



GEOMETRICKÁ OPTIKA II

Přednáška 10

Obsah

- Opakování



**Pesimista vidí obtíž při každé příležitosti.
Optimista vidí příležitost při každé obtíži.**

V naší poněkud nepřehledné době chci šířit optimismus, sebedůvěru, víru ve vlastní síly jednotlivce i v naší "kolektivní" schopnost nalézt východisko, nalézt pozitivní řešení.

**Winston Leonard
Spencer-Churchill**

(30. listopadu 1874,
Oxfordshire, Velká
Británie – 24. ledna
1965, Londýn,
Velká Británie)

Prof. Ing. Václav Klaus, CSc., Dr.
h. c.

(19. června 1941, Praha)

je druhým prezidentem České
republiky



Osnova kurzu

Geometrická optika – 1. semestr, 1/2

1. Zákony geometrické optiky, index lomu prostředí, index lomu vzduchu, vzájemné vztahy. Fermatův princip, odvození zákona lomu a odrazu z tohoto principu.
2. Zdroje záření.
3. Disperze, Abbéovo číslo, katalogy optických materiálů.
4. Planparalelní destička, hranol pro lom.
5. Minimální deviace, použití, optický klín.
6. Zobrazení kulovou plochou obecně a v paraxiálním prostoru.
7. Základní body jedné kulové plochy.
8. Zobrazení soustavou kulových ploch, polohy základních bodů soustavy, ohniskové vzdálenosti.
9. Zobrazovací rovnice (pro paraxiální prostor).
10. Zobrazení čočkou tenkou, reálné zobrazení čočkou tlustou.
11. Zobrazení soustavou čoček.
12. Omezení a chod paprskových svazků v optické soustavě.

Vady zobrazovacích soustav – Geometrická optika – 2. semestr, 2/2

Vady monochromatické

- a) Zobrazení osového bodu (vada otvorová).

- b) Zobrazení bodu ležícího mimo optickou osu:
 - zkreslení,
 - astigmatismus,
 - zklenutí,
 - koma.

Vady barevné

- Barevná vada polohy
- Barevná vada velikosti
- Oprava barevné vady v PC

Asférické optické plochy

Bezaberační odrazná a lomová plocha

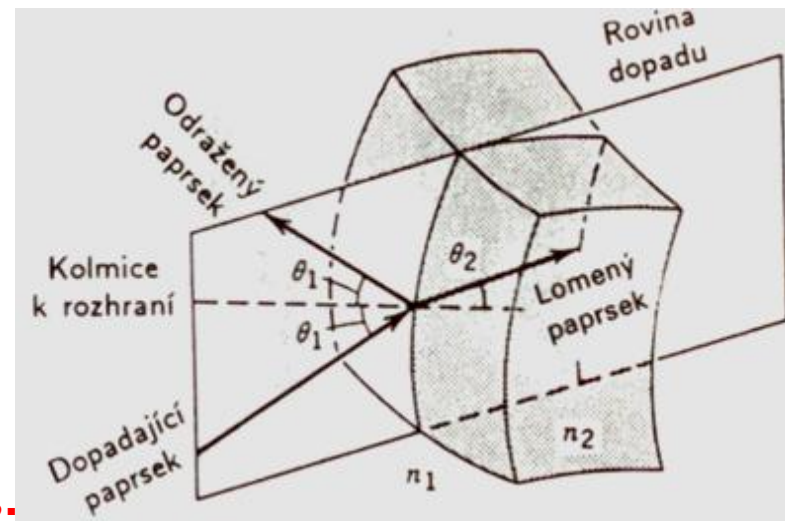
Hodnocení kurzu

- Podmínky k udělení zápočtu
 1. Aktivní účast na cvičeních. Tolerují se maximálně **2** absence (ve výjimečných případech náhrada možná při domluvě se cvičícím).
 2. Získání **50%** bodů ze dvou povinných písmenek (v odůvodněných případech možnost získat chybějící body na zápočet vypracováním speciálních úkolů po domluvě se cvičícím).
- Podmínky pro získání zkoušky
 1. Písemný test s otázkami s výběrem odpovědí a úlohami, sestavený z učiva probíraného na přednáškách a cvičeních.
 2. Při úspěšném zvládnutí testu postup do druhého kola – **ústní zkouška**.
 3. Výsledné hodnocení se skládá z hodnocení ze **cvičení (40 %)** a **zkoušky (60 %)**.

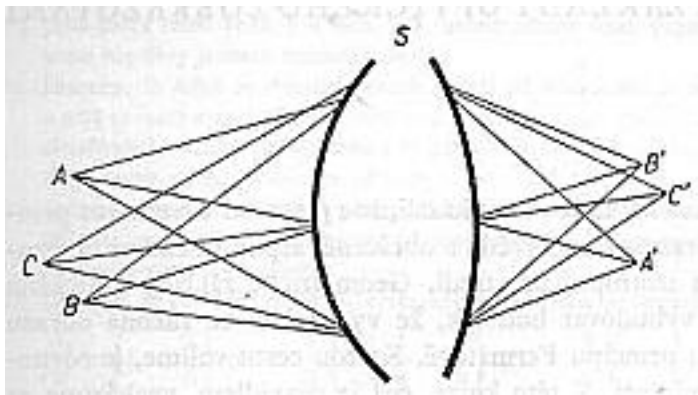
Optické zobrazení - úvod

Z Fermatova principu vyplývá:

- **v homogenním prostředí paprsky šíří přímočaře,**
- **odražený paprsek leží v rovině dopadu; úhel odrazu se rovná úhlu dopadu,**
- **lomený paprsek leží v rovině dopadu; úhel lomu θ_2 se vztahuje k úhlu dopadu θ_1 Snellovým zákonem $n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2$.**



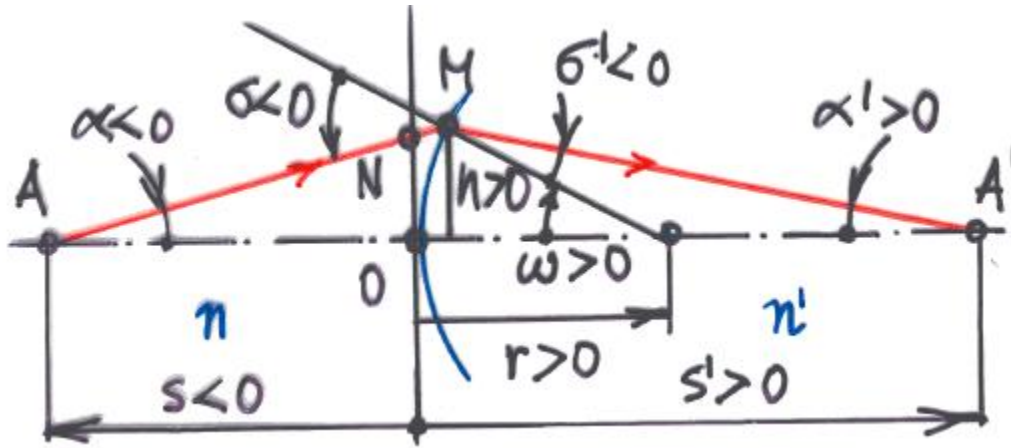
Optické zobrazování – úkolem je umožnit viditelnost předmětů na jiném místě, a to buď ve stejné velikosti, nebo zvětšeně (resp. zmenšeně).



Z každého (**předmětového**) bodu A, B, C... svítícího (osvětleného) objektu vychází svazek světelných paprsků. Procházejí-li tyto svazky optickou soustavou S, transformují se na nové svazky s vrcholy A', B', C' ... A', B', C' ... nazýváme **obrazy bodů** A, B, C... a obrazem předmětu je souhrn obrazů jednotlivých bodů předmětu.

Optické zobrazení

Chod paraxiálních paprsků optickou soustavou



Paraxiálním paprskem je označován paprsek, který se šíří z osového bodu předmětu pod malým úhlem α a optickou soustavu protíná v malé dopadové výšce h .

$$\sin \alpha \approx \operatorname{tg} \alpha \approx \alpha, \quad \cos \alpha \approx 1;$$

$$\sin \sigma \approx \sigma, \quad \sin \sigma' \approx \sigma';$$

$NM \approx 0$, (bod na ploše je nahrazen bodem N na rovině kolmé k ose).

$$\text{Snellův zákon: } n\sigma = n'\sigma'.$$

$$\text{Z obrázku: } \sigma = \alpha - \omega, \quad \sigma' = \alpha' - \omega.$$

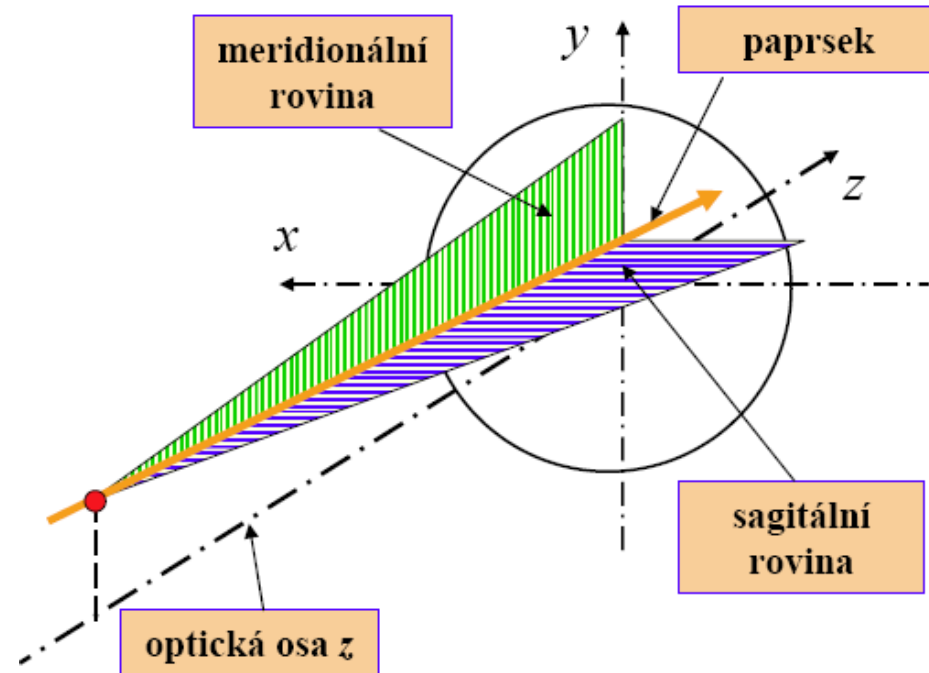
Po dosazení do Snellova zákona:

$$n(\alpha - \omega) = n'(\alpha' - \omega),$$

$$n \left(\frac{1}{s} - \frac{1}{r} \right) = n' \left(\frac{1}{s'} - \frac{1}{r} \right) \quad \text{Invariant lomu.}$$

OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV

- Při jiném než ideálním zobrazení optickou soustavou se projevují různé odchylky v zobrazení.
- Tyto odchylky se nazývají **optické vady zobrazovacích soustav**.
- K určení vad je nutné sledovat paprsek mimo paraxiální prostor; ve většině případů vystačíme s paprsky probíhajícími v **poledníkové (meridiální, meridionální) rovině**, tj. v rovině určené optickou osou a zobrazovaným bodem.
- Vady optických soustav dělíme na vady **monochromatické** a **chromatické**.



Optické zobrazení – významné roviny optické soustavy

Zdroj: <http://webfyzika.fsv.cvut.cz/>

Příčiny vzniku aberací

fyzikální

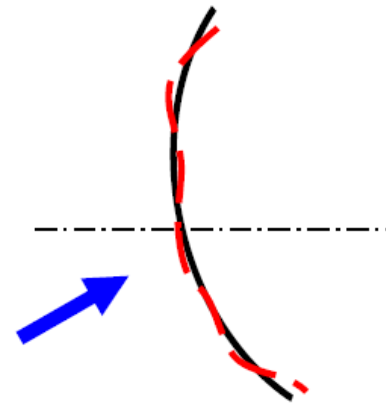
- ⊕ lom a odraz paprsků na plochách optické soustavy,
- ⊕ neplatnost paraxiálních zobrazovacích rovnic,
- ⊕ difrakce světla na prvcích optické soustavy,
- ⊕ disperze prostředí,...

technologické

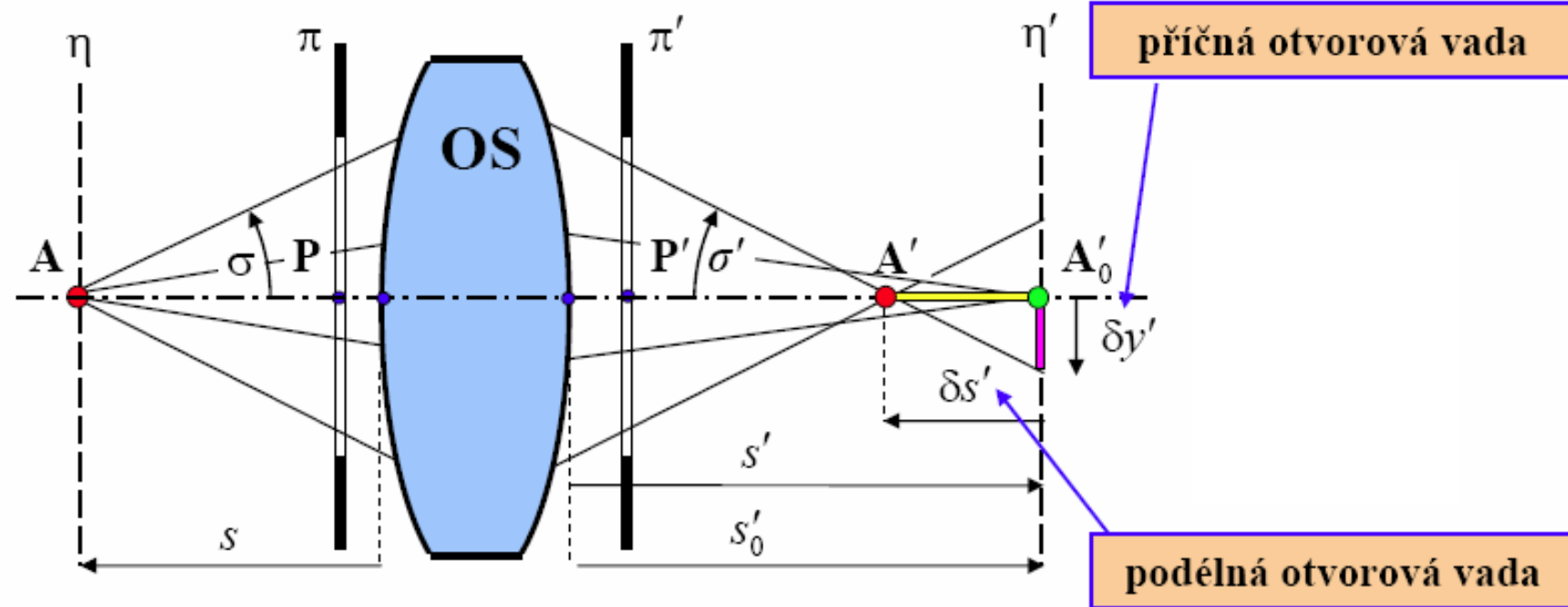
- ⊕ nedokonalost výroby prvků optických soustav (odchyly tvaru ploch, decentricita prvků, apod.)

materiálové

- ⊕ nedokonalost (vady) materiálů, ze kterých jsou optické prvky zhotoveny (nehomogenita materiálu, bubliny, šlírý, pnutí, apod.)



Zobrazení osového bodu - vada otvorová (sférická)

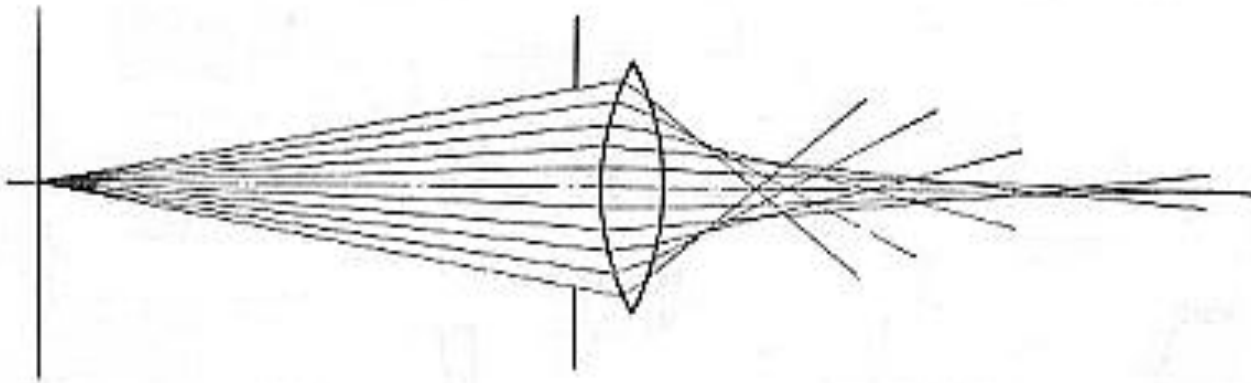


Zdroj: <http://webfyzika.fsv.cvut.cz/>

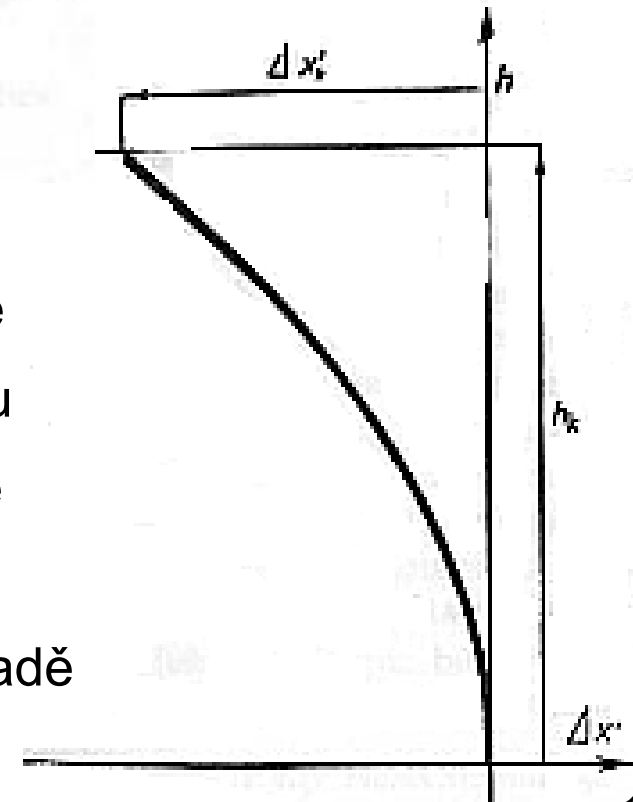
- Obrazem bodu není bod, ale kruhová ploška.

Vada otvorová (sférická)

- Lom širokého paprskového svazku lámavou plochou.

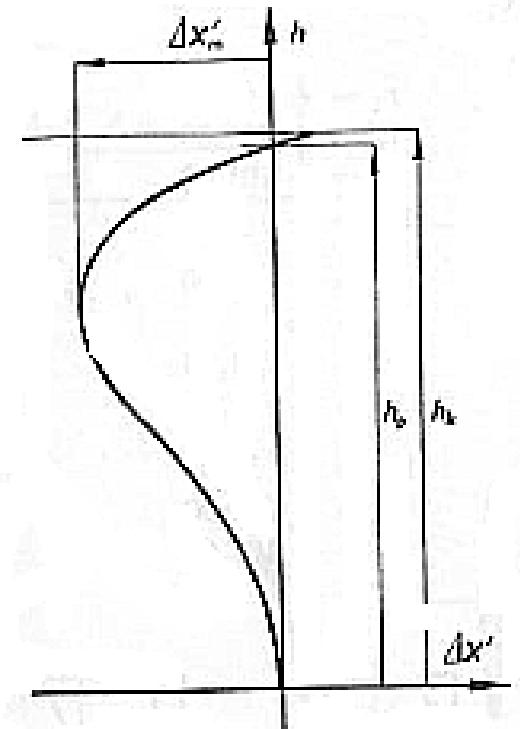


- Průběh otvorové vady pro různé úhly σ , tj. různé dopadové výšky h znázorňujeme křivkou, kterou dostaneme, když na vodorovnou osu nanášíme otvorovou vadu $\Delta x'$ a na svislou osu dopadové výšky paprsků na první lámavou plochu (popřípadě v rovině vstupní pupily).



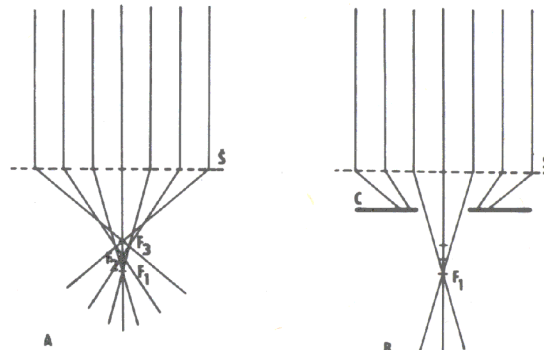
Korekce otvorové vady

- U soustavy je otvorová vada korigována pro určitý otvor, jestliže paprsky příslušné tomuto otvoru protnou optickou osu pro průchodu optickou soustavou na stejném místě jako paraxiální paprsky.
- Průběh otvorové vady pro spojku a rozptylku je opačný.
- Kombinací vhodné spojky a rozptylky lze otvorovou vadu snížit.
- Nelze potlačit otvorovou vadu pro všechny dopadové výšky (pro všechna pásma otvoru).
- V praxi se odstraňuje otvorová vada alespoň pro okrajové pásma otvoru.

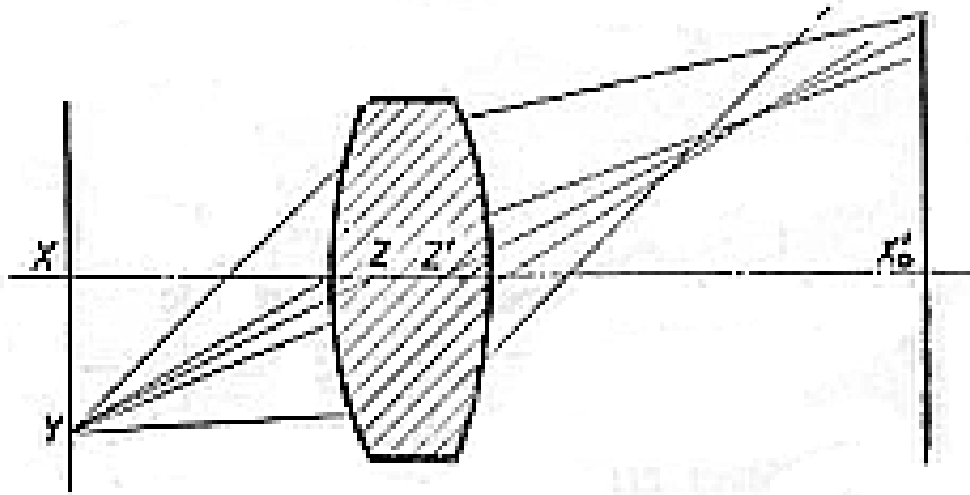


Pozn. Nejjednodušší korekce otvorové

(sférické) vady – zacloněním



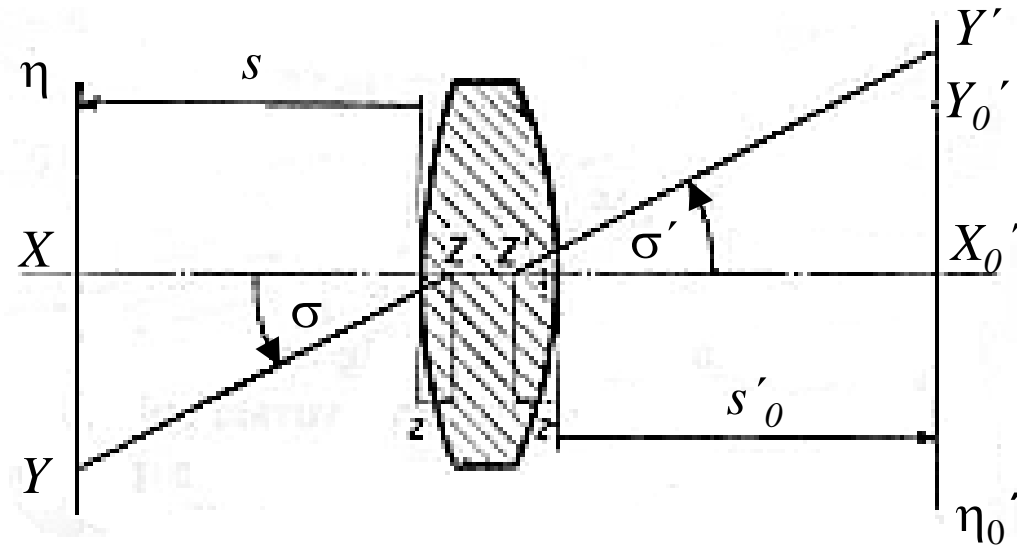
OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV - Zkreslení



- Zobrazení bodu Y ležícího **mimo optické osy**.
- Svazek monochromatického světla vycházející z toho bodu nabude po průchodu čočkou nesouměrného tvaru.

- Úchylky se projeví u všech paprsků, tento jev se nazývá **zkreslení**.

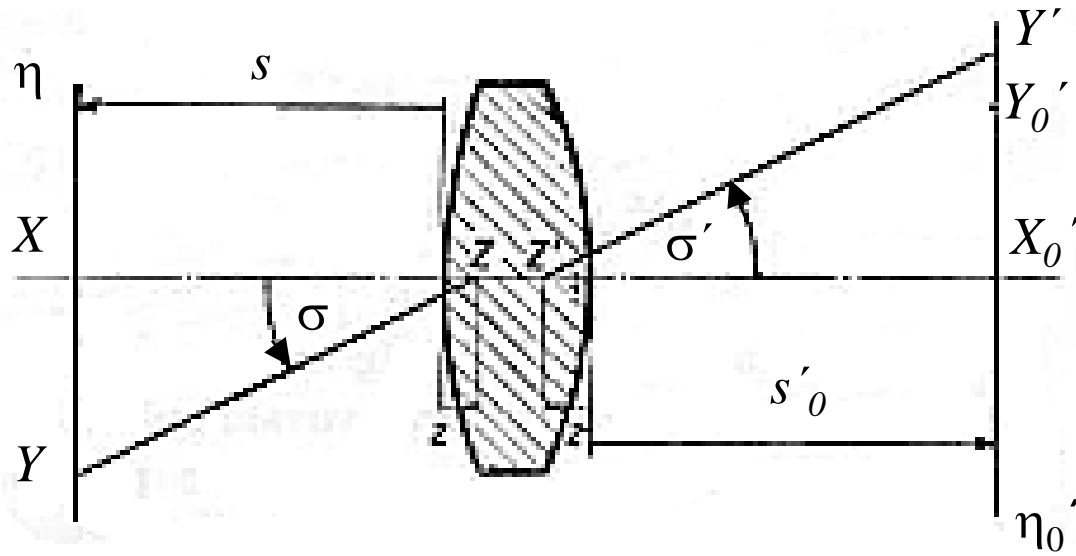
OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV - Zkreslení



- Sledujme šíření středového paprsku YZ svazku (**hlavní paprsek**).
- Po průchodu čočkou protíná tento paprsek paraxiální obrazovou rovinu η_0' v bodě Y' , který obecně nesplývá s ideálním obrazem Y_0' .

- Úchylka $\Delta y' = |Y' - Y_0'|$ je tím větší, čím je bod Y dále od optické osy. Následkem toho, se zobrazují křivky, které neprotínají optickou osu jako křivky, které jsou k ose buď konkávní nebo konvexní.

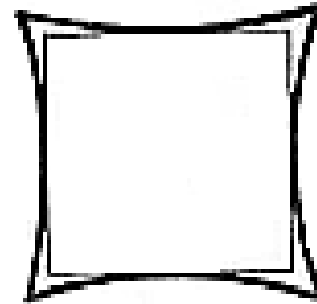
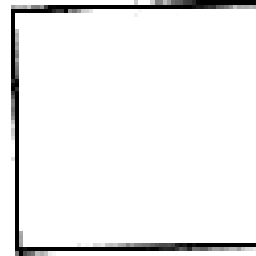
OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV - Zkreslení



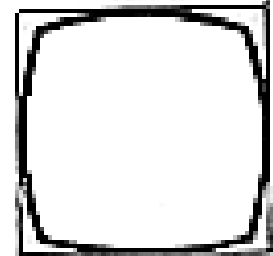
• Zobrazení čtverce pro:

a) zkreslení *kladné* (**poduškové**)

b) zkreslení *záporné* (**soudkové**)



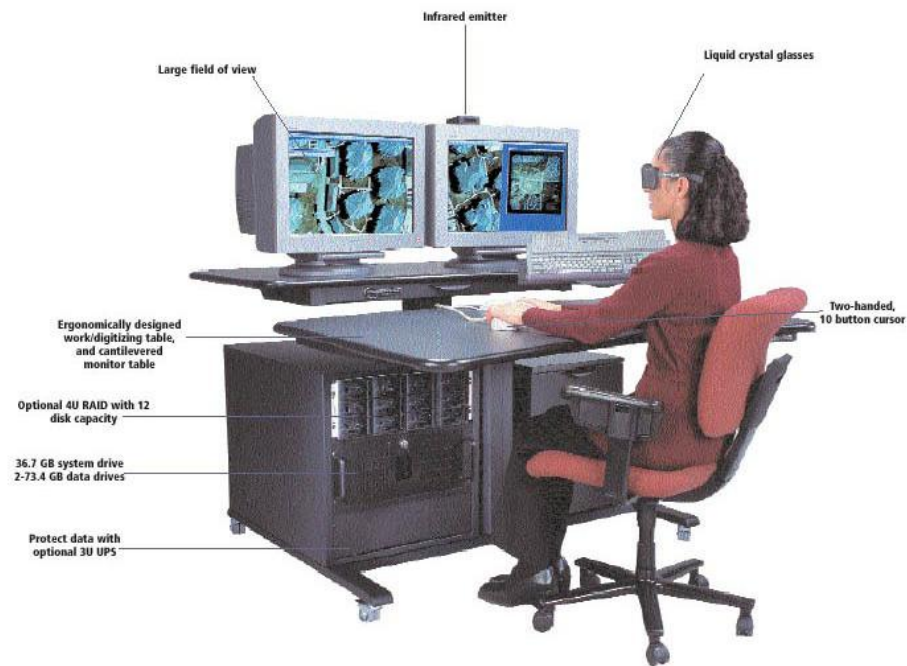
a



b

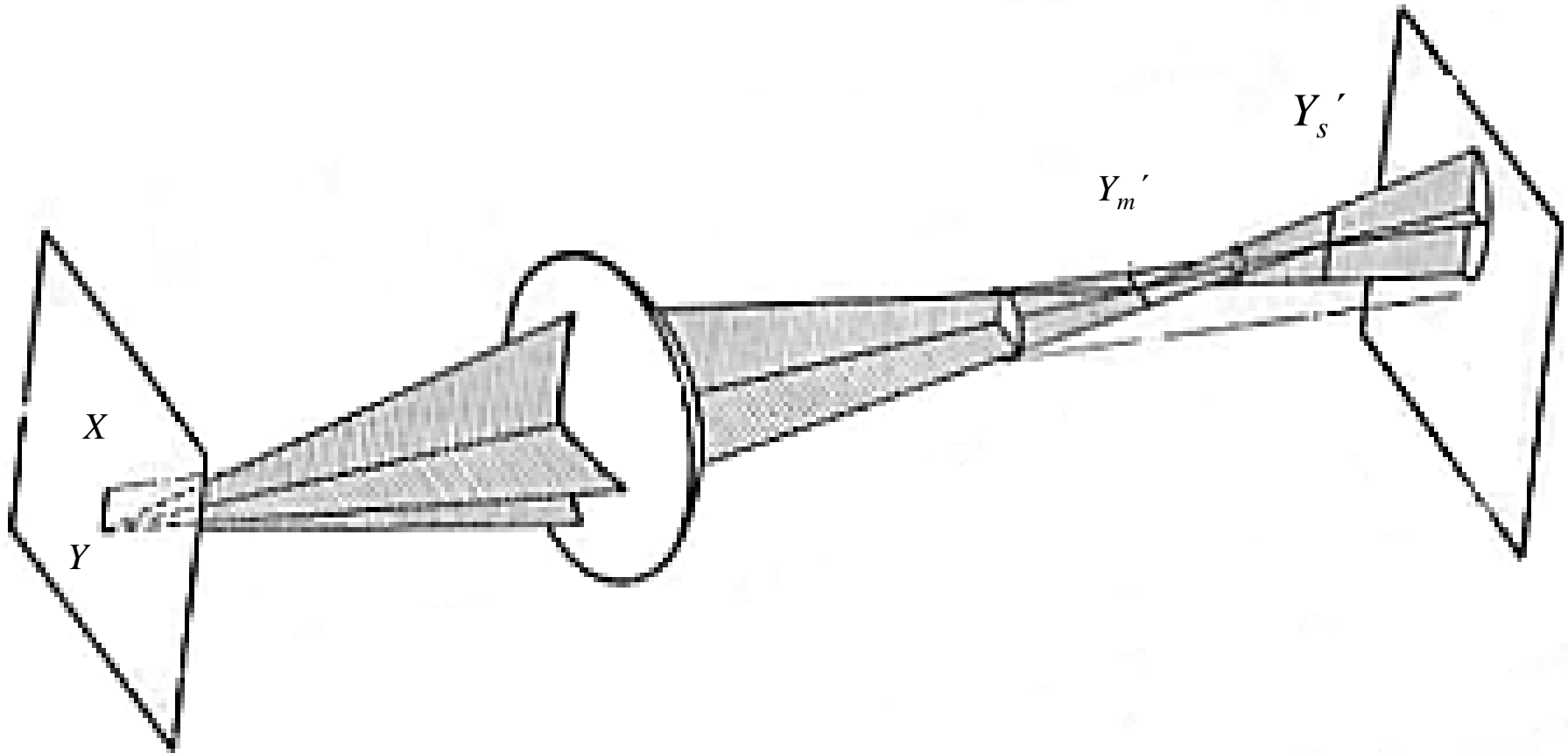
OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV - Zkreslení

- Zkreslení lze snížit na takovou hodnotu, aby se při zobrazení neprojevovalo rušivě, vhodnou kombinací čoček.
- Zkreslení je nutno zvlášť potlačit u těch optických soustav, které slouží k měřicím účelům, (např. objektivy pro (leteckou) fotogrammetrii).



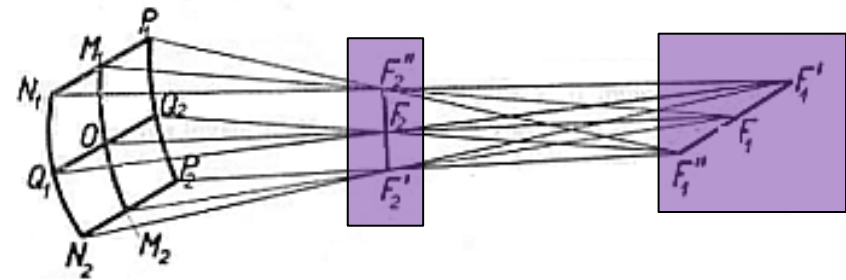
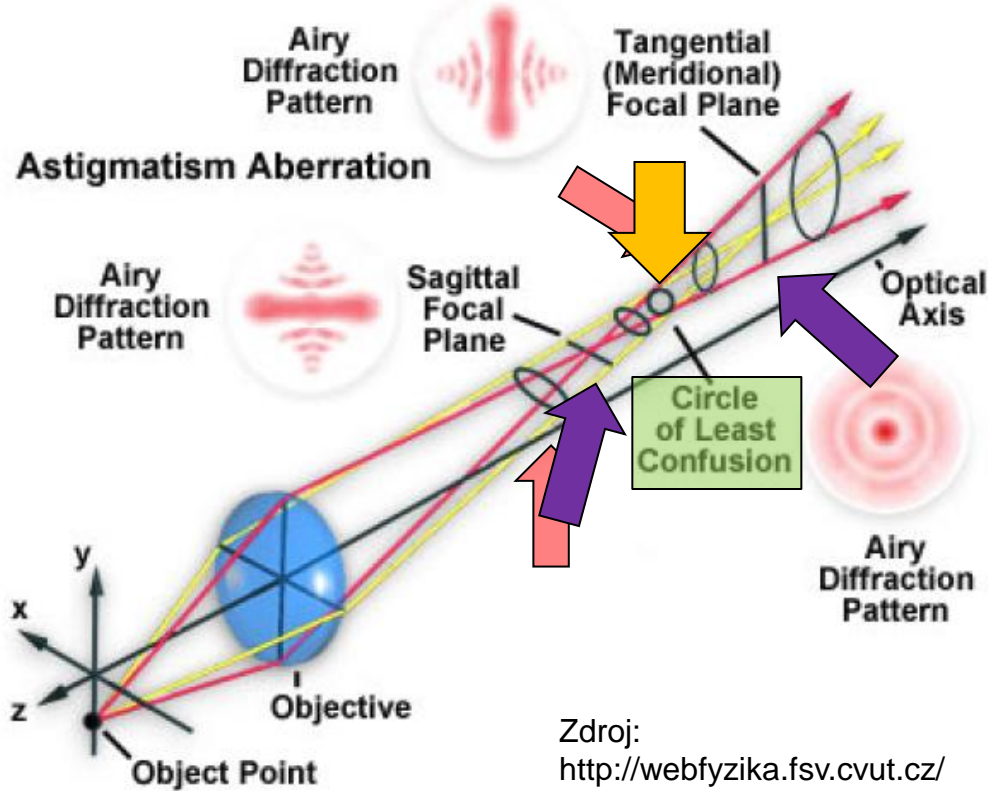
Vyhodnocovací pracoviště firmy ERDAS -
fotogrammetrická stanice ERDAS Imaging.

OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Astigmatismus a zklenutí

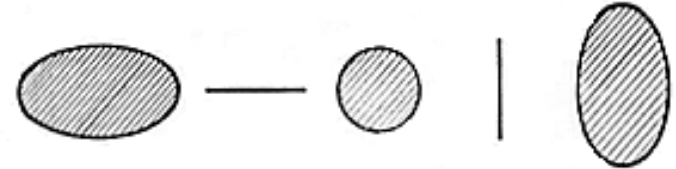


- Sledujme zobrazení bodu Y úzkým paprskovým svazkem.
- Paprsky v rovině meridionální (poledníková, tangenciální) se protnou v bodě Y'_m (meridionální obraz bodu Y) a v rovině sagitální v bodě Y'_s (sagitální obraz bodu Y).

OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Astigmatismus a zklenutí



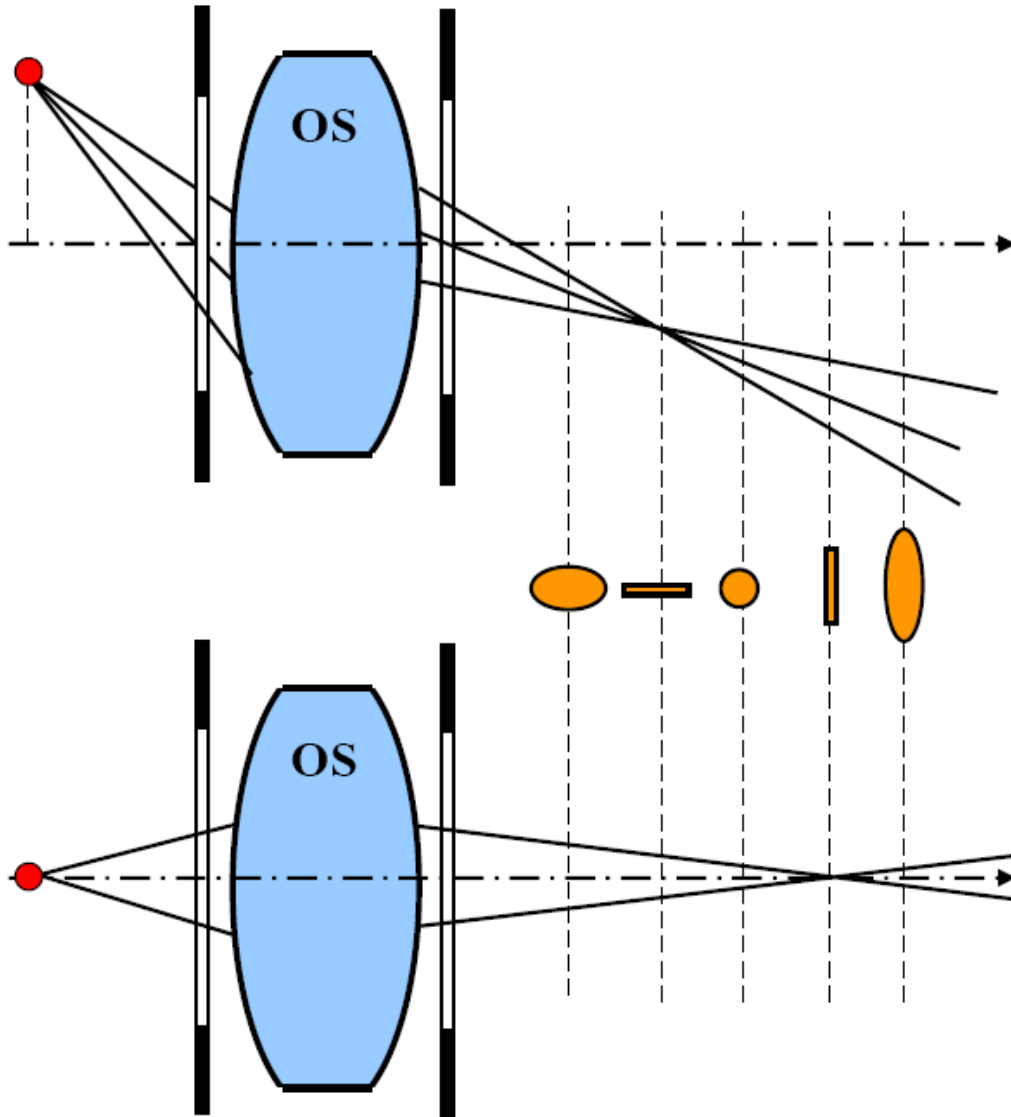
- Tvar astigmatického svazku.



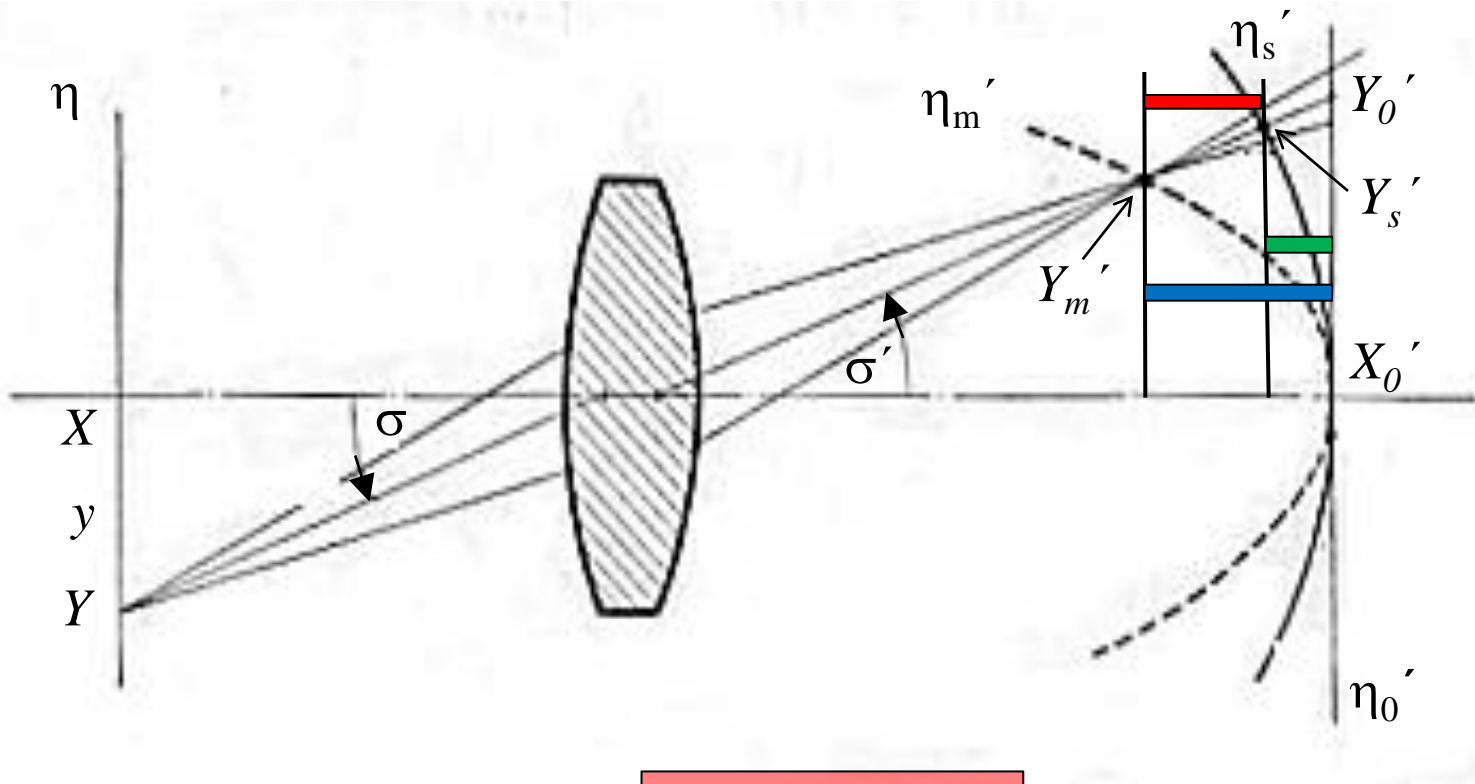
- Rovinné řezy paprskového svazku kolmé k hlavnímu paprsku.

- Při kruhové vstupní apertuře je svazek po lomu čočkou zobrazuje v rovinách kolmých k ose svazku jako **elipsa**, která přechází v bodech Y_m' a Y_s' v **úsečky** a v půlicím bodě úsečky $|Y_m' Y_s'|$ v **kružnici**.
- V místě tohoto kruhového řezu je **svazek nejužší**.

OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Astigmatismus a zklenutí

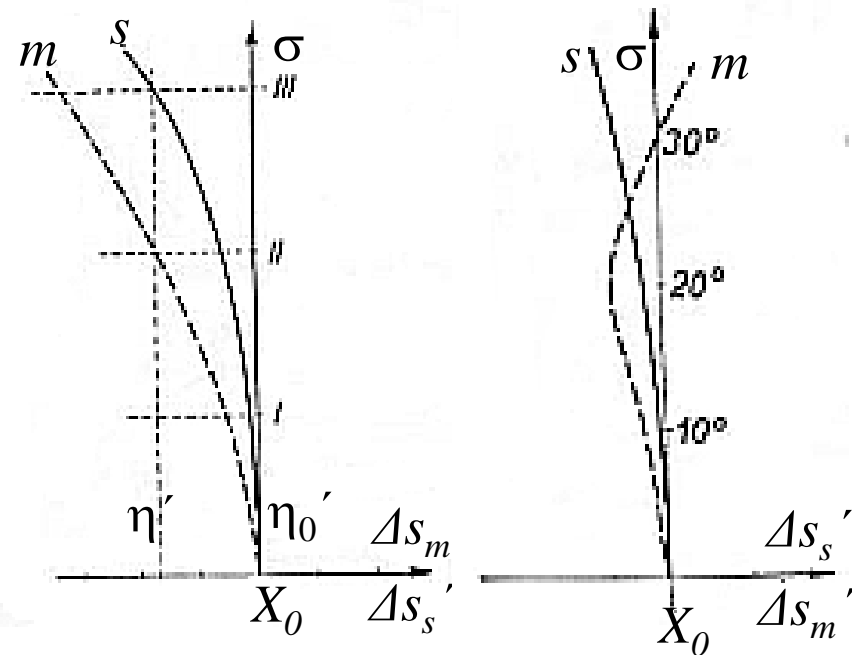


OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Astigmatismus a zklenutí



- Popsaná vada se nazývá **astigmatismus** a vzdálenost bodů $|Y_m' Y_s'|$ **astigmatický rozdíl (astigmatismus)**.
- Vzdálenost bodu Y_m' (Y_s') od paraxiální roviny se nazývá **meridionální (poledníková, tangenciální)** resp. **sagitální zklenutí**, nebo **křivost**.

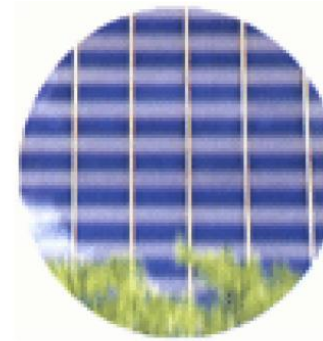
OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Astigmatismus a zklenutí



Zdroj: <http://webfyzika.fsv.cvut.cz/>



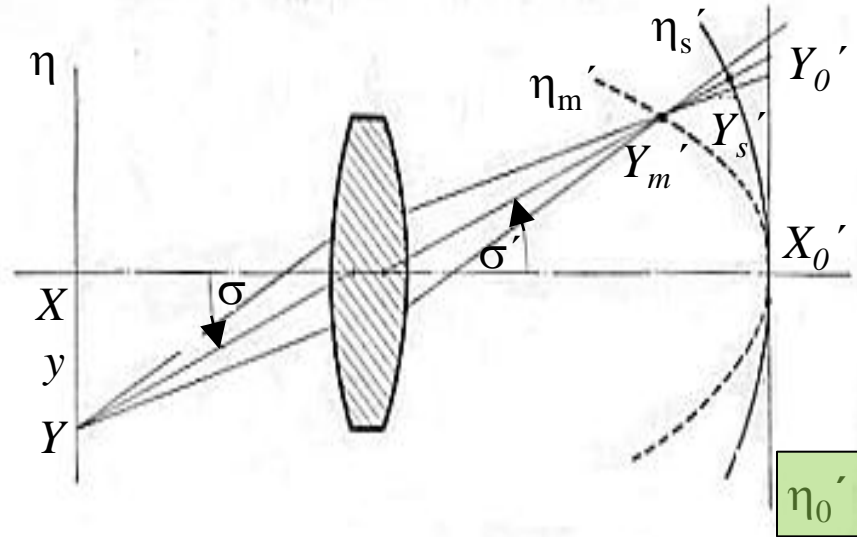
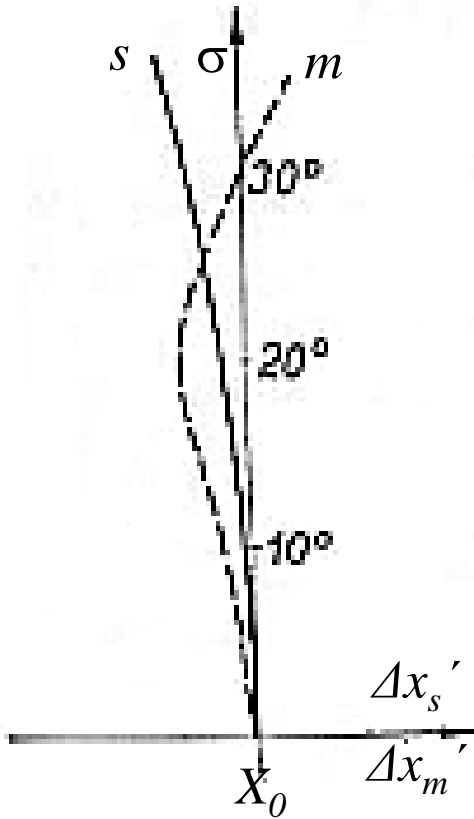
bez astigmatismu



s astigmatismem

- Astigmatismus (podobně jako sférickou vadu) nelze odstranit pro všechny body Y .
- Pomocí soustavy čoček se snažíme potlačit astigmatismus pro okraj zorného pole nebo pro body blízké okraji zorného pole.

OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Astigmatismus a zklenutí

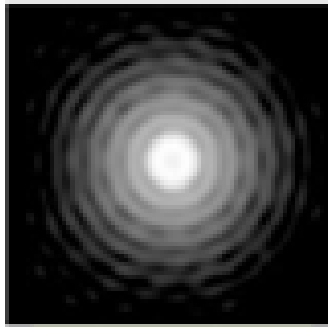


- V tomto případě splývají body Y_m' a Y_s' v jediném bodě Y_{ms}' .
- Je dále žádoucí, aby Y_{ms}' ležel v rovině η_0' nebo alespoň těsně v její blízkosti, čímž je potlačeno zklenutí pole.

- Tím je dosaženo **anastigmatického narovnání pole**, soustava která tento požadavek splňuje je **anastigmatická**.

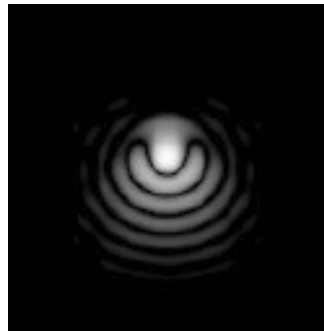
OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Koma

- Při zobrazení mimoosých bodů **širokým svazkem paprsků** ztrácí obraz kruhový tvar charakteristický pro otvorovou vadu.
- Obrazem bodu není bod, ale protáhlá kruhová ploška s nerovnoměrným rozdělením intenzity.

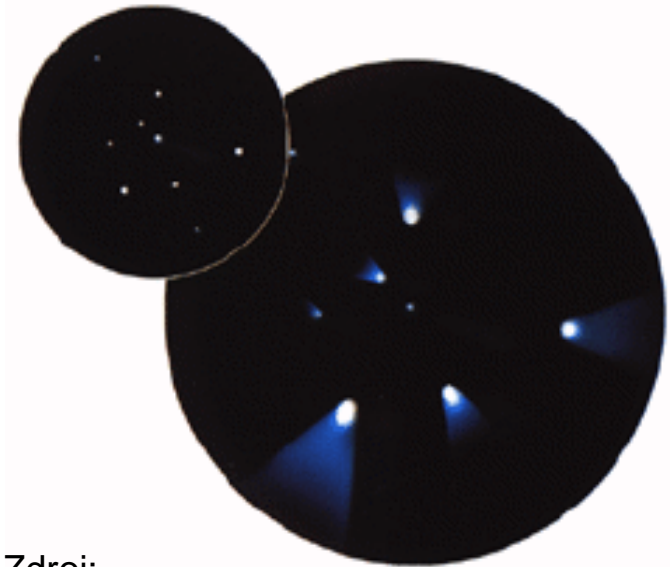


Otvorová vada

Zdroj:
<http://webfyzika.fsv.cvut.cz/>



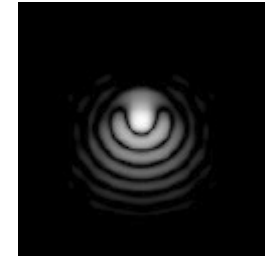
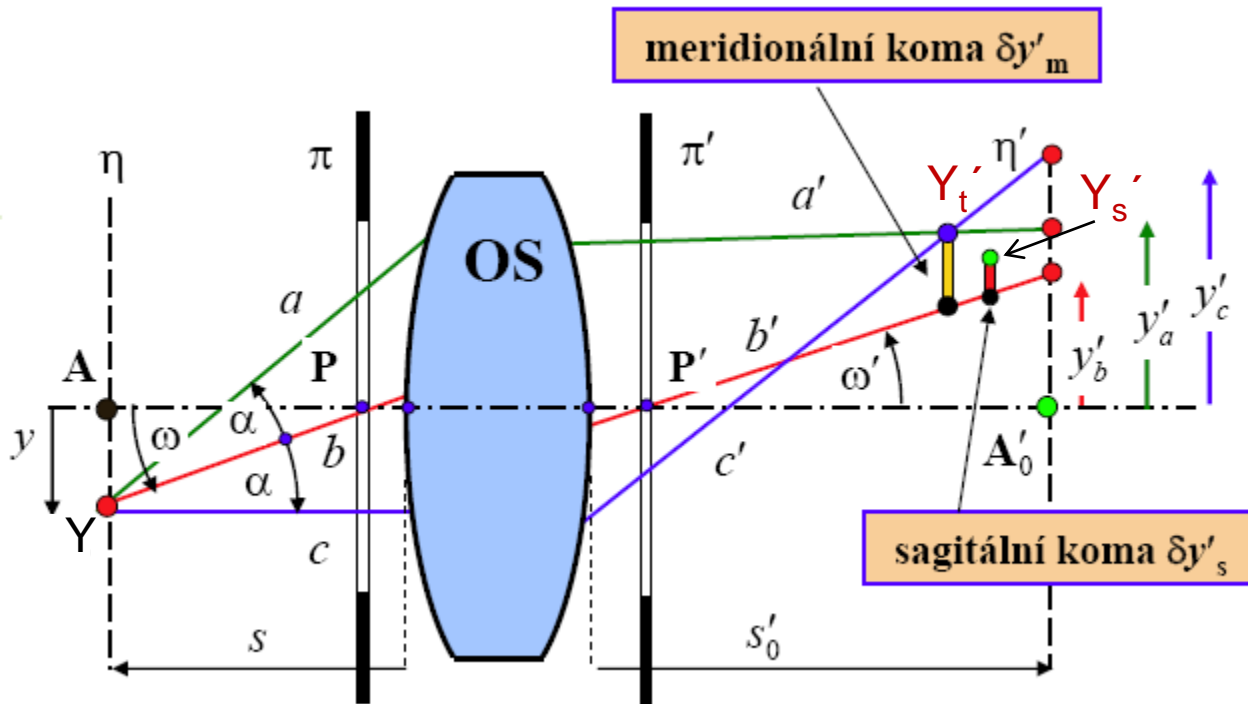
Koma



Zdroj:
http://www.pf.jcu.cz/stru/katedry/fyzika/pr of/Tesar/diplomky/obr_dopl_optika/optika /dalekohledy/poj/coma.gif

- Komu lze potlačit vhodnou volbou soustavy čoček, která se označuje jako **aplanát**.

OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Koma

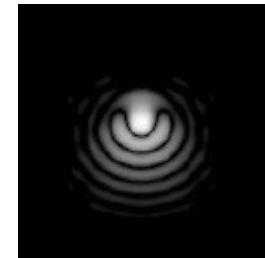
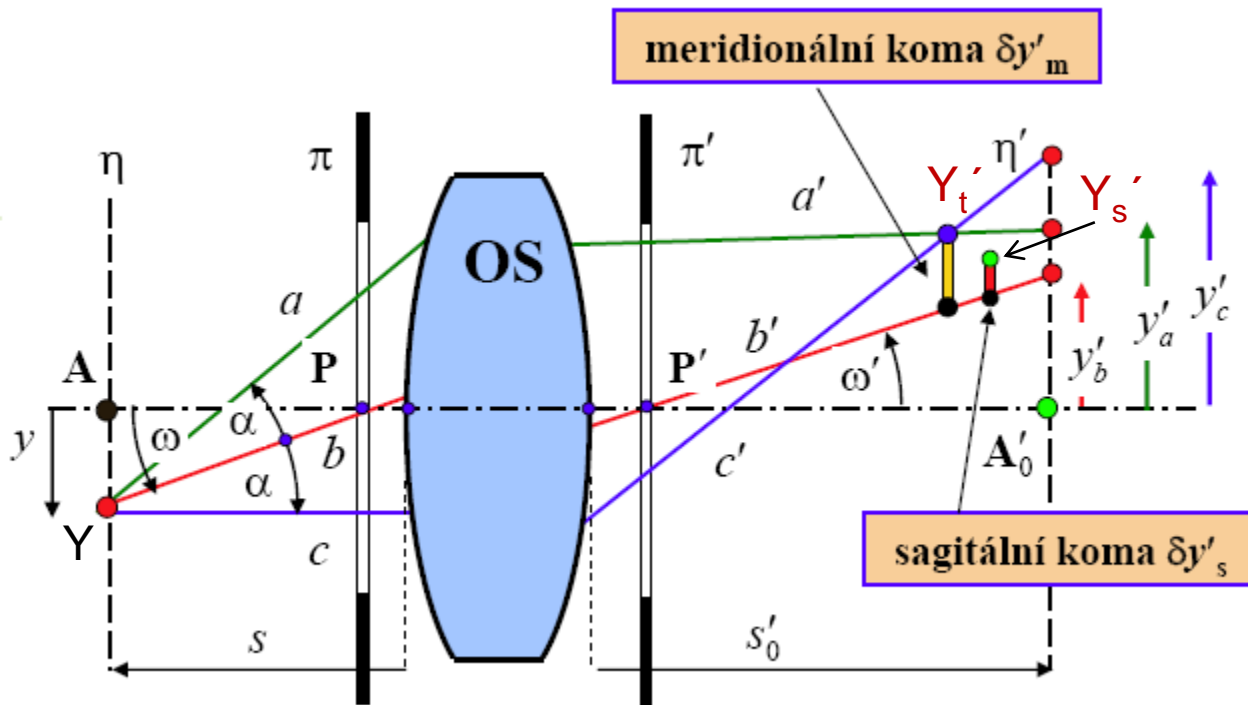


$$\delta y'_m = \frac{y'_a + y'_b}{2} - y'_c$$

Zdroj:
<http://webfyzika.fsv.cvut.cz/>

- Sledujeme zobrazení mimoosového bodu Y širokým svazkem paprsků.
- **Horní** a **dolní** paprsek meridionální roviny se protínají po průchodu čočkou v bodě Y'_t který leží mimo **hlavní paprsek** a obdobně krajové paprsky sagitální se protínají v bodě Y'_s .

OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Koma

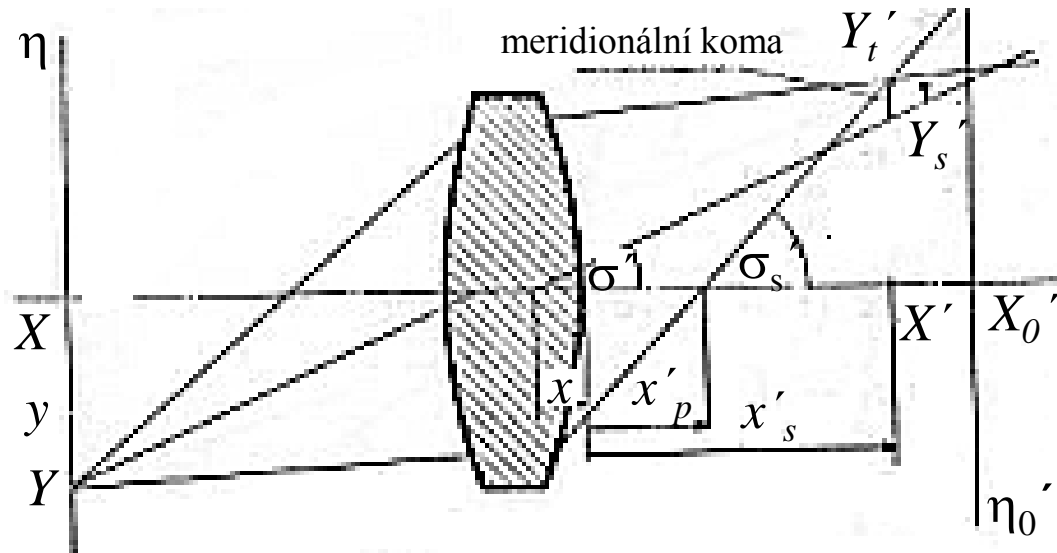


$$\delta y'_m = \frac{y'_a + y'_b}{2} - y'_c$$

Zdroj:
<http://webfyzika.fsv.cvut.cz/>

- Vzdálenost bodu Y_t' (resp. Y_s') od hlavního paprsku, měřená kolmo k optické ose se nazývá **tangenciální (meridionální)** (resp. **sagitální**) koma.

OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Koma - korekce



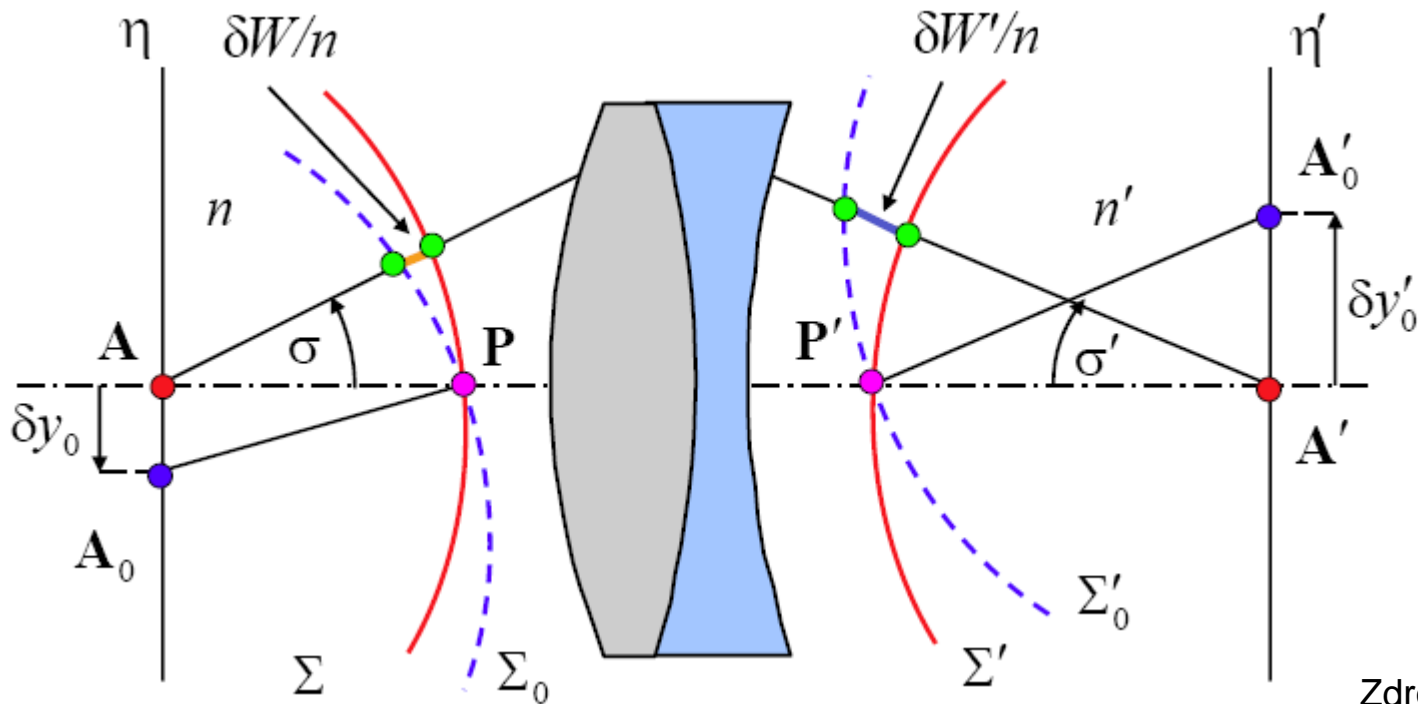
- Snažíme se (vhodnou soustavou čoček) dosáhnout toho, aby body Y_t' a Y_s' **padly na hlavní paprsek nebo v jeho blízkosti**, aby **oba splynuly v jeden bod** a aby se tento bod zobrazil do **paraxiální obrazové roviny η_0'** nebo v její blízkosti.

- V převážné většině případů stačí korigovat komu meridionální, čímž je současně korigována i koma sagitální.

OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Aplanazie a izoplanazie

- Názvy aplanazie a izoplanazie pocházejí z řeckého *planasthai* = bloudit, chybovat a řeckého *a -* = ne a *isos* = stejný.
- **Aplanatická soustava** značí tudíž soustavu oproštěnou optických vad; nejedná se ale o soustavu u níž byly odstraněny všechny vady pro velké zorné pole, ale pro pole v bezprostřední blízkosti optické osy; tedy osové body a body velmi blízké v rovině kolmé k ose jsou zobrazeny stigmaticky.
- **Izoplanatická soustava** je taková, u které je stejná otvorová (sférická) vada osového bodu a blízkého bodu mimoosového.

OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Abbeova sinová podmínka



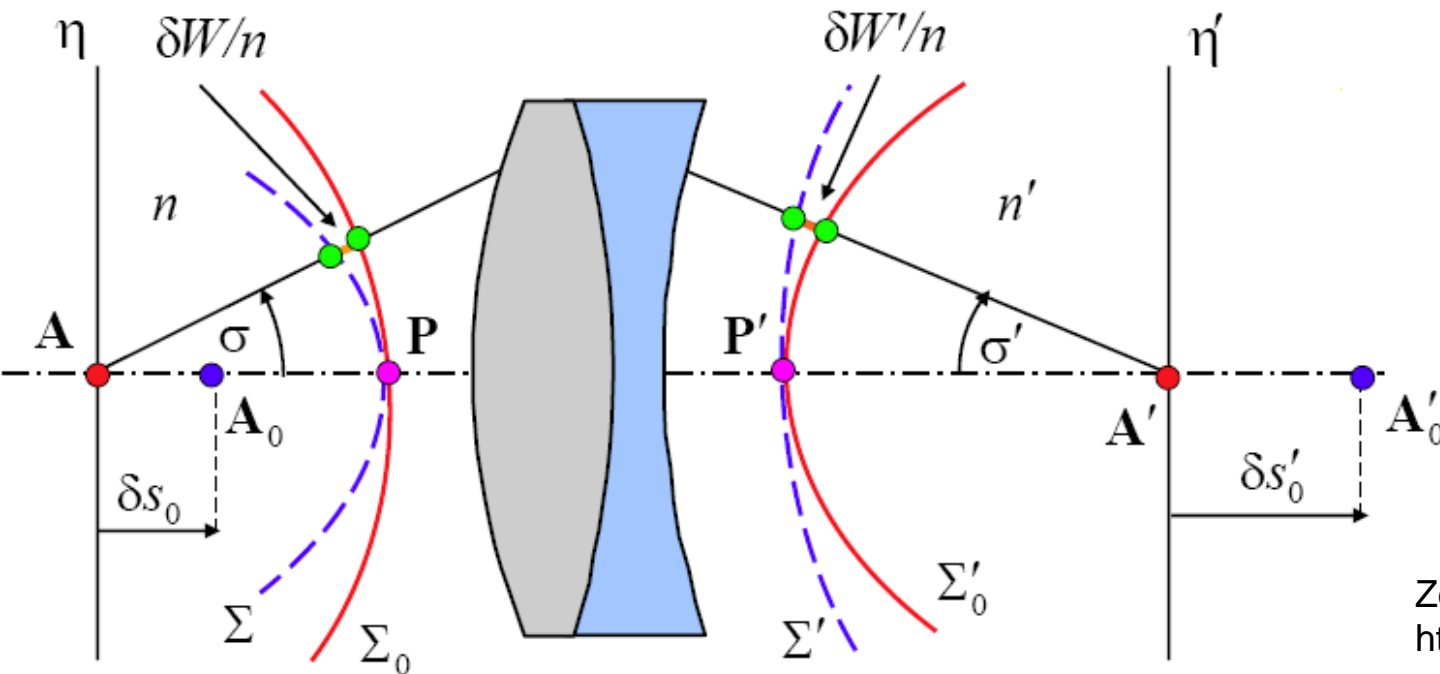
Zdroj:

<http://webfyzika.fsv.cvut.cz/>

- Podmínka, která musí být splněna aby se **dvojice blízkých bodů, ležících meridionální rovině** se zobrazila ostře, tj. bod jako bod.

$$\frac{dW}{n} = \frac{dW'}{n'} \rightarrow n \delta y_0 \sin \sigma = n' \delta y'_0 \sin \sigma' \rightarrow \beta = \frac{\delta y'_0}{\delta y_0} = \frac{n \sin \sigma}{n' \sin \sigma'}$$

OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Herschelova podmínka



Zdroj:
<http://webfyzika.fsv.cvut.cz/>

- Podmínka, která musí být splněna aby se **dvojice blízkých bodů, ležících na ose optického systému** se zobrazila ostře, tj. bod jako bod.

$$\frac{dW}{n} = \frac{dW'}{n'} \rightarrow n\delta s_0 (1 - \cos\sigma) = n'\delta s'_0 (1 - \cos\sigma') \rightarrow \alpha = \frac{\delta s'_0}{\delta s_0} = \frac{n'}{n} \beta^2 = \frac{n \sin^2(\sigma/2)}{n' \sin^2(\sigma'/2)} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow \beta = \frac{n \sin(\sigma/2)}{n' \sin(\sigma'/2)}$$

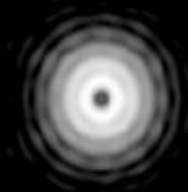
Vady monochromatické

Základní aberace optických soustav

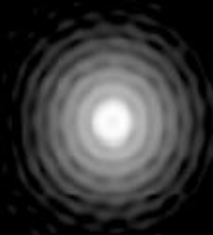
obraz bodu



bez aberací



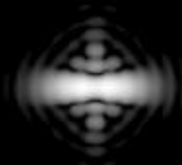
defokusace



otvorová vada



zklenutí



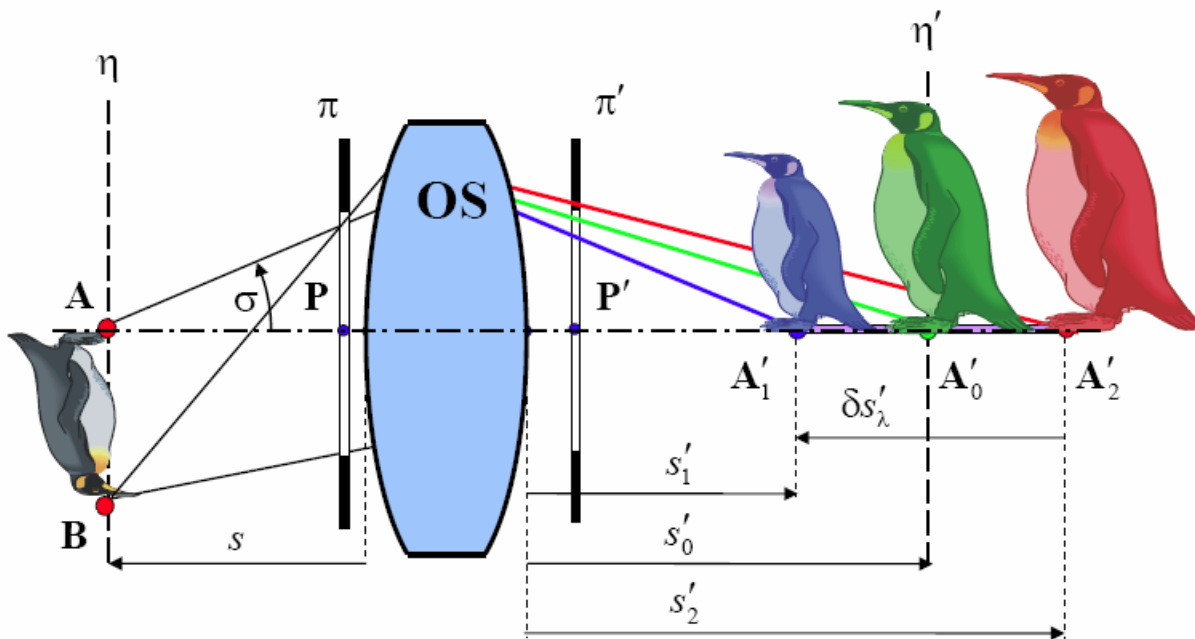
koma



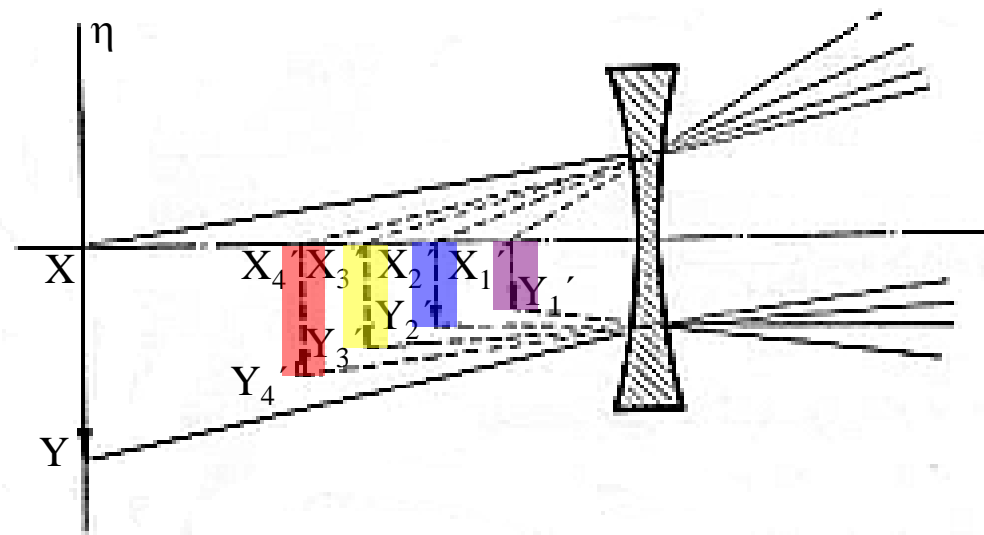
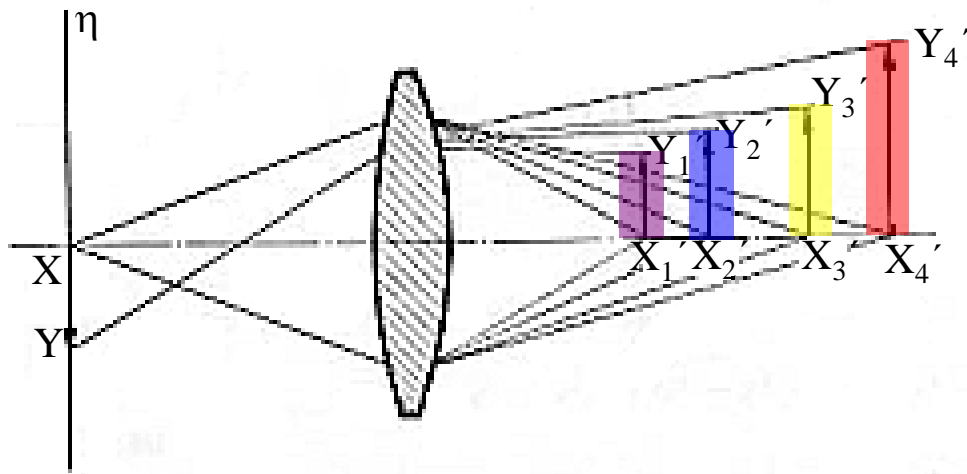
koma

OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Barevná vada

- V převážné většině případů zobrazovací systém zobrazuje světlo složené (bílé) tak, že vytvoří tolik obrazů, kolik složek zobrazené světlo obsahuje.
- Obraz pro každou složku se vytvoří na jiném místě a má jinou velikost – zobrazovací systém má **barevnou vadu polohy a velikosti**.

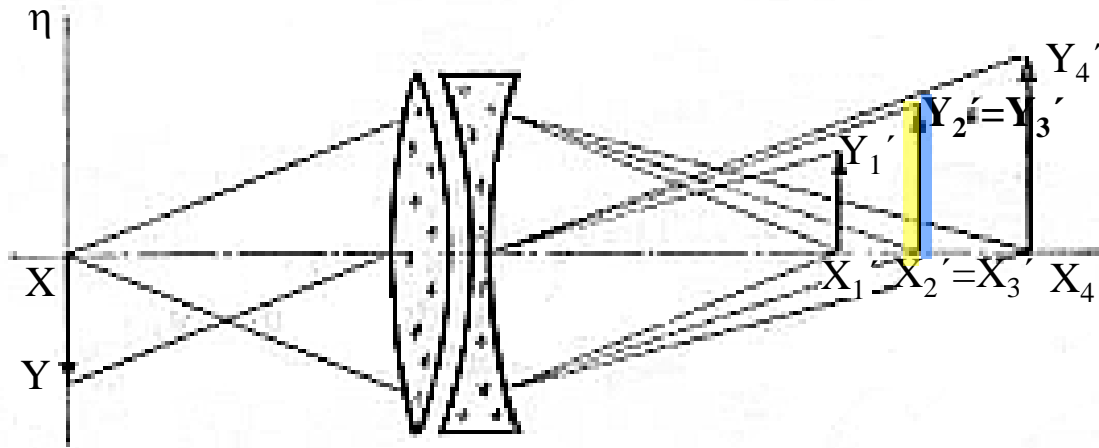


OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Barevná vada



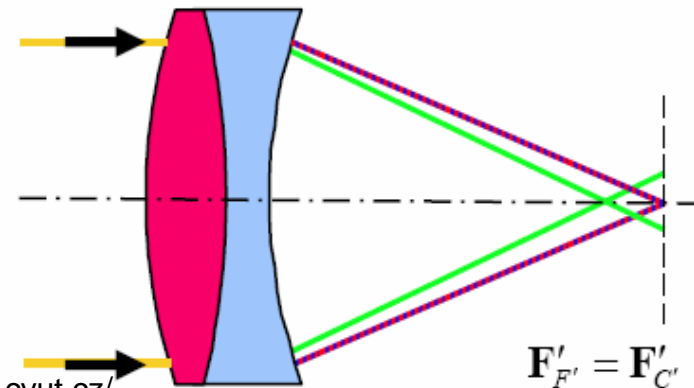
- Zobrazení světlem fialovým, modrým, žlutým a červeným v případě spojky a rozptylky.

OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV - Barevná vada – Achromatická soustava



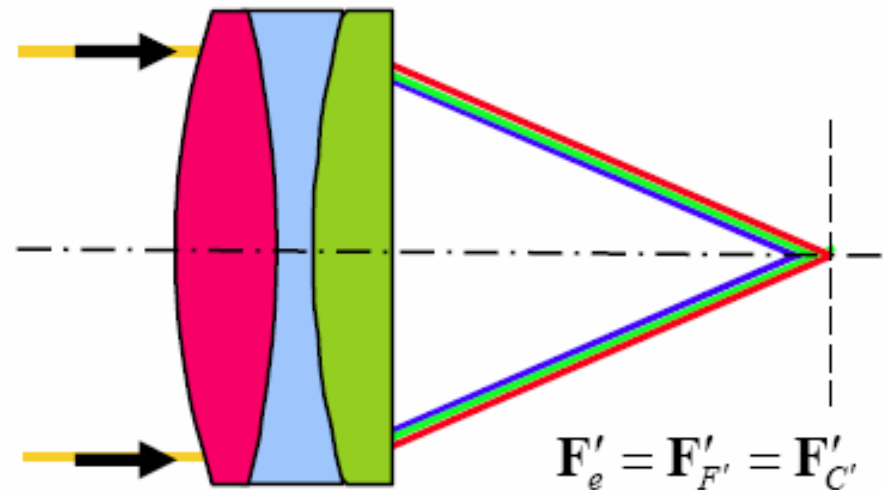
- Vhodnou soustavou spojek a rozptylek lze dosáhnout stejné polohy a velikosti obrazu pro dvě barevné složky. Taková soustava se nazývá **achromatická**.

- Na obrázku je achromatická soustava (pro **žlutou** a **modrou** složku).
- Úchylky pro jiné barvy světla nazýváme **sekundární barevnou vadou**.
- Achromatická soustava pro fialovou a červenou složku:

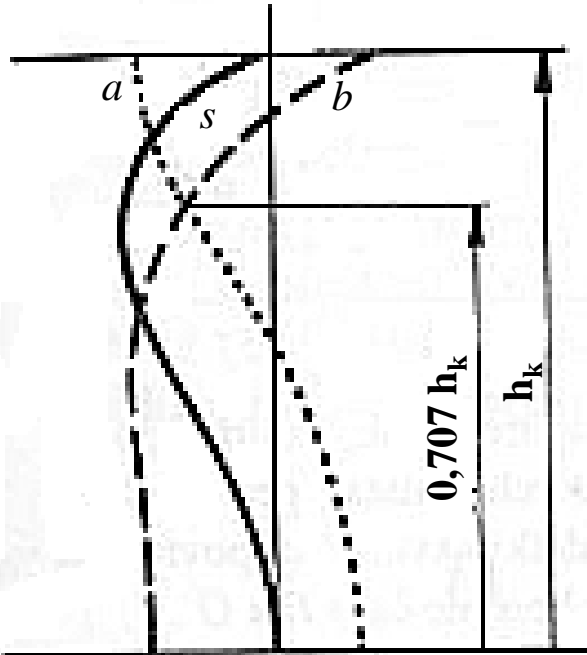


OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV - Barevná vada – Achromatická soustava

- Vlnové délky světla, pro něž musí být dosaženo achromazie, volíme podle účelu, jakému má optická soustava sloužit. U optických systémů pro vizuální pozorování (dalekohledy, puškohledy) volíme vlnové délky světla odpovídající Fraunhoferovým čarám **C** a **F**, pro fotografování čáry **D'** a **G**.
- Sekundární barevná vada se projevuje většinou jenom u velikého zvětšení, např. objektivy mikroskopů. V těchto případech je nutné provést korekce pro tři (nebo čtyři a více) složky bílého světla – soustava **apochromatická** (resp. **superapochromatická**).



OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV



- Průběh barevné vady polohy je nejlépe patrný z grafického znázornění otvorové vady obou světél o vlnových délkách λ_1 a λ_2 (a a b) ve spojení s grafem pro otvorové vady pro základní světlo (s) je zároveň umožněno posouzení sekundární barevné vady.

OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV - Opravy vad objektivů v PC – Barevná vada

- Jednou z nejčastěji viditelných vad je barevná vada neboli chromatická aberace. Projevuje se na hranách s vysokým kontrastem a je zřetelnější na okrajích snímku. Její typický projev jsou fialové či jinak barevné kontury, které začnou silně rušit zejména v případě kdy snímek zvětšujete alespoň na formát 13x18 cm.
- Barevná vada je fyzikálním produktem lomu světla a žádný objektiv není proti ní 100% odolný. Drahé objektivy ji dokáží částečně kompenzovat, ale stejně jen v úzkém rozsahu zoomu. A tak barevnou vadu snadno najdete zejména u superzoomů (více než 5x) a je daní za široký a pohodlný rozsah ohnisek. Obvykle se nejvíc projevívá na okrajích zoom rozsahu.

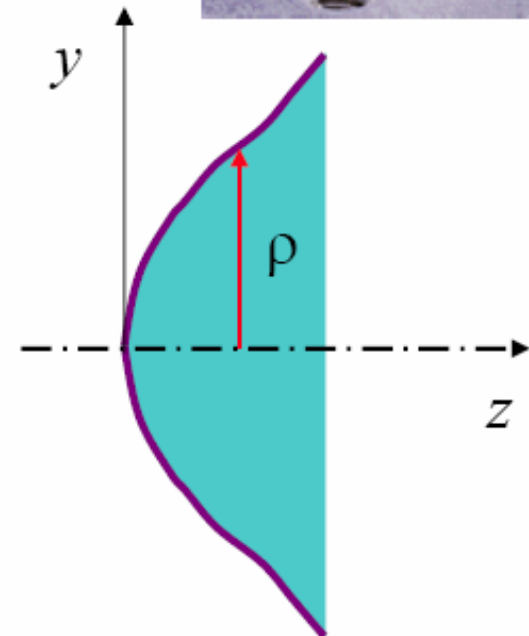
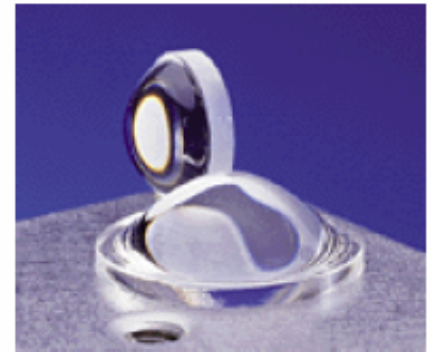
OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Asférické optické plochy

✚ pro konstrukci mnohých optických soustav se využívají **asférické lámavé a odrazné plochy**, které umožňují efektivněji korigovat aberace optických soustav

rotačně symetrická asférická
plocha

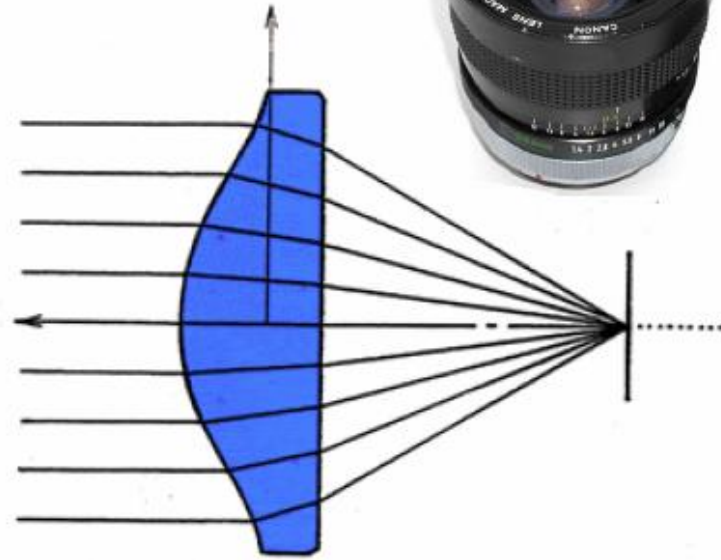
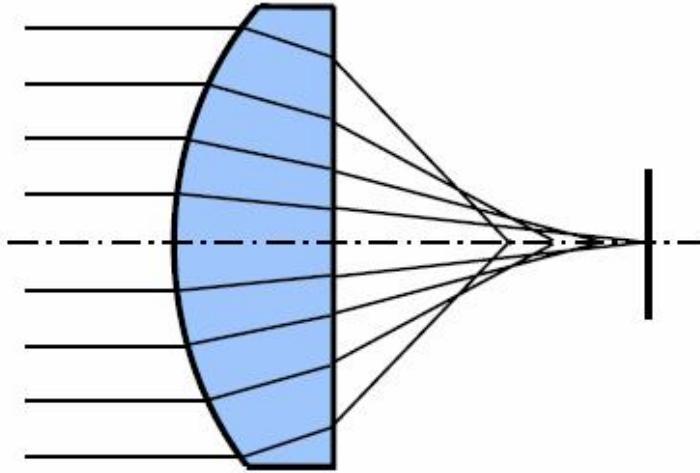
$$\rho = \sqrt{x^2 + y^2} \quad c = 1/r$$

$$z = \frac{c\rho}{1 + \sqrt{1 - (1+k)c^2\rho^2}} + a_2\rho^2 + a_4\rho^4 + a_6\rho^6 + \dots$$



OPTICKÉ VADY ZOBRAZOVACÍCH SOUSTAV – Asférické optické plochy

Asférické optické plochy

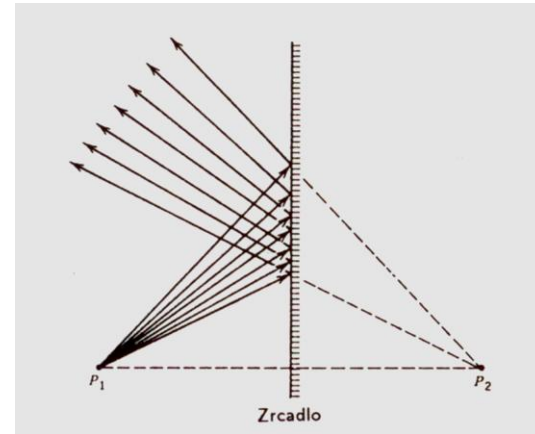
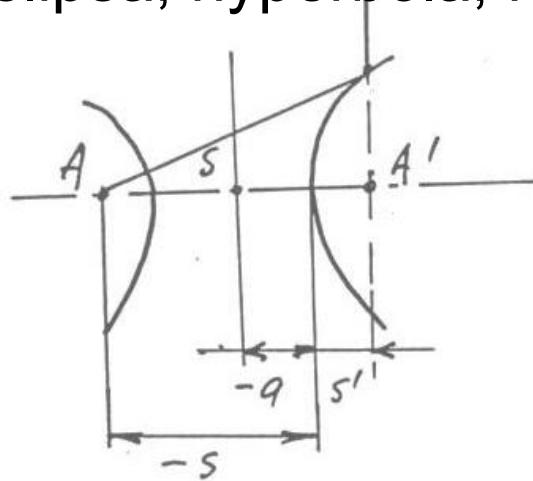
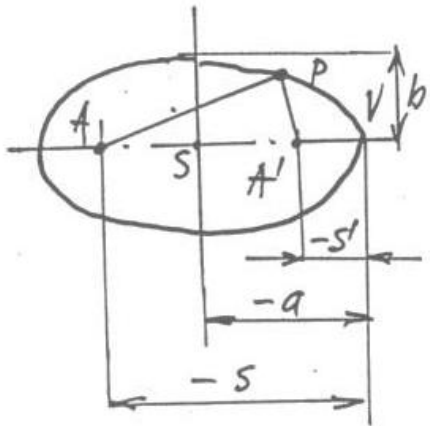


**použitím asférických ploch lze
dosáhnout větší kompaktnosti a
jednoduchosti optických soustav s
korigovanými vadami**



Vady zobrazovacích soustav – Bezaberační odrazná a lomová plocha

Odrážná plocha: elipsa, hyperbola, rovina



Bezaberační lomová plocha – 4 typy aplanatických čoček

