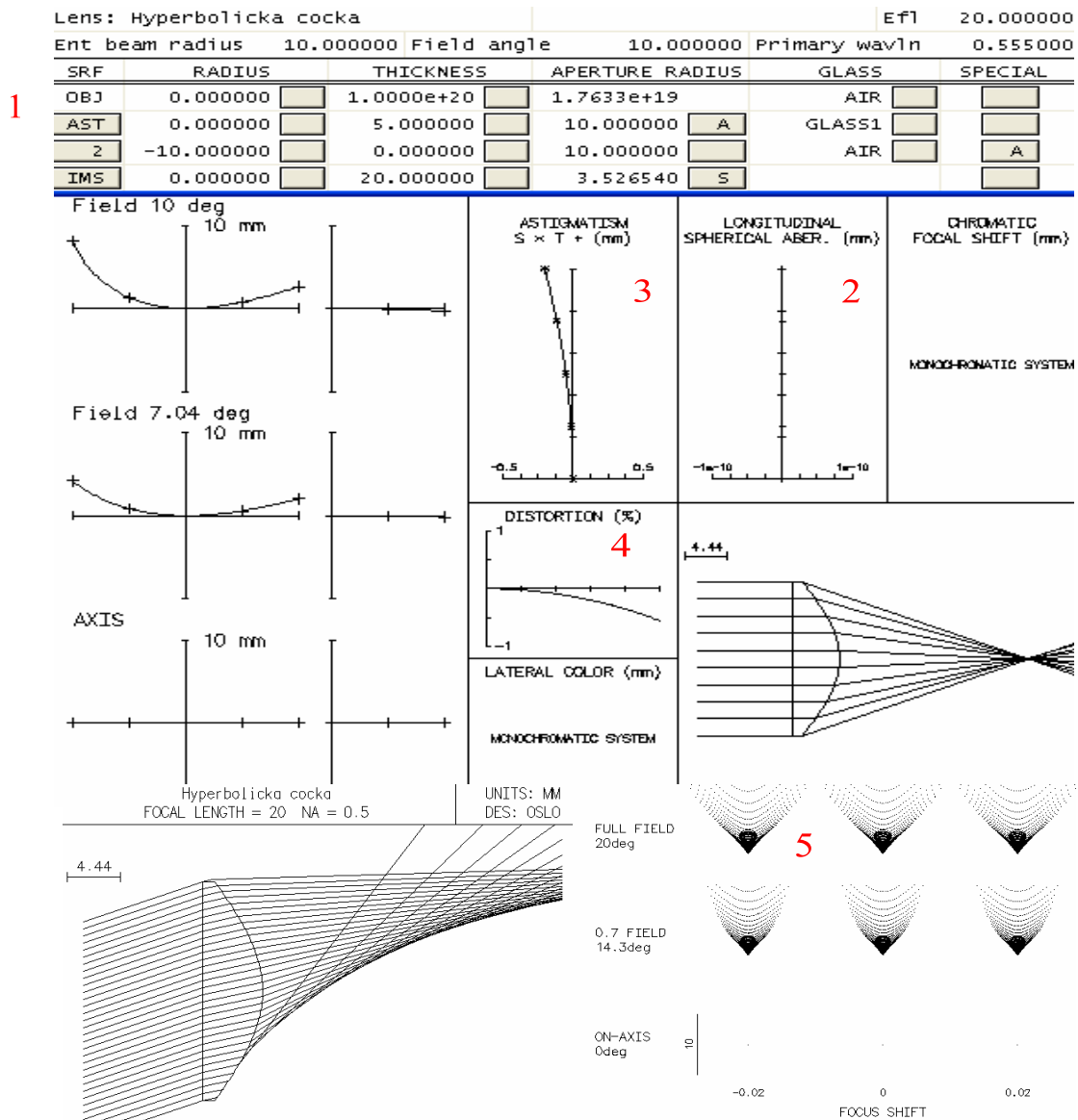
3.2.2 Hyperboloidní lámavá plocha $n > n'$

Odvozením (2.2.1.) získáme obecnou rovnici hyperboly. Excentricitu vypočítáme jako $\varepsilon = \frac{n}{n'}$,

do programu OSLO zadáváme podle (3.2.1.1).

První plocha plan-hyperbolického kondenzoru musí být rovinná, aby nedocházelo k lomu paprsků z nekonečně vzdáleného zdroje. Druhá plocha je hyperboloidní. Návrh je simulován pro $r_2 = -20\text{mm}$, $d = 5\text{mm}$ a $n = 1,5$.

Na obr. 3.2.2.1 je zadání parametrů čočky do programu OSLO (1) a analýza. Ta dokázala, že soustava nemá otvorovou vadu (2). Zobrazení mimoosového bodů je zatíženo komou (5) a astigmatismem (3). Dochází k soudkovovému zkreslení obrazu (4). Barevné vady neuvažujeme.



Obr. 3.2.2.1 Plan-hyperbolický kondenzor v OSLO.

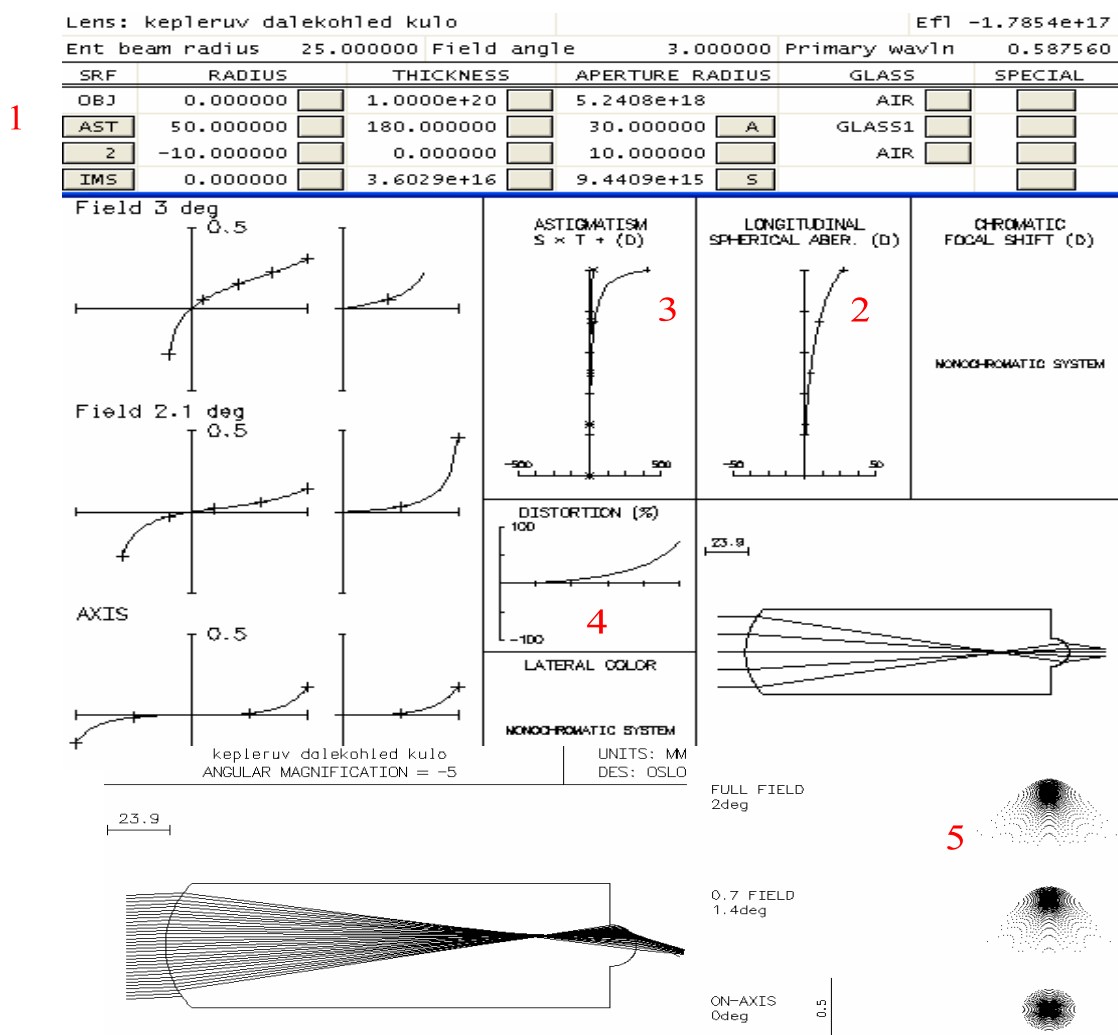
4. Vybrané optické prvky

4.1 Afokální čočka

Afokální čočka je taková čočka, jejíž optická mohutnost je rovna 0. Podle vzorce (1.1.1) a (1.1.2) zjistíme, že je-li předmět v nekonečnu, do nekonečna se promítne i obraz. Takové čočky lze využít jako jednočočkového dalekohledu. V programu OSLO je řešen následující ukázkový příklad. Vytvořte pomocí afokální čočky Keplerův dalekohled s pětinasobným zvětšením. První plocha má poloměr křivosti $r_1=50\text{mm}$, index lomu je $n=1.5$.

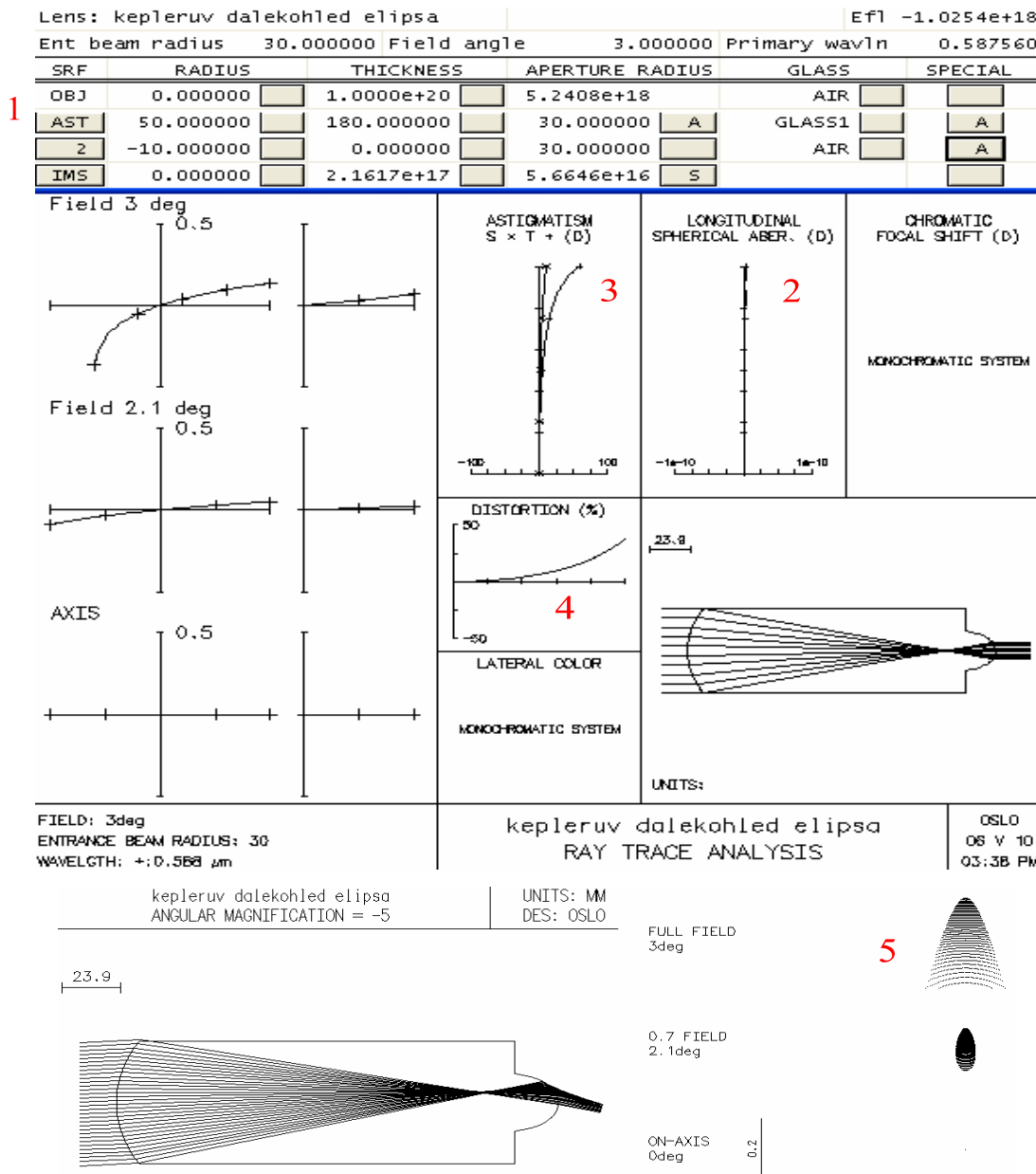
$$\Gamma = \frac{f'_{\text{objektivu}}}{f'_{\text{okuláru}}}, \text{ obrazové ohniskové vzdálenosti ploch dopočítám dle vzorce (1.1.2)}$$

Na obr. 4.1.1 je zadání parametrů čočky do programu OSLO (1) a analýza. Ta dokázala, že soustava má otvorovou vadu (2). Zobrazení mimoosového bodů je zatíženo komou (5) a astigmatismem (3). Dochází k poduškovému zkreslení obrazu (4). Barevné vady neuvažujeme.



Obr. 4.1.1 Keplerův jednočočkový dalekohled v OSLO

Afokálních čoček, použitých jako dalekohledů, se v praxi nevyužívá. Jsou v porovnání se standardním dalekohledem mnohem těžší, nelze je přestrojit a mají nižší propustnost světla. Použitím sférických ploch navíc dochází k velkým optickým vadám. Otvorovou vadu odstraníme a snížíme ostatní vady použitím asférických ploch. Obě plochy budou elipsoidní. Na obr. 4.1.2 je zadání parametrů čočky do programu OSLO (1) a analýza. Ta dokázala, že soustava nemá otvorovou vadu (2). Zobrazení mimoosového bodu je zatíženo komou (5) a astigmatismem (3). Dochází k poduškovému zkreslení obrazu (4). Barevné vady neuvažujeme



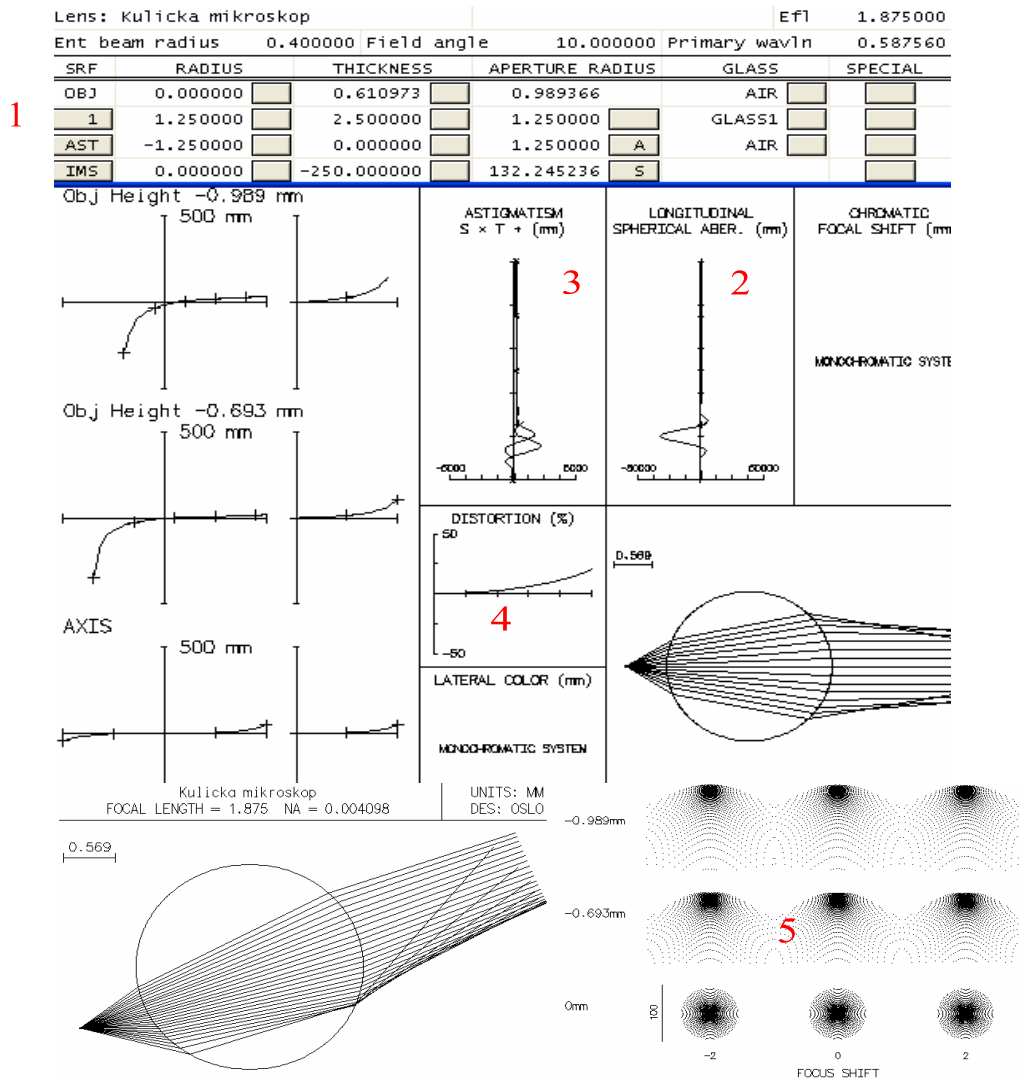
Obr. 4.1.2 Keplerův jednočočkový dalekohled s elipsoidními plochami v OSLO

4.2 Skleněná kulička jako optický prvek

Skleněné kuličky jako optického prvku se využívá v moderní optice. Je jednoduchá na výrobu, manipulaci a především mechanické uložení (nemusí se centrovat). Poloměry takovýchto kuliček jsou v řádu milimetrů.

4.2.1 Použití jako mikroskop

Anton van Leeuwenhoek konstruoval jednočočkové mikroskopy pomocí skleněných korálků s velmi malým poloměrem křivosti, který dovoľoval zvětšovat až 270x. Návrh v OSLO je simulován pro průměr kuličky $d=2,5\text{mm}$ a $n=1,5$. Zbývající parametry jsou dopočítány podle vzorců (1.1.1 - 1.1.3) a (1.1.5). Kuličku uvažujeme jako lupu. Na obr. 4.2.1 je zadání parametrů čočky do OSLO (1) a analýza. Mikroskop má zvětšení 133x. Má velkou otvorovou vadu (2). Zobrazení mimoosového bodu je zatíženo komou (5) a astigmatismem (3). Dochází i k poduškovému zkreslení obrazu (4).



Obr. 4.2.1 Kuličkový mikroskop v OSLO.

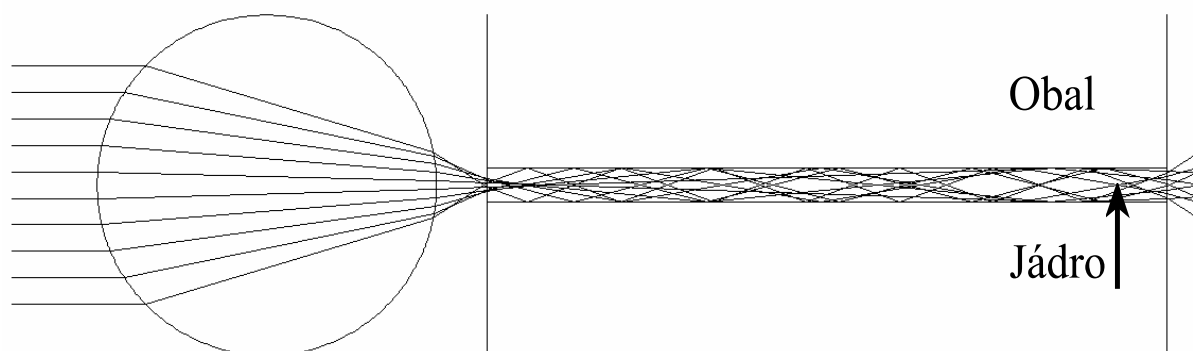
4.2.2 Použití jako zavaděč svazku do optického vlákna

K navázání světla při vstupu do optického vlákna (nebo je vyvázání) se často používají jako čočky malé skleněné kuličky. Konec vlákna se v takovém případě umísťuje do obrazového ohniska kuličky. Parametry pro výpočet ohniska kuličky vypočítáme ze vzorců (1.1.1 - 1.1.3) a (1.1.7). Optické vlákno pro vedení světla využívá totálního odrazu mezi prostředími o různém indexu lomu. Totální odraz nastává po překonání mezního úhlu vstupujících paprsků: $\alpha_m = \arcsin \frac{n_2}{n_1}$. Paprsky se tedy odráží od opticky řidšího prostředí. V následujícím příkladě má jádro vlákna index lomu $n_2=1.6$ a obalu $n_1=1.4$. Kulička je ze skla o $n=1,5$. Jedná se pouze o ukázkou s parametry volenými pro názornost demonstrace. V praxi se užívají jiné parametry. Na obr. 4.2.2.2 jsou parametry zadávané do OSLO. V záložce speciál musíme pro zadání jádra a obalu povolit kolonku „rod“.

Lens: Kulicka svazek do vlakna						Efl	7.500000	
Ent beam radius		3.500000	Field angle		5.7296e-05	Primary wavln		0.587560
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS		GLASS	SPECIAL		
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.0000e+14		AIR			
AST	5.000000	10.000000	5.000000		GLASS1			
2	-5.000000	1.500000	5.000000		AIR			
3	0.000000	0.000000	5.000000		OBAL	F		
4	0.000000	20.000000	0.500000		JADRO	F		
5	0.000000	0.000000	5.000000		AIR			
IMS	0.000000	0.000000	V	5.366678	S			

Obr. 4.2.2.2 Zadání parametrů do OSLO

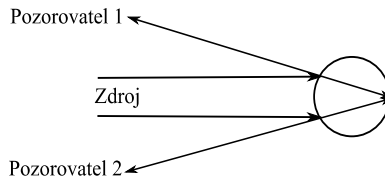
Na obr 4.2.2.1 je náčrt chodu paprsků, který naznačuje lom paprsků a následné odrazy na rozhraní jádra a obalu vlákna.



Obr. 4.2.2.1 Zavedení paprskového svazku do optického vlákna pomocí skleněné kuličky.

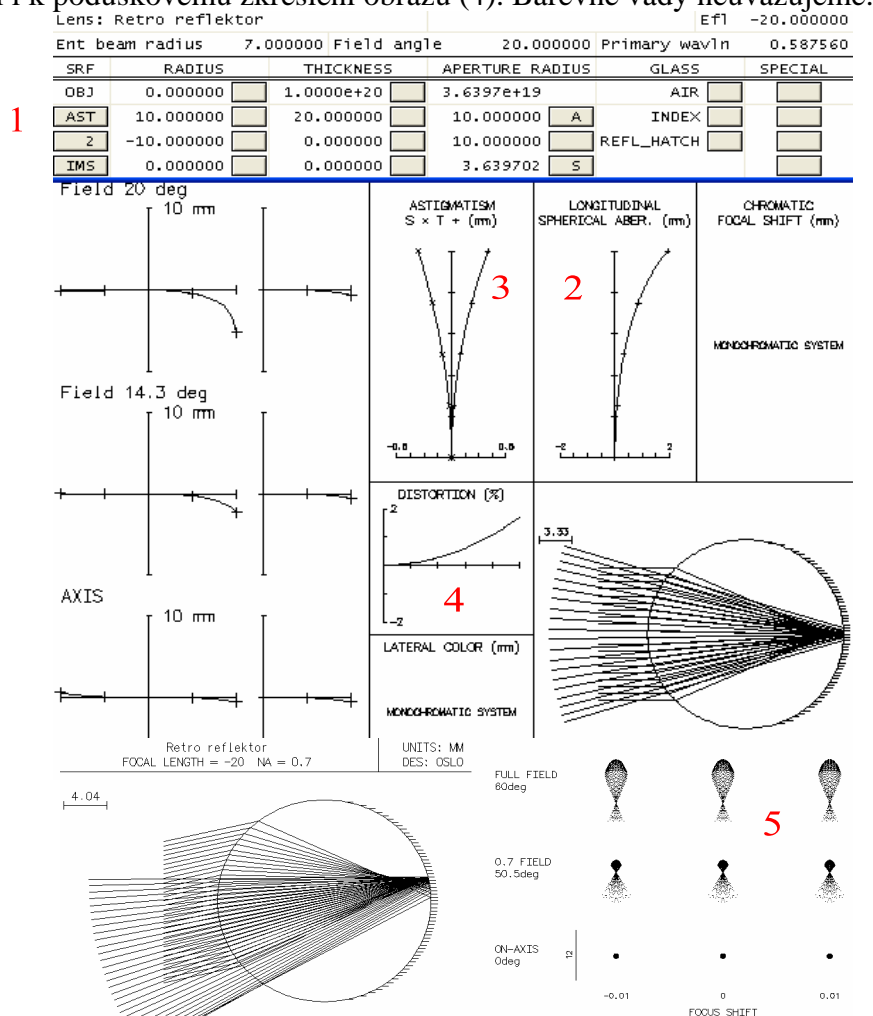
4.2.3 Retroreflektor

Retroreflektor je nezobrazovací optický prvek nebo jen plocha, která odráží zpět ke zdroji světlo s minimálním rozptylem. Dokáže zpět odrážet paprskové svazky dopadající pod velkým úhlem. Rovinné zrcadlo odráží zpět pouze paprsky kolmé. Retroreflektor může být skleněná kulička, jejíž druhá plocha je odrazná. Kulička musí mít index lomu $n=2$. Retroreflektorů se využívá např. v dopravě. (viz. obr 4.2.3.1) Posvítíme-li na retroreflektor z určitého úhlu (zdroj), bude odraz viditelný i pro větší úhly pohledu pro pozorovatele 1 i pozorovatele 2



Obr 4.2.3.1 Retroreflektor využití

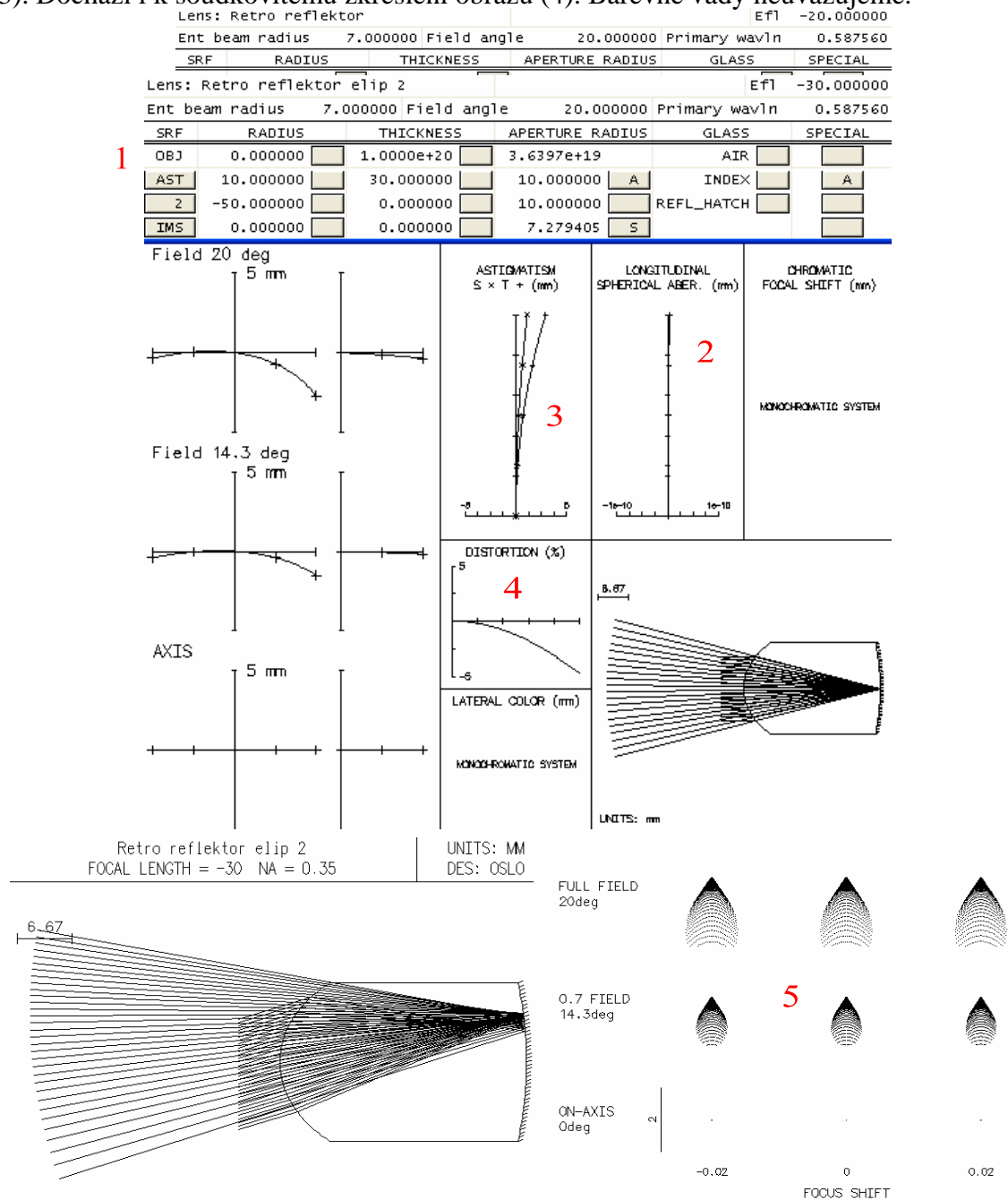
Na obr 4.2.3.2 je zadání parametrů retroreflektoru do programu OSLO (1) a analýza příkladu. Návrh je simulován pro $d=20\text{mm}$ a $n=2$. Analýza dokázala, že soustava má otvorovou vadu (2). Zobrazení mimoosového bodů je zatíženo komou (5) a astigmatismem (3). Dochází i k poduškovému zkreslení obrazu (4). Barevné vady neuvažujeme.



Obr 4.2.3.2 Skleněná kulička jako retroreflektor.

Zlepšení vlastností retroreflektoru lze získat asférizací první plochy. Nejvhodnější je eliptická plocha. Index lomu $n=2$ je v praxi nepoužitelný, neboť běžná skla mají index lomu kolem $n=1,5$. Aby dopadaly paprsky na druhou stěnu zaostřeny v bod, musíme zvětšit tloušťku čočky. Nižší index lomu a asférizace nám způsobí porušení kulového tvaru.

Na obr 4.2.3.3 je zadání parametrů retroreflektoru do programu OSLO (1) a analýza příkladu. Návrh je simulován pro $d=20\text{mm}$ a $n=2$. Analýza dokázala, že soustava má otvorovou vadu (2). Zobrazení mimoosového bodu je zatíženo komou (5) a astigmatismem (3). Dochází i k soudkovitému zkreslení obrazu (4). Barevné vady neuvažujeme.



Obr 4.2.3.3 Retroreflektor s elipsoidní plochou a indexem lomu $n=1,5$

4.3 Generování Besselovského svazku pomocí axikonu

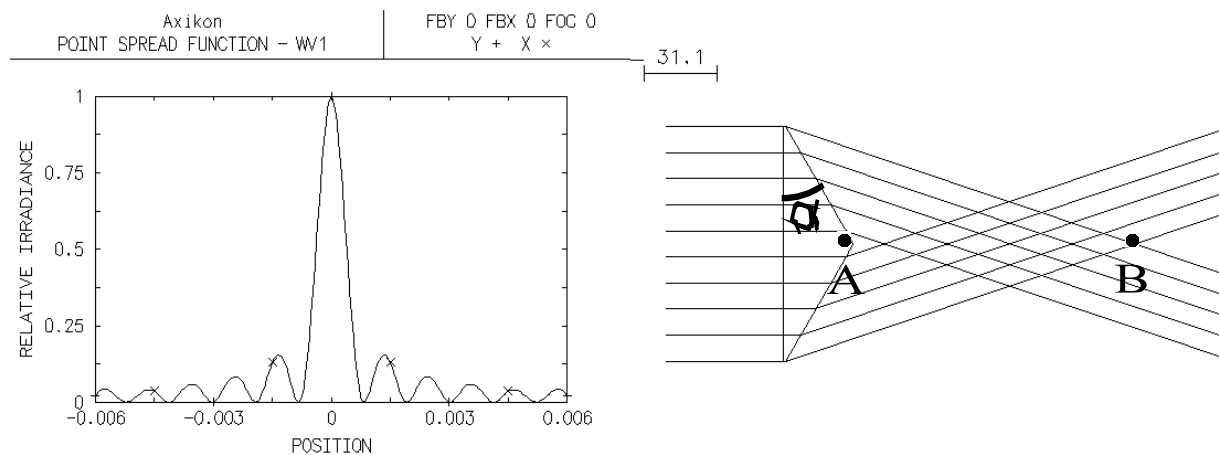
Axikon je kuželová čočka využívána v různých oborech výzkumu. Může být použita jako převodník laserového svazku na nedifrakční Besselovský svazek s dlouhou hloubkou ostrosti.

Návrh je simulován pro $n=1,5$ a vrcholový úhel kužele 120° .

Lens: Axikon						EFL	5.0000e+55
Ent beam radius	50.000000	Field angle	5.7296e-05	Primary wavln	0.587560		
SRF	RADIUS	THICKNESS	APERTURE RADIUS	GLASS	SPECIAL		
OBJ	0.000000	1.0000e+20	1.0000e+14	AIR			
AST	0.000000	30.000000	50.000000	GLASS1	A		
2	0.000000	0.000000	50.000000	AIR		S	
IMS	0.000000	150.000000	50.000170		S		

*SPLINE SURFACE DATA
 2 SH0 -- SSO -0.577350 SH1 1.0000e+20 SS1 --

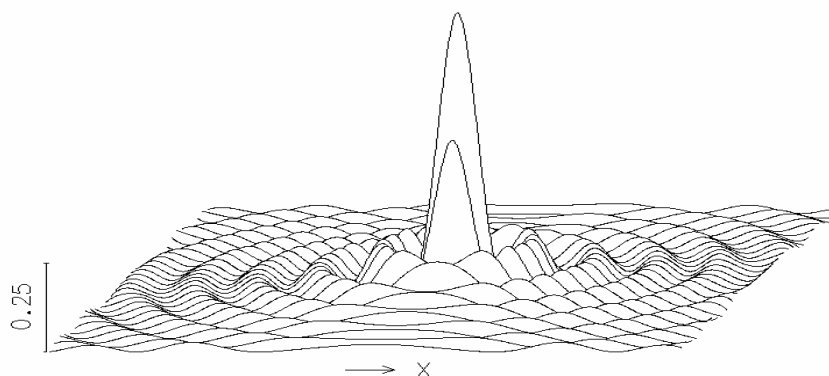
Obr. 4.3.1 Zadávání parametrů do OSLO. V záložce speciál jsem zadal vlastnosti kuželové plochy. Zadává se zde sklon plochy $\tan \alpha = \tan 30^\circ = 0,57735$.



Obr. 4.3.2 Generace Besselovského svazku. Průběh funkce PSF (Point spread function) od bodu A po bod B. Funkce PSF nám udává rozdělení intenzit záření v průřezu svazku (v rovině kolmé k optické ose). Na úsečce AB je maximální intenzita záření po celé délce.

Peak = 1 (0mm,0mm)
 Centroid (-1.69e-20mm,-6.925e-19mm)
 Monochromatic WW1: 0.588

Axikon
 Direct Integration-based PSF



Obr. 4.3.3 Průběh funkce PSF Besselovského svazku

Závěr

Cílem této práce bylo seznámení se s programem OSLO a jeho využití při návrhu optických prvků, tedy dokonale zobrazujících zrcadel a čoček. Obor prvků, které jsme řešili, byl vybrán s ohledem na syllabus předmětu *Optické zobrazování*, který je vyučován na katedře optiky Univerzity Palackého v Olomouci . Postupy a řešené úlohy studentům usnadní přechod od teoretické části učiva po praktický návrh prvků.

V první části je nastíněna teorie optického zobrazování, kterou lze využít při návrhu optických prvků. Druhá a třetí část řeší konkrétní případy ideálního zobrazení bodu pro odraz a lom, pro něž je navržen optický systém využívající prvky ideálního zobrazení bodu. Jedná se o Cassegrainův dalekohled a mikroskopický objektiv. Ve čtvrté části jsou simulovány vybrané optické prvky, které byly vybrány především proto, abychom ukázali komplexnost programu OSLO pro návrhy soustav.

Za přínos této práce považujeme využití teoretických znalostí o optických soustavách v praktickém návrhu optických prvků. Osvojením základních dovedností ve vývojovém prostředí programu OSLO jsme dosáhli korekce vad zobrazení zrcadel a čoček. Všechny možnosti využití tohoto programu však zdaleka nebyly vyčerpány. Program OSLO Premium firmy Lambda Research je dostupný na počítačové učebně Katedry optiky.

Použitá literatura:

- [1] Saleh, E.A., Teich, M.C., Základy Fotoniky I., Matfyzpress, Praha, 1994.
- [2] Fuka J., Havelka, B., Optika a atomová fyzika část I. Optika, SPN, Praha, 1961.
- [3] Klabazňa J., Základy teorie optických soustav, skriptum, Olomouc, 1992
- [4] Palatka M., Metody návrhu zobrazovacích soustav, Olomouc, 2008.
- [5] Baudyš A., Technická optika , skriptum, Praha, 1996.
- [6] Lambda Research, Oslo optics reference, 2001.
- [7] <http://wikipedia.org/>
- [8] <http://www.4oci.cz/>

Prohlašuji, že tuto práci na téma Návrh a analýza optických prvků v programu OSLO jsem vypracoval samostatně s využitím uvedených zdrojů.

V Olomouci dne 19.5.2010

.....

Stanislav Pych