Přírodovědecká fakulta Univerzity Palackého v Olomouci

katedra optiky

Návrh zobrazovacích systémů pomocí optických počítačových programů

bakalářská práce

Vypracoval: Martin Korger

Vedoucí práce: RNDr. Vladimír Chlup

Konzultant: RNDr. Zdeněk Lošťák

Studijní obor: bakalářské studium Optika a optoelektronika

Datum odevzdání: 20. května 2009

Prohlášení

Čestně prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci zpracoval samostatně pod vedením RNDr. Vladimíra Chlupa. Doporučená literatura, se kterou jsem pracoval, je uvedena na konci bakalářské práce.

V Olomouci dne 20.5.2009 …...............................

Obsah

Úvod

V rámci spolupráce Přírodovědecké fakulty Univerzity Palackého (PřF UP) v Olomouci s podnikem Meopta - optika s.r.o, Přerov, obsahovala nabídka témat bakalářských prací pro rok 2007 / 2008 mimo jiné i několik zajímavých prací týkajících se návrhu a analýzy optických systémů.
Z těch jsem si vybral téma s názvem Návrh zobrazovacích systémů pomocí optických počítačových programů.
Cílem práce je vytvoření pomůcky pro studenty oboru "Přístrojová optika" při praktické výuce v podniku Meopta v podobě podrobného návodu jak využívat optického počítačového programu při návrhu, analýze a optimalizaci zobrazovacích systémů.
Největším přínosem pro mne je možnost naučit se zacházet s programem OSLO, který je k disposici na PřF UP, a na který jsem se v rámci práce zaměřil.
Program OSLO je vytvořen jako nástroj pro optické inženýrství a obsahuje mnoho funkcí využitelných k simulaci optického systému a jeho následnému vyhodnocení. Z těchto funkcí se pokusím vybrat ty, s jejichž pomocí je možné minimalizovat optické vady systému.
První kapitola práce se zabývá elementárními problémy při tvorbě optického systému. Zahrnuje nastínění geometrické optiky a jejích základů, vysvětlení důsledků rozporu mezi Abbeovou a Herschelovou podmínkou, základní aspekty charakteristiky a analýzy optického systému a úvod do maticové optiky, se kterou se pracuje v příkladech ve třetí kapitole.
Druhá kapitola je zaměřena převážně na optické vady, jejich charakteristiku, rozdělení a ukázky jejich vlivu na zobrazovací vlastnosti optického systému.
Třetí kapitola pak obsahuje několik řešených příkladů návrhů optických systémů simulovaných a vyhodnocených pomocí programu OSLO.

1. Elementární problémy konstrukce optického systému

Základní parametry optické soustavy jsou určeny třemi údaji:

- Aperturou
- Zorným polem
- Rozsahem vlnových délek

Apertura představuje velikost otvoru, jímž do optické soustavy vniká svazek paprsků nebo vlnoplocha. Údajem používaným při popisu opt. soustav je aperturní úhel σ, který je definován jako polovina úhlu, který svírají dva krajní paprsky svazku vycházejícího z předmětového bodu P a dopadajícího na první plochu soustavy.

Paprsky vycházející z bodu P mohou být ovlivněny různými clonami, které je možné přidat před soustavu a tím tak docílit omezení svazku pouze na aperturní úhel nejlepší k zobrazení daného bodu.

Zorné pole představuje část prostoru, kterou je možné zobrazit danou optickou soustavou, a ze které do soustavy přicházejí světelné paprsky. Zorné pole je vyjádřeno zorným úhlem τ, kterým se označuje úhel mezi optickou osou a paprskem z nejzazšího bodu, který je optický systém schopen zachytit.

V běžné praxi však někdy bývá zorné pole zaměněno za zorný úhel, ačkoliv hodnota zorného pole je dvojnásobná oproti hodnotě zorného úhlu.

Spektrální oblast světla, procházejícího optickou soustavou, velmi výrazně ovlivňuje zobrazovací vlastnosti soustavy. Proto požadavky na zobrazování v určité spektrální oblasti komplikují návrh a konstrukci optické soustavy. Příkladem mohou být optické systémy zobrazující v pásmech UV a IR, které kladou další neobvyklé požadavky co se optických materiálů a jejich vlastností týče.

Na výše uvedené tři základní údaje navazuje řada dalších parametrů optického systému, které určují kvalitu systému.

1.1 Základy geometrické optiky

Geometrická optika popisuje šíření světla pomocí paprsků, které jsou definovány jako normály k vlnoploše šířícího se elektromagnetického záření. Zákony geometrické optiky jsou potvrzeny jako limitní případ vlnové fyziky pro $\lambda \to 0$. Odvození lze nalézt např. v [2] nebo [3].

Geometrická optika formuluje tři následující požadavky:

a) V homogenním a isotropním prostředí se světlo šíří přímočaře ve tvaru světelných paprsků.

b) Ve světelném toku se svazky navzájem neovliňují.

c) Na rozhraní dvou homogenních a isotropních prostředí se svazky řídí zákonem lomu a odrazu.

Je ovšem nutné brát také zřetel na vlnový charakter světla, protože světlo se přestane šířit přímočaře při průchodu svazku malým otvorem, popřípadě při dopadu svazku na malý předmět, kdy dochází k ohybu světla.

Stejně tak neplatí pravidlo o neovlivňování svazků navzájem, pokud tyto svazky vycházejí ze stejného zdroje a sbíhají se v určitém místě pomocí vhodného zařízení po různých drahách – v takovém případě dochází k interferenci světla [1].

Geometrickou optiku většinou považujeme za nauku zabývající se popisem optického zobrazení, tedy průchodem optických paprsků čočkami, zrcadly a jinými zobrazovacími prvky.

S ohledem na tři základní požadavky formulované výše vystačíme při většině případů se znalostí Snellova zákona lomu, s jehož pomocí lze šíření světla soustavou studovat jako šíření jednotlivých paprsků, myšleně vycházejících z jednotlivých bodů předmětu pod různými směry.

S pomocí počítačových programů je velice výhodné prozkoumat šíření velkého počtu paprsků [2].

Index lomu, odraz a lom světla

Absolutní index lomu N prostředí je definován jako podíl rychlosti světla c ve vakuu a fázové rychlosti v jednobarevného světla v tomto prostředí $N=\frac{c}{v}$. (1.1)

N vzduchu je přibližně stejný pro všechny vlnové délky viditelného světla a při teplotách kolem 20°C a tlaku kolem 760 torr se rovná přibližně 1,00027.

Relativní index lomu n prostředí P vůči prostředí V je podíl fázové rychlosti v_v jednobarevného světla v prostředí V a fázové rychlosti v_p světla (téže vlnové délky) v prostředí P.

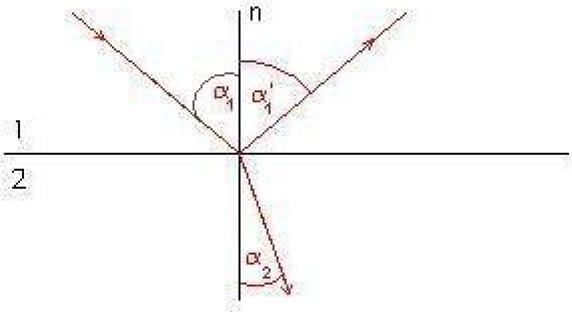
Z toho plyne, že $n=\frac{v_v}{v_p}=\frac{N_p}{N_v}$. (1.2)

Na základě velikosti *n* rozeznáváme na rozhraní dvou prostředí dva typy prostředí:

opticky hustší prostředí, které má *n* větší

opticky řidší prostředí, s *n* menším

Svazek paprsků, dopadající na rozhraní oddělující dvě různá prostředí (na obr. 1.1 jsou to prostředí 1 a 2), se po dopadu částečně odráží do prostředí, ze kterého vychází, a částečně vniká do druhého prostředí.



Obr. 1.1 odraz a lom světla na rozhraní prostředí 1 a 2

Odraz (reflexe) světla se řídí zákonem odrazu – odražený paprsek leží v rovině dopadu dopadajícího paprsku a úhel odrazu α_1' se rovná úhlu dopadu α_1. Úhly dopadu a odrazu měříme od příslušných paprsků ke kolmici, zákon odrazu lze tedy vyjádřit rovnicí $\alpha_1' = -\alpha_1$ (1.3)

Lom (refrakce) lze popsat obdobně, pouze paprsky se šíří od rozhraní do prostředí 2. Zlomený paprsek leží taktéž v rovině dopadu dopadajícího paprsku a platí rovnice

$$n_1 \sin\alpha_1 = n_2 \sin\alpha_2 \qquad (1.4)$$

(zvaná též Snellův zákon lomu).[3] [4]

1.2 Optická soustava

Optickou soustavou rozumíme jakýkoliv souhrn optických rozhraní, na nichž dochází ke změně směru šíření optického paprsku.

Pro účely této práce uvažujeme jen osově symetrické optické soustavy s refraktivními plochami, které transformují homocentrické svazky.

V praxi jsou výhodná rozhraní kulové (nebo rovinné) plochy, jejichž středy křivosti leží na jedné přímce, optické ose soustavy, a tím tvoří soustavu centrovanou.

Nejjednodušší optickou soustavou je čočka, tedy část prostoru ohraničená dvěma kulovými plochami, vyplněná prostředím o rozdílném indexu lomu než má okolní prostředí.

Cílem geometrické optiky je přiblížit se co nejvíce ideálnímu zobrazení, tedy aby se bod zobrazil do bodu, přímka do přímky a rovina do roviny. Nelze však tvrdit, že pokud optická soustava zobrazí jeden bod P ležící na optické ose stigmaticky, dokáže zobrazit i body v těsném okolí bodu P se stejnou kvalitou.

K stigmatickému zobrazení všech bodů těsně sousedících s bodem P musí být splněny dvě podmínky: sinová podmínka (neboli podmínka Abbeova) a Herschelova podmínka.

1.2.1 Abbeova podmínka

$$ny\,\sin\sigma = n'\,y'\sin\sigma' \qquad (1.5)$$

Pokud platí, není optická soustava zatížena optickou vadou komy (pokud není zatížena i otvorovou optickou vadou) a příčné měřítko zobrazení je konstantní.

Důkaz se provádí pro bod P ležící na optické ose, pomocí Snellova zákona lomu (1.4) [5]

Z předchozích úvah je zřejmé, že Abbeova podmínka zajišťuje stigmatické zobrazení blízkých bodů v rovině kolmé k optické ose v bodě P. Je tudíž používána pro systémy, při nichž je požadováno ostré zobrazení nejen osového bodu P, ale také jeho okolí na dané rovině.

Nezajišťuje však správné zobrazení bodů ležících na optické ose, odlišných od P.

1.2.2 Herschelova podmínka

Herschelova podmínka je nutná pro stigmatické zobrazení bodů blízkých osovému bodu P, které také leží na optické ose: $ny\,\sin\frac{\sigma}{2} = n'\,y'\sin\frac{\sigma'}{2}$ (1.6)

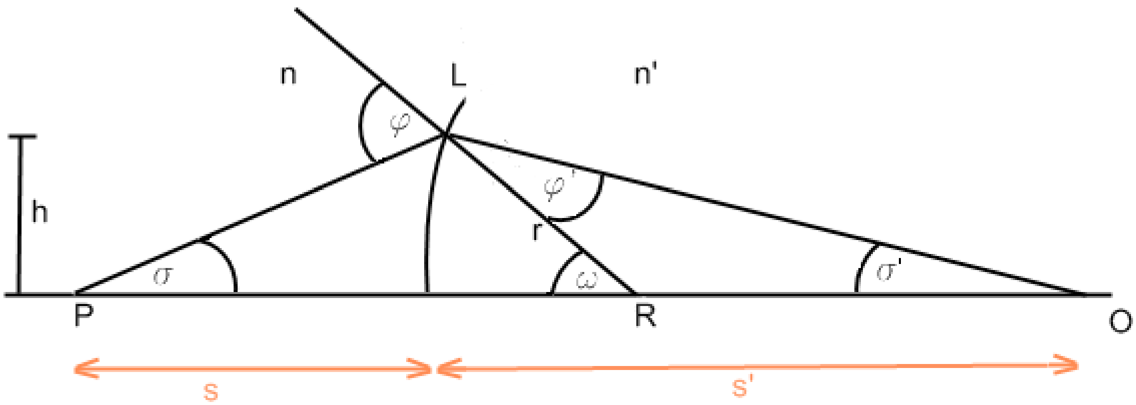
Stejně jako Abbeova podmínka se dokazuje pomocí Snellova zákona lomu pro bod P ležící na optické ose [1].

Herschelova a Abbeova podmínka si vzájemně odporují pro jeden bod P – proto nejsme schopni zobrazit ostře objemovou část prostoru, pokud se nejedná o zrcadlení na rovinném zrcadle.

V případě velmi úzkých svazků (paraxiální aproximace) je možné obě podmínky spojit aproximací $\sin\sigma \approx \sigma$ což odpovídá Helmholtz-Lagrangeovu invariantu $ny\,\sigma = n'\,y'\,\sigma'$, (1.7)

který platí v paraxiální oblasti. Pro malé úhly σ, σ' je tento invariant ve shodě s rovnicí platnou pro ideální zobrazení $ny\,tg\,\sigma = n'\,y'\,tg\,\sigma'$ (1.8)

1.2.3 Ohnisková vzdálenost



Obr. 1.2 odvození ohniskové vzdálenosti sférického rozhraní

Úhly φ a φ' na obrázku 1.2 vyjádříme pomocí úhlů ω , σ a σ' :

$$\varphi=\omega+\sigma \quad , \quad \varphi'=\omega-\sigma' \tag{1.9}$$

což umožní přepsat rovnici zákona lomu (1.4) do tvaru $n(\omega+\sigma)=n'(\omega-\sigma')$ (1.10)

Pokud použijeme paraxiální aproximace můžeme všechny úhly nahradit jejich tangentami, tz:

$$\sigma\approx tg\,\sigma=\frac{h}{s} \quad , \quad \sigma'\approx tg\,\sigma'=\frac{h}{s'} \quad , \quad \omega\approx tg\,\omega=\frac{h}{r} \tag{1.11}$$

Po dosazení (1.11) do (1.10) a úpravě dostaneme $n\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{s}\right)=n'\left(\frac{1}{r}-\frac{1}{s'}\right)$ (1.12)

což umožňuje stigmatické zobrazení, při kterém všechny paprsky vycházející z bodu *P* pod libovolným úhlem dopadají do bodu *P'* na optické ose.

Tento vztah je však platný pouze pro paraxiální oblast, tz. pouze pro svazek paprsků, který svírá s osou soustavy velice malý úhel.

Rovnici (1.12) je po úpravě možné přepsat do základní zobrazovací rovnice

$$\frac{n'}{s'}-\frac{n}{s}=\frac{n'-n}{r} \tag{1.13}$$

kterou je dále možno upravit do tvaru $\dfrac{\frac{n'r}{n'-n}}{s'}-\dfrac{\frac{nr}{n'-n}}{s}=1$ (1.14)

Polohu obrazového ohniskového bodu určíme z podmínky $s\rightarrow-\infty$, tedy z podmínky, že ohniskový bod je obrazem bodu ležícího v nekonečnu: $s'_{F'}=\frac{n'r}{(n'-n)}$ (1.15)

Obdobně pro polohu předmětového ohniska položíme $s' \to \infty$, $s_F = \frac{nr}{(n-n')}$ (1.16)

Ohniskové vzdálenosti jsou definovány jako vzdálenosti měřené od hlavních bodů k ohniskovým bodům. Předmětová ohnisková vzdálenost *f* je rovna $f = s_F - s_H$ (1.17)

a obrazová ohnisková vzdálenost *f'* je rovna $f' = s'_{F'} - s'_{H'}$ (1.18)

Vzhledem k tomu, že pro lom na kulové ploše platí $s_H = s'_{H'} = 0$, zůstávají nám pro ohniskové

vzdálenosti vzorce $f = \frac{nr}{(n-n')}$ a $f' = \frac{n'r}{(n'-n)}$ [2] (1.19)

Z rovnice (1.13) lze velice snadno dojít k čočkové rovnici, platné pro tenkou čočku, když obě strany rovnice vydělíme indexem lomu čočky n' a uvážíme čočku umístěnou ve vzduchu.

Tím dostaneme $\frac{1}{s'} - \frac{1}{s} = \frac{n'-1}{n'r} = \frac{1}{f'}$ (1.20)

Z rovnice (1.20) jde snadno odvodit vztah pro příčné zvětšení čočky umístěné ve vzduchu

$$m = \frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} = \frac{f'}{s+f'} \tag{1.21}$$

1.3 Numerická apertura, clonové číslo

Numerická apertura je vyjádřena jako součin indexu lomu prostředí a sinu aperturního úhlu.

Pro předmětovou část tedy platí $A = n \sin\sigma$, a pro část obrazovou $A' = n' \sin\sigma'$ (1.22)

Numerická apertura udává poloměr pupily přechodu mezi prostředími.

Clonové číslo $c = \frac{f'}{d}$ je poměr mezi ohniskovou vzdáleností a průměrem pupily. Lze je také

vyjádřit pomocí výstupní apertury jako $c = \frac{1}{2A'} = \frac{1}{2n' \sin\sigma'}$ (1.23)

Clonové číslo udává tzv. světelnost a ovlivňuje hloubku ostrosti obrazu.

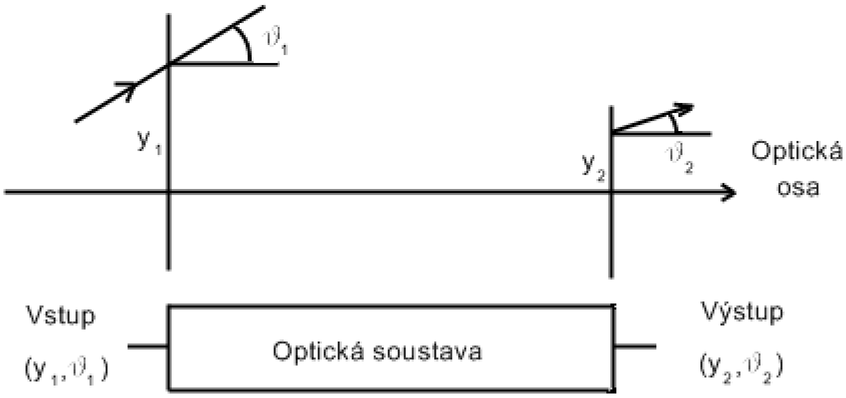
1.4 Maticová optika

Pro popis drah paraxiálních paprsků, které se šíří v jedné rovině osově symetrického systému, je výhodné použít maticové optiky.

Paprsek můžeme definovat jeho polohou a úhlem vůči optické ose, přičemž tyto dvě proměnné se mění při průchodu optickým systémem.

V paraxiální aproximaci jsou poloha a úhel na vstupní a výstupní rovině soustavy spjaty dvěma

lineárními algebraickými rovnicemi, což umožňuje popsání optické soustavy pomocí matice 2x2, nazývané přenosová matice paprsku (někde také transformační matice soustavy).
Výhoda maticové metody spočívá v tom, že transformační matici systému optických prvků lze popsat součinem přenosových matic jeho jednotlivých součástí.
Jestliže tedy do soustavy vstupuje paprsek o dané poloze a směru $(y_{1,}\vartheta_1)$, přenosová matice soustavy určí jeho průchod tak, že na výstupní rovině má novou polohu a směr $(y_{2,}\vartheta_2)$ (viz obrázek 1.3).



Obr. 1.3 princip maticové optiky

V paraxiálním prostoru jsou vztahy mezi $(y_{2,}\vartheta_2)$ a $(y_{1,}\vartheta_1)$ lineární a mohou být zapsány v soustavě rovnic $y_2 = Ay_1 + B\vartheta_1$, $\vartheta_2 = Cy_1 + D\vartheta_1$, (1.24)

kde A, B, C, D jsou reálná čísla. Rovnice (1.24) jdou zapsat do maticového tvaru

$$\begin{pmatrix} y_2 \\ \vartheta_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A & B \\ C & D \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y_1 \\ \vartheta_1 \end{pmatrix} \tag{1.25}$$

Přenosová matice paprsku M obsahující prvky ABCD představuje kompletní charakteristiku optické soustavy, protože umožňuje stanovit $(y_{2,}\vartheta_2)$ pro všechny $(y_{1,}\vartheta_1)$.

Matice snadno odvodíme kombinacemi tří základních matic:

- Šíření vakuem $M = \begin{pmatrix} 1 & d \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$ (1.26)
- Lom na rovinném rozhraní $M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}$ (1.27)
- Lom na sférickém rozhraní $M = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{n_2 - n_1}{n_2 r} & \frac{n_1}{n_2} \end{pmatrix}$ (1.28)

kde *d* představuje tloušťku prostředí, n_1 je index lomu prvního prostředí, n_2 je index lomu druhého prostředí.

Vynásobením matic tvořících optickou soustavu *odzadu*, tedy od obrazového prostoru k předmětovému, získáváme přenosovou matici optického systému.[3]

Pokud jsou některé z prvků přenosové matice zobrazovacího systému nulové, pak z (1.24) získáme přesné definice, k čemu daný systém slouží.

a) Pokud bude $D=0$, pak $\vartheta_2=Cy_1$, znamená to, že paprsky vycházející z libovolného bodu vstupní roviny jsou ve výstupním bodu rovnoběžné. Systém tedy pracuje jako kolimátor.

b) Pokud bude $A=0$, pak $y_2=B\vartheta_1$, což znamená, že rovnoběžné paprsky na vstupní rovině se protnou v jednom bodě, a systém je fokusační.

c) Pokud bude $B=0$, zobrazí se všechny body vstupní roviny do roviny výstupní, $y_2=Ay_1$, a systém je tedy zobrazovací.

d) Jestliže bude $C=0$, pak platí $\vartheta_2=D\vartheta_1$ a tedy rovnoběžné vstupní paprsky vystupují taktéž rovnoběžné a jedná se tedy o soustavu teleskopickou.[2]

1.5 Funkce přenosu kontrastu

Objektivním kritériem pro kvalitu zobrazení je optická funkce přenosu, která se skládá z funkce přenosu kontrastu a funkce přenosu fáze.

Výpočetní metody pro optickou funkci přenosu můžeme nalézt např. v [6], tady zmiňuji pouze funkci přenosu kontrastu, která udává, s jakým kontrastem budou zobrazeny optickou soustavou jednotlivé části předmětu, charakterizované prostorovou frekvencí *R*, danou počtem čar na jednotku délky (většinou čar/mm).

V případě fyzikálně dokonalé soustavy dostáváme pro funkci přenosu kontrastu následující tvar

$$MTF(\omega)=\frac{2}{\pi}(\arccos\omega-\omega\sqrt{1-\omega^2}) \tag{1.29}$$

kde $\omega=\lambda c R$ je normovaná prostorová frekvence, λ je vlnová délka použitého světla, *c* je clonové číslo optické soustavy a *R* je prostorová frekvence. V důsledku normování tedy $\omega\in\langle 0,1\rangle$.[7]

1.6 Druhy optických systémů

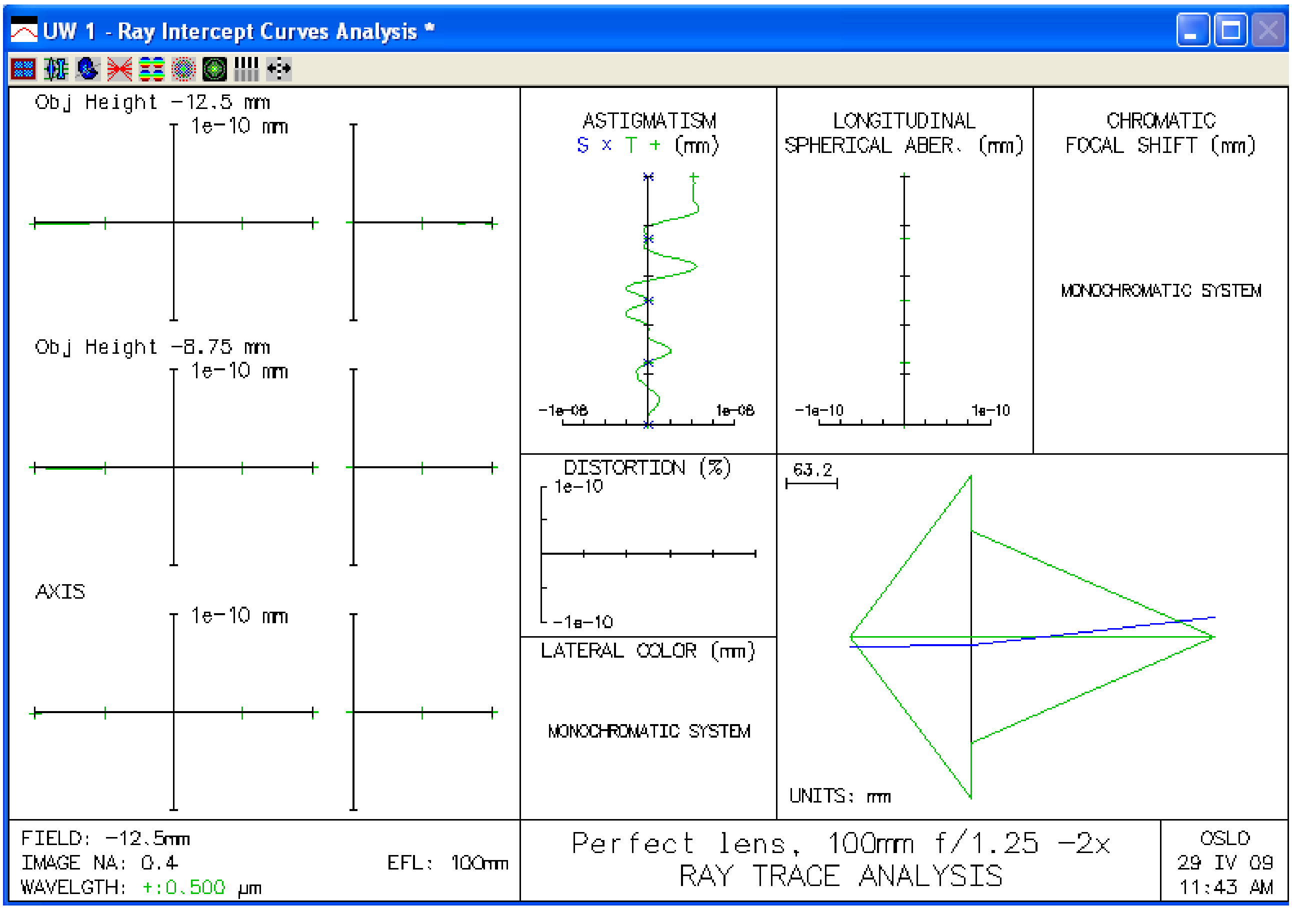
<u>Ideální systém</u> – systém nezatížený žádnými optickými vadami, ignorující vlnový charakter světla (nedochází k difrakci). Je pouze fiktivní, není možné takový systém zkonstruovat.

<u>Fyzikálně dokonalý systém</u> – systém, jenž neuvažuje optické vady, a projevuje se jen difrakce.

<u>*Perfect lens*</u> v programu OSLO je stejný jako fyzikálně dokonalý systém, nastavený pro určité příčné měřítko zvětšení *m.* Při změně měřítka se projeví platnost Herschelovy podmínky a výsledný obraz bude rozmazaný.

Ilustrační čočka v edu verzi programu OSLO na přiloženém CD se nalézá pod názvem *perfmag2.len*).

Při zobrazení charakteristik čočky *Perfect lens* však dostaneme zvláštní obr. 1.4 (vpravo dole).



Obr.1.4 charakteristiky čočky Perfect lens zobrazené v programu OSLO

Perfektní čočka tvoří aberacemi nezatížený obraz (jak je vidět z obr. 1.4) vzdáleného předmětu rozloženého na ploše.

Paprsky se budou řídit zákony ideálního zobrazení (1.8) pouze v případě, že apertura čočky bude infinitesimální; v opačném případě se dostávají do rozporu s Abbeovým sinovým zákonem (1.5).

Program OSLO používá při simulaci idealizovaných systémů, zachovává platnost sinové podmínky (1.5) a v důsledku toho dostáváme tento nezvyklý nákres.

Reálný systém – systém zatížený veškerými optickými vadami a difrakcí.

2. Optické vady (aberace)

Podmínky pro ideální zobrazování optickou soustavou jsou zachovány pouze v paraxiálním prostoru. Reálné (skutečné) zobrazovací optické soustavy jsou však vždy více nebo méně zatíženy optickými vadami, tj. dávají optické obrazy více či méně odlišné (zkreslené) v porovnání s ideálními obrazy.

Optické vady jsou rozděleny do skupin závisejících na vlastnostech látky, jíž světlo prochází, a vlastnostech světla, které prochází danou látkou.

Paprskové (geometrické) optické vady vyplývají z geometrie optických zobrazovacích soustav, závisí na jejich látce a uspořádání a na chodu a šířce (průměru) optického (světelného) paprskového svazku. Vlnové vlastnosti záření jsou zanedbány, zřetel je brán pouze na optické paprsky a zákony paprskové optiky.

Paprskové i vlnové vady lze rozdělit na monochromatické (jednobarevné, achromatické) a (poly)chromatické (barevné).

Monochromatické vady, které se projevují tak, že se homocentrický svazek nepřemění optickou soustavou znovu v homocentrický svazek, tj. že obrazem bodu je ploška, jsou otvorová vada, koma a astigmatismus.

Monochromatická vada, při které se předmětová rovina kolmá k optické ose soustavy zobrazí jako rotační plocha, se nazývá zklenutí nebo křivost obrazu.

Zkreslení, poslední z monochromatických vad, pak zapřičiňuje to, že se přímka v předmětové rovině, která neprotíná optickou osu, zobrazí jako křivka.

V důsledku chromatických vad se předmět zobrazí světlem o různých vlnových délkách na různých místech a v různých velikostech. Proto tyto vady dělíme na barevnou vadu polohy a barevnou vadu zvětšení.

Existují i další rozdělení optických vad, např. méně časté rozdělení podle polohy zobrazovaného bodu vzhledem k optické ose zobrazovací soustavy, rozlišující osové paprskové optické vady (otvorová a osové barevné vady) a mimoosové paprskové optické vady (zkreslení, zklenutí,

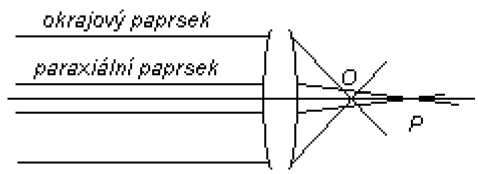
astigmatismus, koma a případně i mimoosové barevné vady). [8] [9]
V této práci se budeme zabývat pouze monochromatickými vadami.

2.1 Monochromatické optické vady

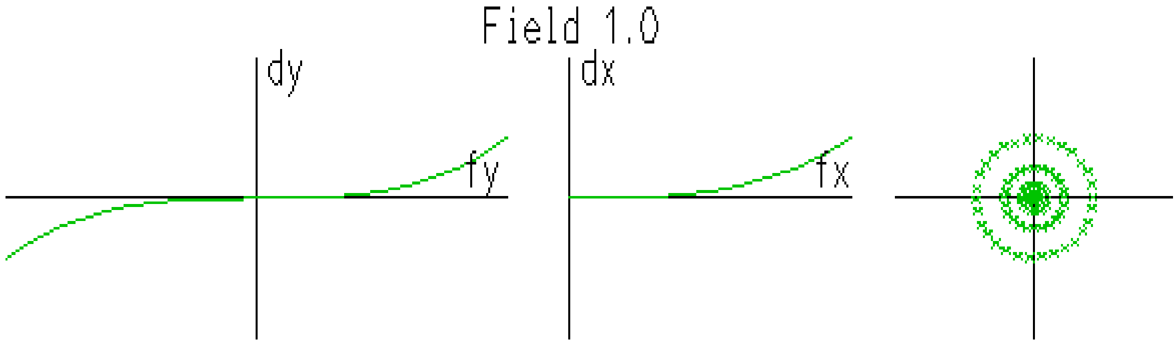
Znázorňovací obrázky použité níže jsou až na obrázky ke zkreslení obrazu z Dema programu OSLO Seidel Aberration Viewer, který umožňuje znázornění různých optických vad 3. řádu při jejich působení na svazek paprsků vycházející z jednoho bodu; obrázky znázorňují obraz mimosového předmětového bodu.
Vady 3. řádu se vyjadřují pomocí Seidelových koeficientů.
Analytické řešení optických vad je časově náročné, zvláště u komplexnějších optických systémů. Využívá se při nich aproximací goniometrických funkcí pomocí Taylorových řad
$\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!} \ldots$ a $\cos x = 1 - \frac{x^2}{2!} + \frac{x^4}{4!} \ldots$, přičemž míra aproximace a přesnosti se vztahuje k nejvyššímu použitému řádu – tedy optické vady 3. řádu využívají k výpočtu aproximace
$\sin x = x - \frac{x^3}{3!}$, vady 5. řádu aproximaci $\sin x = x - \frac{x^3}{3!} + \frac{x^5}{5!}$ apod.
Odvození a analytický výpočet monochromatických vad lze nalézt kupř. v [1], [2] nebo [12].

2.1.1 Otvorová vada

Pokud použijeme Snellův zákon lomu (1.4) k výpočtu průchodu paprsků jednoduchou spojnou čočkou, zjistíme, že paprsky dopadající na okraj soustavy se lámou silněji než paraxiální.
Pokud do soustavy vchází svazek rovnoběžný s optickou osou, jeho okrajové paprsky protnou optickou osu po průchodu soustavou blíže než paraxiální paprsky. Otvorová vada pak představuje vzdálenost mezi paraxiálním ohniskovým bodem *P* a okrajovým ohniskovým bodem *O* (viz obr. 1.5 a 1.6).



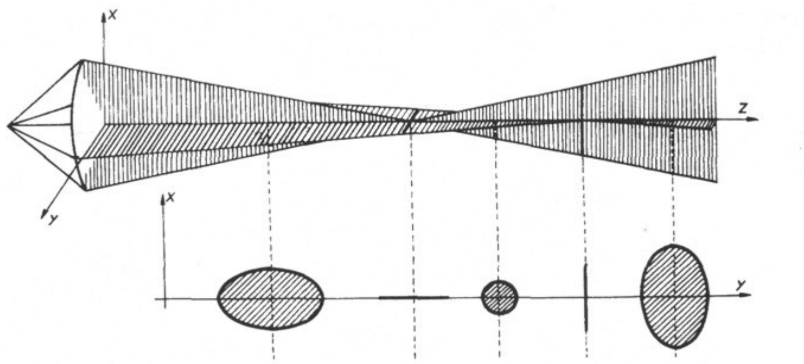
Obr.1.5 otvorová vada



Obr. 1.6 znázornění otvorové vady 3. řádu

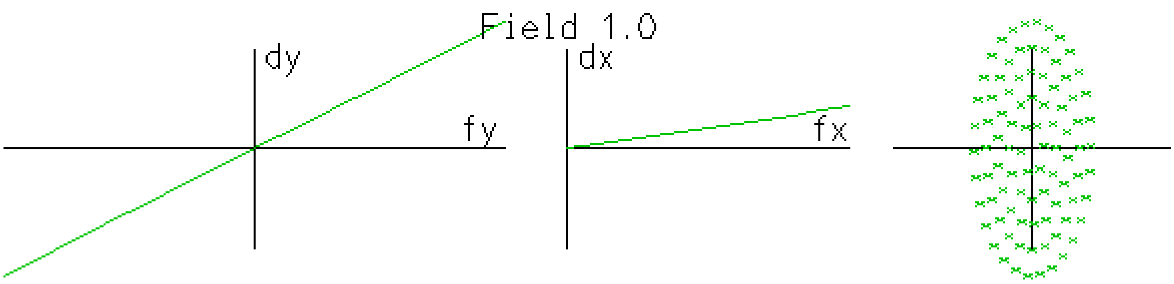
2.1.2 Astigmatismus

Astigmatismus je nejlépe popsat s pomocí 3D zobrazení (obr.1.7)



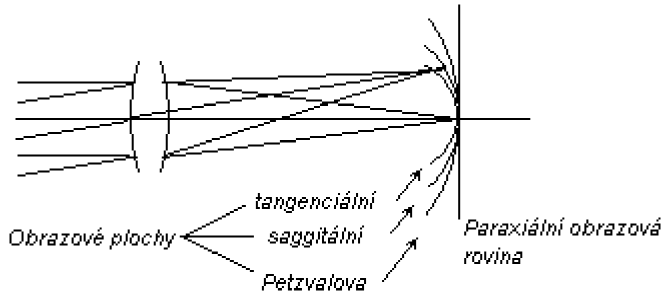
obr.1.7 astigmatismus [11]

Plocha ve směru *x* se nazývá tangenciální, plocha ve směru *y* se nazývá sagittální. V obrazovém prostoru se předmětový bod zobrazuje do dvou obrazů, tangenciálního a sagittálního. Obrazy jsou tvořeny ve dvou různých rovinách, proto se předmětový bod zobrazí jako elipsa. Zhruba v polovině mezi těmito obrazy se nachází tzv.kruh nejmenšího rozptylu, skvrna s nejmenším poloměrem v tangenciální i sagittální rovině.



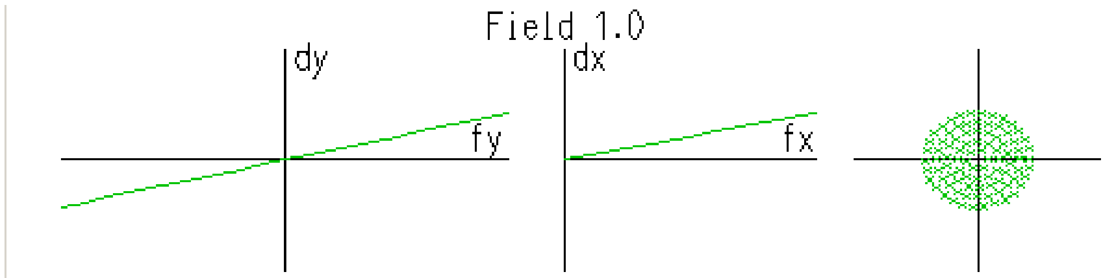
Obr. 1.8 znázornění astigmatismu 3. řádu na mimoosovém bodě

2.1.3 Zklenutí pole



obr.1.9 zklenutí pole a Petzvalova plocha

Zklenutí pole určuje křivost obrazové plochy. Z toho tangenciální má největší křivost, nejmenší pak Petzvalova. Pokud se v optické soustavě podaří vynulovat astigmatismus, tangenciální a sagittální roviny se překryjí na Petzvalově rovině.

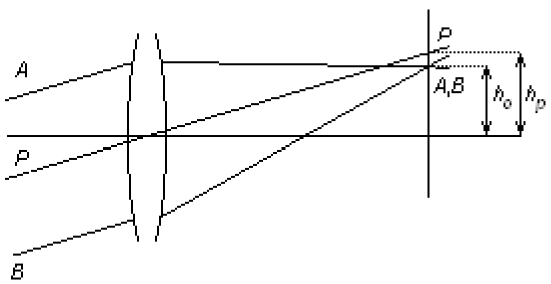


Obr.1.10 znázornění Petzvalova zakřivení 3. řádu

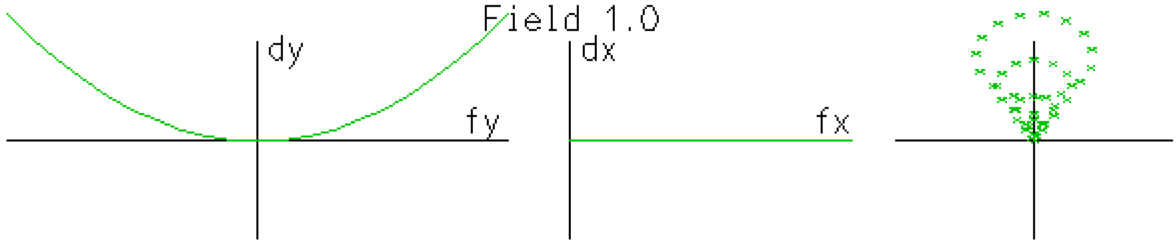
2.1.4 Koma

Obr.1.8 ukazuje dva rovnoběžné okrajové paprsky svazku, A a B, vstupující do optické soustavy paralelně s hlavním paprskem P. Paprsky A a B protnou obrazovou rovinu v jiné výšce, než hlavní paprsek P. Rozdíl výšek $h_o - h_p$ představuje míru komy.

Obr.1.7 znázorňuje obrazec podobný kometě, vytvořený mnoha paprsky vstupního svazku.



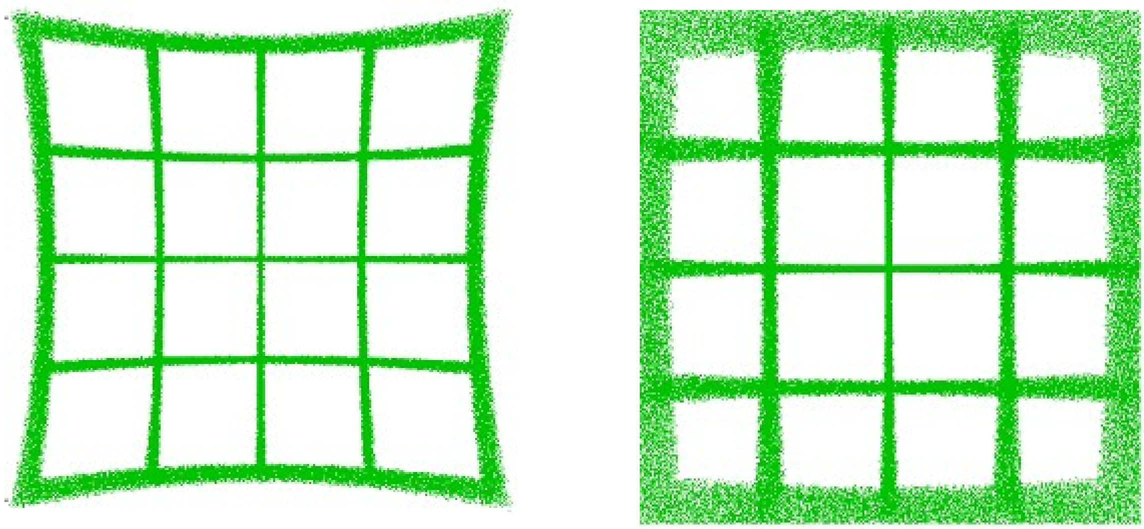
Obr.1.8 koma



Obr. 1.7 znázornění komy 3.řádu na mimoosovém bodě

2.1.5 Zkreslení obrazu (distorze)

Zkreslení (obrázek 1.11) vzniká při zobrazování plošných předmětů, pokud závisí příčné zvětšení na vzdálenosti zobrazovaného předmětu od optické osy. Způsobuje, že obraz není přesně geometricky podoben předmětu. Rozlišujeme zkreslení poduškovité (obrázek 1.11 vlevo, roste-li zvětšení se vzdáleností od osy), nebo soudkovité (obrázek 1.11 vpravo, pokud zvětšení klesá se vzdáleností od osy).[4][1][2]



Obrázek 1.8 zkreslení čtvercové mřížky poduškovité a soudkovité

2.2 Korekce optických vad

Optické vady lze korigovat vhodně zvolenou soustavou čoček, ve které čočky navzájem kompenzují své vady, např. volbou tvaru čoček, vzdáleností mezi nimi a materiálu, ze kterého jsou vyrobeny.

Plošky, odpovídající poté obrazovým bodům, můžeme prakticky považovat za body a obraz předmětu za dostatečně ostrý.

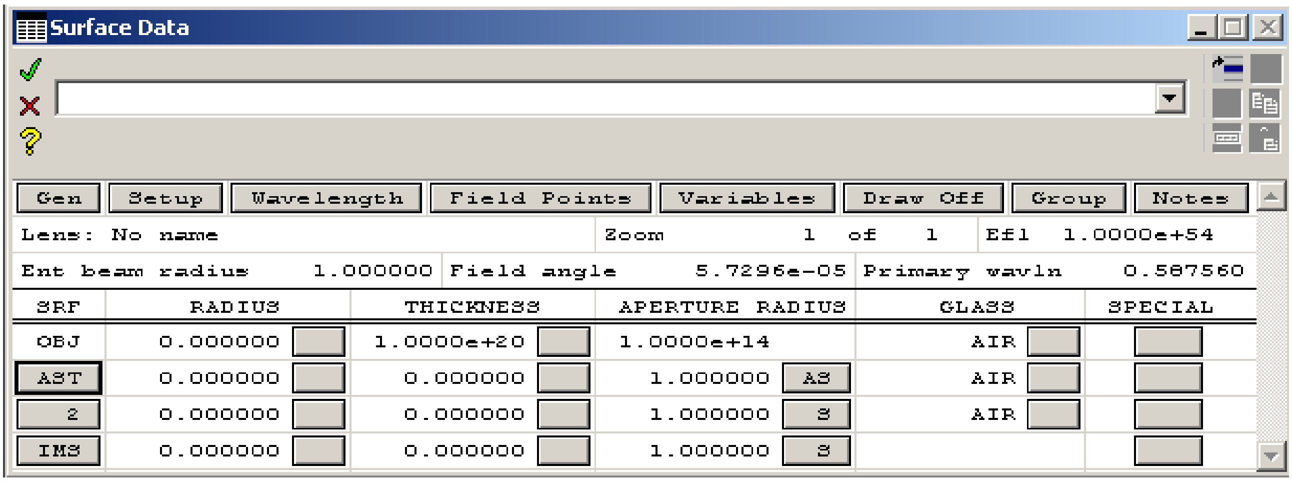
Analytická korekce optických vad je velice náročná jak časově, tak matematicky a v dnešní době výkonných počítačů byla nahrazena řešeními jako je prohýbání čoček nebo numerická optimalizace.

3.Příklady návrhů optického systému pomocí programu OSLO

Program OSLO je vytvořen jako nástroj pro optické inženýrství. Jeho součástí je velká škála funkcí užívaných při návrhu, optimalizaci nebo pouhé charakteristice optických soustav.
Může simulovat téměř jakýkoliv optický systém, od jednoduchého zrcadla až po složitou soustavu potřebnou pro tvorbu hologramů.
Jelikož není možné v této práci obsáhnout celý program OSLO, ukážu zde pomocí několika příkladů základy práce s programem a vysvětlení dvou možností korekce optických vad zadaných optických systémů, založených na prohýbání čoček.

3.1 Zadávání optického systému do programu

Při otevření nové optické soustavy zvolíme možnost Custom Lens, s počtem ploch 2.
Parametry soustavy se v programu OSLO zadávají do tabulky na obr. 3.1, tzv Surface data Spreadsheet. Zkratkou k jeho otevření je tlačítko



Obr. 3.1 Surface Data Spreadsheet

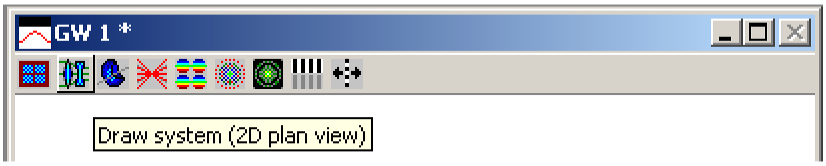
Šedivými tlačítky v prvním řádku jsme schopni specifikovat doplňující parametry soustavy.
Po kliknutí na Gen lze upřesnit všeobecné podmínky např. určit, zda je soustava fokální, nebo afokální, aplanatická nebo paraxiální, je možné specifikovat jinou teplotu a tlak či jiné měřící jednotky atd.)
Setup umožňuje určit clonové číslo, změnit šířku vstupního svazku nebo zadat zorný úhel či výšku předmětu aj.
Pod tlačítkem Wavelenght se dá upravovat vlnová délka, pomocí které zkoumáme daný systém.
Pro příklady v této práci budeme používat pouze jednu vlnovou délku, a to 587 nm.

Field Points otevírá nabídku k upřesnění prostorových bodů, které OSLO používá při některých analýzách.
Variables umožňuje zadat proměnné hodnoty základních vlastností ploch.
Draw off/on zapne nebo vypne kreslicí okno, ve kterém se zobrazí optický systém tak, jak je právě v té chvíli zadefinovaný.
Příkaz Group/Surfs je používán při komplexních systémech, kdy se několik ploch spojí v jednu skupinu, se kterou je poté možné pracovat jako s jednou plochou. Opětovné kliknutí na Surfs znovu rozdělí skupinu do jednotlivých ploch.
V druhém řádku můžeme zadat jméno systému a zoom (pokud budeme chtít systém, který půjde zoomovat). Ohnisková vzdálenost Efl je propočítávaná na základě vlastností zadávaných níže.
Druhý řádek obsahuje velikost poloměru vstupního svazku (Ent beam radius), zorný úhel (Field angle) a primární vlnovou délku (Primary wavln), pro kterou se propočítává ohnisková vzdálenost.
Do spodní tabulky se zadávají vlastnosti prostředí, kterými prochází paprsky.
SRF je zkratka pro Surface, tedy plochu. Ta je v programu brána jako prostor optického systému – každý řádek tedy představuje jedno prostředí, kterým se paprsky šíří.
Odshora jsou to tedy:

- OBJ - předmětový prostor od předmětu po první plochu optického systému
- AST - první prostor optického systému s počátkem v první ploše a koncem na druhé ploše. Označení AST (Aperture Stop) má proto, že současně omezuje průchozí svazek na aperturu dané plochy.
- číslem označené další prostory opt. systému ohraničené příslušnými plochami
- IMS – obrazový prostor optického systému

Počet ploch uvnitř systému je možné libovolně měnit přidáváním či odebíráním ploch pomocí kliknutí pravým tlačítkem myši na některou z ploch a zvolením možnosti „insert before“ nebo „insert after“. Tím se může prostor AST dostat i na jiné místo.
Každý prostor je definován svými základními vlastnostmi – totiž poloměrem křivosti první plochy, tloušťkou, aperturou a typem prostředí - (zleva doprava RADIUS, THICKNESS, APERTURE RADIUS a GLASS). Mimo to lze každému prostoru přiřadit ještě speciální vlastnosti (SPECIAL), ze kterých v této práci využijeme pouze položku „perfect lens“, objevující se v nabídce k prostoru AST a k numericky číslovaným prostorům.
Každé základní vlastnosti můžeme přiřadit ještě specifikaci pomocí šedivých obdélníčků (např. přímé zadání, nastavení jako proměnnou veličinu nebo výběr stejné vlastnosti jiné plochy).
Některé z těchto funkcí budou použity při výkladu příkladů v části 3.2.

Surface data spreadsheet není jediným oknem, které se otevře po spuštění programu a zadání nové čočky. Okno GW1 je kreslicí a obsahuje několik tlačítek, jejichž účel se objeví při krátkém podržení kurzoru přes některé z nich (viz obr. 3.2 se zvýrazněným tlačítkem pro nakreslení systému v 2D pohledu)



Obr. 3.2 kreslicí okno GW1

Poslední okno, TW1, je okno analytické, pro jehož tlačítka platí totéž, co pro okno GW1.

Některé změny v programu OSLO je nutné potvrzovat zeleným symbolem  vlevo nahoře v příslušném okně (viz např. zadávání indexu lomu z katalogů).

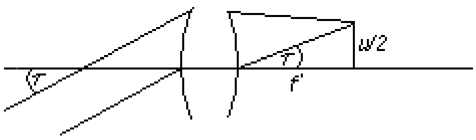
3.2 Příklad 1, Návrh jednočočkových snímacích objektivů

Navrhněte tři snímací objektivy, z nichž každý bude použit pro jeden ze tří snímacích prvků CCD 1/6“, CCD 2/3“ a kinofilmu 35 mm. Návrh proveďte pro maximální zorné pole velikosti $2\tau=44^o$ a clonové číslo $c=7$ pro každý objektiv. Konstrukce objektivu je tvořena jedinou čočkou ze skla N-BK7.

<u>*Postup řešení:*</u>

Nejprve vypočteme ohniskové vzdálenosti jednočočkových objektivů z velikosti úhlopříčky snímacího prvku, který je umístěn v ohniskové rovièobjektivu, a z tangenty zorného úhlu τ. (viz obr. 3.3)

Polovina úhlopříčky snímací oblasti zde představuje nejzazší možný bod zobrazitelný pod daným zorným úhlem.



Obr. 3.3 výpočet ohniskové vzdálenosti

V důsledku této podmínky tedy pro obrazovou ohniskovou vzdálenost čočky dostáváme rovnici

$$f'=\frac{\frac{u}{2}}{tg\,\tau} \tag{3.1}$$

Úhlopříčky snímacích oblastí se dají snadno zjistit kupř v [10].

S použitím vzorce (3.1) tak získáme následující tabulku, doplněnou ještě o optickou mohutnost

čoček $D=\frac{1}{f'}$ (3.2)

	$\frac{u}{2}$ [mm]	f' [mm]	τ [°]	D[D]
Kinofilm (35 mm)	21,65	53,5	22	18,7
CCD 2/3“	5,5	13,6	22	73,5
CCD 1/6“	1,44	3,5	22	285,7

S pomocí maticové optiky (viz.kapitola 1.4) dokážeme, že oba poloměry křivosti tenké čočky jsou až na znaménko rovny její ohniskové vzdálenosti, pokud uvážíme index lomu skla 1,5, čočku ve vzduchu, zanedbáme tloušťku čočky a zadáme podmínku, že oba poloměry jsou až na znaménko shodné (*).

Nyní máme již veškeré hodnoty nutné pro zadání čočky do programu.

Předmětový prostor je v tomto příkladu vzduch, a tedy ho necháme beze změn.

Změnami projde až první prostor optického systému – je nutné zadat zde první poloměr křivosti, tloušťku čočky a index lomu prostředí za první plochou. Apertura ploch se v základním nastavení programu propočítává automaticky.

Index lomu skla N-BK7 se nachází v katalogu Schott, zadává se skrze šedivé tlačítko ve sloupci GLASS.

Druhý prostor systému má poloměr křivosti opačného znaménka jako první, a má stejný index lomu jako předmětový prostor (paprsek se dostává z čočky do vzduchu).

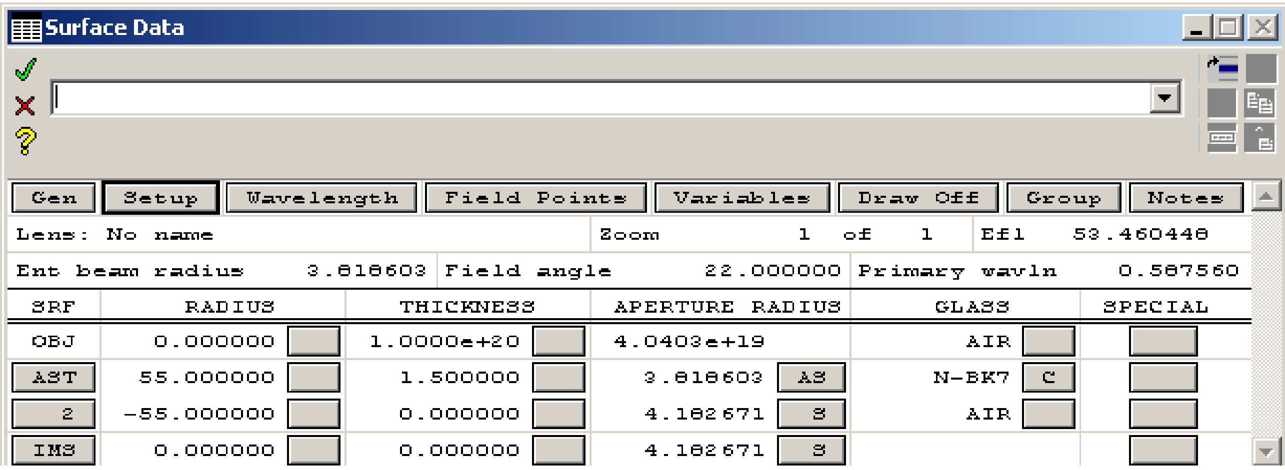
Jeho tloušťku můžeme zanechat nulovou, protože za čočkou už následuje pouze obrazový prostor, tedy opět vzduch.

Je nutné zohlednit znaménkovou konvenci, a mírně upravit poloměry křivosti a tloušťku čočky, což lze v programu provést přímo, vzhledem k faktu, že ohnisková vzdálenost je okamžitě propočítána pro jakoukoliv změnu poloměrů křivosti či tloušťky.

Clonové číslo nastavíme přes tlačítko Setup, kde změníme položku working f-nbr (clonové číslo) na hodnotu 7. Za povšimnutí stojí, že se ke clonovému číslu přenese hvězdička, značící, že program teď bere jako primární výchozí hodnotu právě clonové číslo.

Většinou to není žádoucí, proto si uložíme někam hodnotu, kterou program propočítal pro aperturu vstupního svazku (ent beam radius), změníme ji na něco jiného a uloženou hodnotu dosadíme.

Clonové číslo teď je přesně takové, jaké požadujeme, a program počítá primárně s aperturou vstupního svazku.
Zorný úhel nastavíme taktéž pod tlačítkem Setup – změníme hodnotu Field Angle na 22 – tedy hodnotu poloviny zorného pole.
Výsledný Surface data Spreadsheet pro krajinářskou čočku by měl tedy vypadat přibližně takto (v závislosti na předchozích úpravách):

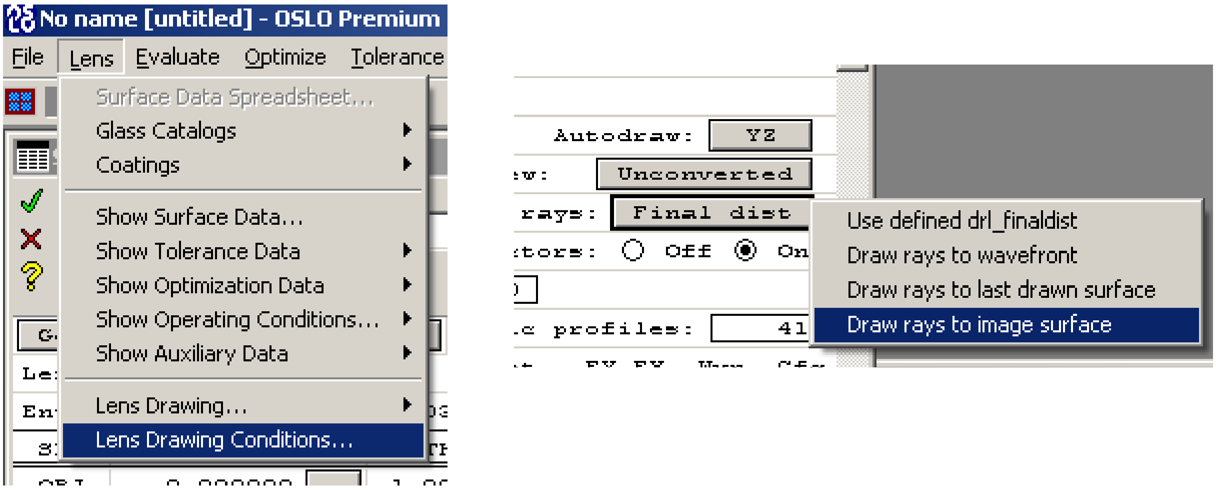


Obr. 3.4 Surface Data Spreadsheet pro čočku kinofilmu 35mm

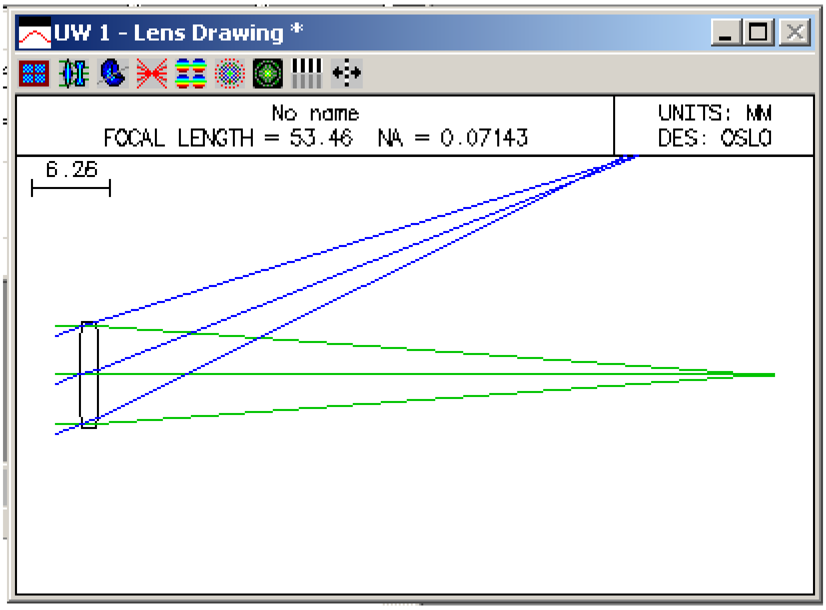
Teď, když je čočka zadaná, s ní lze začít pracovat.

3.2.1 Nákres čočky

V nynější situaci lze soustavu nakreslit v okně GW1. Ukáže se nám však pouze průchod paprsků soustavou – jelikož je ale většinou požadováno protažení paprsků až k ohnisku soustavy, lze ve specifikaci tloušťky IMS prostoru použít funkci Autofocus – paraxial focus.
Pokud poté změníme kreslicí podmínky pro soustavu (viz obr. 3.5) zobrazí se nám průchod paprsků soustavou až po konec obrazového prostoru, který je teď v důsledku funkce Autofocus v ohniskové rovině paraxiálních paprsků (viz obr. 3.6)



Obr. 3.5 změna kreslicích podmínek

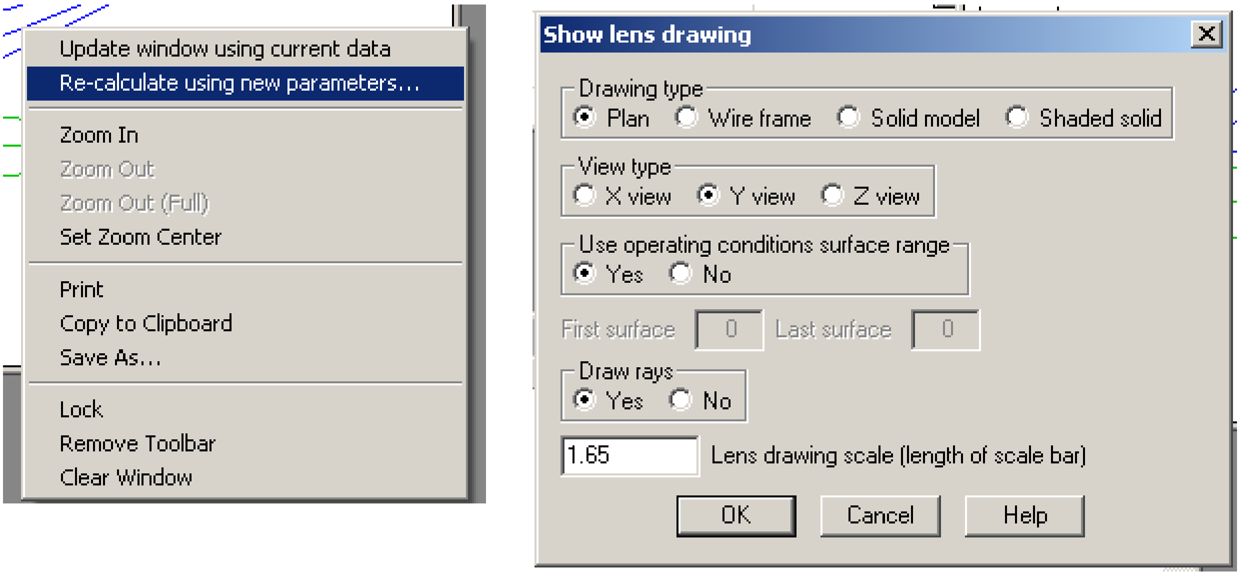


Obr. 3.6 čočka kinofilmu 35 mm autofokusovaná do ohniskové vzdálenosti

Stejným způsobem zadáme i zbývající dvě čočky.

Pro srovnání velikostí čoček je výhodné zavést stejné měřítko (znázorněné na obr. 3.6 úsečkou s hodnotou 6.26 v levém horním rohu).

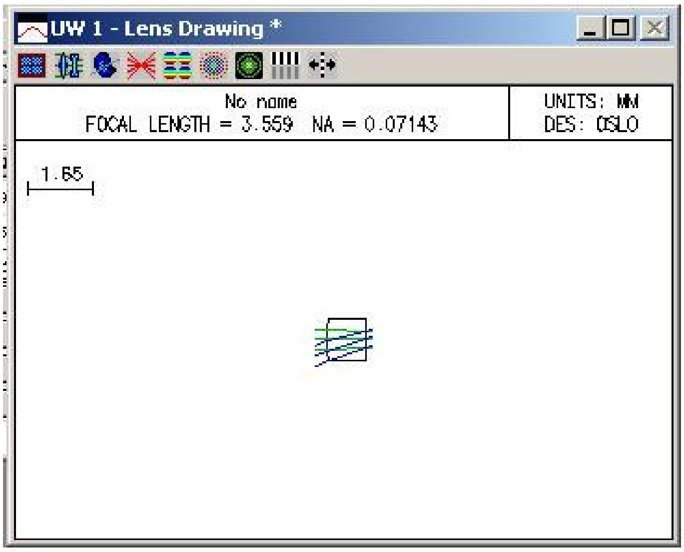
Toho docílíme kliknutím pravého myšítka do nákresu a zvolením Re-calculate using new parameters (viz obr. 3.7)



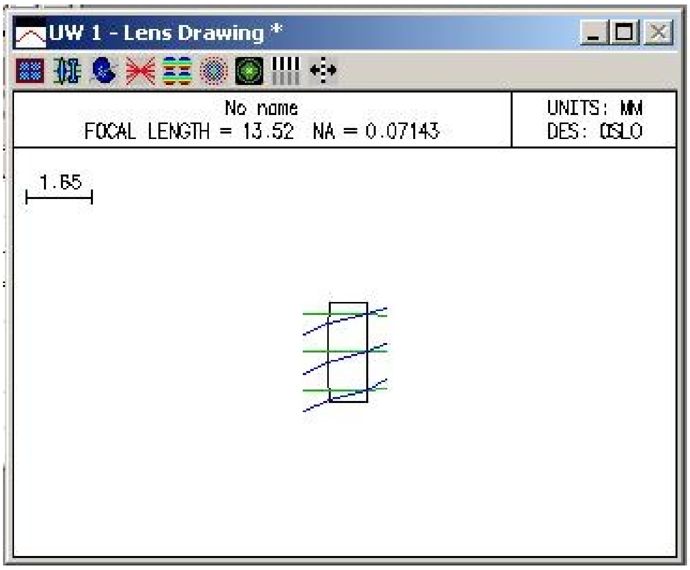
Obr. 3.7 překreslení nákresu čočky do jiného měřítka

zde je zvoleno kreslicí měřítko (Lens drawing scale) 1.65 coby délka úsečky, pro názornou ilustraci velikostí čoček v zadání. (viz obr. 3.8-3.10)

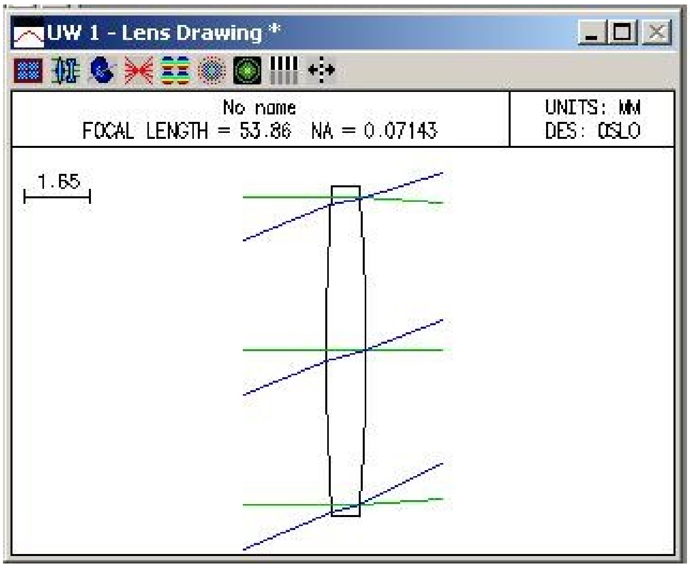
Vzhledem k ohniskovým vzdálenostem je pro stejné *c* průměr objektivu největší pro formát kinofilmu 35 mm.



Obr. 3.8 snímací čočka CCD 1/6“



Obr. 3.9 snímací čočka CCD 2/3"



Obr. 3.10 snímací čočka kinofilmu 35 mm

3.2.2 Grafická analýza

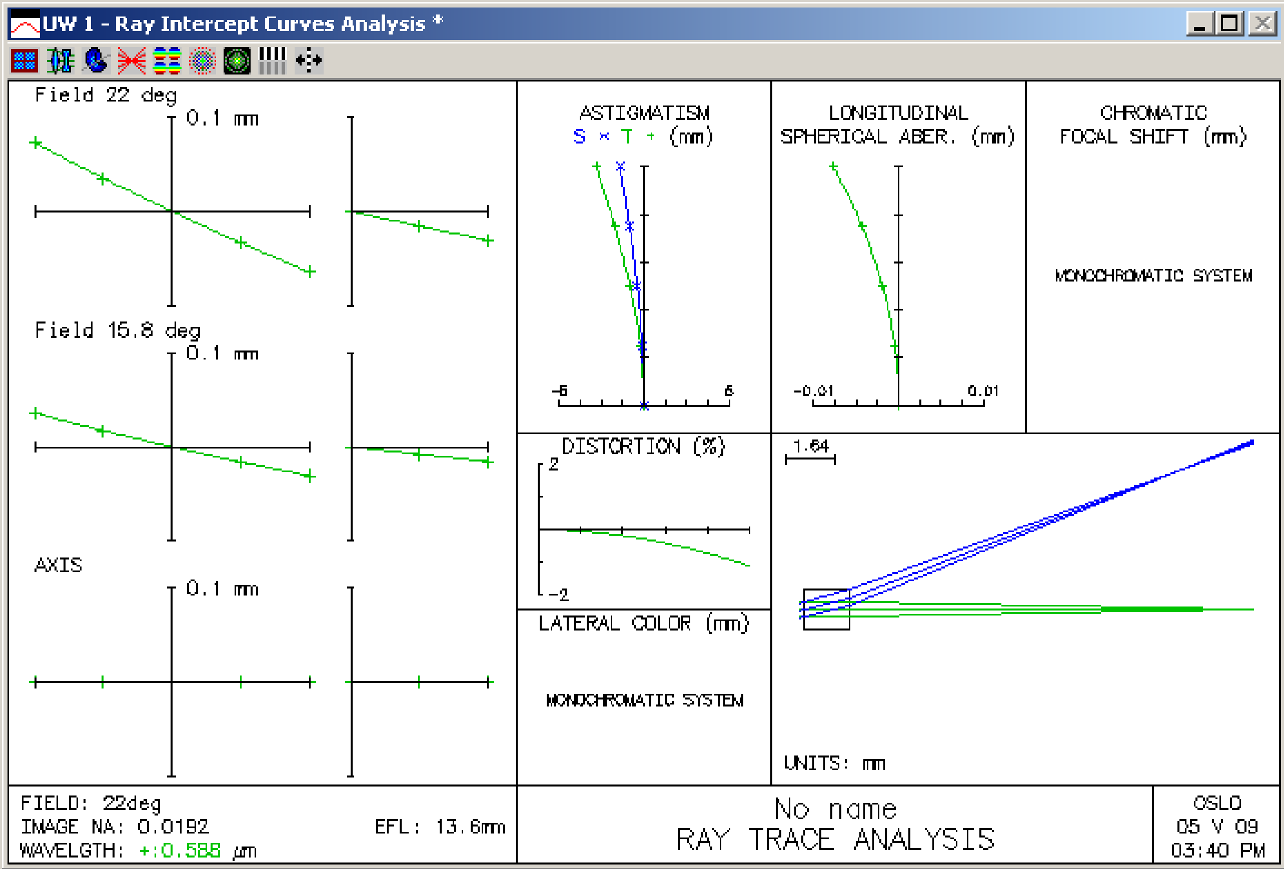
Další srovnání nám může poskytnout grafická analýza paprsků, bodového diagramu nebo funkce přenosu kontrastu, které lze nalézt v nabídce grafického okna.

Pro veškeré další analýzy v tomto příkladu je nutné mít systém zaostřen pomocí autofokusace !

Obr. 3.11 ukazuje grafickou analýzu paprsků.

Vlevo je znázorněna míra posunutí paprsku v závislosti na výšce dopadu paprsku na čočku pro tři body s rozdílnými zornými úhly.

Jak je vidět, paprsek probíhající přesně podle optické osy se vůbec neposune, kdežto paprsky dopadající na čočku ve větších výškách a z úhlu se posouvají úměrně s výškou a úhlem dopadu.



Obr. 3.11 grafická analýza paprsků

Astigmatismus je brán jako rozdíl dvou zklenutí, sagitálního a tangenciálního, na vodorovné ose se udává vzdálenost reálného obrazového bodu od bodu ideálního zobrazení, svislá osa pak značí vzdálenost předmětového bodu od optické osy.

Můžeme tedy vyvodit, že se vzrůstající vzdáleností předmětového bodu od optické osy roste i astigmatismus.

Otvorovou vadu program znázorní jako závislost délky mezi průsečíky paprsků s optickou osou na dopadové výšce paprsků na čočku – čím výše tedy paprsek dopadne, tím více je čočkou zlomen a tím větší vzdálenost je k dalšímu průsečíku paprsků dopadajících na čočku v menší vzdálenosti od optické osy.

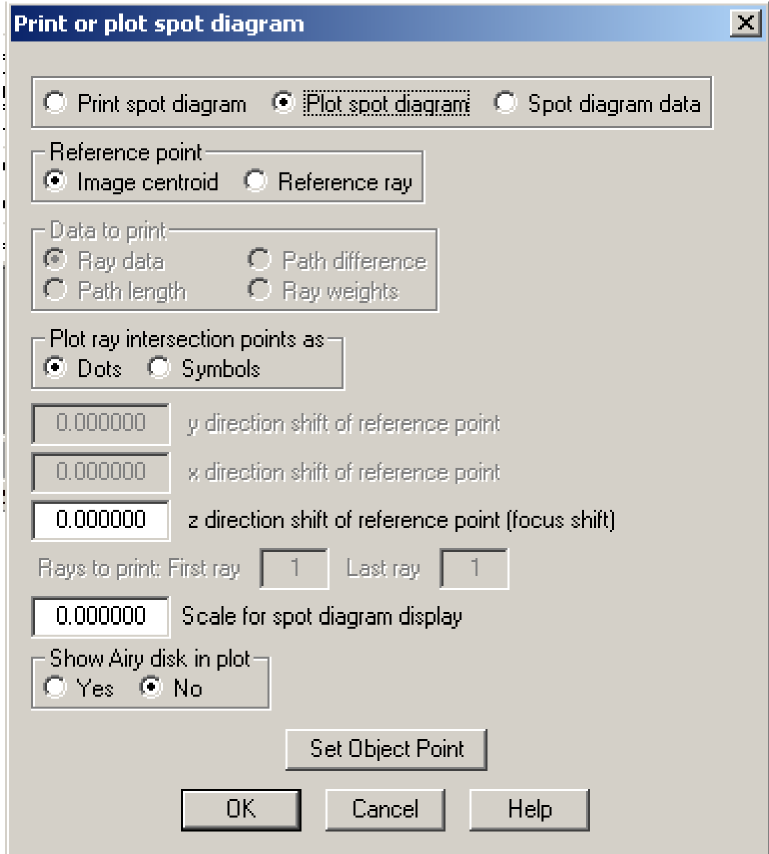
Zkreslení (Distortion) je udáno jako procentuelní rozdíl ideálního obrazu a reálného obrazu, vyjádřený jako funkce vzdálenosti od optické osy.

Barevná vada polohy a barevná vada zvětšení nejsou zakresleny, jelikož používáme pouze jednu vlnovou délku světla.

Maximální hodnoty (hodnoty simulované pro okrajové paprsky či body na okraji zorného pole) pro tři hlavní optické vady, tedy sférickou vadu, astigmatismus a zkreslení, jsou shrnuty v následující tabulce.

	f' [mm]	Otvorová vada [mm]	Astigmatismus [mm]	Zkreslení [%]
CCD 1/6”	3,5	0,025	0,2	-3
CCD 2/3”	13,6	0,1	1	-1
kinofilm 35 mm	53,5	0,44	5	-0,3

Grafickou analýzu bodového diagramu lze provést přes funkci Evaluate->Spot Diagram->Single spot diagram (viz obr. 3.12)

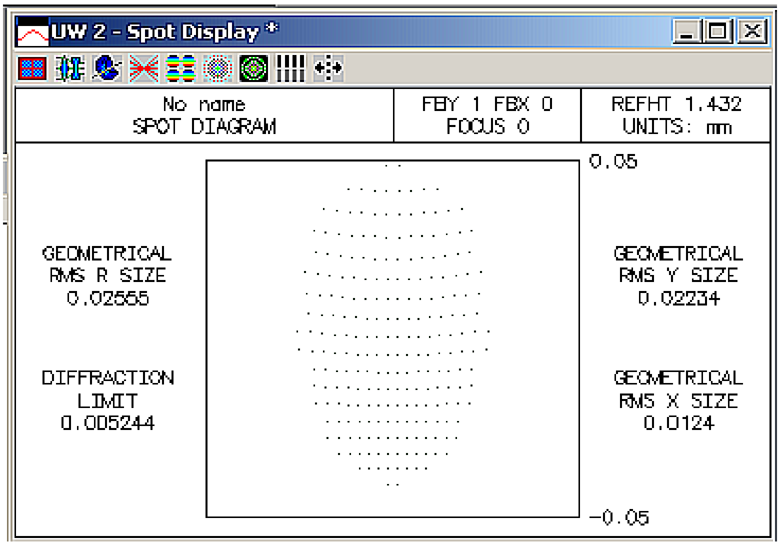


Obr. 3.12 nastavení bodového diagramu

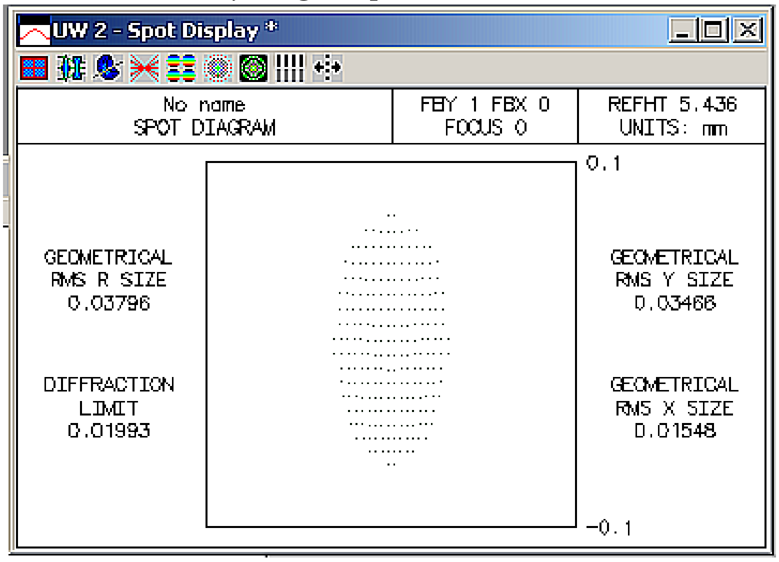
kde je nejprve nutné nastavit předmětový bod, který chceme zkoumat, skrze tlačítko Set Object Point.

V objevivší se tabulce nastavíme souřadnice bodu, nebo, pokud už máme předdefinované body skrze tlačítko v Surface Data Spreadsheetu, můžeme vybrat jeden z již hotových bodů.

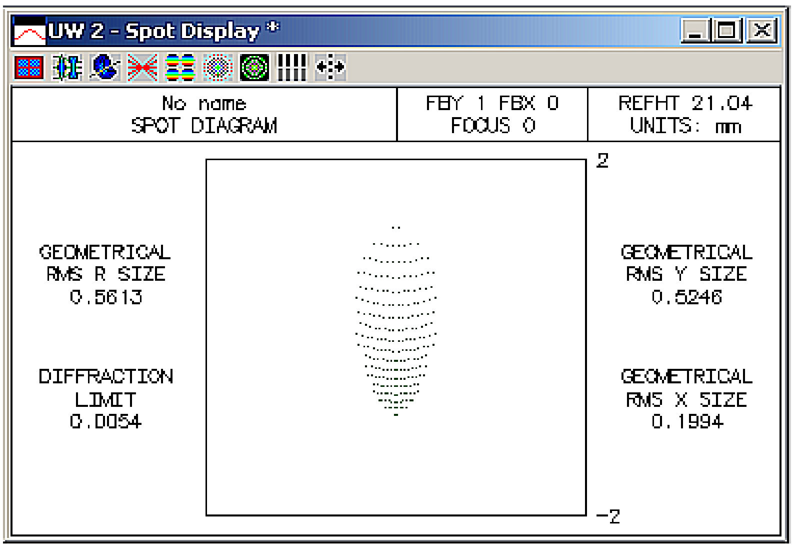
Po odsouhlasení výběru bodu potvrdíme vytvoření bodového diagramu a získáme grafické znázornění obrazu zadaného předmětového bodu. Pro tři objektivy v zadání úlohy jsou bodové diagramy znázorněny na obr. 3.13-3.15.



Obr. 3.13 bodový diagram pro snímací čočku CCD 1/6"



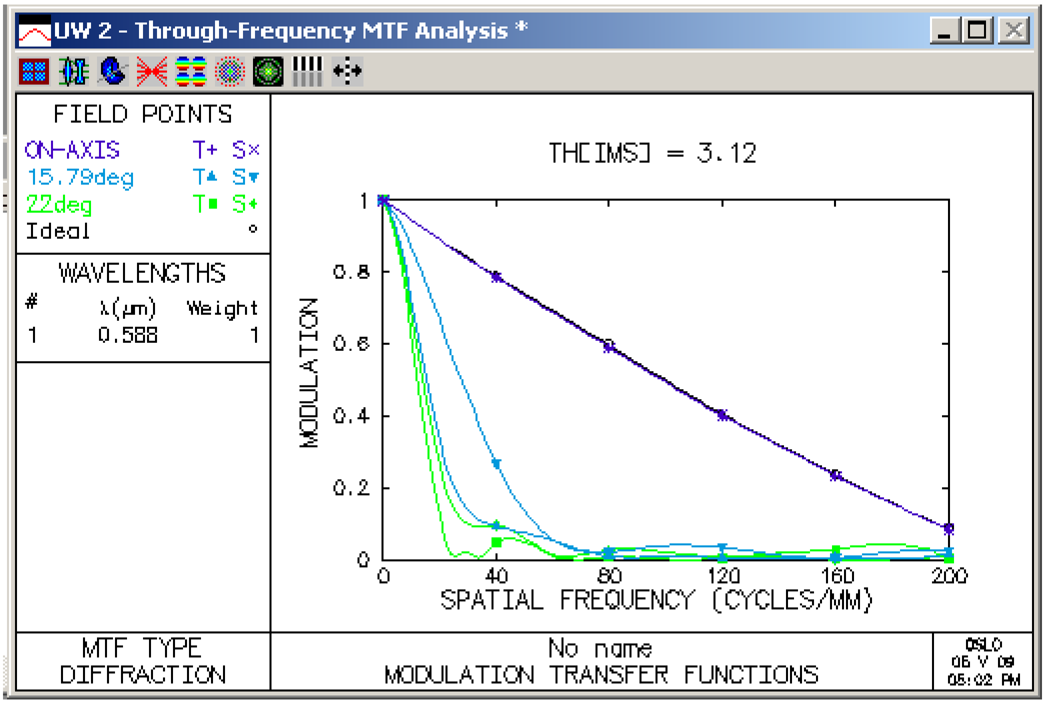
Obr. 3.14 bodový diagram pro snímací čočku CCD 2/3"



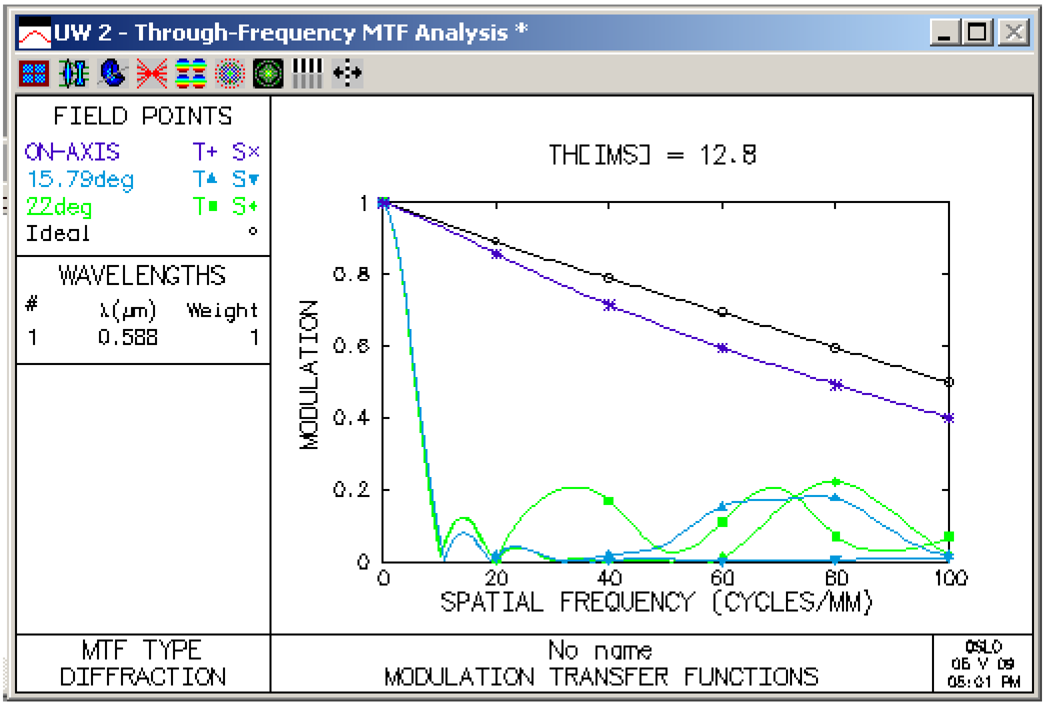
Obr. 3.15 bodový diagram pro snímací čočku kinofilmu 35mm

Jak je vidět z geometrických parametrů na pravé straně diagramu, největší stopu daného bodu zanechává čočka použitá pro kinofilm, nejmenší pak snímací čočka CCD 1/6“.

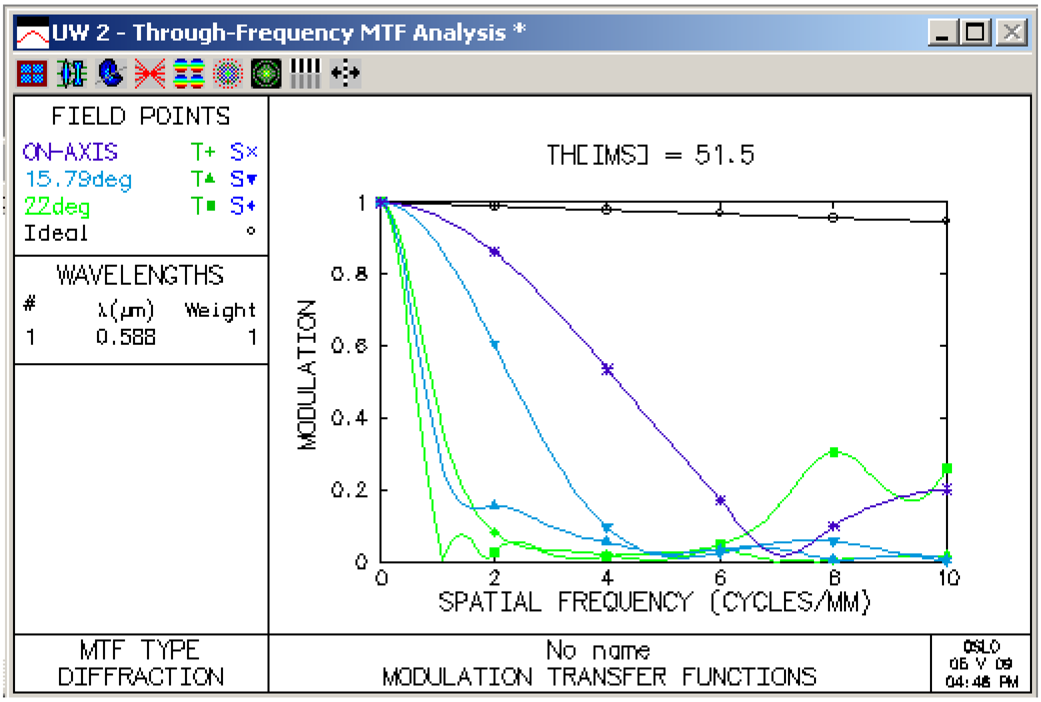
Funkci přenosu kontrastu najdeme v nabídce grafického okna pod názvem
Plot report graphics MTF through-frequency.
Výsledkem je grafické znázornění MTF pro danou vlnovou délku a tři body, v základním nastavení OSLO definované jako okrajový bod zorného pole, bod s úhlem 0,7 zorného pole a osový bod.
Na vodorovné ose je vynesena prostorová frekvence v čarách na milimetr, na svislé ose je vynesena MTF.
Pro srovnání kvality optického systému je znázorněna i MTF ideálního systému, jako černá křivka pomalu klesající s narůstající prostorovou frekvencí.
MTF pro jednotlivé čočky je ilustrována na obr. 3.16-3.18, ze kterých je patrné, že nejlepší rozlišovací schopnost má snímací čočka CCD 1/6“, nejhorší pak snímací čočka kinofilmu 35mm.



Obr. 3.16 MTF pro snímací čočku CCD 1/6“



Obr. 3.17 MTF pro snímací čočku CCD 2/3"



Obr. 3.18 MTF pro snímací čočku kinofilmu 35mm

3.3 Příklad 2, Návrh Keplerova dalekohledu pomocí perfektních čoček

Pomocí perfektních čoček navrhněte Keplerův dalekohled se zvětšením -10x, zorným polem 4° a ohniskovou vzdáleností objektivu 150 mm. Do ohniska objektivu vložte další perfektní čočku a diskutujte její efekt.

<u>*Postup řešení:*</u>

Pro zvětšení dalekohledu platí rovnice $\Gamma = -\frac{f'_{obj}}{f_{ok}}$, z čehož vyplývá, že $f_{ok} = 15\ mm$.

Z maticové optiky můžeme odvodit, že ohnisková vzdálenost systému dvou čoček se nezmění, pokud druhou čočku umístíme do ohniskové roviny té první.

Při zadávání nové čočky do programu OSLO vybereme možnost Perfect Lens.

Dále vložíme požadovanou ohniskovou vzdálenost objektivu 150 mm.

Po vytvoření perfektní čočky změníme zorný úhel stejným způsobem, jako je popsáno v příkladu 1.

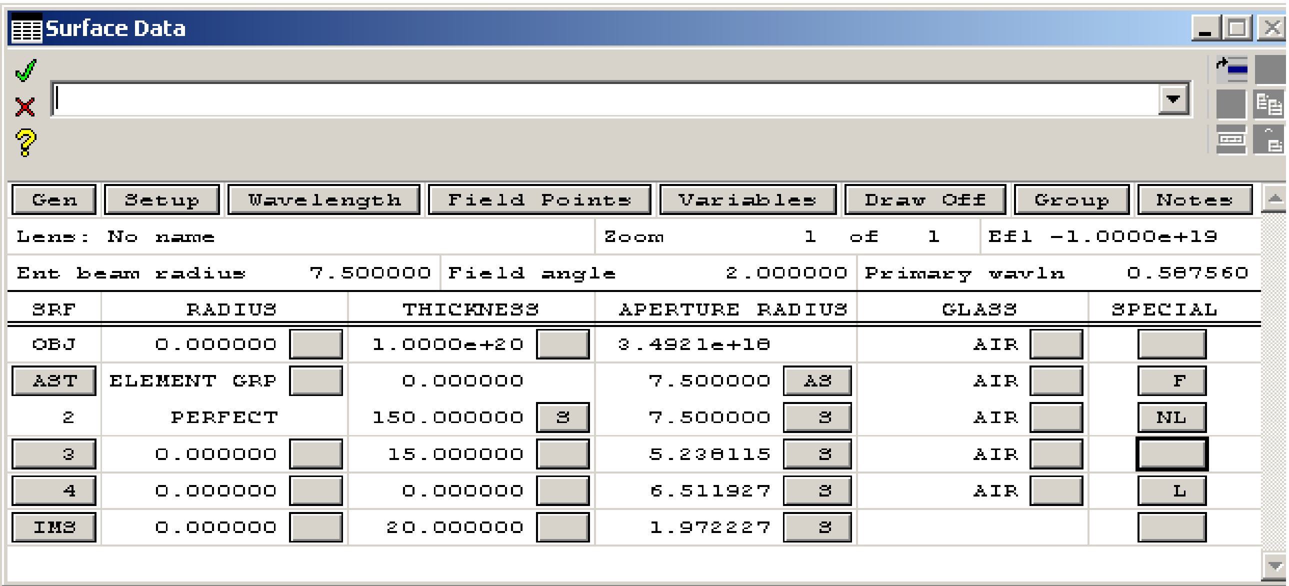
Je nutné také změnit způsob evaluace systému pod tlačítkem Gen – dalekohled je totiž systém afokální, a fokální způsob evaluace by dával špatné výsledky. Spolu se změnou způsobu evaluace se nám také vymaže možnost ovlivnit clonové číslo soustavy.

Za perfektní čočku přidáme další dvě plochy, první s tloušťkou 15 mm a druhou, do které v poli SPECIAL vybereme Perfect lens.

Stejně jako při zadávání první čočky zadáme ohniskovou vzdálenost, tentokrát ovšem 15mm.

Surface Data Spreadsheet by teď měl vypadat jako na obr. 3.19.

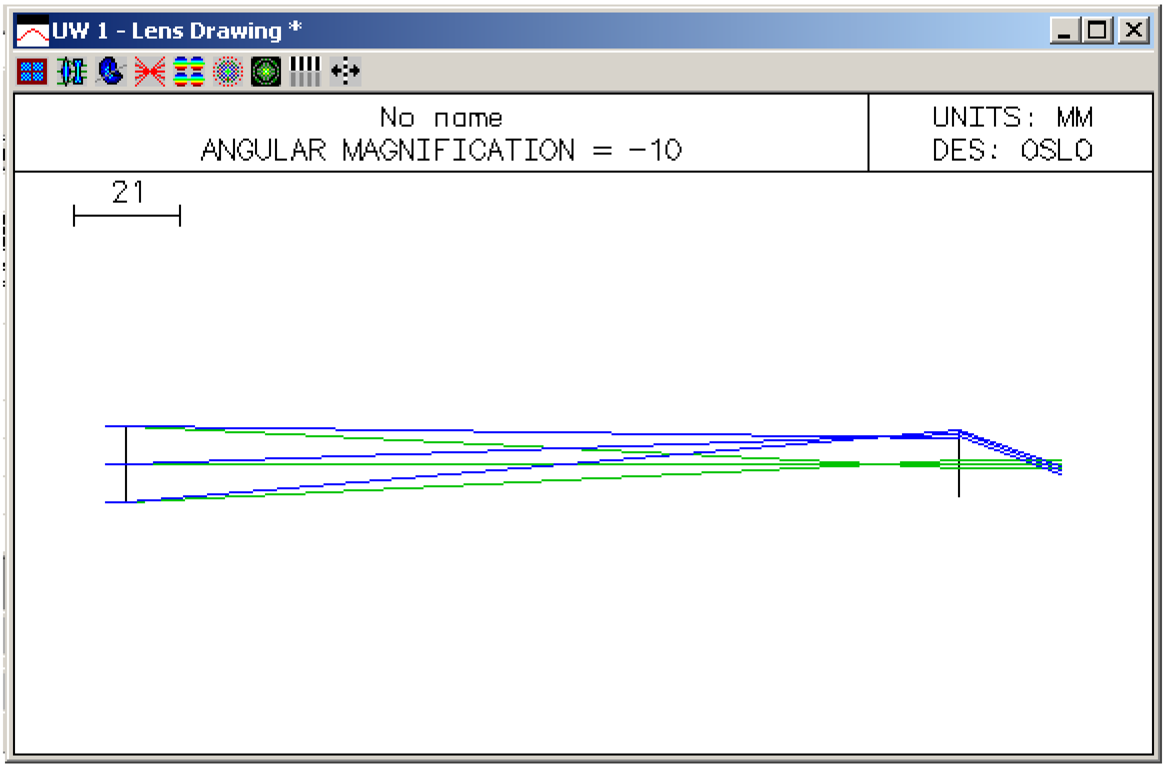
Tím máme vytvořen Keplerův dalekohled.



SRF	RADIUS	THICKNESS		APERTURE RADIUS		GLASS	SPECIAL
OBJ	0.000000	1.0000e+20		3.4921e+18		AIR	
AST	ELEMENT GRP	0.000000		7.500000	AS	AIR	F
2	PERFECT	150.000000	S	7.500000	S	AIR	NL
3	0.000000	15.000000		5.238115	S	AIR	
4	0.000000	0.000000		6.511927	S	AIR	L
IMS	0.000000	20.000000		1.972227	S		

Obr. 3.19 surface data spreadsheet pro Keplerův dalekohled

Nákres průběhu paprsku dalekohledem je vidět na obr. 3.20.

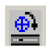


Obr. 3.20 schema průběhu paprsků keplerovým dalekohledem

Do ohniskové vzdálenosti objektivu vložíme další perfektní čočku, která představuje kolektiv. Ta podle obr. 3.19 patří do plochy číslo 3, jak bylo uvedeno na straně 17.

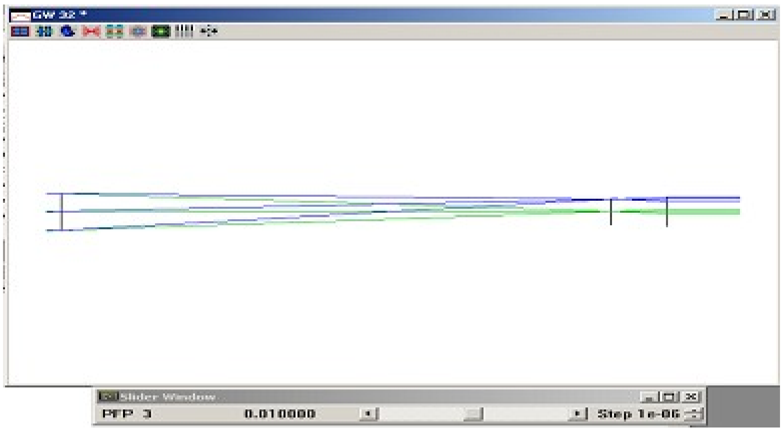
Její ohnisková vzdálenost neovlivní ohniskovou vzdálenost soustavy objektiv + kolektiv, proto zvolíme např. 100 mm.

K prozkoumání jejího efektu na průběh paprsků lze použít slider-wheel („šoupátko“), kterým můžeme upravovat sílu vložené čočky a zároveň pozorovat efekt, který tyto úpravy vyvolávají.

K rychlému vyvolání okna s nastavením šoupátka klikneme na tlačítko  .

V okně, které vyskočí, změníme počet šoupátek na 1, zvolíme plochu 3 a jako měněnou veličinu udáme Perfect lens power.

Po odsouhlasení se nám objeví nové grafické okno (obr. 3.21), pod nímž je lišta se šoupátkem, jehož kroky můžeme nastavit vpravo.



Obr. 3.21 grafické okno se šoupátkem

Pokud teď začneme hýbat šoupátkem, nákres nad lištou se bude měnit podle počtu a/nebo velikosti kroků, v závislosti na proměnné, kterou jsme do šoupátka zadávali, tedy v našem případě lámavost perfektní čočky vložené mezi objektiv a okulár Keplerova dalekohledu.

Můžeme si všimnout, že čím větší lámavost čočky bude, tím více se k sobě přiblíží osový a mimoosový svazek, až konečně splynou v jeden výstupní. Pokud budeme zvětšovat lámavost ještě dál, oba svazky se znovu začnou vzdalovat.

Naopak, pokud lámavost čočky budeme od počátku zmenšovat, oba svazky se budou vzdalovat od sebe.

Kolektivní čočka tedy slouží jako element, který umožní ovlivňovat průměr okuláru bez vlivu na zvětšení dalekohledu.

3.4 Příklad 3, Korekce otvorové vady

Proveďte korekci otvorové vady jednoduché čočky o ohniskové vzdálenosti $f'=100\ mm$, tloušťce $d=1\ mm$, clonovém čísle 7 a indexu lomu $n=1{,}5$ pro čáru e.

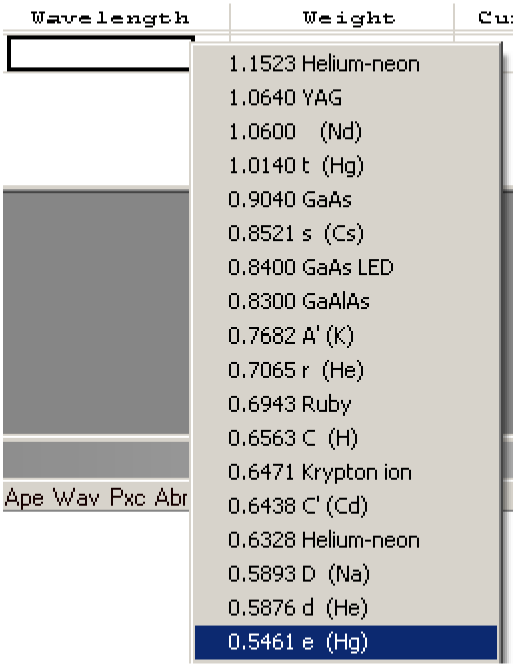
a) Korekci ilustrujte pomocí prohýbání ploch
b) proveďte korekci pomocí minimalizace Seidelova koeficientu.

<u>*Postup řešení:*</u>

V systému OSLO vybereme zadání pro Custom Lens, pro počet ploch zvolíme 2.

Obvyklým způsobem zapíšeme konstrukční parametry symetrické bikonvexní čočky $R_1=-R_2$ a zvolíme tloušťku $d=1\text{mm}$. Ze vztahu (*) (viz příklad 1) plyne, že $R_1=100\,mm$.

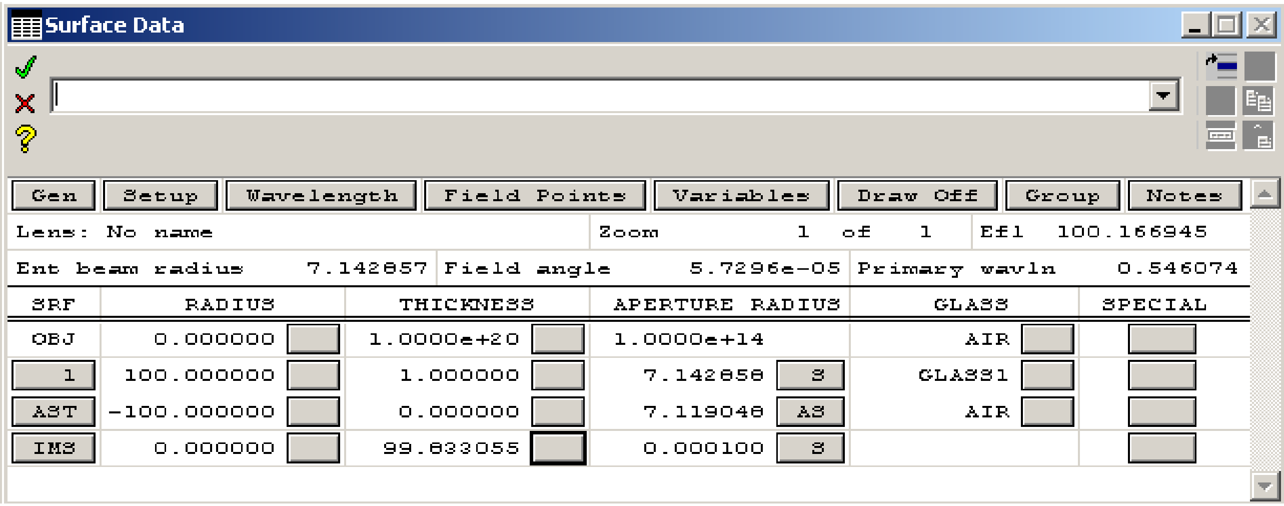
Dříve než však zadáme index lomu $n=1{,}5$, musíme v položce Wavelenght vymazat dvě přebývající vlnové délky a tu poslední nastavit na hodnotu čáry e, což provedeme poklepáním na hodnotu vlnové délky, čímž se nám otevře okno s nabídkou (viz obr. 3.22).



Obr. 3.22 výběr vlnových délek

Až teď zvolíme index lomu skla přes funkci Direct... a zadáme požadovanou hodnotu 1,5. Clonové číslo změníme stejným způsobem jako u příkladu 1 a čočku pomocí funkce Autofocus - Paraxial focus zaostříme.

Výsledný Surface Data Spreadsheet je zobrazen na obr. 3.23.



Obr. 3.23 surface data spreadsheet pro jednoduchou čočku v příkladu 3

a) Ze vzorce pro ohniskovou vzdálenost tlusté čočky, který získáme pomocí maticové optiky, si vyjádříme křivost plochy 1 – pozor nikoliv poloměr křivosti ! Program OSLO obsahuje křivost plochy definovanou jako $K = \dfrac{1}{R}$ (3.3)

Výsledný vzorec by měl vypadat následovně: $$\frac{1}{R_1} = \frac{\left(\frac{1}{f'} + (n-1)\frac{1}{R_2}\right)}{(n-1)+(n-1)^2\frac{1}{R_2}\frac{d}{n}} \qquad (3.4)$$

Ve vzorci (3.4) nahradíme obrácené hodnoty poloměrů křivosti křivostmi a pravou část dosadíme jako poloměr křivosti první plochy skrze příkaz User Defined...

Křivosti nahradíme znaky cv[2], index lomu n a ohniskovou vzdálenost f' vypíšeme číselně a tloušťku nahradíme th[1].

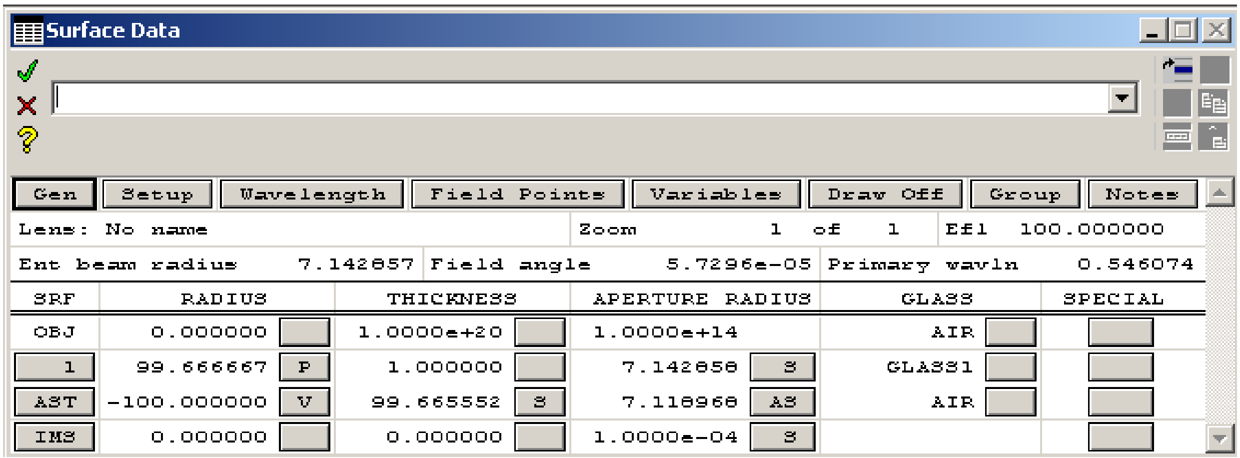
Vzorec, který budeme zadávat do programu tedy vypadá následovně:

(1.0/100.0+(1.5-1.0)*cv[2])/(1.5-1.0+cv[2]*th[1]*(1.5-1.0)*(1.5-1)/1.5)

Poloměr křivosti druhé plochy nastavíme jako proměnnou (Variable).

Pro zachování výšky osového paprsku musíme ještě zadat u šířky druhé plochy automatické propočítání funkcí Solves->Axial ray height a potvrdíme, že má zůstat nulová.

Výsledný Surface data Spreadsheet je na obr. 3.24.

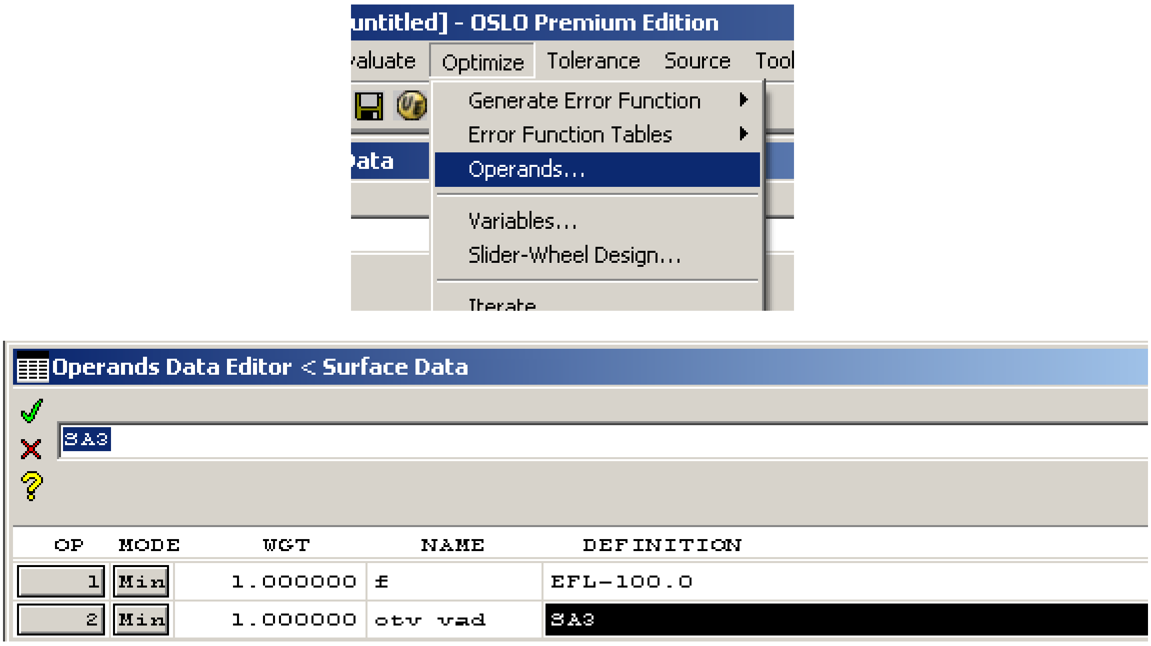


SRF	RADIUS		THICKNESS		APERTURE RADIUS		GLASS		SPECIAL
OBJ	0.000000		1.0000e+20		1.0000e+14		AIR		
1	99.666667	P	1.000000		7.142858	S	GLASS1		
AST	-100.000000	V	99.665552	S	7.118968	AS	AIR		
IMS	0.000000		0.000000		1.0000e-04	S			

Obr. 3.24 Surface data Spreadsheet pro simulaci prohýbání ploch

V menu Optimize->Operands přidáme ještě jeden řádek a zadáme veličiny, s nimiž chceme pracovat, podle obr. 3.25.

Efl je ohnisková vzdálenost a bude tedy udržována na 100mm, SA3 je zkratka pro otvorovou vadu třetího řádu.

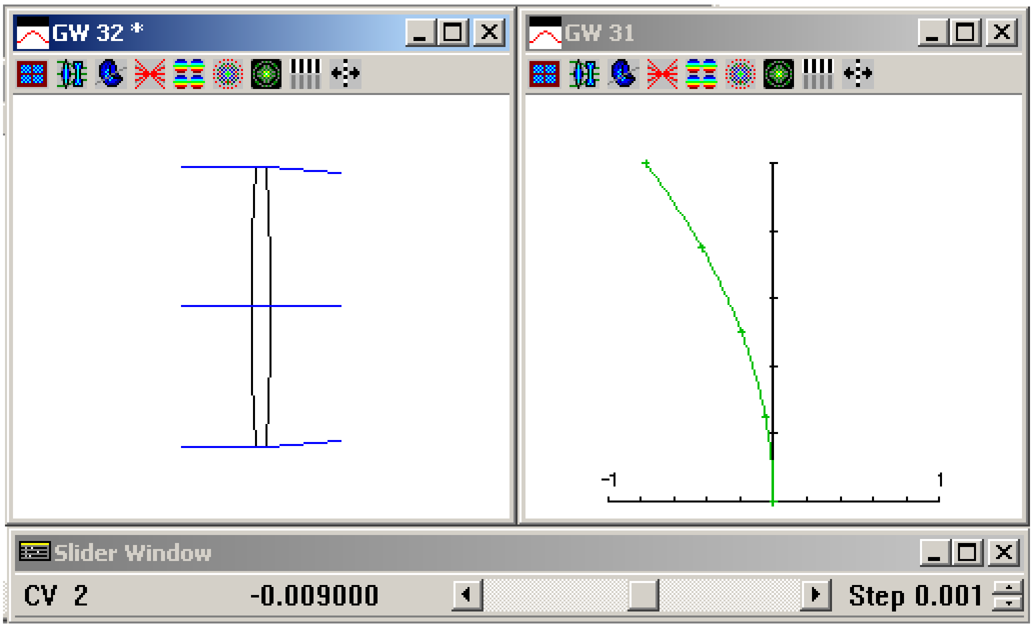


Obr. 3.25 zadání pracovních veličin

Tyto veličiny jsou zadány pouze za účelem průhlednosti a jednoduchosti tohoto příkladu, pokud bychom chtěli například pracovat s komou nebo astigmatismem, nebo pracovat s vadami jiného řádu, stačí vepsat jejich zkratku místo SA3.

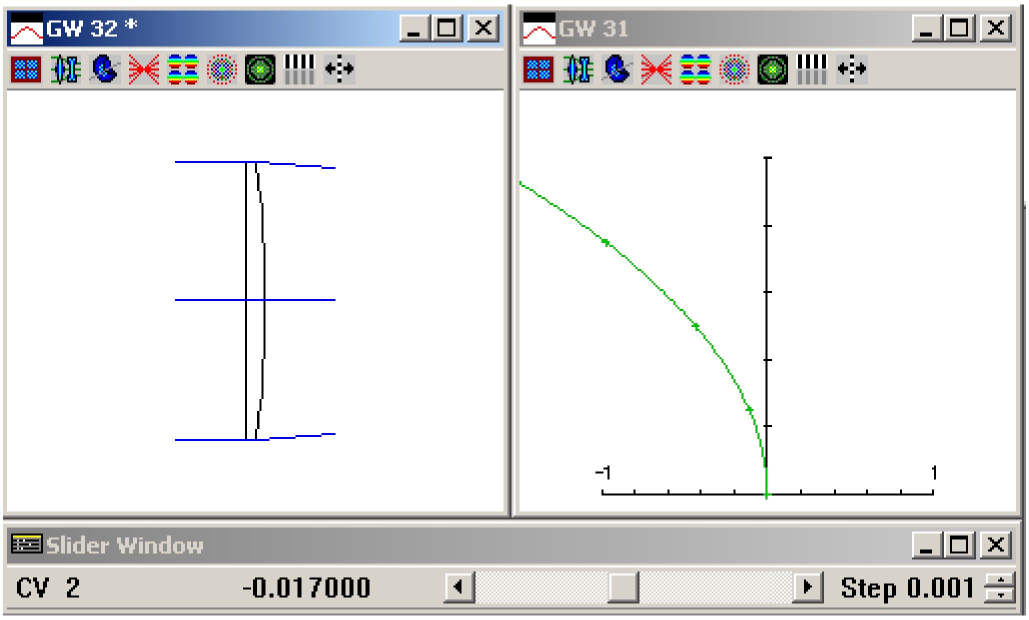
Odsouhlasíme zadání a zvolíme znovu funkci Slider-wheel. Tentokrát zaškrtneme poslední políčko v druhém řádku Long. SA (otvorovou vadu), změníme počet šoupátek na 1, budeme křivit plochu 2 a měněnou vlastnost zadáme křivost (Curvature (CV)).

Po odsouhlasení se nám objeví dělené okno, na jehož levé straně je nákres čočky, a na pravé straně otvorová vada čočky (viz obr. 3.26).

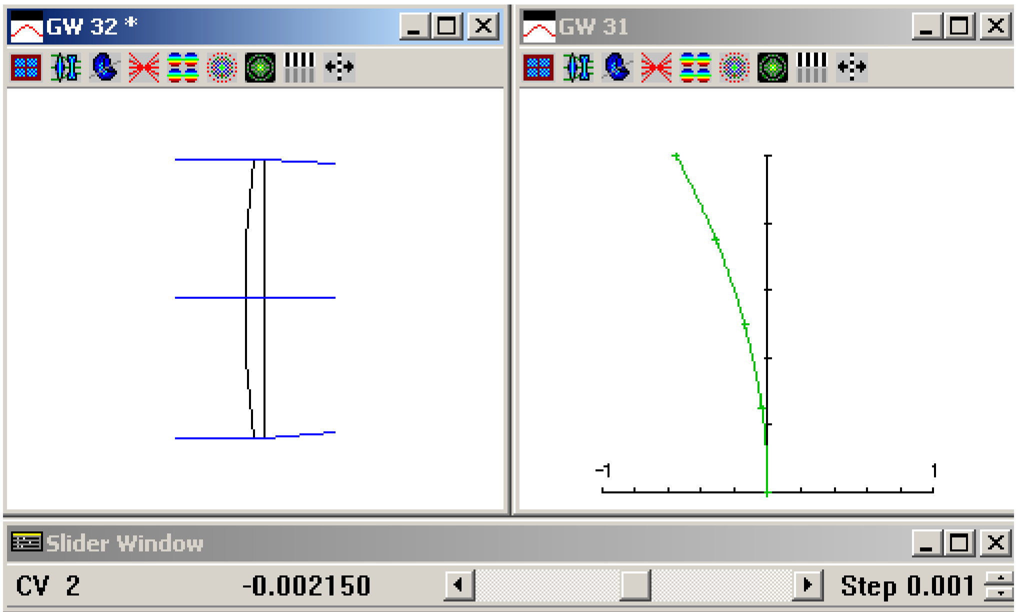


Obr. 3.26 slider-wheel pro ilustraci korekce otvorové vady pomocí prohýbání ploch

Šoupátkem teď můžeme měnit křivost druhé plochy a první plocha se nám automaticky bude propočítávat tak, aby zůstala zachována ohnisková vzdálenost čočky. Zároveň se také bude měnit otvorová vada čočky (viz obr. 3.27 a 3.28)



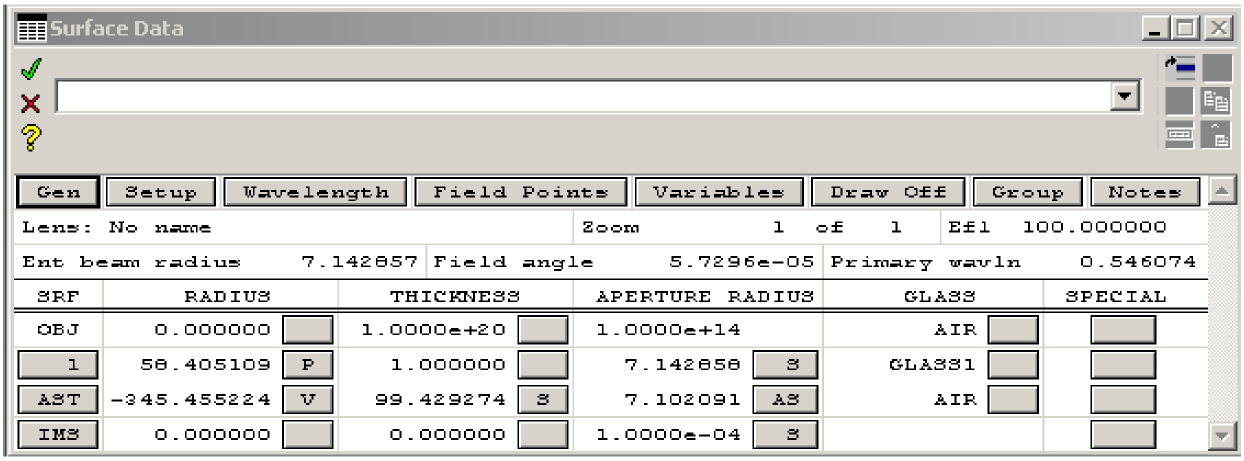
obr.3.27 prohnutí čočky – zvětšená otvorová vada



obr.3.28 prohnutí čočky – zmenšená otvorová vada

S pomocí zjemňování kroků šoupátka můžeme dosáhnout minimální otvorové vady – stojí za povšimnutí, že s pohyby šoupátka se nám také mění hodnoty v Surface Data Spreadsheetu.

Pro minimální otvorovou vadu tedy dostaneme hodnoty na obr. 3.29.

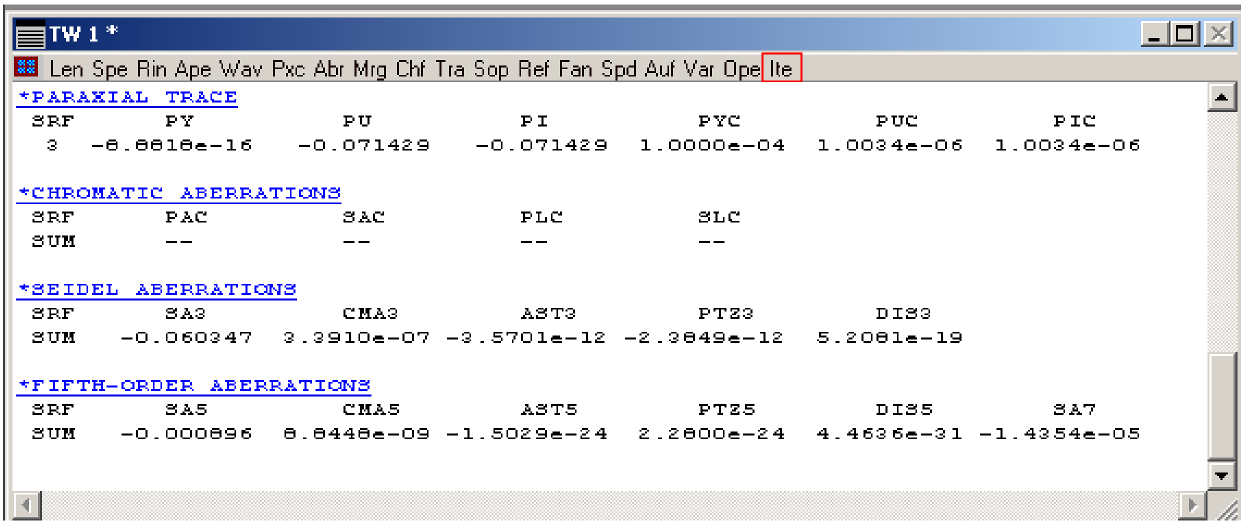


Obr. 3.29 Surface Data Spreadsheet pro čočku s minimalizovanou otvorovou vadou

b) Seidelův koeficient, vyjadřující velikost otvorové vady, můžeme korigovat pomocí iteračních procesů.

Pokud se vrátíme k původnímu nastavení čočky (stačí zavřít Slider-wheel okno a vložit k proměnnému poloměru křivosti plochy 2 hodnotu -100), můžeme si v okně TW1 otevřít položku Abr. Program nám vypíše koeficienty vad 3. řádu (Seidelovy) a koeficienty vad 5. řádu (viz obr. 3.30)

Vzhledem k nastavení pracovních veličin nás zajímá koeficient SA3.

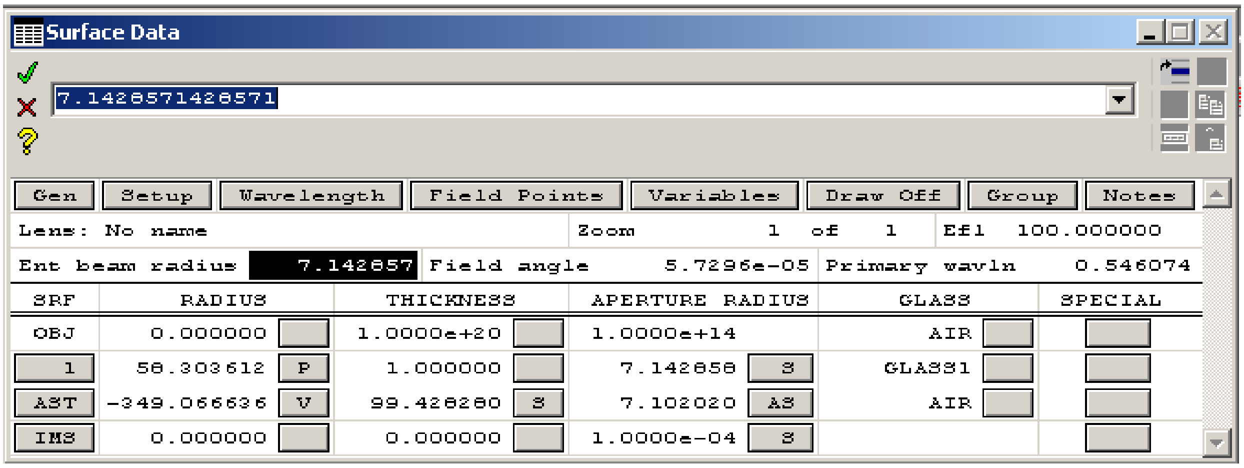


Obr. 3.30 Výpis koeficientů vad neupravované čočky

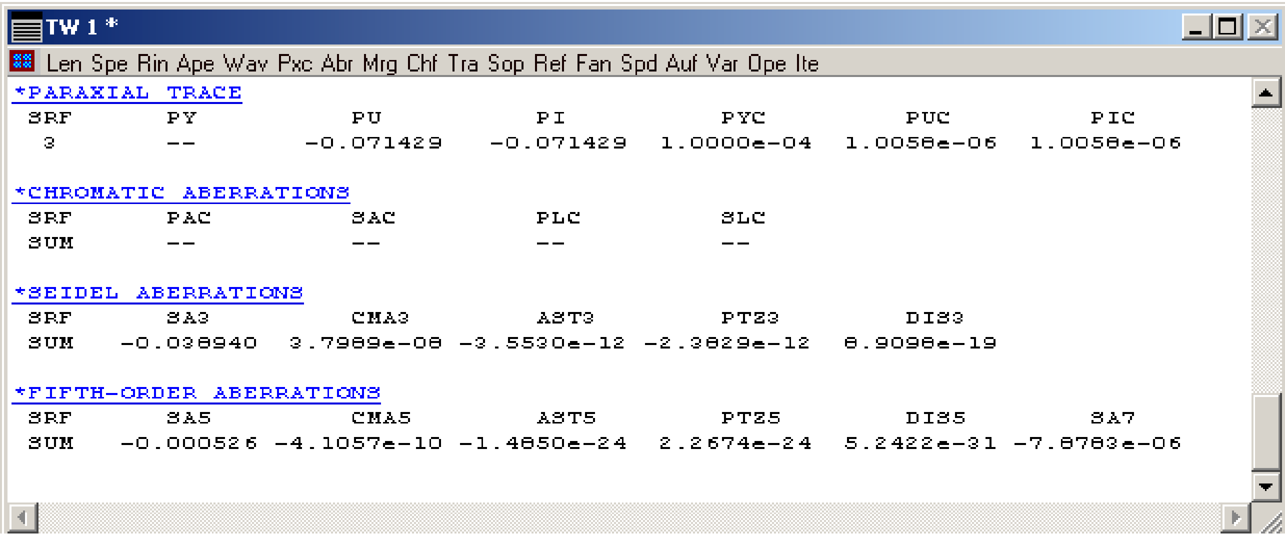
Pokud nyní spustíme iterační proces pomocí příkazu Ite v tomtéž okně (na obr. 3.28 zvýrazněn červeným rámečkem), program automaticky propočítá několik kroků iterací a najde tak nejvýhodnější hodnoty poloměrů křivostí. Pro větší přesnost je možné proces iterací zopakovat i několikrát.

Z výsledku iterací je pak patrné, že program našel přibližně tytéž hodnoty, kterým jsme se blížili při prohýbání ploch v úkolu a). (srov. Obr. 3.31 a Obr. 3.29)

Nově vypsané aberační koeficienty pak ukazují zřetelnou minimalizaci (viz obr. 3.32).



obr. 3.31 Surface data spreadsheet s otvorovou vadou minimalizovanou pomocí iterací



obr. 3.32 výpis aberačních koeficientů s minimalizovanou otvorou vadou

Závěr

Hlavním cílem mé bakalářské práce bylo poukázat na praktické využití funkcí programu OSLO a přiblížit alespoň několik z nich studentům bakalářského oboru "Přístrojová optika" pomocí řešených příkladů, jež si mohou sami projít, vyzkoušet a případně upravit tak, aby se s programem OSLO seznámili co nejlépe.

V první kapitole jsem nastínil základní charakteristiku optických systémů, podmínky nutné pro optimální zobrazení předmětů a základy maticové optiky, kterou lze s úspěchem použít při řešení některých problémů.

Druhá kapitola pojednává o důsledcích nesplnitelnosti všech podmínek optimálního zobrazení – o optických vadách, jimiž je zatížena každá reálná optická soustava, a vlivu, který mají na kvalitu obrazu.

Příklady, vytvořené pro studenty PO jako podklady pro práci s programem OSLO a praktický nácvik, jsou v kapitole č.3, zahrnující také řešení těchto příkladů a návod, jak do programu zadat optickou soustavu a při její analýze a optimalizaci využít několik funkcí z mnoha, které program OSLO nabízí.

I přes to, že jsem se seznámil pouze s několika málo možnostmi tohoto programu, bylo pro mne přínosem nahlédnout do nového a zajímavého odvětví návrhů a simulace optických systémů.

Použitá literatura:

[1] HAVELKA, B. *Geometrická optika I.*, 1955. 346 s.

[2] MALÝ, P. *Optika*. Praha : Karolinum, 2008. 361 s.

[3] SALEH, E.A., TEICH, M.C. *Základy Fotoniky I.*. 1. vyd. Praha : Matfyzpress, 1994. 226 s.

[4] KOŠŤÁL, K. *Sbírka fyzikálních vzorců a pouček*. 4. vyd. Praha : SNTL, 1970. 407 s.

[5] J.B.CALVERT. *Topics in ray optics* [online]. 4. september 2007 [cit. 2009-04-21]. Dostupný z WWW: http://mysite.du.edu/~etuttle/optics/geop.htm

[6] HAJNOVÁ, Anna. *Optická funkce přenosu a její použití pro hodnocení kvality zobrazovacích systémů*. [s.l.], 2008. 34 s. Univerzita Palackého v Olomouci. Vedoucí bakalářské práce Prof. RNDr. Zdeněk Bouchal, Dr.

[7] NOVÁK, Jiří. *Analýza měření tvaru vlnoplochy v optice pomocí MatLabu*. [s.l.], [200-]. 5 s. ČVUT v Praze. Oborová práce. Dostupný z WWW: http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB06/prispevky/novak_jiri1/novak_jiri1.pdf

[8] POSPÍŠIL, J. *Základy Optiky I. : část B*. Doc.RNDr. Jiří Machýček, CSc.. 1. vyd. Olomouc: Rektorát UP v Olomouci, 1983. 378 s.

[9] HAVELKA, B. *Zobrazení na podkladě paprskové optiky.* 1. vyd. Olomouc : UP Olomouc, 1966. 280 s.

[10] Lambda Research. *Oslo optics reference book*. [s.l.] : [s.n.], 2005. 429 s.

[11] Štrba A. (1979):,Všeobecná fyzika 3 - optika. ALFA-Vydavateľstvo technickej a ekonomickej literatúry. Bratislava

[12] RIEDL, Max J. *Optical Design Fundamentals for Infrared Systems*. 2nd edition. Tutorial texts in Optical Engineering vol. TT 48. Bellingham, Washington USA : SPIE PRESS, 2001