

Geometrická optika a fotoaparát, prakticky

Šárka Němcová

s částečným využitím podkladů prof. Václava Hlaváče

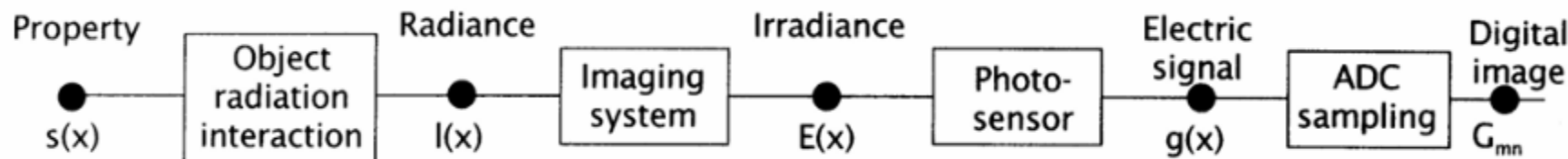
Prerekvizita: přednáška Pořízení obrazu.

Osnova přednášky:

- Motivace, objektiv fotoaparátu.
- Proč jsou potřebné čočky?
- Jednoduchý model, geom. optika.
- Hloubka pole a ostrosti.
- Objektivy. Optické vady objektivů.
- Kamera, pořízení obrazu.
- Radiometrie – v předmětu Optoelektronika

Celý zobrazovací řetěz, přehled

Pohled na celek: od pozorované vlastnosti přes zář (L) a ozáření (E) k elektrickému signálu a nakonec k digitálnímu obrazu.



Dvě možnosti pořízení obrazu:

- Přímé zobrazování – existuje jednoznačná korespondence mezi bodem ve 3D scéně a jeho 2D obrazem (pomocí optického systému - objektivu).
- Nepřímé zobrazování – také poskytují prostorově závislou zář, ale bez jednoznačné korespondence mezi 3D a 2D (prostřednictvím jiného systému, např. radar, tomografie)

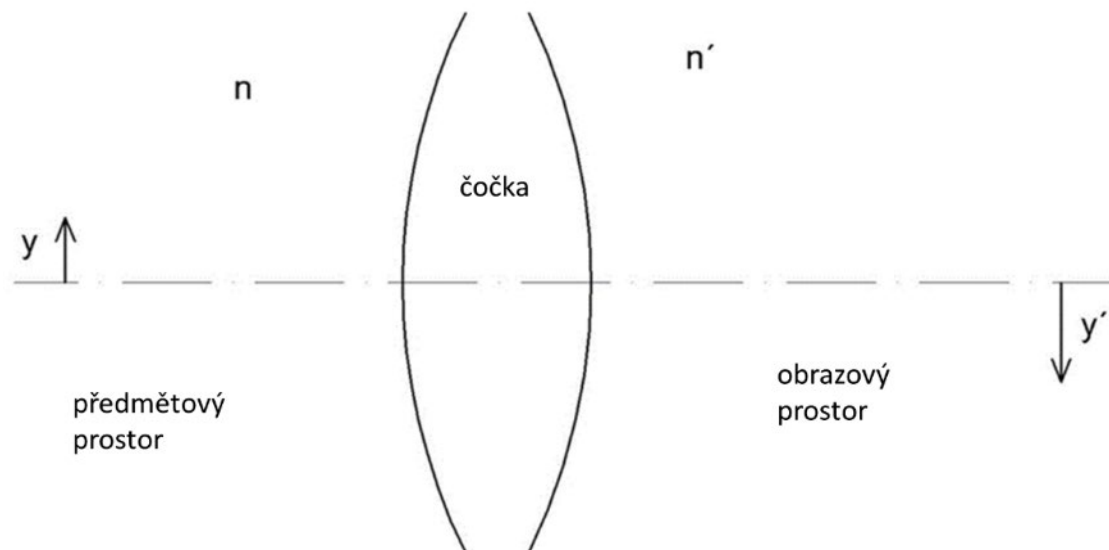
Fotoaparát

princip:

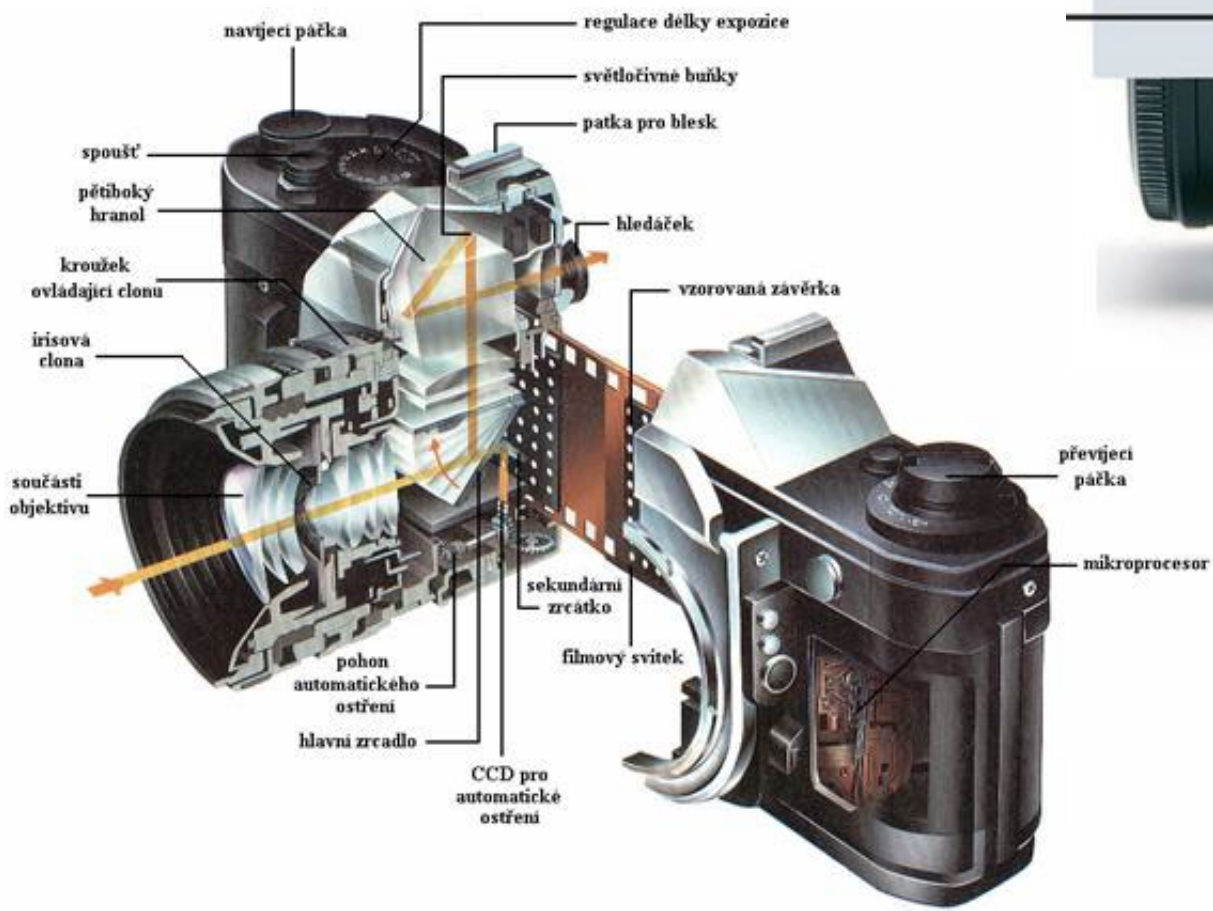
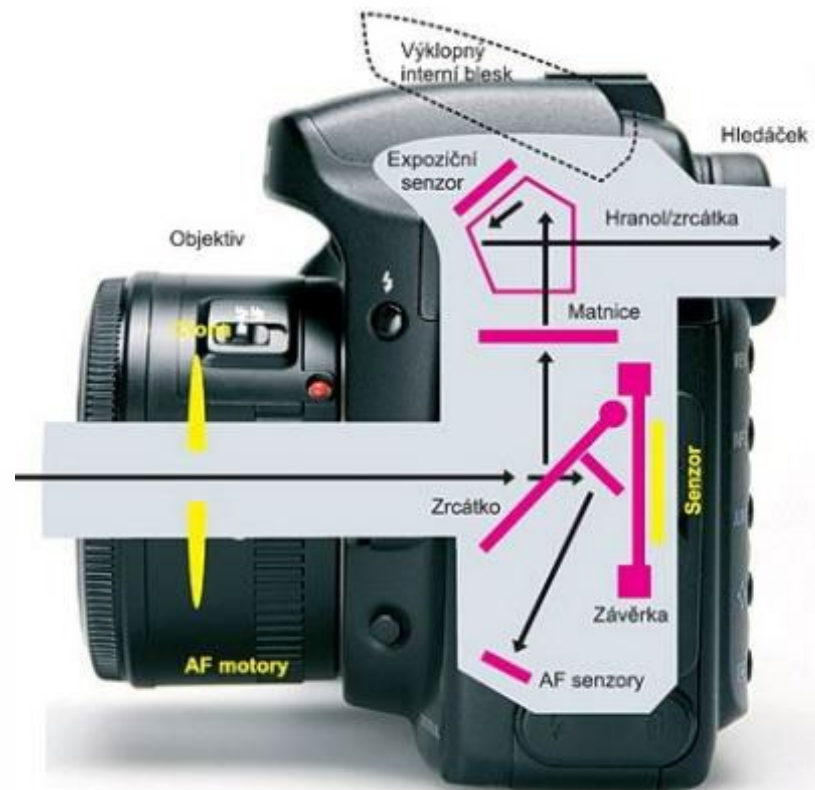
vytvoření reálného obrazu v obrazovém prostoru
zachycení obrazu na senzoru
pevná poloha senzoru
zaostřování pohybem objektivu (celého nebo části)

části:

objektiv
hledáček
závěrka
senzor + elektronika
clona
tělo
autofokus
displej



DSLR = digital single lens reflex

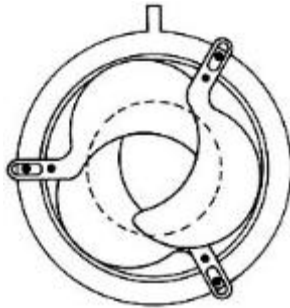


Vylepšující části/funkce fotoaparátu

- Automatická expozice, tj. společné nastavení clony a rychlosti závěrky.
- Automatické zaostřování. Otázka: Jaké fyzikální principy se zde používají?
- Stabilizace obrazu proti otřesům ruky.
- Vestavěný blesk.
- Schopnost zaznamenat video sekvenci.
- Nastavitelné rozlišení obrazu a jeho komprese.
- Zaznamenávání obrazu v módu RAW.
- Fotoaparát má v sobě procesor, který realizuje základní operace zpracování/analýzy obrazu, např. detekci obličejů pro automatickou volbu bodů pro automatické zaostření.

Závěrka

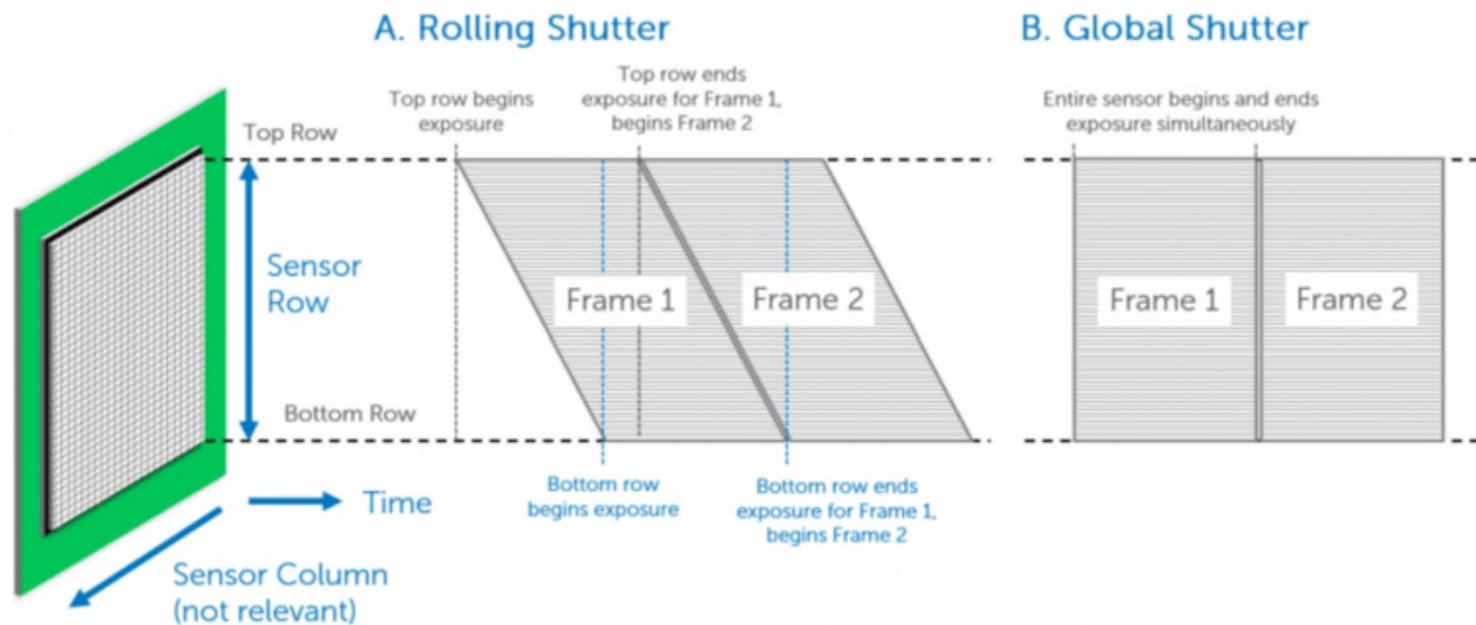
centrální



Ovládání závěrky:

1. mechanicky
2. electromechanicky
3. elektronická závěrka

štěrbinová (posuvná, rolling shutter)



Závěrka - efekty

Global Shutter



Rolling Shutter



Motion Blur

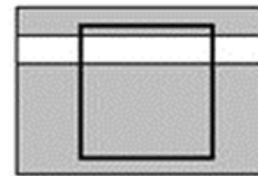
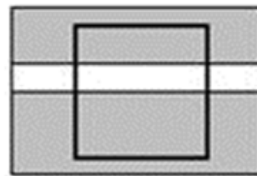
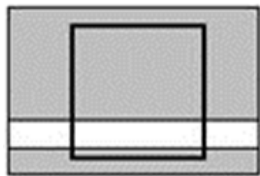


Rolling Shutter

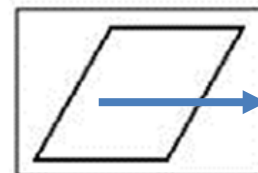
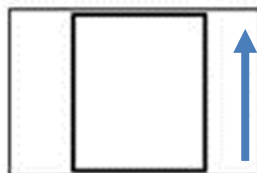
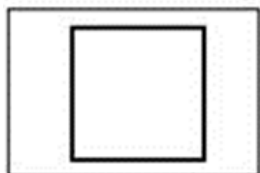


Global Shutter

při snímání pohybujícího se objektu je zkreslení ovlivněno vzájemným směrem pohybu objektu a závěrky
(jak je to u prostředního obrázku?)

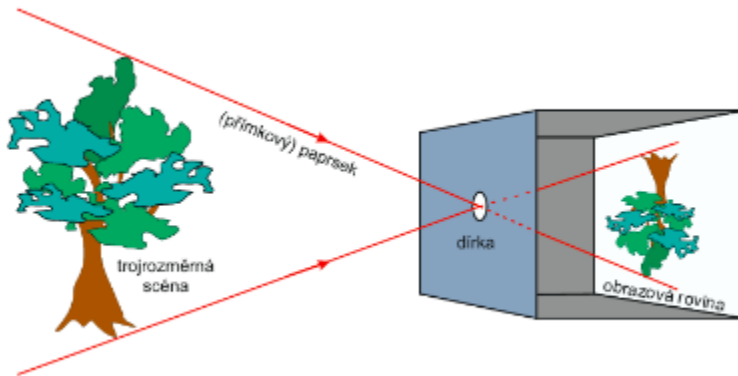


směr pohybu
závěrky

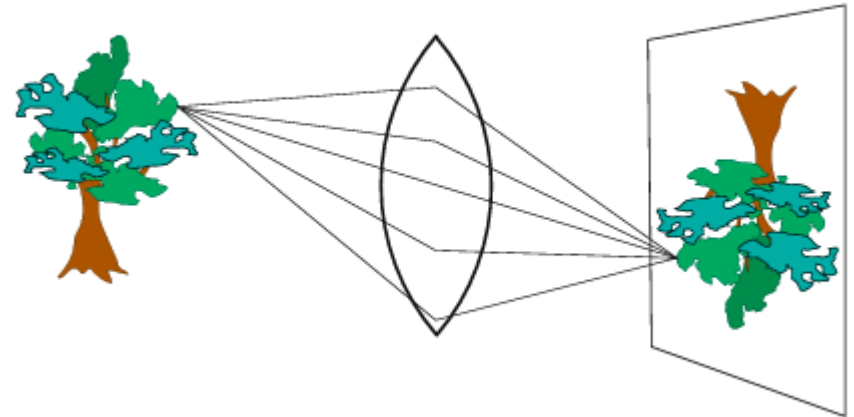


směr pohybu
předmětu

Dírková komora vs. kamera



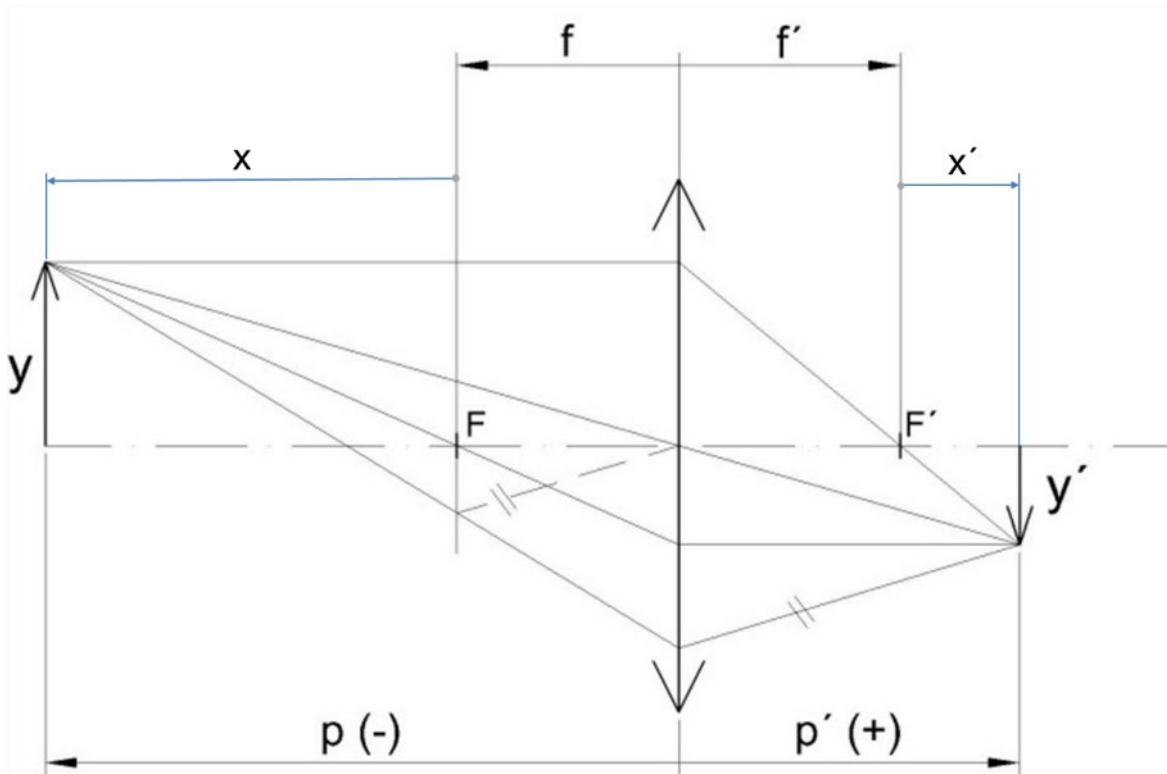
ideální zobrazení, pokud
z každého bodu předmětu
projde jen „jeden paprsek“ =>
málo světla, potíže s ohybem



- ✓ sbírá světlo
z větších úhlů a
přitom stále vytváří
ostrý obraz
- X nutno ostřit
- X optické vady

Zobrazení tenkou čočkou

- paraxiální prostor (blízko optické osy, malé úhly) = ideální zobrazení
- $\sin \alpha \cong \alpha$
- znaménková konvence (kartézský systém)
- vztažné body: čočka (p, p') nebo ohniska (f, f')
- čočka definována jednou rovinou



čočková rovnice

$$\frac{1}{p'} - \frac{1}{p} = \frac{1}{f'}$$

Newtonova rovnice

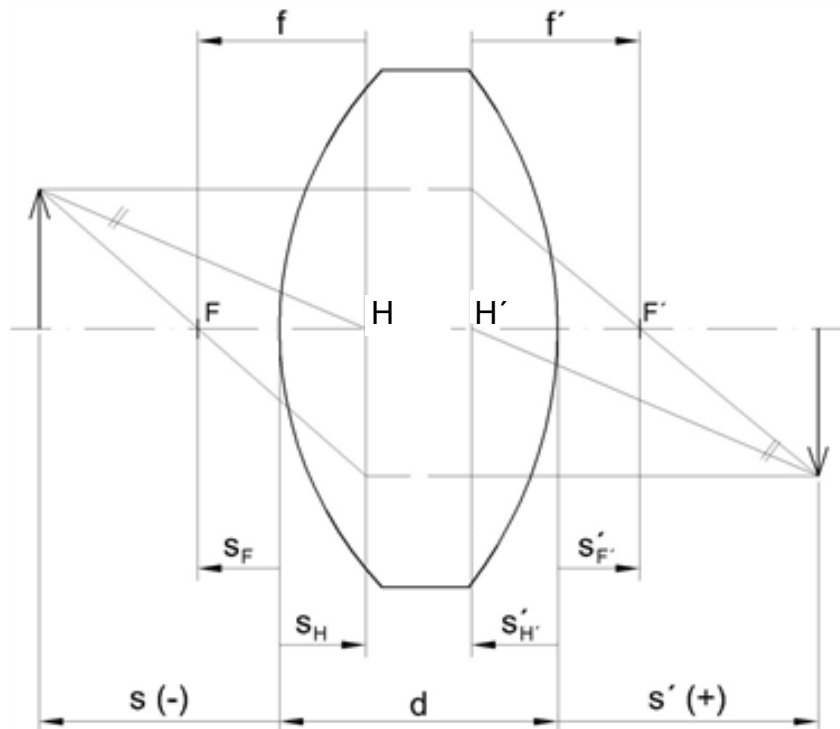
$$x \cdot x' = f \cdot f' = -f'^2$$

příčné zvětšení

$$\beta = \frac{y'}{y} = \frac{p'}{p} = -\frac{f}{x} = -\frac{x'}{f'}$$

Zobrazení tlustou čočkou

- paraxiální prostor, $\sin \alpha \cong \alpha$, znaménková konvence
- čočka (objektiv, optický systém) definována hlavními rovinami
- trasování paprsků: paprsek se neláme na jednotlivých plochách čoček, ale (virtuálně) na hlavních rovinách; mezi hlavními rovinami rovnoběžný chod
- vztažné body: hlavní body (H, H')



tlustá čočka vznikne
z tenké odsunutím
hlavních rovin od sebe

pro neznámý optický systém
(poloměry, tloušťky, materiál) lze
stále použít Newtonovu rovnici

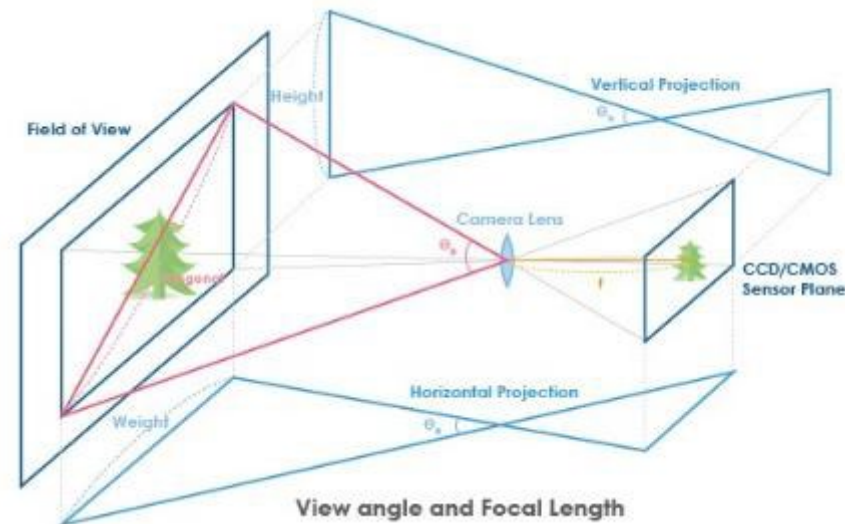
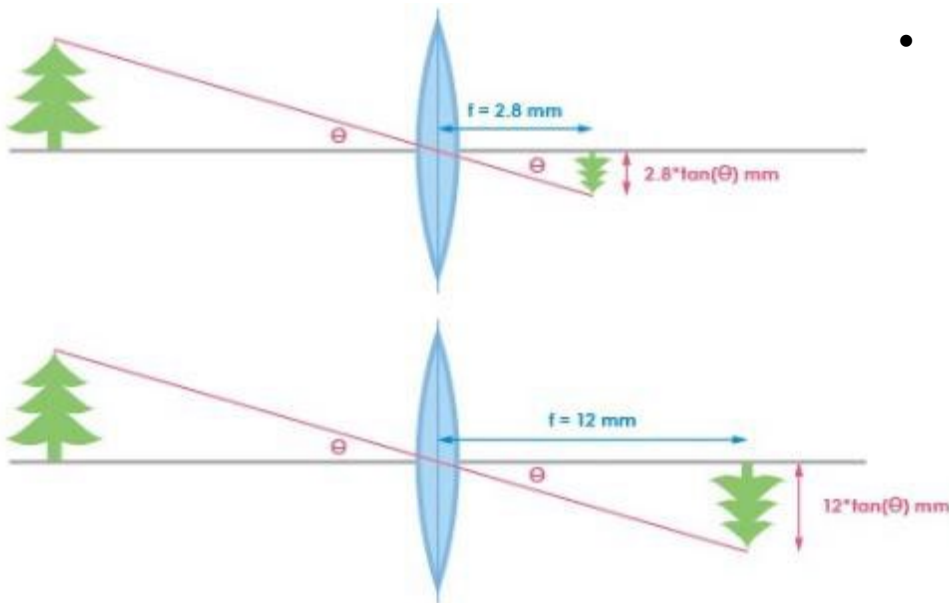
$$x \cdot x' = f \cdot f' = -f'^2$$

Zobrazení kamerou

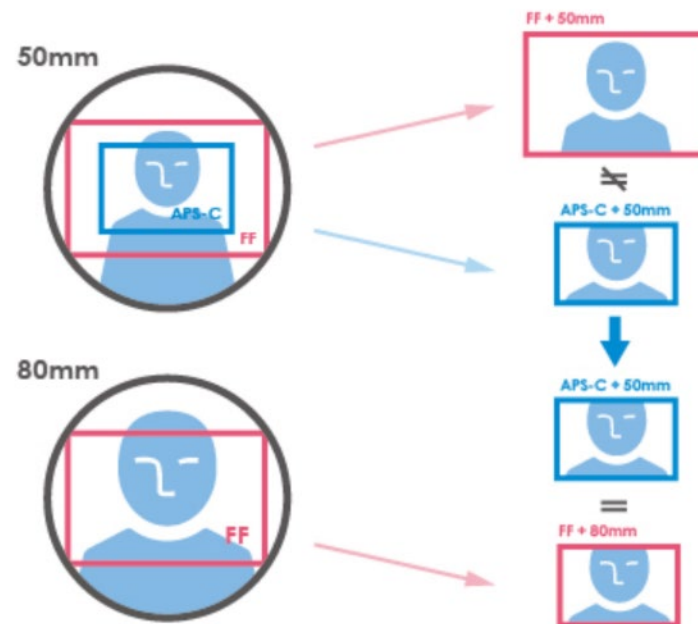
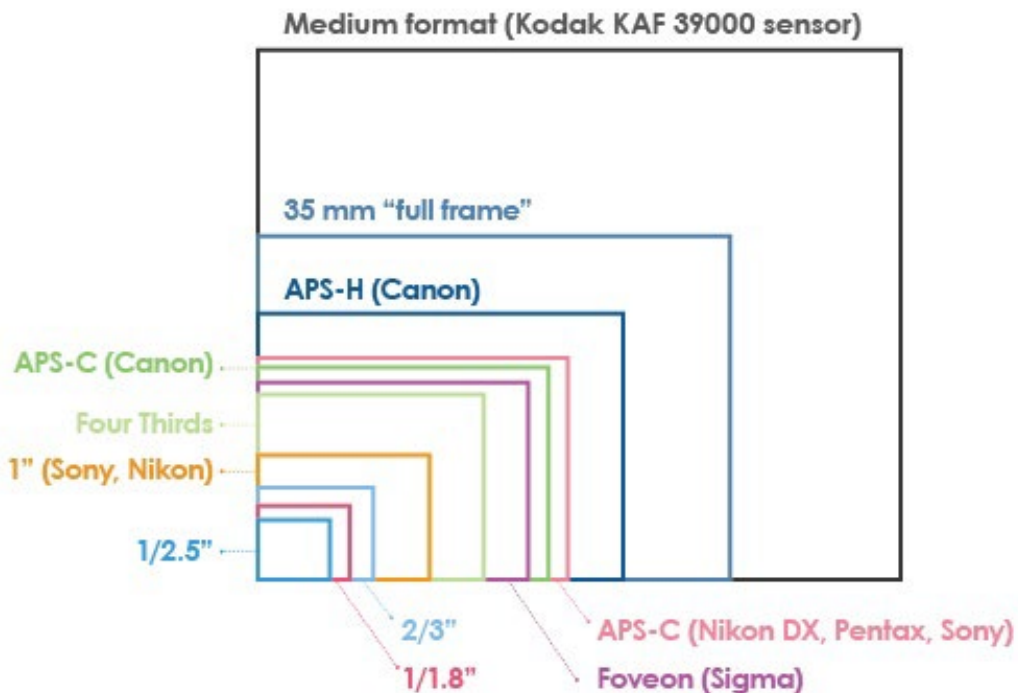
zorné pole (FOV) je výsledkem kombinace ohniskové vzdálenosti objektivu a velikosti senzoru

při daném objektivu s f' a vzdálenosti předmětu p je daná obrazová vzdálenost p' (čočková rovnice)

- pro zachování úhlového zorného pole AFOV (Θ) je pro různé velikosti senzoru potřeba vybrat různé objektivy (f')
- jiné AFOV vertikálně a horizontálně



FOV, f'_{ekv} a crop faktor



kamera Vivotek FD9365	ekvivalentní f'
FOV	120° ~ 46°
@1/2" sensor (physical)	4 ~ 9 mm
@1/2.7" sensor (equivalent)	3 ~ 12 mm
@1/2.8" sensor (equivalent)	2.8 ~ 11.4 mm
@1/3" sensor (equivalent)	2.7 ~ 10.8 mm

<https://www.vivotek.com/en-US/resource/learning/blog/23>

Vliv AFOV



AFOV = 60°

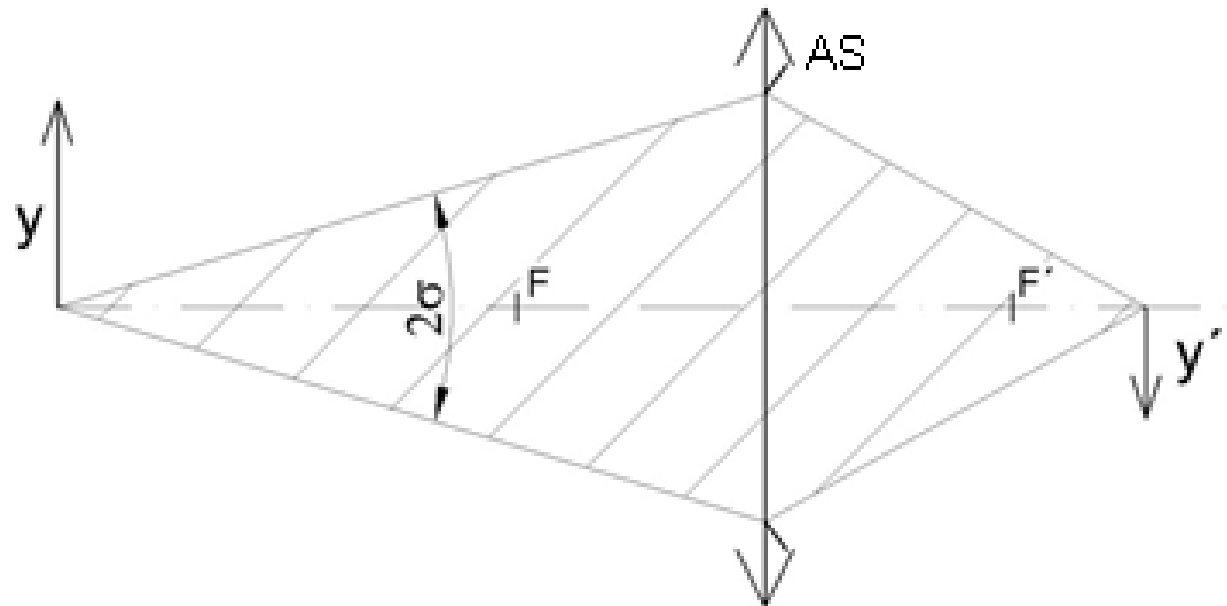
AFOV = 100°

Clony a pupily

Aperturní clona (AS)

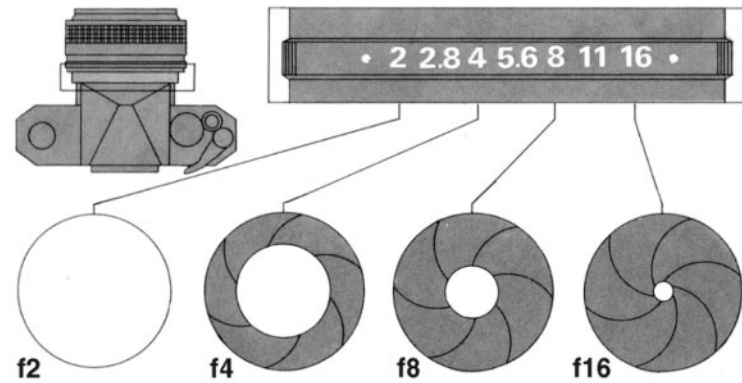
omezuje průměr soustavy, a tím:

- určuje aperturní úhel 2σ
- ovlivňuje osvětlení obrazu
- určuje rozlišení
- ovlivňuje hloubku ostroty



Clonové číslo (F/#)

$$F/\# = \frac{f'}{\varnothing D}$$



clonová čísla: geom. řada s
 $q = \sqrt{2}$

zvýšení o 1 clonové číslo →
poloviční množství světla



f2.8



f8



f22

soustava s malým F/#

- paprsky procházejí pod velkými úhly
- sbírá více světla a soustřeďuje ho do menšího bodu
- „rychlá“ soustava (stačí krátké expoziční časy)
- malá hloubka ostrosti
- vyšší rozlišení

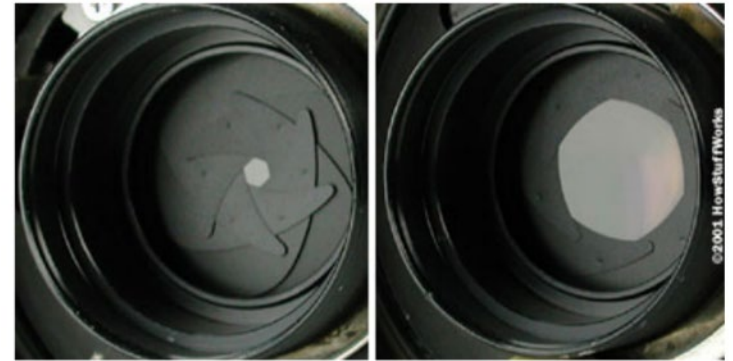
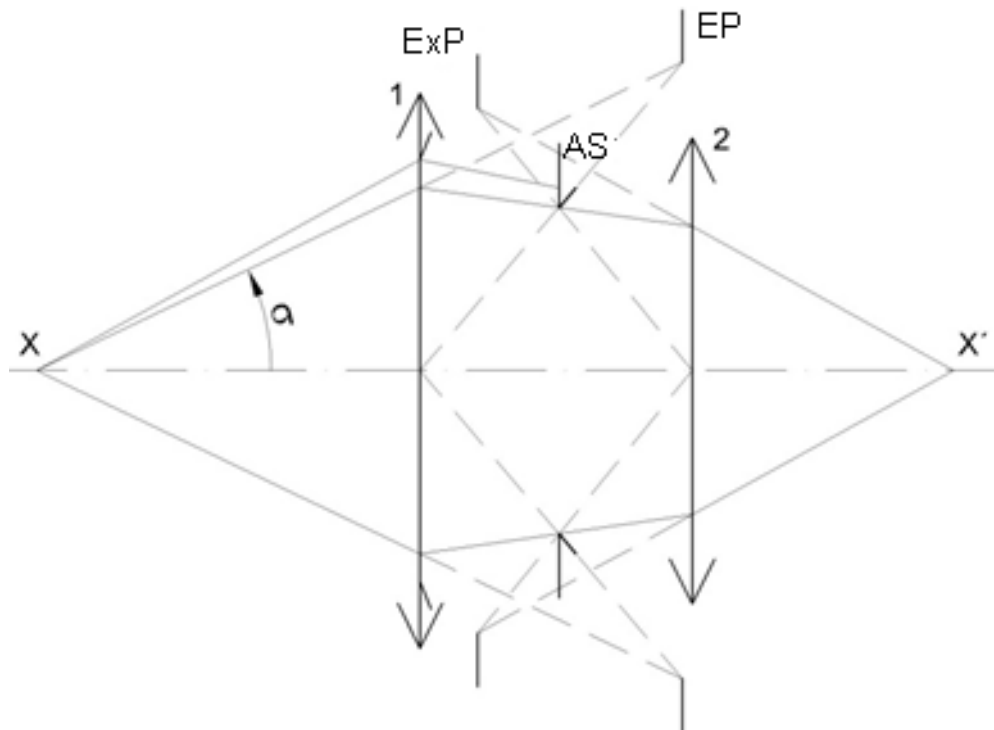
soustava s velkým F/#

- procházejí jen paprsky pod malými úhly
- sbírá méně světla
- „pomalá“ soustava
- velká hloubka ostrosti
- nižší rozlišení

Vstupní a výstupní pupila (EP, ExP)

aperturní clona je v objektivu kamery fyzická clona (irisová)

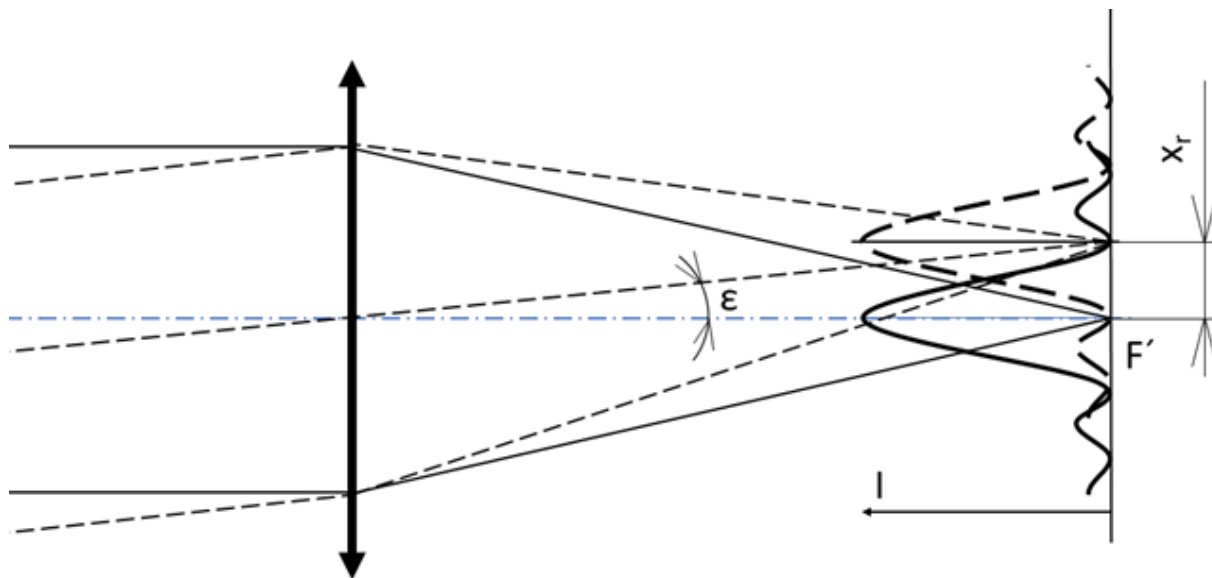
$$F/\# = \frac{f'}{\phi_{EP}}$$



EP vstupní pupila – obraz aperturní clony do předmětového prostoru („klíčová dírka pro předmět“)

ExP výstupní pupila – obraz aperturní clony do obrazového prostoru („klíčová dírka pro senzor“)

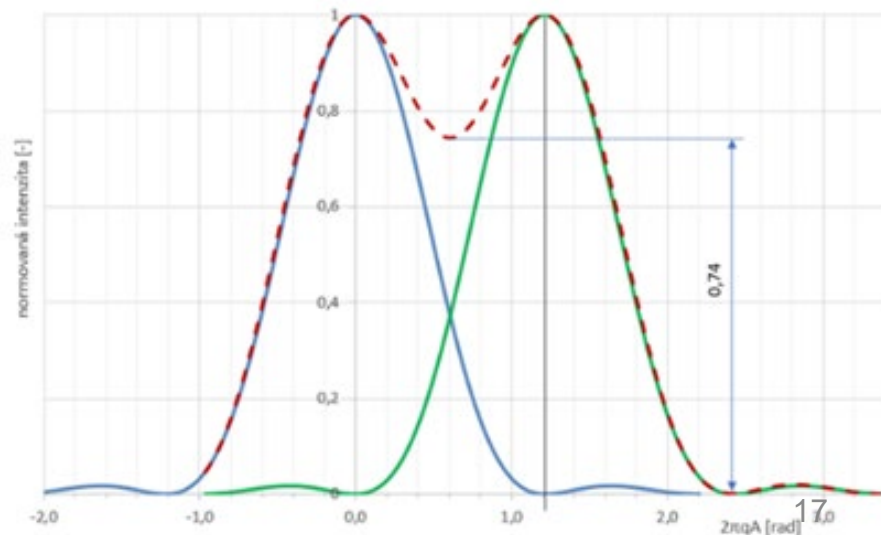
Rozlišení



$$\varepsilon = \frac{1,22\lambda}{D}$$

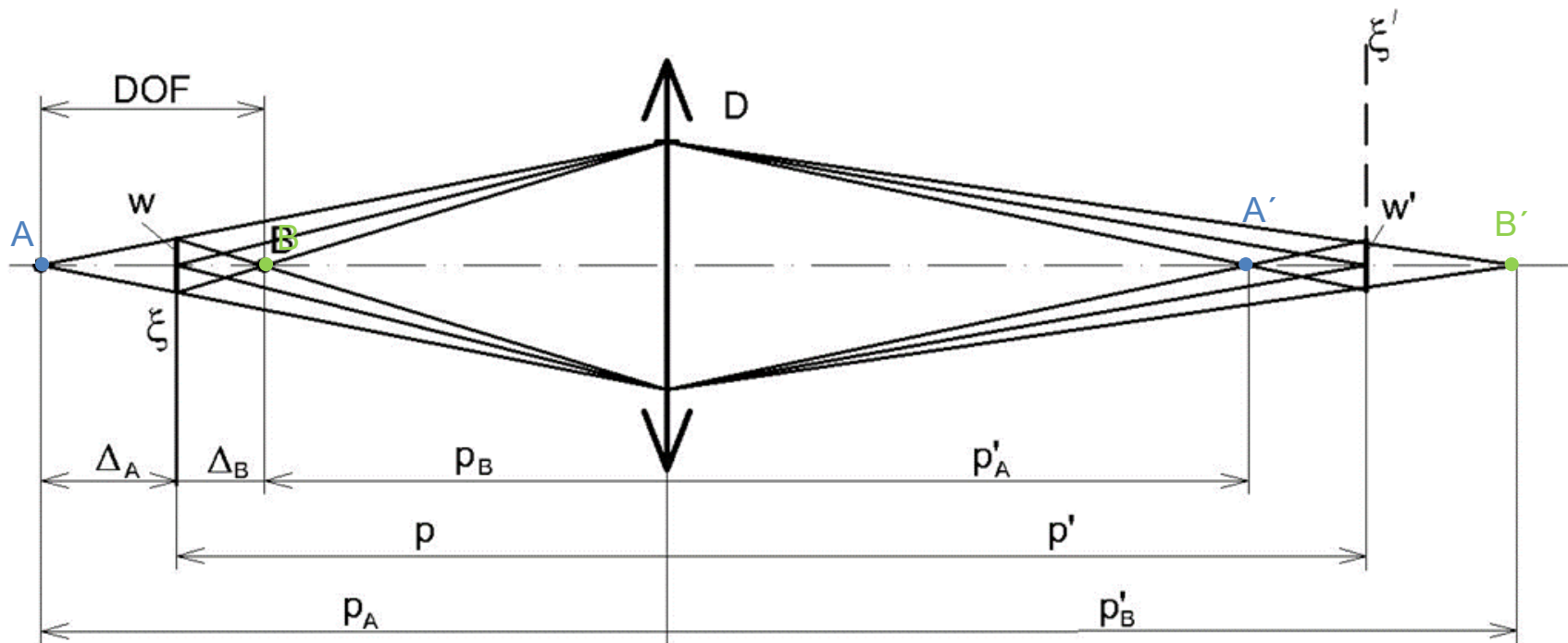
vlivem ohybu světla na AS není
obrazem bodu ideální bod, ale
rozptylový obrazec (Airyho disk)

Rayleighův limit rozlišení:
úhlová vzdálenost bodů je min. ε



Hloubka ostrosti DOF

rozlišení v obrazové rovině určuje, jak velký rozostřený spot se ještě jeví jako ostrý bod v obraze
dáno velikostí pixelu a případně binningem, při pozorování výsledného obrazu okem také rozlišovací schopností oka ($1'$)

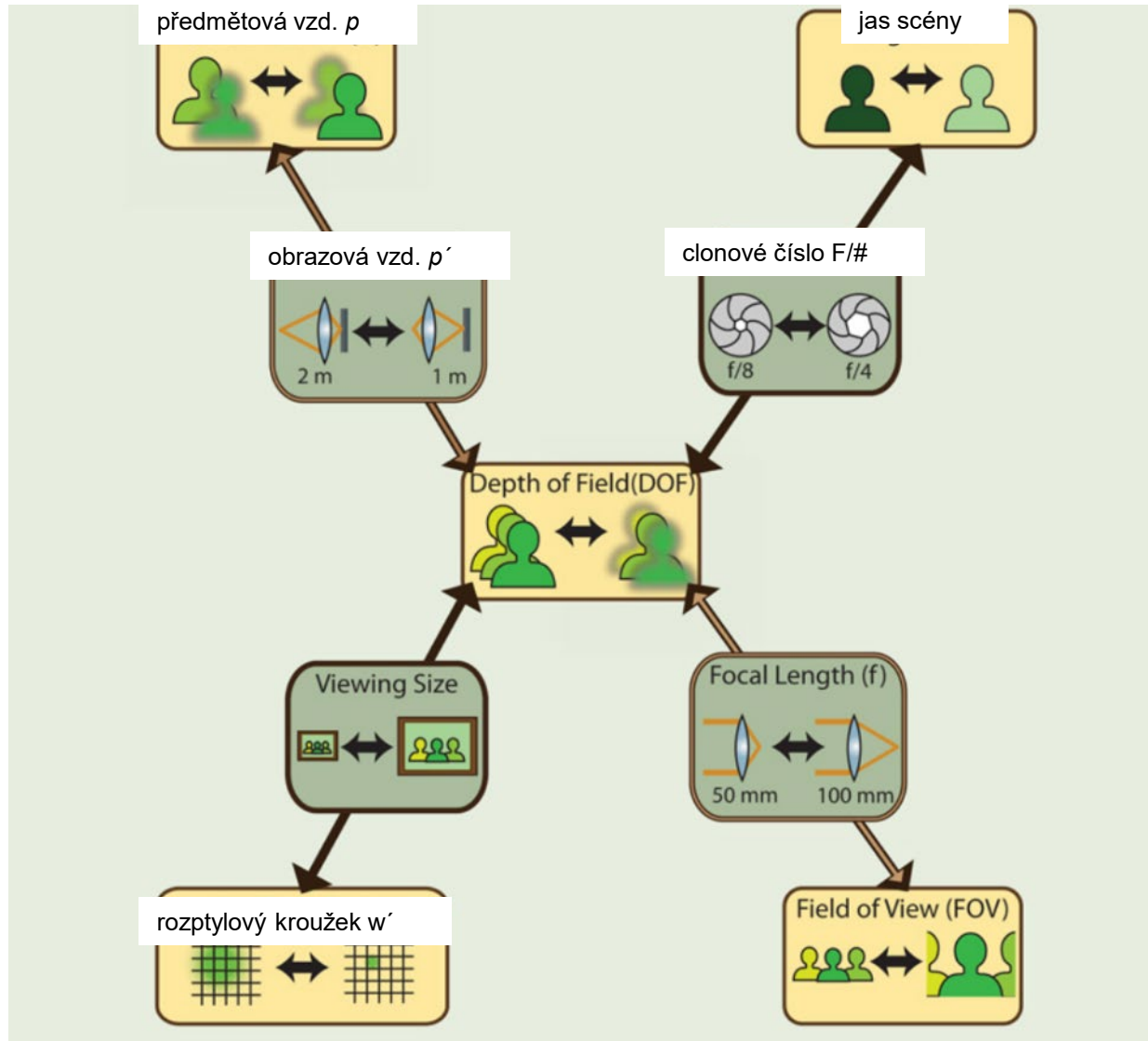


objektiv zaostřen na vzdálenost p

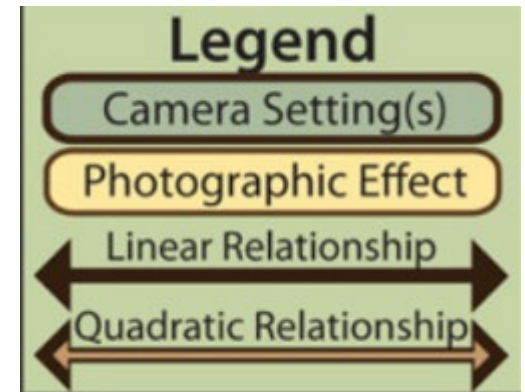
vyšší clonové číslo $\rightarrow$ menší otvor $\rightarrow$ menší úhly $\rightarrow$ větší DOF

pozor na ohyb (Airyho disk ne větší než geometrické rozostření) $\rightarrow$ existuje limit zvyšování DOF cloněním

Vliv nastavení parametrů na DOF



$$DOF = \frac{2w'(F/\#)p^2}{f'^2}$$

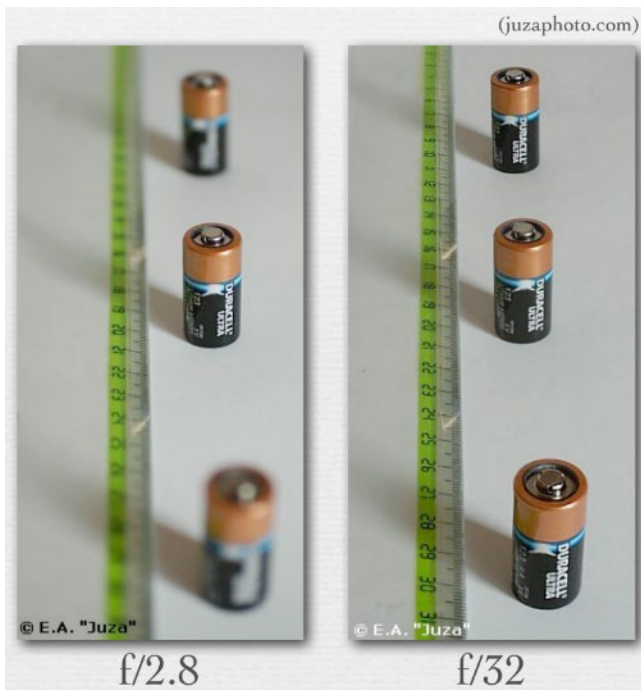


<http://graphics.stanford.edu/courses/cs178/applets/eddy-camera-settings-p2-s.jpg>

DOF

vliv předmětové vzdálenosti

vliv clonového čísla



Closer to subject

3 feet



Farther from subject

10 feet

vliv ohniskové vzdálenosti



Longer focal length

180mm



Shorter focal length

50mm

DOF

vliv předmětové vzdálenosti v kombinaci s ohniskovou vzdáleností



50mm f/4.8



200mm f/4.8,
moved back 4× from subject

$$DOF = \frac{2w'(F/\#)p^2}{f'^2}$$

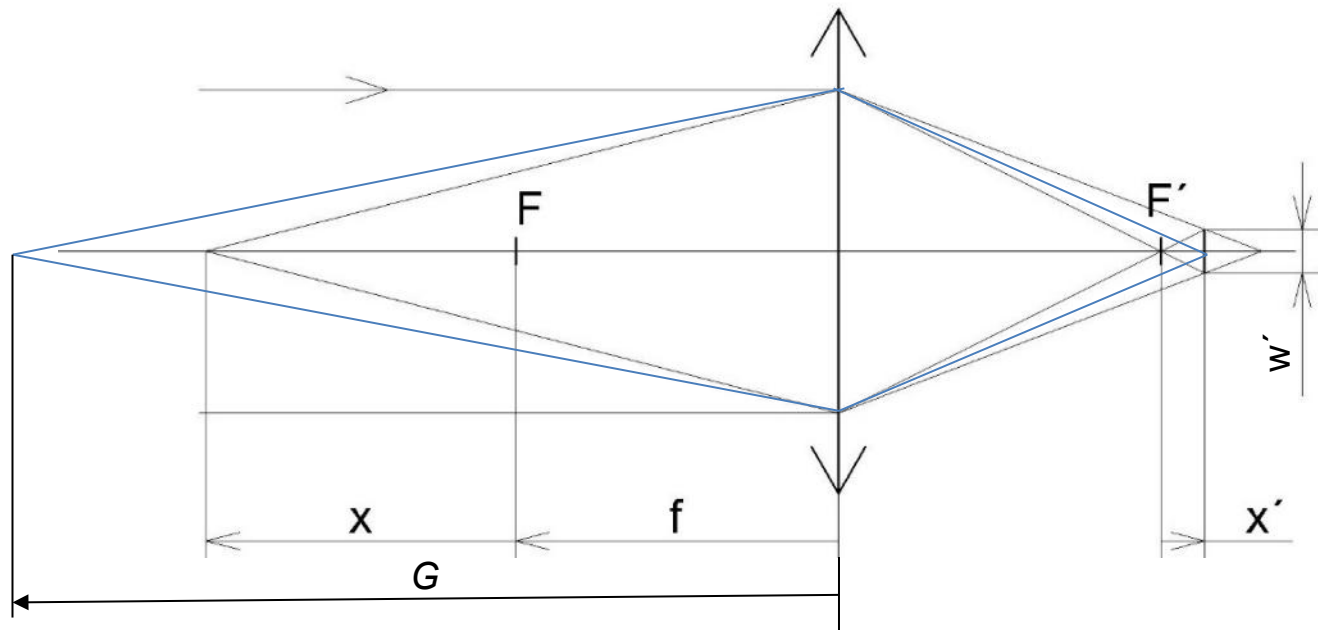
při nepřístupném předmětu, tedy nutnosti větší předmětové vzdálenosti, zvolíme delší f' a můžeme zachovat FOV i DOF

Hyperfokální vzdálenost G

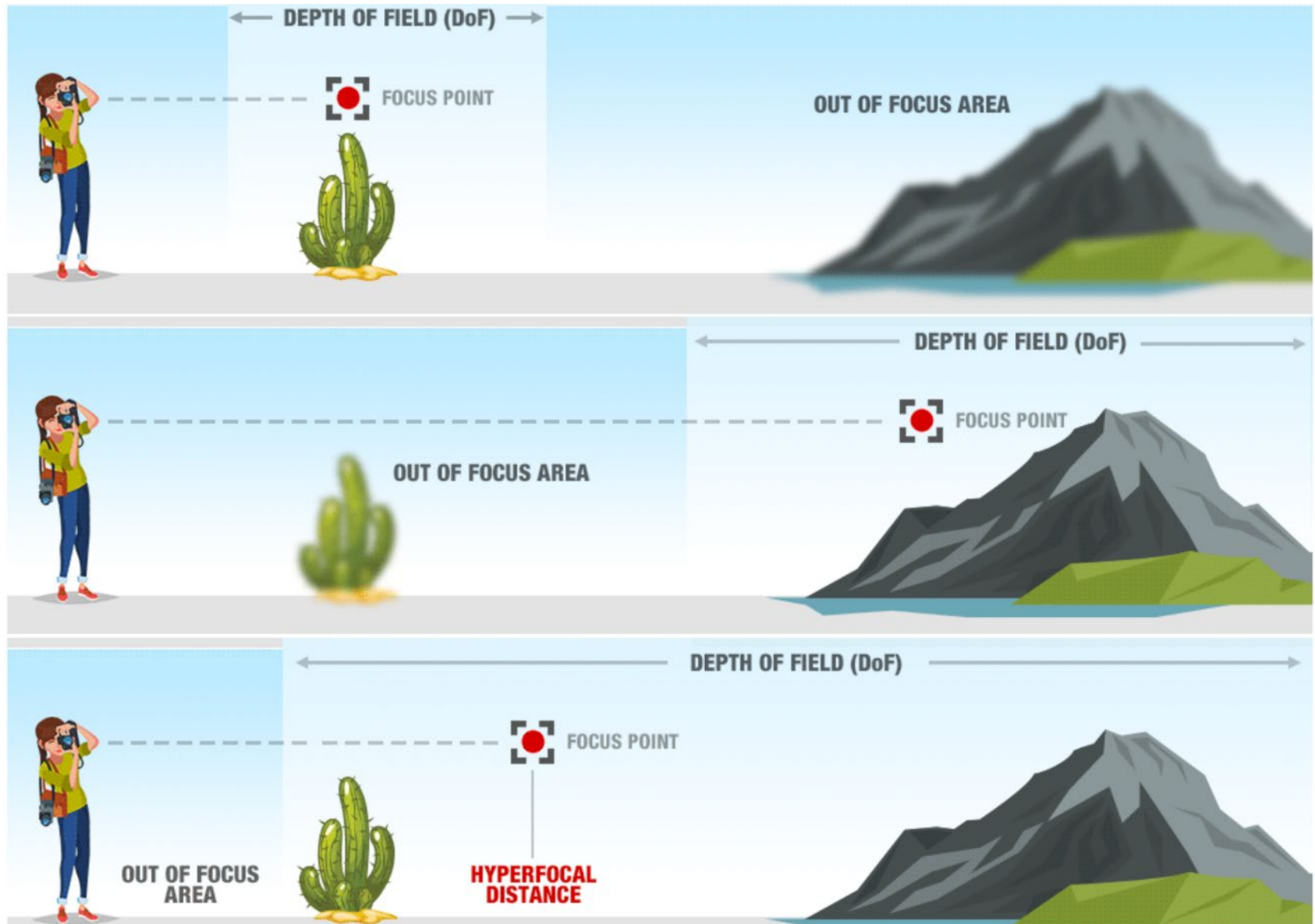
kombinace vzdálenosti, na kterou je zaostřeno (p'), clony a velikosti w' ,
kdy předměty v nekonečnu jsou rozostřené max. w'

→ všechny objekty od cca $G/2$ do nekonečna se jeví ostré

$$G = \frac{f'^2}{w' \cdot (F/\#)}$$



Hyperfokální vzdálenost G



Hyperfokální vzdálenost - ukázka



<https://www.phototraces.com/b/hyperfocal-distance-in-photography/>

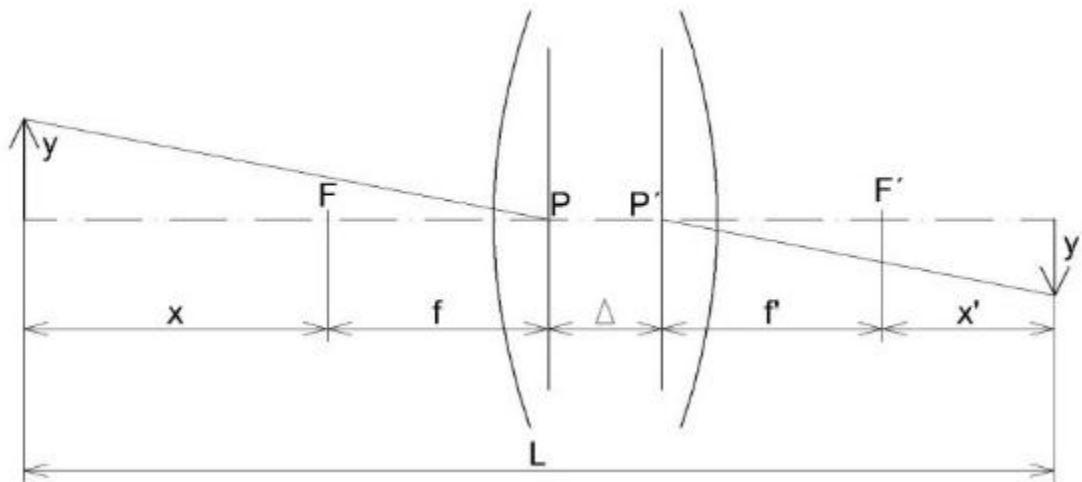
Objektivy pro kamery

senzor kamery i předmět jsou v pevné poloze

pro ostření je podstatná vzdálenost L

ostření se děje posuvem objektivu (celého nebo některých prvků)

= přizpůsobení vzdálenosti x' (většinou za cenu mírné změny f')



$$x' \approx \frac{f'^2}{L}$$

charakteristiky objektivů:

zorný úhel (AFOV) $\operatorname{tg} \theta = \frac{u}{2f'}$

u – uhlopříčka senzoru

clonové číslo: $F/\# = f'/D$

objektivy dle f' :

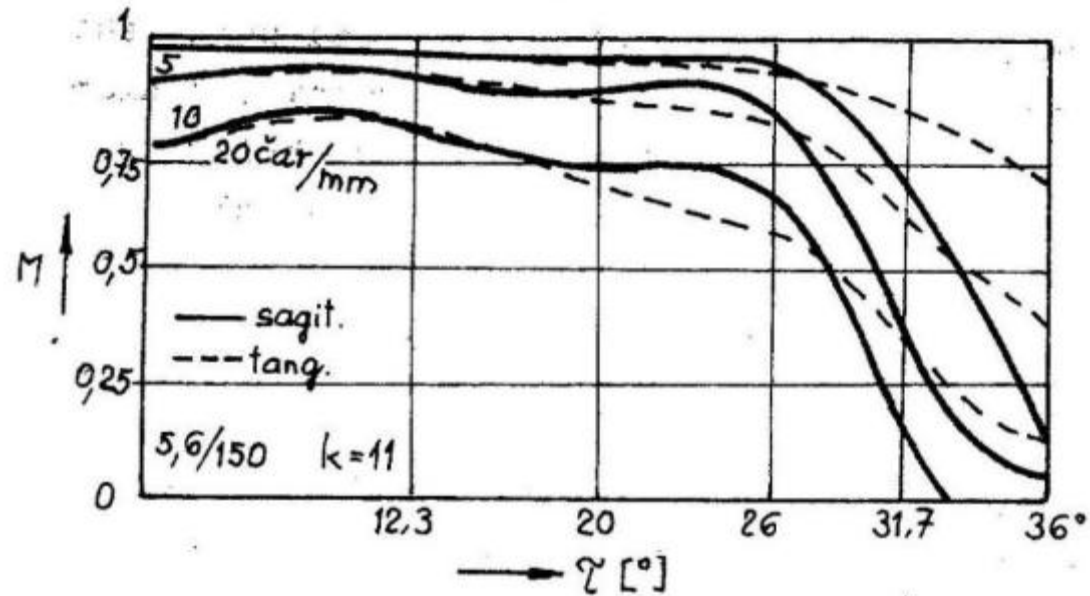
- normální – $f' = u$; $2\Theta = (40 - 55)^\circ$
- širokoúhlé – $f' < u$; $2\Theta > 55^\circ$
- telefoto – $f' > u$; $2\Theta < 35^\circ$; plně čočkové nebo v kombinaci se zrcadly (pak kratší stavební délka)
- pankratické (proměnná f' , zoom)

camera lens design

conflicting requirements

evaluation of the image
quality - MTF

MTF for objective Sironar 5,6/150,
designed for $\tau = 27^\circ$, for F/# 11



objectives by f' :

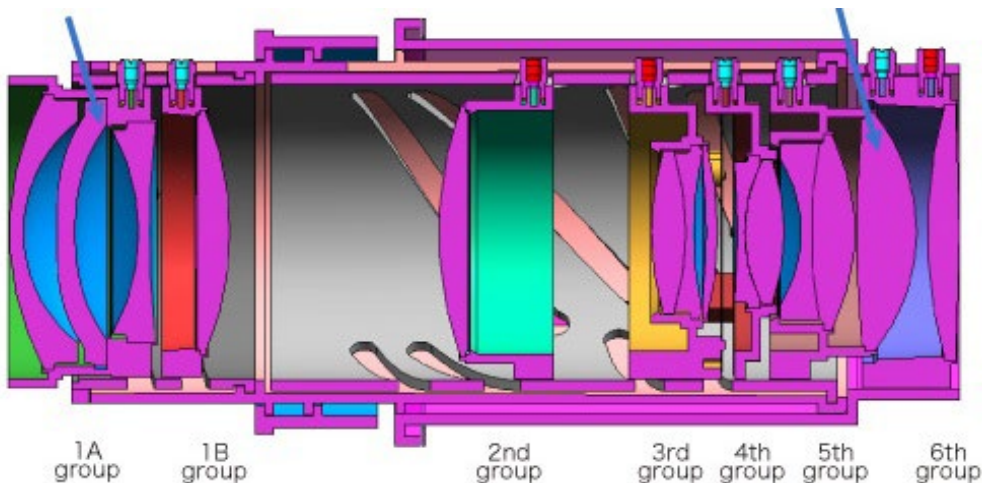
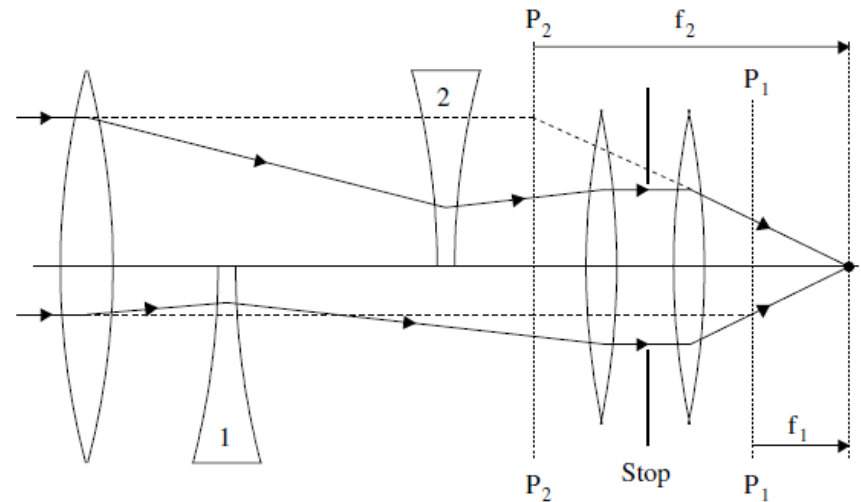
- normal – $f' = u$ (format diagonal); $2\tau = (40 - 55)^\circ$
- wide angle – $f' < u$; $2\tau > 55^\circ$
- telephoto – $f' < u$; $2\tau < 35^\circ$; two-lens achromat: long tube length; objective with front positive and back negative element has shorter tube length; catadioptric lenses: a short tube length
- pancratic (variable focus, zoom)

Zoom objektivy

požadavek:
při změně f' musí zůstat zaostřeno,
tedy poloha obrazu je fixní –
obtížně splnitelné

možné konfigurace:

1. dvě spojky, obě pohyblivé
2. spojka + rozptylka + spojka, první dvě nezávisle pohyblivé
3. spojka + rozptylka + spojka, spojky se pohybují společně (zbytkové rozostření)
4. proměnná rozptylka mezi dvěma spojkami



WUX4000 (Canon)

Autofokus

1. aktivní

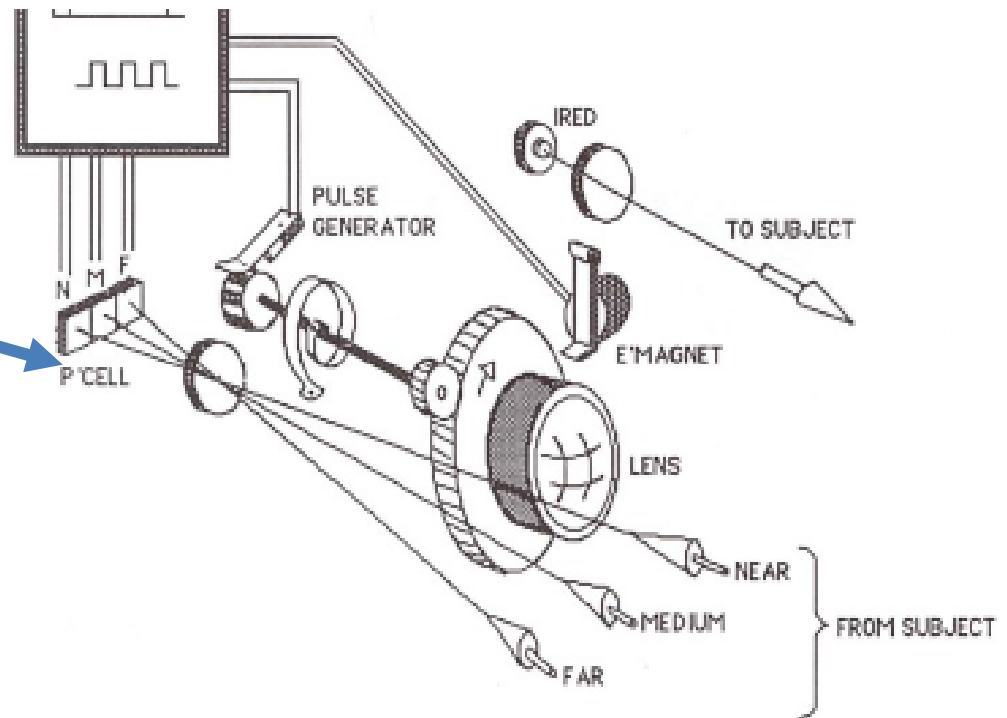
vysílá se záření

dva typy měření vzdálenosti

a) TOF – čas odezvy

b) paralaxa (směr, úhel)

problém měření času odezvy:
fotografie přes sklo (okno),
obraz v zrcadle

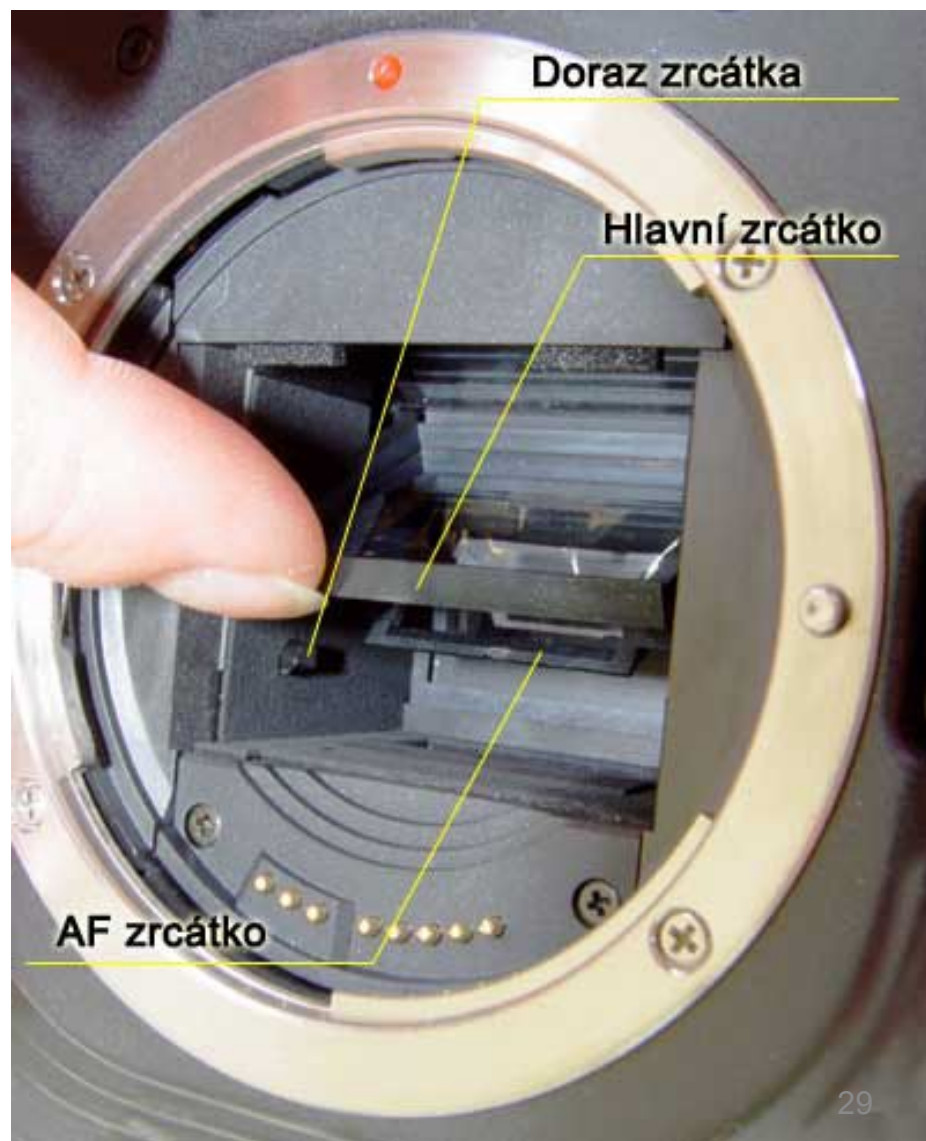
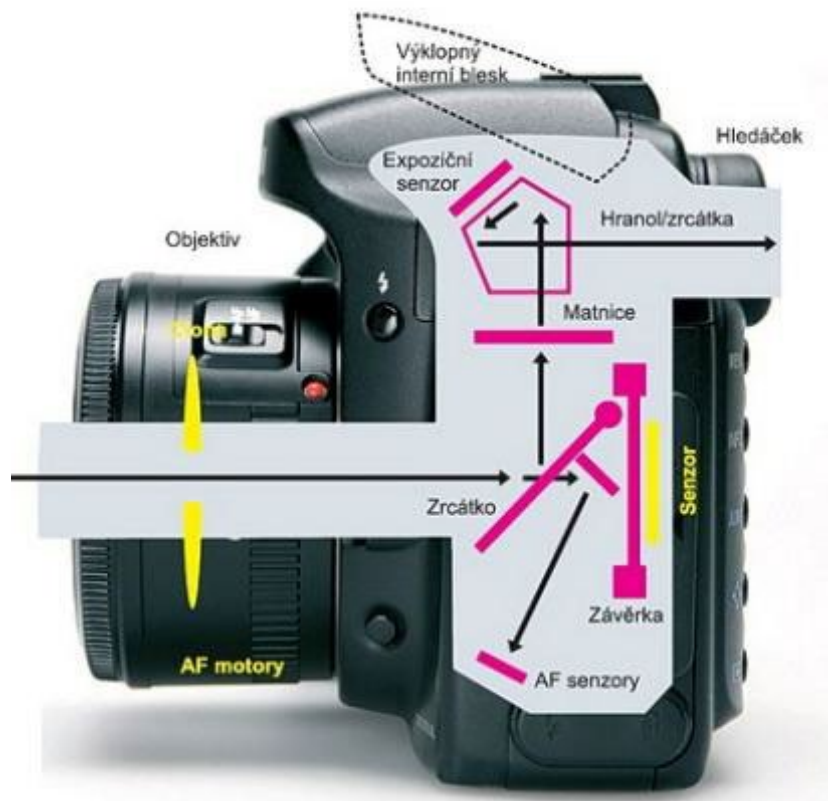


Autofokus

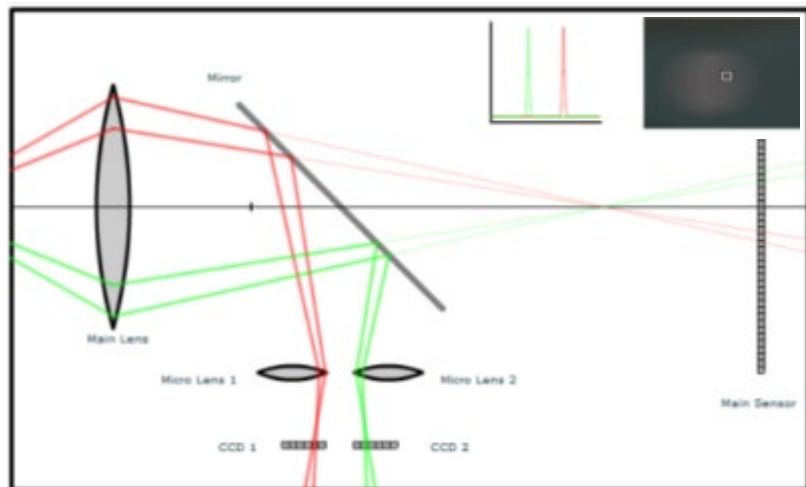
2. pasivní

dva typy měření vzdálenosti

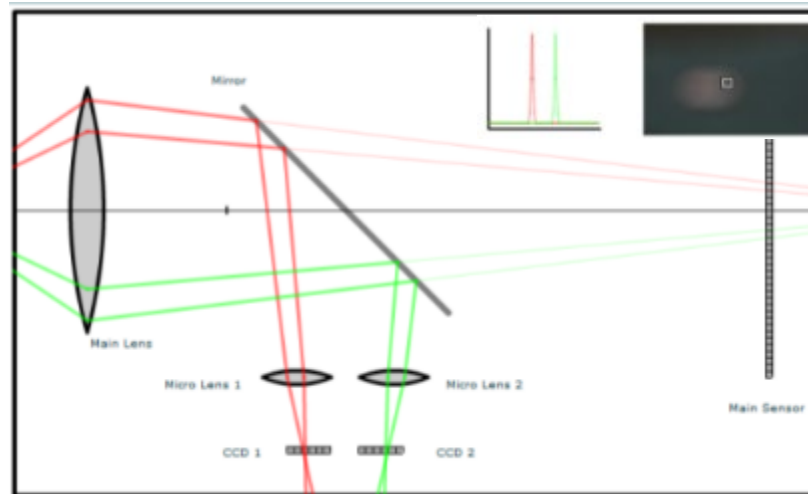
- a) měření fáze
- b) měření kontrastu



Autofokus – měření fáze

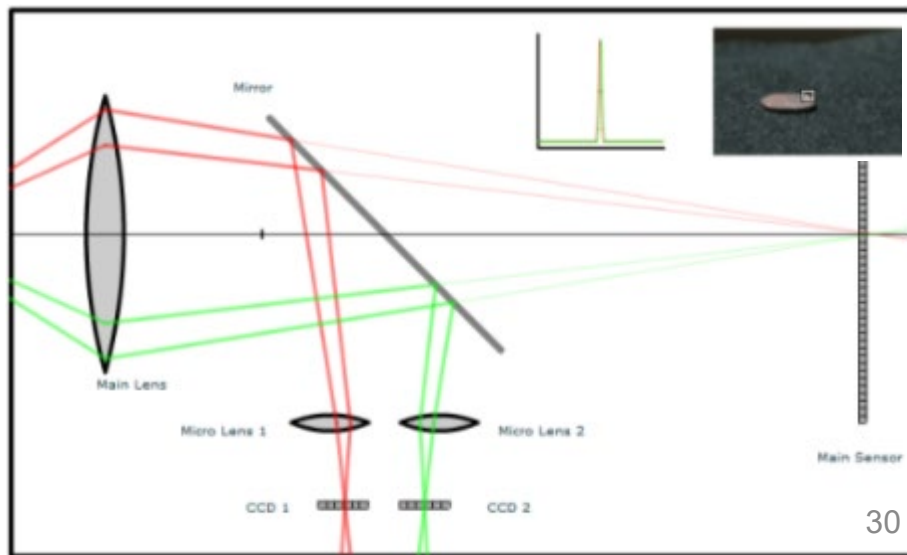


objekt daleko



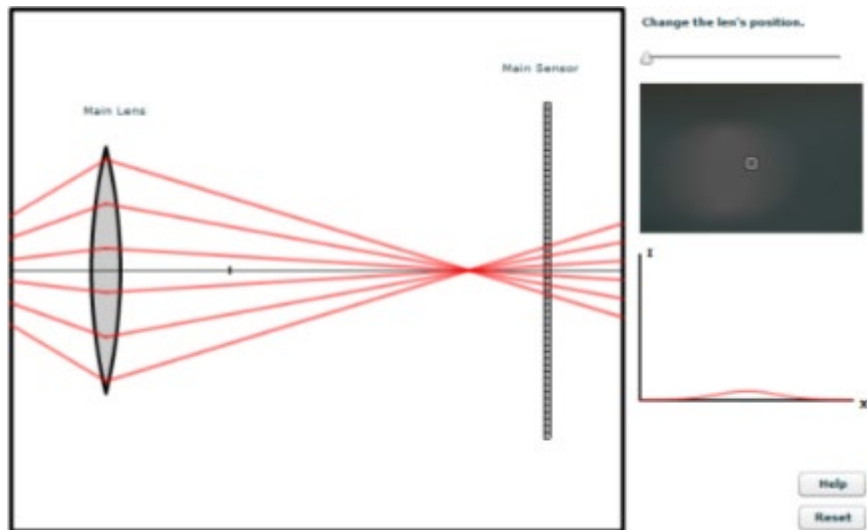
objekt blízko

výhoda
– známe směr, kterým
je třeba ostřit

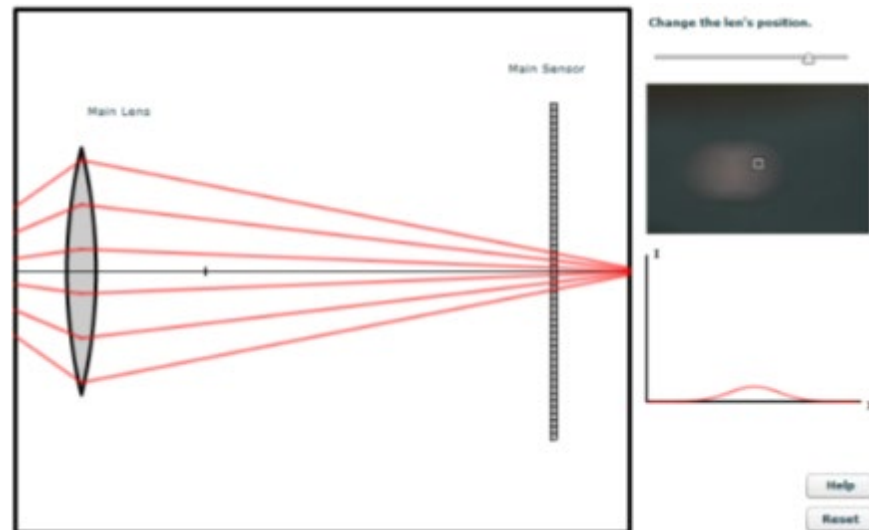


zaostřeno

Autofokus – měření kontrastu



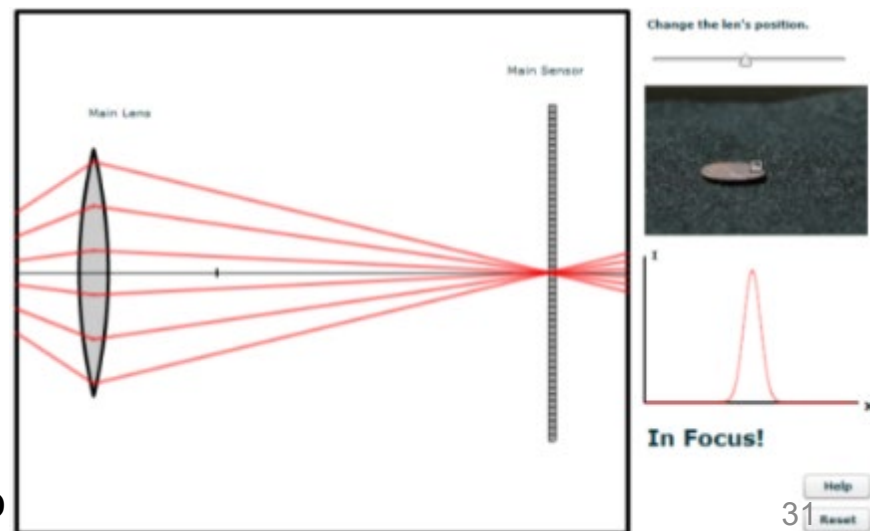
objekt daleko



objekt blízko

výhoda
– jednoduchá implementace,
žádné přídavné prvky

nevýhoda
- neznáme směr ostření

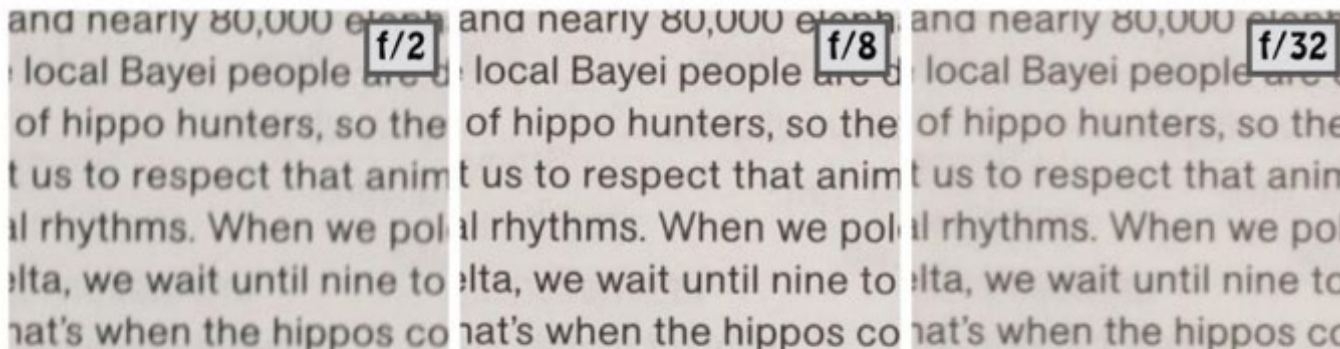


zaostřeno

Optické vady (aberrace)

- způsobeny fyzikální podstatou zobrazení - sférická plocha nevytvoří dokonalý obraz (obraz bodu je spot, přímky je křivka, roviny je zborcená plocha) a disperzí světla ve skle (různé barvy se lámou do různých směrů)
- další degradace obrazu je způsobena výrobními tolerancemi (zde neuvažujeme)
- kontrast obrazu se také snižuje v důsledku rozptýleného světla (zpětné odrazy)

aberační stav závisí také na aktuální předmětové vzdálenosti – ve fotografii náročná úloha navrhnout objektiv vykorigovaný na vzdálenosti od makro po nekonečno
ještě náročnější jsou zoom systémy
obecně lze vady snížit zacloněním – pozor na difrakci



Text is slightly blurred
(aberration)

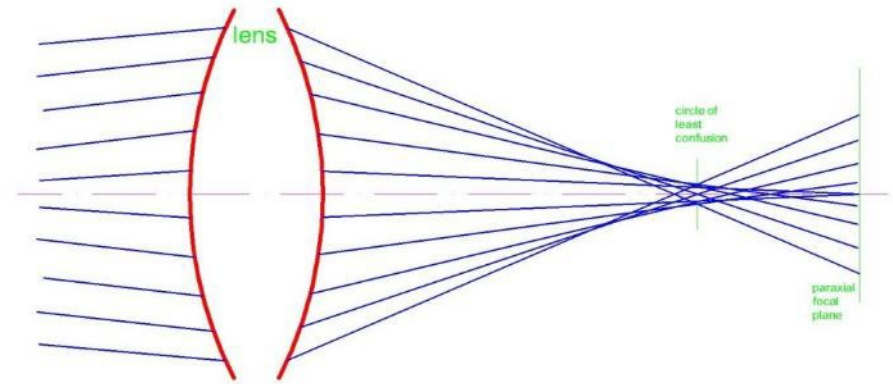
Text is crisp

Text is slightly blurred
(diffraction)

<https://www.japanistry.com/aberrations/>

1. Otvorová vada

- jediná, která se vyskytuje i při zobrazení bodu na optické ose
- projevuje se celkovým rozostřením obrazu



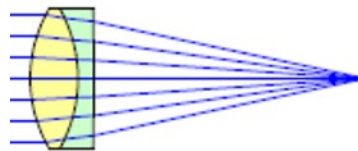
korekce:

aférizováním plochy

dublet (spojka + rozptylka)

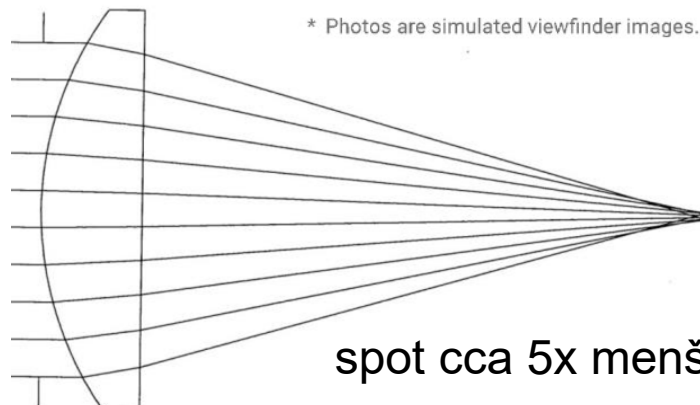
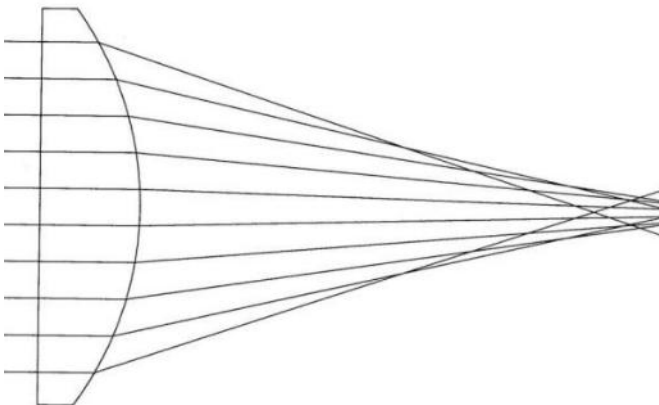
kombinace obojího

správná orientace čočky



* Photos are simulated viewfinder images.

https://imaging.nikon.com/sport-optics/guide/binoculars/technologies/technologies_08/

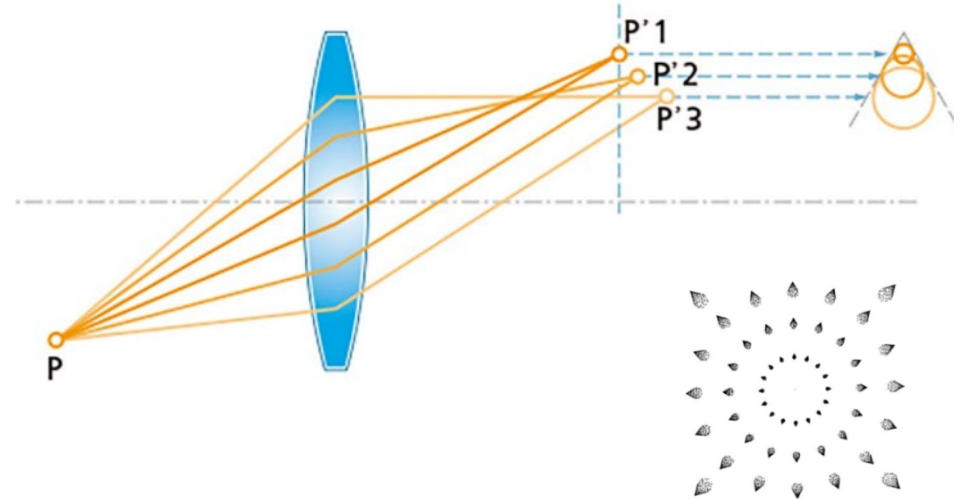


spot cca 5x menší

2. Koma

https://imaging.nikon.com/sport-optics/guide/binoculars/technologies/technologies_08/

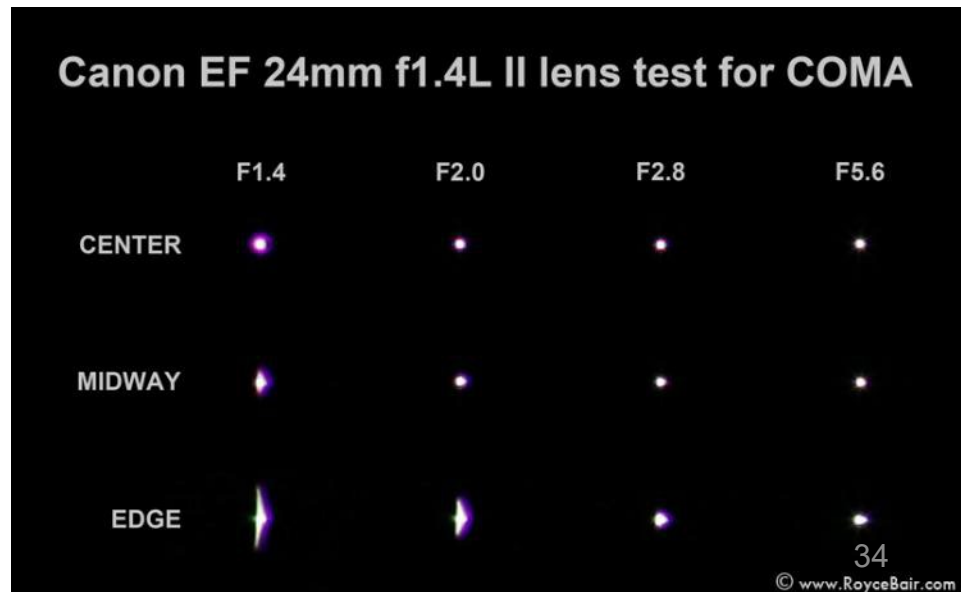
- paprsky jdoucí střední částí čočky se protínají v jiné vzdálenosti od čočky a v jiné výšce od optické osy než paprsky jsoucí okrajem čočky
- projevuje se rychlým rozostřováním obrazu směrem k okrajům pole
- korekce: úpravou poloměrů křivosti, orientace, polohou aperturní clony



ukázka aberačního stavu na okraji pole

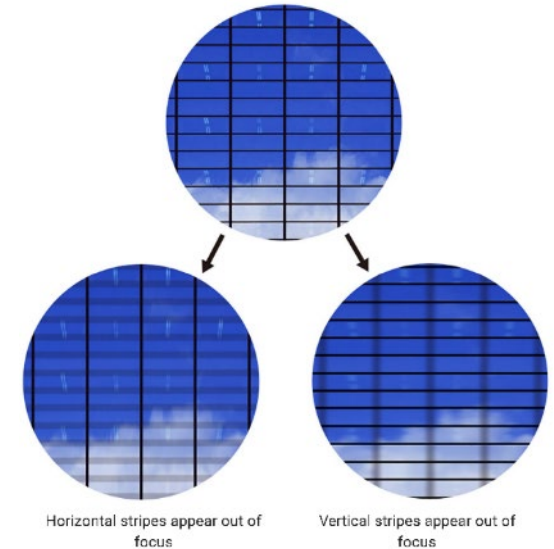


vliv zaclonění a zorného úhlu



3. Astigmatismus

- příčina: pro mimoosové paprsky v navzájem kolmých rovinách má čočka jiný poloměr křivosti
- důsledek: obraz bodu je vodorovná přímka – elipsa – kruh – elipsa – svislá přímka
- kvadraticky závislé na zorném úhlu



mimo střed obrazu jsou hrany dvojité, posunuté stranově nebo výškově

korekce:

změnou poloměrů křivosti

výsledek: paprsky v obou kolmých rovinách se protínají na stejném místě, ale obrazem roviny není rovina – zbytkové zklenutí pole

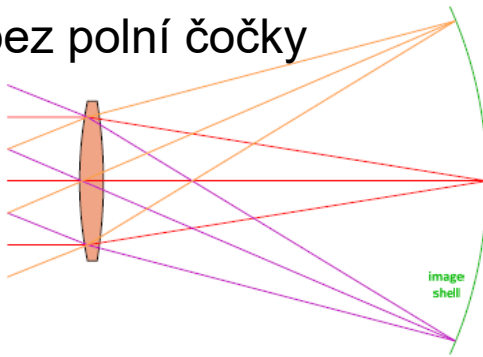


4. Zklenutí pole

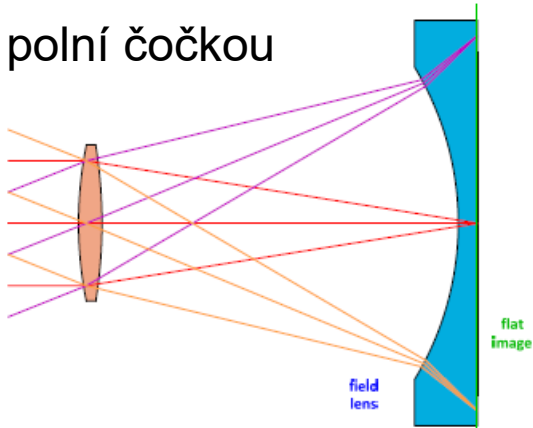
- ostré obrazy bodů rovinné plochy se vytvářejí na zaklenuté ploše
- důsledek: rozostření obrazu u okrajů; přeostřením lze zmenšit

korekce: vložení polní čočky před detektor

bez polní čočky



s polní čočkou



* Photos are simulated viewfinder images.



Without Field Flatteners Lens System



Field Flatteners Lens System

4. Zklenutí pole – vliv zaclonění

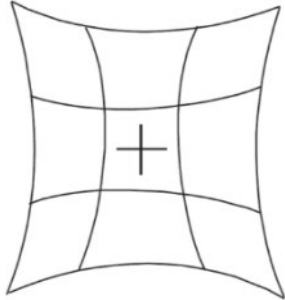


<https://phillipreeve.net/blog/lens-aberrations-explained-part-1/>

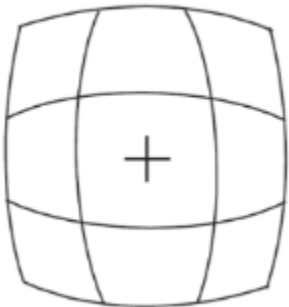
5. Zkreslení

- příčina: zvětšení není konstantní, ale mění se se zorným úhlem
- důsledek: rovné čáry se zakřivují
- poduškovité zkreslení – zvětšení roste se zorným úhlem („vytažené rohy“)
- soudkovité zkreslení – zvětšení klesá se zorným úhlem
- jeden objektiv může mít pro jednu vzdálenost podušku, pro jinou soudek

poduškovité zkreslení



soudkovité zkreslení



Original shape



Positive distortion
(pincushion type)



Negative distortion
(barrel type)

možno kompenzovat post-processingem,
ale nutno kalibrovat pro aktuální pracovní
vzdálenost

5. Zkreslení - pokračování

- převládající geometrické zkreslení
- projevuje se více u širokoúhlých objektivů

(x', y') - souřadnice změřené v obraze, nekorigované

(x, y) - korigované souřadnice

(x_0, y_0) - souřadnice hlavního bodu

(Δ_x, Δ_y) - složky opravy

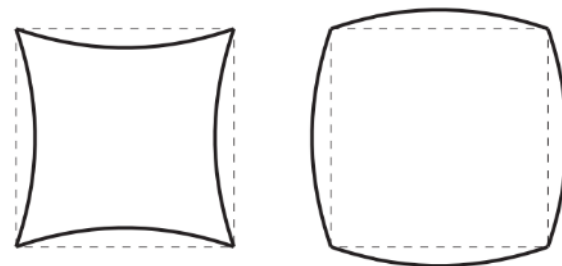
r - rádius

$$r = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2}$$

Zkreslení se aproximuje polynomem sudého stupně, často jen stupně dva.

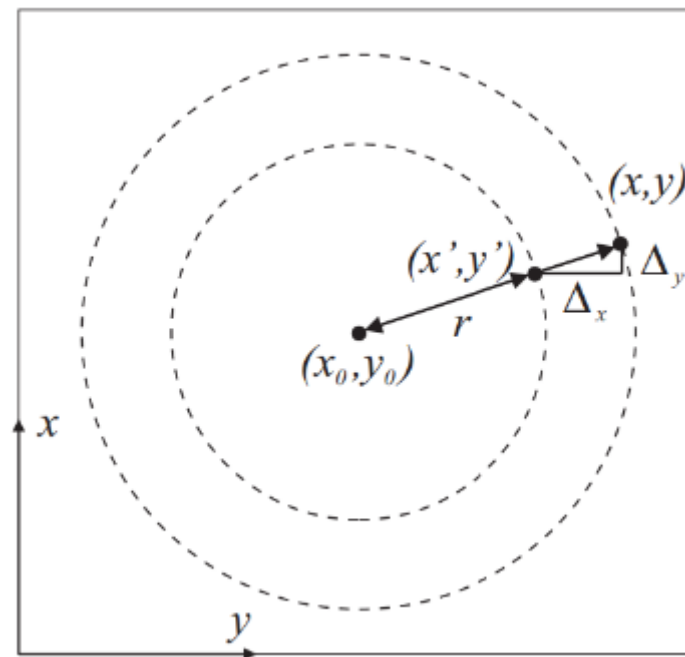
$$\Delta_x = (x' - x_0) (\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6)$$

$$\Delta_y = (y' - y_0) (\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6)$$



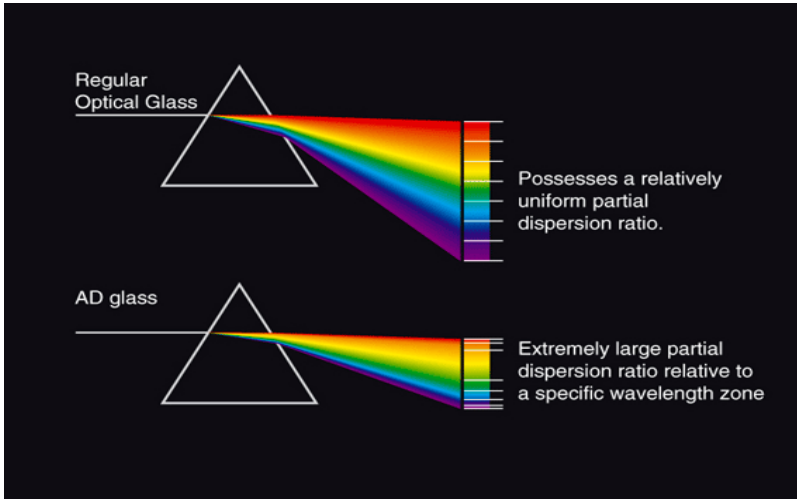
polštářkové

soudkovité

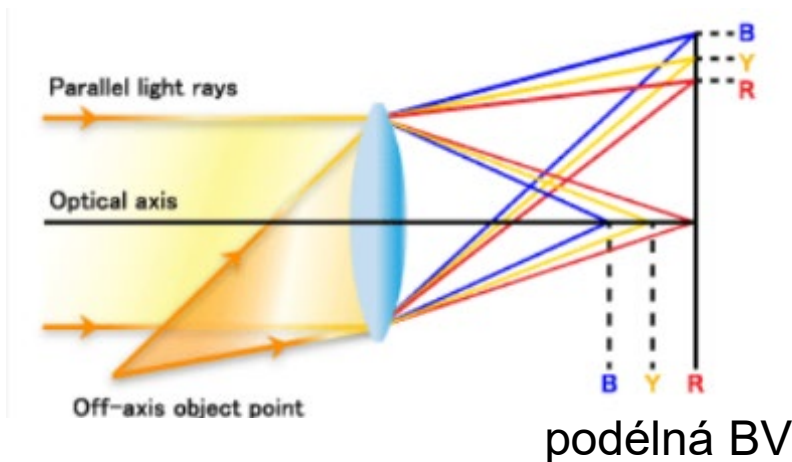
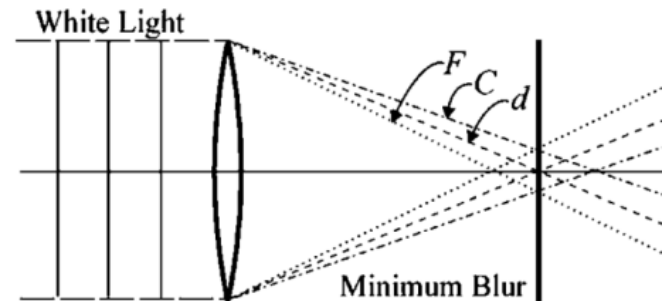


6. Barevná vada

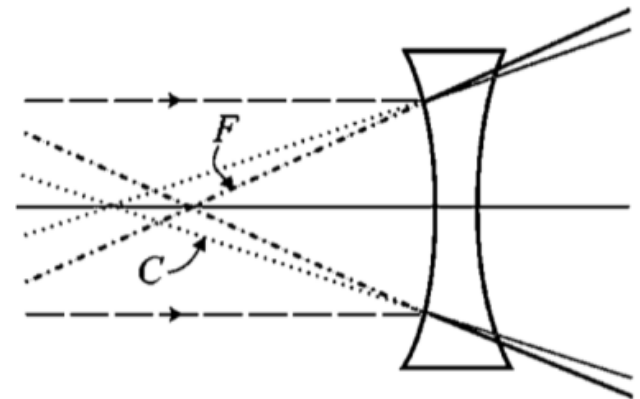
- příčina: disperze světla v materiálu, tedy index lomu se mění s vlnovou délkou
- projevuje se více u vysokoindexových skel
- pro nejlepší korekce je potřeba alespoň jedna čočka ze skla s anomální disperzí



barevná vada spojky a rozptylky je opačná → korekce dubletem

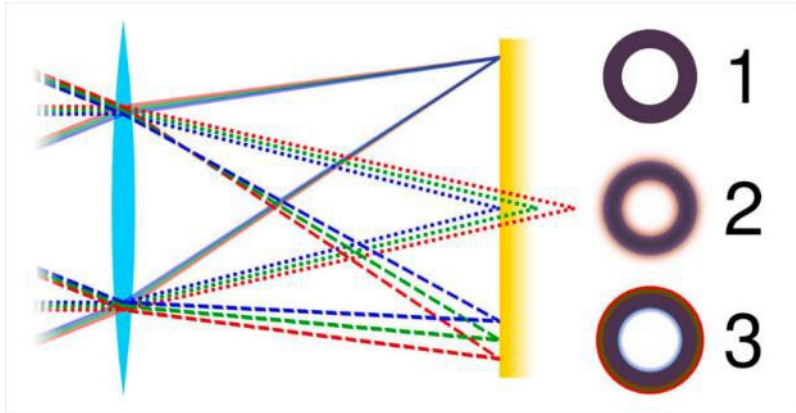


příčná
BV



F: 486.1nm, d: 586.1nm, C: 653.3nm

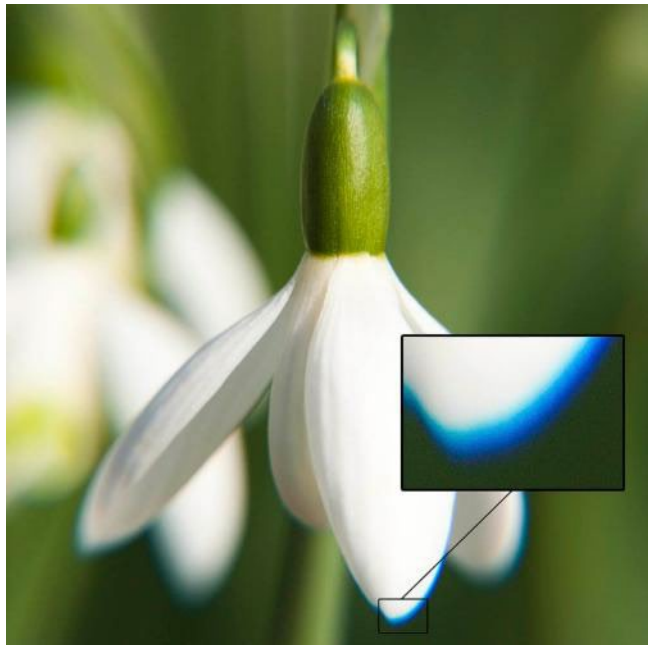
6. Barevná vada - pokračování



1 korigovaná
vada

2 podélná
vada

3 příčná vada



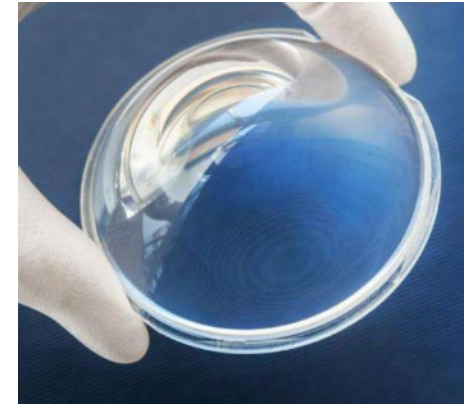
simulovaný
obrázek

Rozptýlené světlo

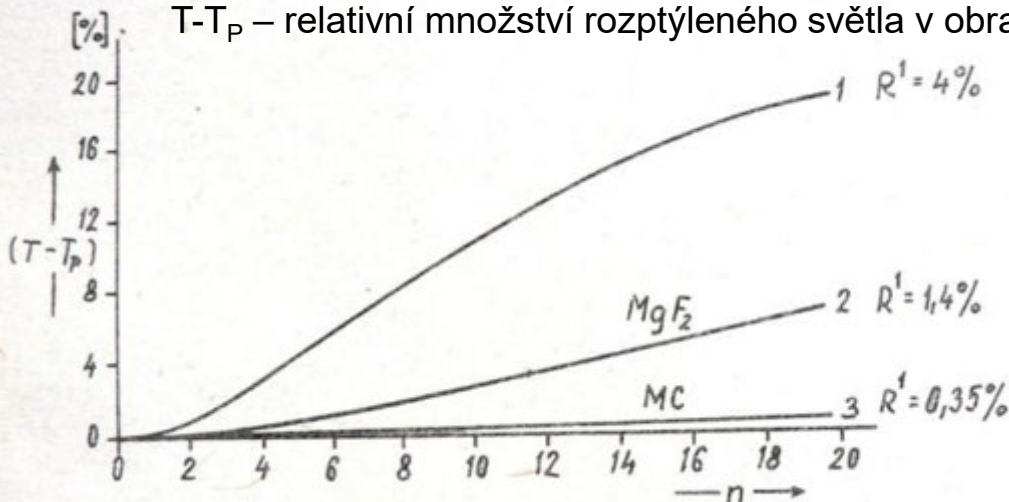
příčina: na každém rozhraní (každé ploše čočky) se část světla odrazí zpět a dále cestuje soustavou až na detektor

důsledek: snížený kontrast („černá není černá“)

opatření: antireflexní vrstvy – snižují odrazivost a tím zvyšují propustnost



T_p – propustnost pro pouze zobrazovací paprsky
 T – celková propustnost (včetně rozptýleného světla)
 $T - T_p$ – relativní množství rozptýleného světla v obraze



křivka 1: bez AR

$$T - T_p = 18\%$$

$$T_p = 19,5\%$$

křivka 2: jednoduchá AR

vrstva MgF_2

$$T - T_p = 7\%$$

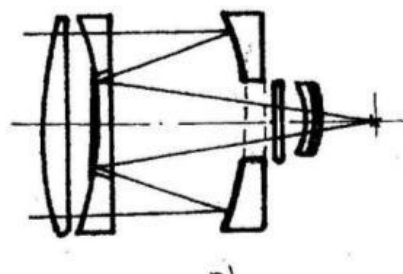
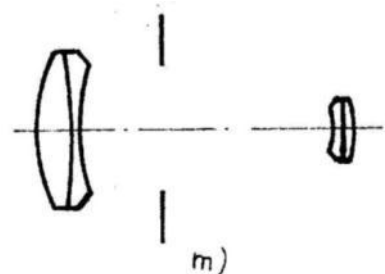
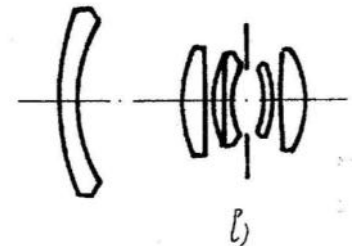
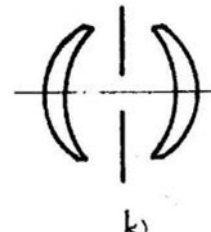
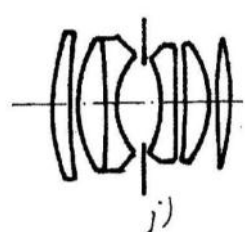
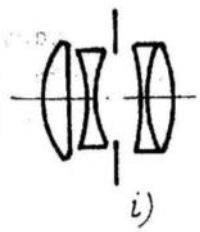
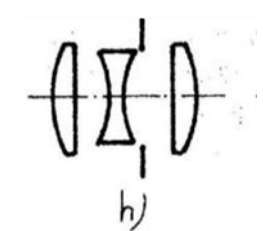
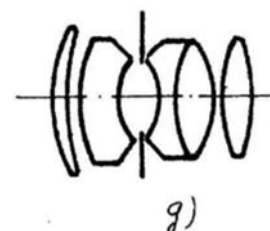
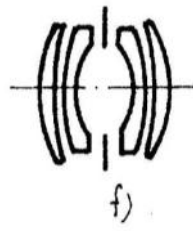
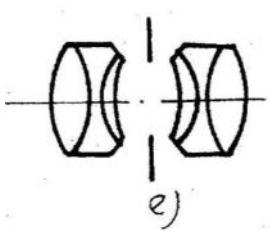
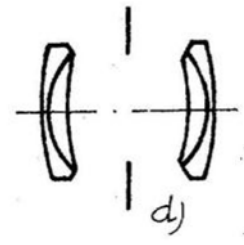
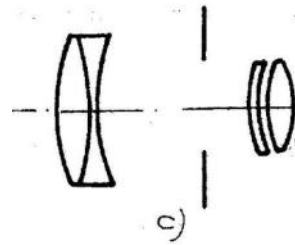
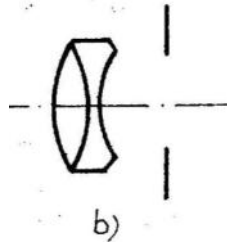
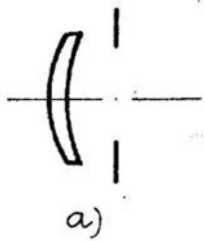
$$T_p = 56,9\%$$

křivka 3: AR multicoat

$$T - T_p = 1\%$$

$$T_p = 86,9\%$$

Objektivy podle stupně korekce



Objektivy mobilního fotoaparátu

$$f' = \frac{u}{2 \tan(\theta/2)}$$

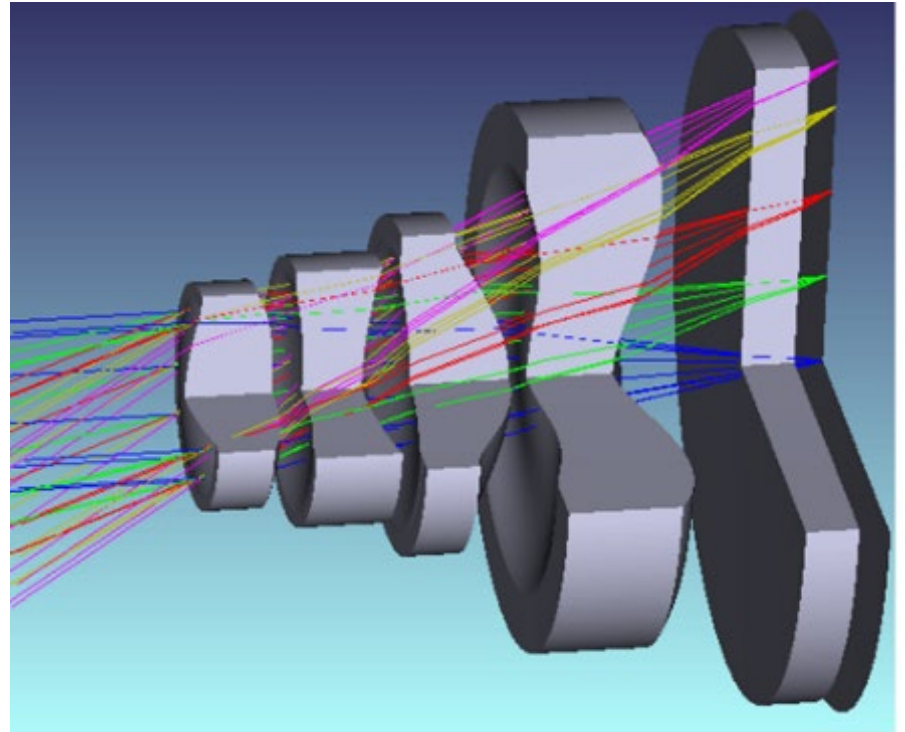
$$\theta = 68^\circ$$

uhlopříčka senzoru $u = 5.5\text{mm}$

$$\rightarrow f' = 4,08\text{mm}$$

stavební délka méně než 5mm

vysoce asférizované čočky
často plastové

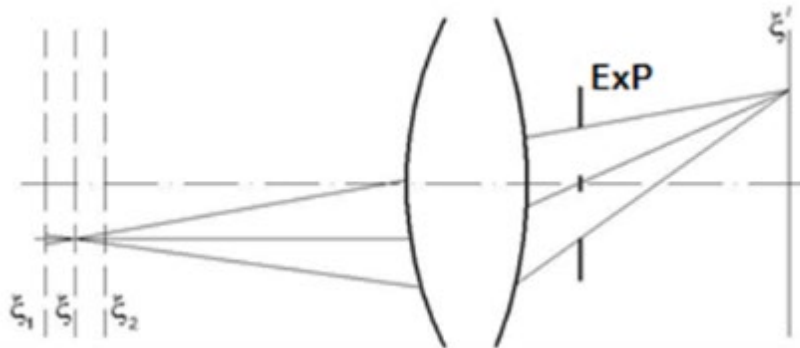


Telecentrický chod

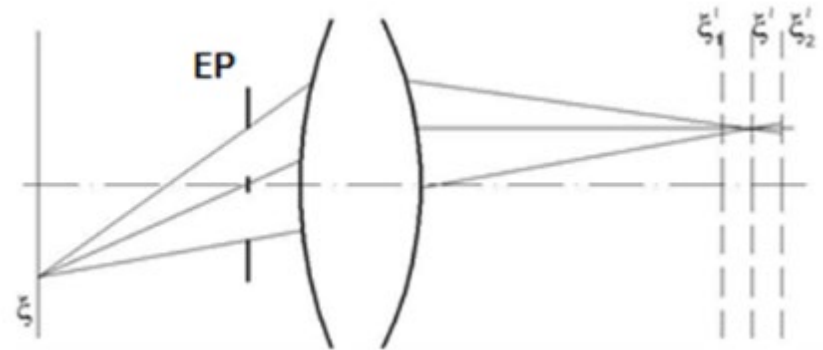
obecně se zvětšení mění s předmětovou vzdáleností (platí i pro rozostřený obraz) → problém u měřicích systémů

řešení: telecentrický chod – hlavní paprsek je rovnoběžný s optickou osou, protože vstupní(výstupní) pupila je v nekonečnu; aperturní clona musí být v ohnisku soustavy
- the pupil is located at infinity

telecentrický chod na straně předmětové
- eliminuje změnu velikosti obrazu vlivem rozdílných vzdáleností předmětu



telecentrický chod na straně obrazové
- eliminuje změnu velikosti obrazu vlivem posunu detektoru (zaostření)



Telecentrický chod - pokračování

dvojitě telecentrický systém

- objektiv musí být trochu větší než snímáný předmět
- drahé

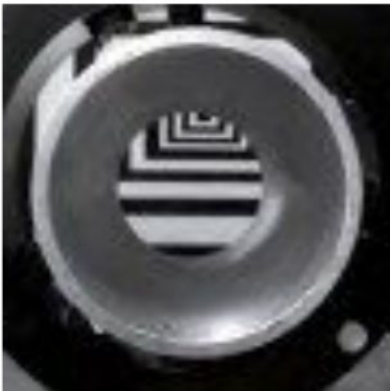
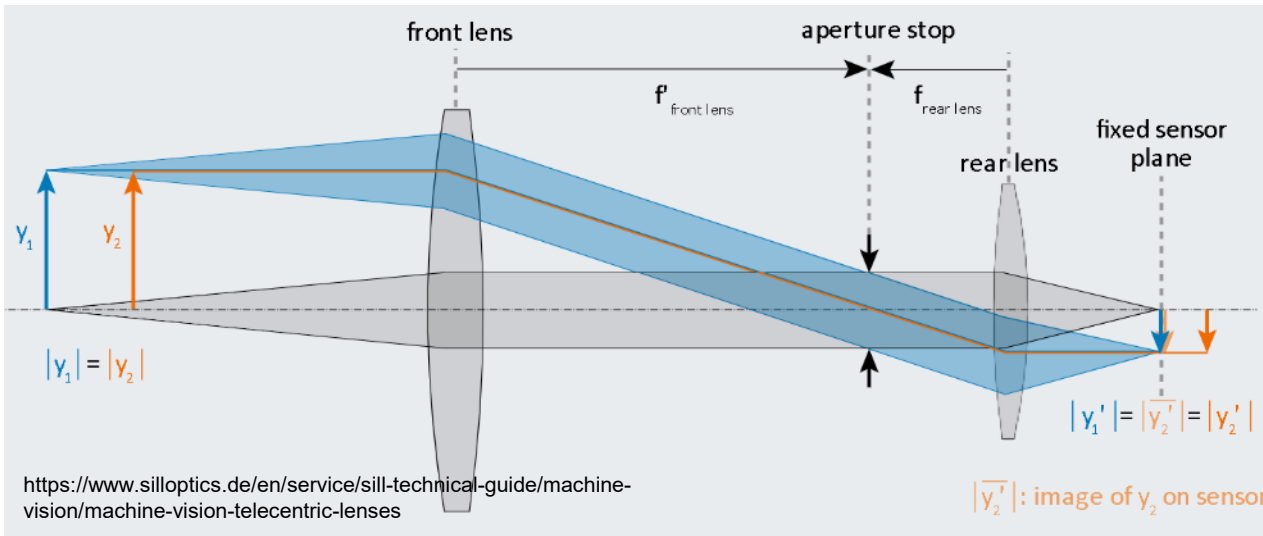
předmět



standardní optika



telecentrická optika

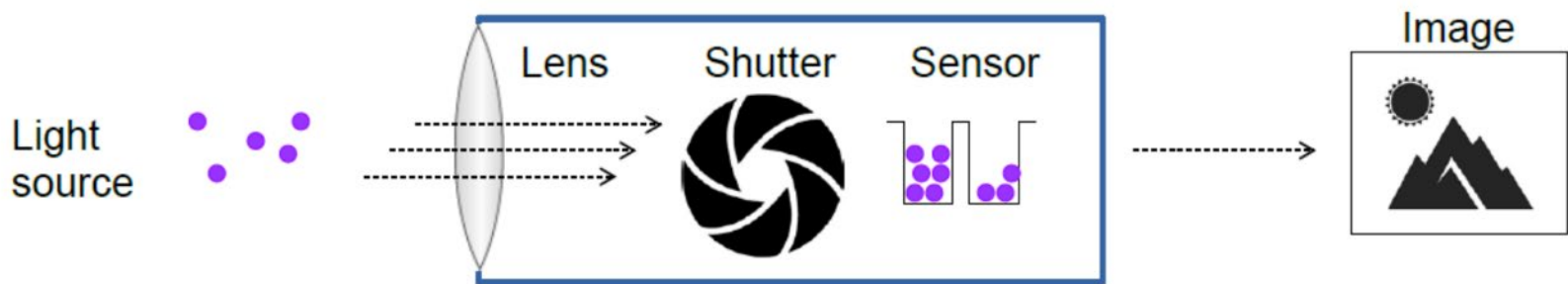


standardní optika



telecentrická optika

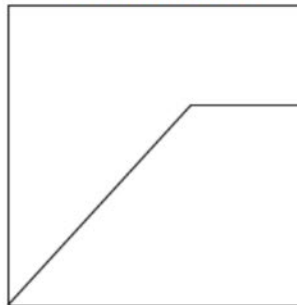
Vytvoření obrazu v kameře z radiometrického hlediska



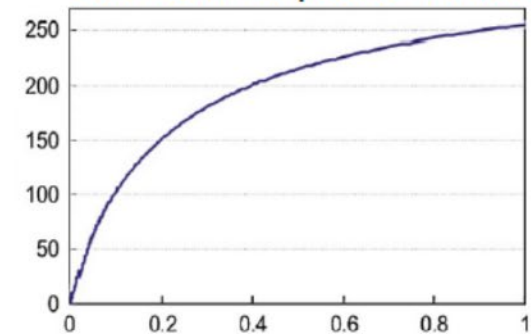
Vignetting effects



Saturation



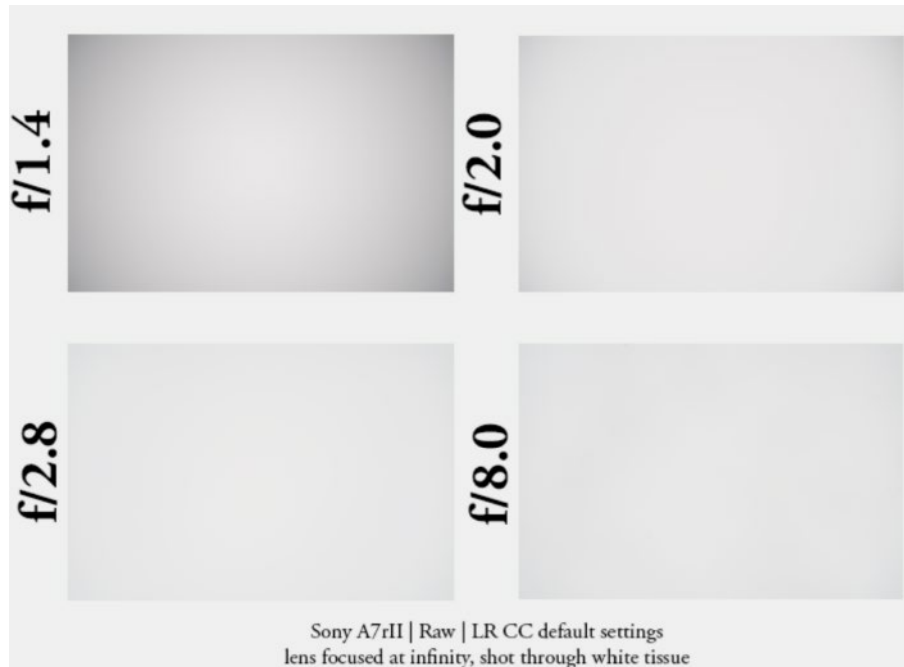
Camera response function



více o radiometrii a senzorech v předmětu Optoelektronika

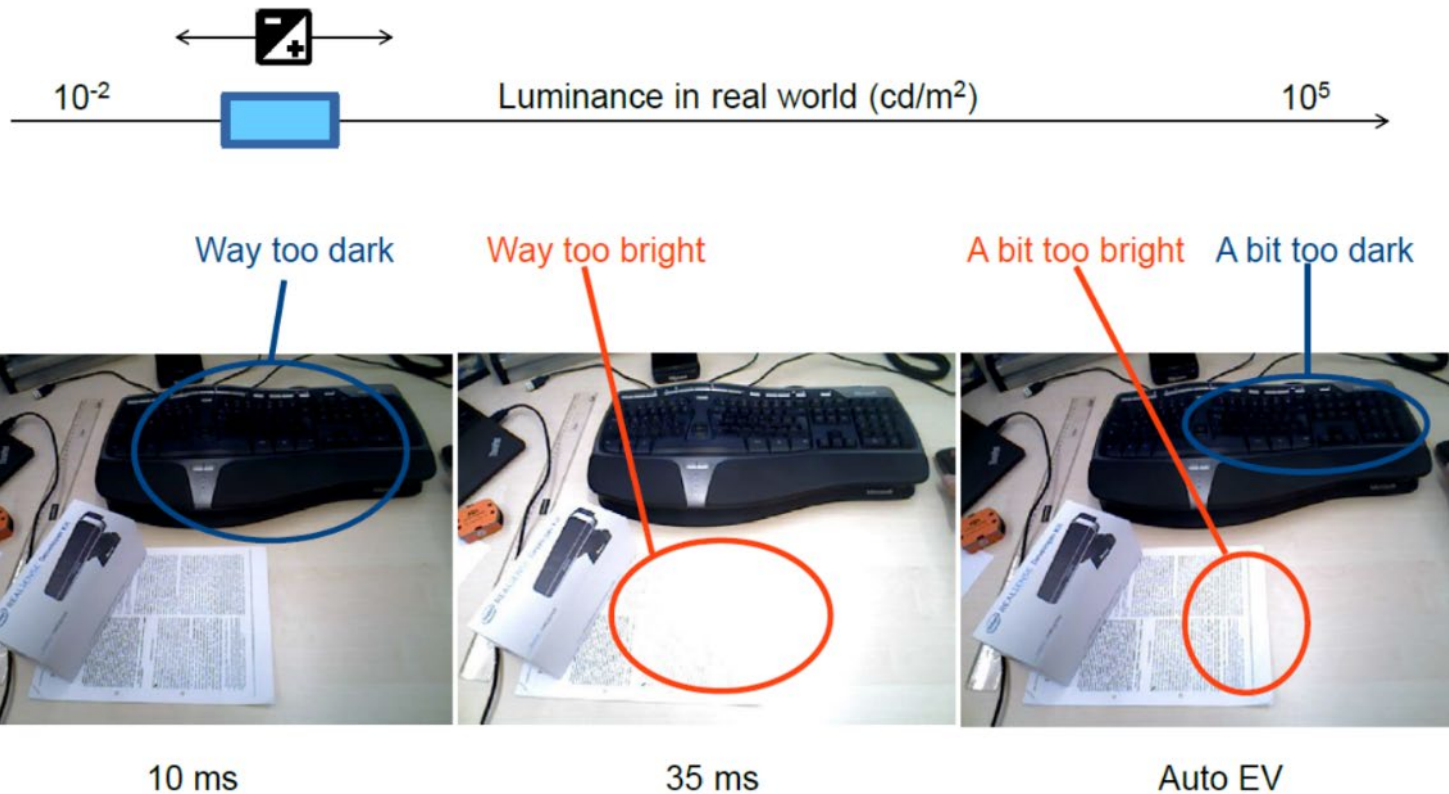
Vinětace

- Jelikož optické soustavy mají tloušťku několika milimetrů až centimetrů, nemusí být pro paprsky vstupující do objektivu dostupný celý clonový otvor
- Jev se uplatňuje při více otevřených clonách.



Dynamický jas

Ukázka nízkého dynamického rozsahu v jasu



jasy

měsíční svit: 10⁻² cd/m²

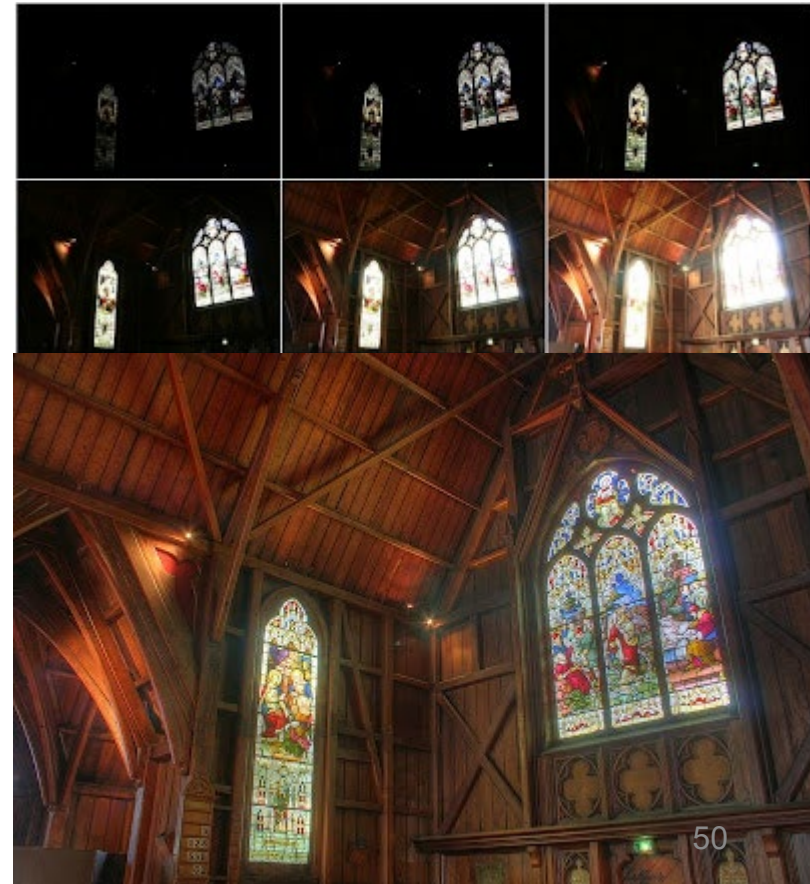
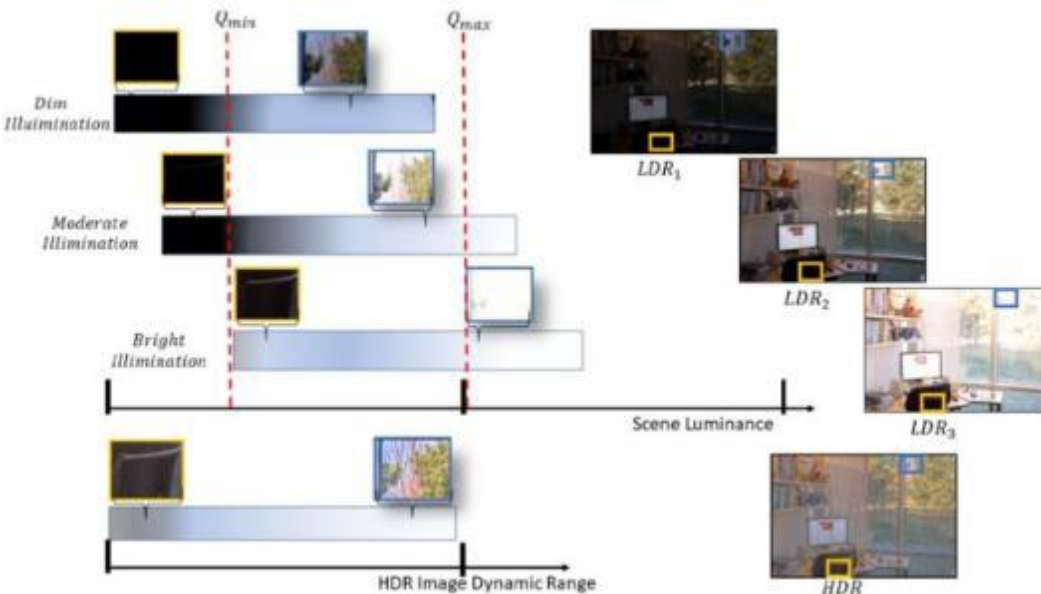
interiérové světlo: 10² cd/m²

denní světlo (zataženo/jasno): 10³/10⁵ cd/m²

Dynamický jas - HDR

Jak HDR (high dynamic range) funguje u fotografie:

- Pořídí se několik snímků scény s různou expozicí.
- Snímky jsou sloučeny do jednoho obrazu s vyšším dynamickým rozsahem a lepším prokreslením detailů, které by jinak byly ztraceny.



bonbónek

fotografie skrz překážku (drátěný plot apod.)

princip:

překážka co nejbližší k objektivu, tedy je v obraze rozostřená a pouze snižuje kontrast

otevřít clonu → sníží se DOF a překážka se více rozostří

