

Geometrická optika a fotoaparát, prakticky

Václav Hlaváč

České vysoké učení technické v Praze

Český institut informatiky, robotiky a kybernetiky, také Centrum strojového vnímání

160 00 Praha 6, Jugoslávských partyzánů 1580/3

<http://people.ciirc.cvut.cz/hlavac>, vaclav.hlavac@cvut.cz

Poděkování: Pavel Krsek, Vladimír Smutný.

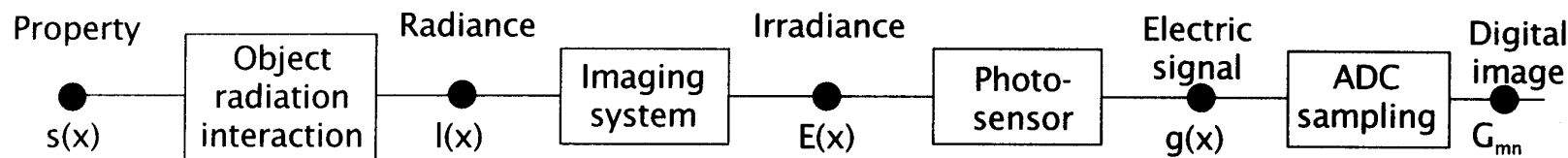
Prerekvizita: Přednáška Pořízení obrazu.

Osnova přednášky:

- ◆ Motivace, objektiv fotoaparátu.
- ◆ Proč jsou potřebné čočky?
- ◆ Jednoduchý model, geom. optika.
- ◆ Čočka fyzikálně. Hloubka pole a ostrosti.
- ◆ Objektivy. Optické vady objektivů.
- ◆ Kamera, pořízení obrazu, radiometrie.

Celý zobrazovací řetěz, přehled

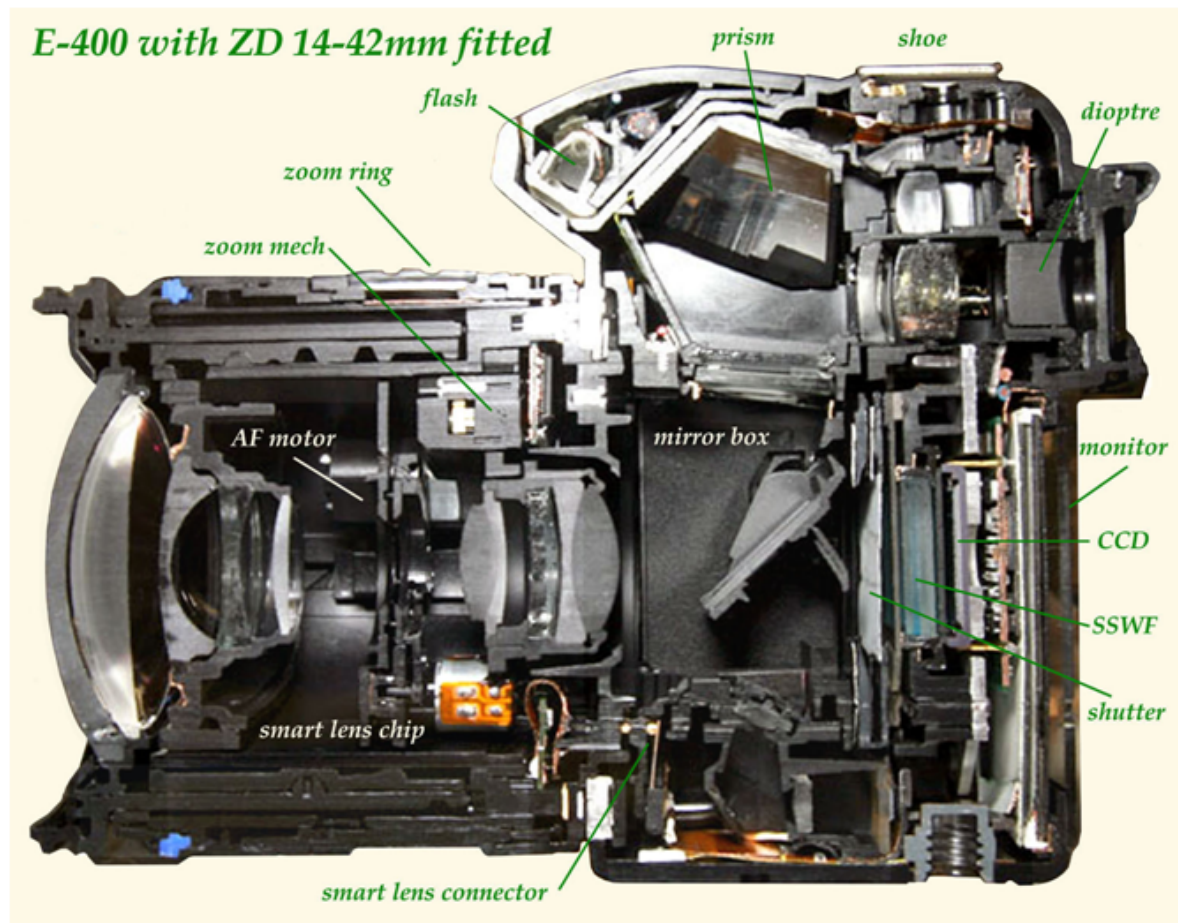
Pohled na celek: od pozorované vlastnosti přes zář (radiance) L a ozáření (irradiance) E k elektrickému signálu a nakonec k digitálnímu obrazu.



Dvě možnosti pořízení obrazu:

- ◆ **Přímé zobrazování** – existuje jednoznačná korespondence mezi bodem ve 3D scéně a jeho 2D obrazem (např. paprsek v projektivní transformaci).
- ◆ **Nepřímé zobrazování** – také poskytují prostorově závislou zář, ale bez jednoznačné korespondence mezi 3D a 2D (např. radar, tomografie, techniky spektrálního zobrazení, magnetická rezonance).

Jednooká zrcadlovka v řezu



Základní části digitálního fotoaparátu

- ◆ **Objektiv** složený z více čoček. Pevná nebo proměnná ohnisková vzdálenost. Clona s proměnnou velikostí otvoru.
- ◆ **Závěrka**. Mechanická nebo elektronická.
- ◆ **Optický hledáček** (u levnějších fotoaparátů chybí).
- ◆ **Matice světlocitlivých senzorů**. CCD nebo CMOS.
- ◆ **Zesilovač** upravující signál senzorů.
- ◆ **Analogočíslíkový převodník**.
- ◆ **Počítač** převádějící surová obrazová data na zobrazitelná.
- ◆ **LCD displej** k pozorování obrazů. LCD je zkratka z Liquid Crystal Display.
- ◆ **Paměťové médium** na obrazy, často lze vyndat.
- ◆ Zdroj energie, **baterie** nebo akumulátor.

Vylepšující části/funkce fotoaparátu

- ◆ Automatická expozice, tj. spolenčné 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.

Úkol optické soustavy

- ◆ Optická soustava (objektiv složený z více čoček) soustřeďuje dopadající energii (fotony) a na snímáči se vytváří obraz.
- ◆ Měřenou fyzikální veličinou je ozáření [W m^{-2}] (z pohledu lidského vnímání neformálně jas).
- ◆ Objektiv by měl co nejvěrněji napodobovat ideální projektivní zobrazování (také perspektivní, středové, model dírkové komory).
- ◆ Ve výkladu se omezíme především na geometrickou optiku. Vlnovou a kvantovou optiku ponecháme stranou.

Aproximace geometrickou optikou

Jedna z několika možných aproximací.

Předpoklady:

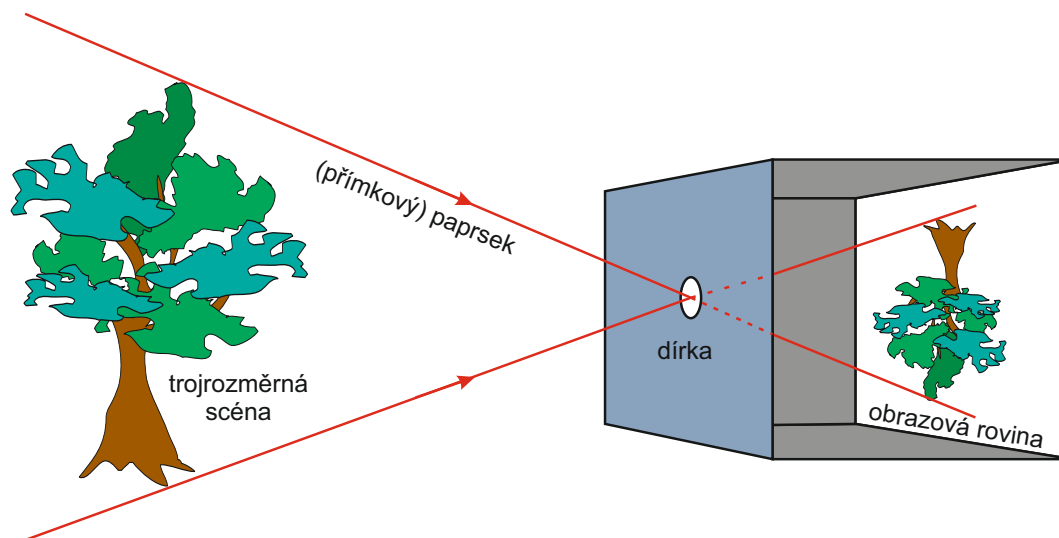
- ◆ Vlnové délky elektromagnetického záření (zde jen viditelná část frekvenčního spektra = světlo) jsou velmi malé ve srovnání s použitými optickými a mechanickými částmi.
- ◆ Energie fotonů (z pohledu kvantové teorie) jsou malé ve srovnání s energetickou citlivostí použitých sensorů.

Jde o hrubou aproximaci. Geometrická optika je důležitá pro techniku a také je zajímavá z hlediska historického vývoje fyzikálního názoru.

Doporučené čtení: *Feynman R.P., Leighton R.B., Sands M.: Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady, Fragment Praha 2000 (původní angl. vydání 1963).*

Dírková komora

- ◆ 15. století, florentský architekt Filippo Brunelleschi (1377-1446), pomůcka při kreslení perspektivy.
- ◆ 16. století, latinsky camera obscura, česky dírková komora.
- ◆ 1822 Francouz J.-N. Niepce přidal fotografickou desku $\Rightarrow$ první fotografie.



Konvence: Uvažujeme směr světla zleva doprava.

Velikost dírky v dírkové komoře

Protichůdné jevy.

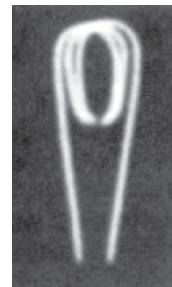
- a. Větší dírka propustí více světla, ale rozmaže obrázek.
- b. Při malé dírce se začnou projevovat ohybové jevy a obrázek bude také rozmazán.
- c. Existuje optimum, kdy je obrázek nejvíce zaostřen? Např. pro $f=100$ [mm] a $\lambda=500$ [nm] je optimální průměr dírky 0,32 [mm].



a



b

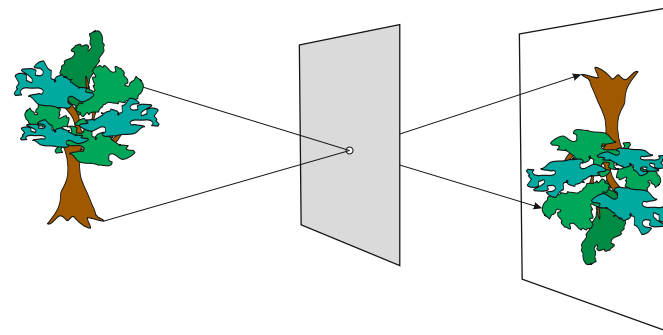


c

Proč se používají čočky?

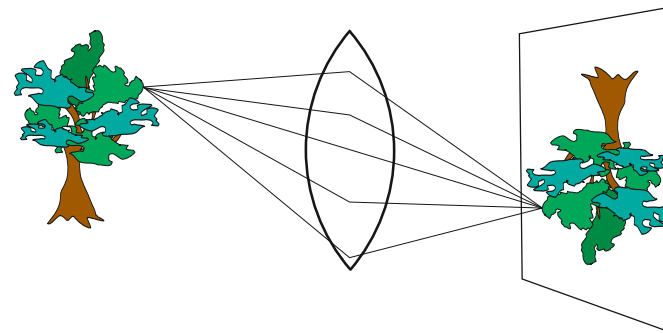
Dírková komora:

- ◆ Sbírá jen málo fotonů (světla).
- ◆ Potíže díky ohybu světla na dírce.
- ◆ Nemá optické vady (přibližně řečeno).



Čočka i fotografický objektiv:

- ◆ Sbírají více fotonů (světla).
- ◆ Musí být zaostřené.
- ◆ Trpí optickými vadami.

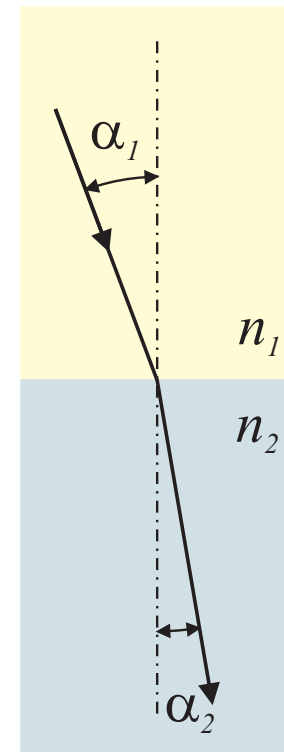


Čočka z fyzikálního hlediska

- Chování čočky vysvětlil holandský matematik Willebrord van Roijen Snell (1580–1626) v roce 1621 zákonem lomu na rozhraní dvou prostředí

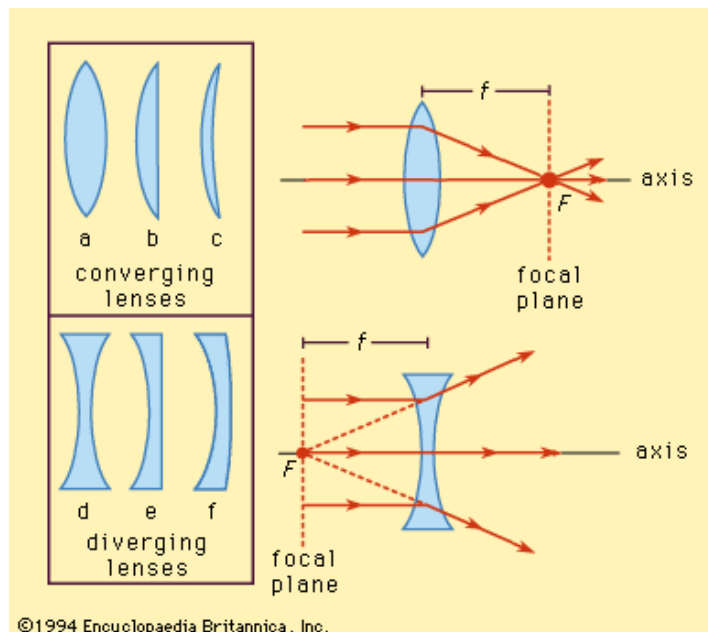
$$n = \frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \alpha_1}, \text{ kde } n \text{ je index lomu.}$$

- n pro žluté světlo $\lambda=589$ [nm] a rozhraní mezi vakuem a X:
X = vzduch 1,0002; voda 1,333; korunové sklo (malý rozptyl světla, malý index lomu) 1,517; olovnaté optické sklo 1,655; diamant 2,417.
- Elegantní odvození Snellova zákona lomu je na základě (přibližného) Fermattova principu nejkratšího času z roku 1650, viz Feynmanovy přednášky z fyziky.

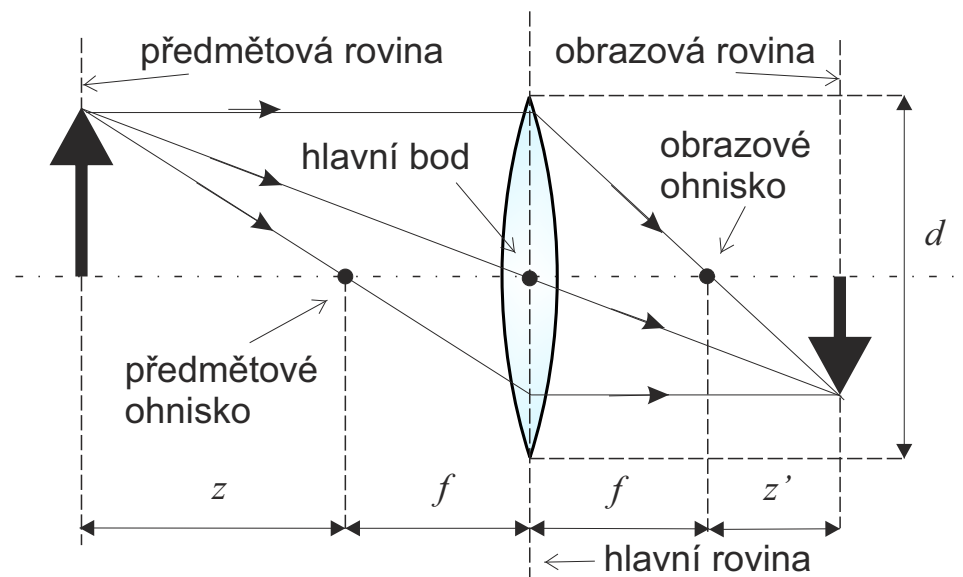


Čočka

- ◆ Čočka vytváří obraz tím, že zaostřuje paprsky světla ze scény.
- ◆ Různé paprsky přicházejícího světla se lámou na čočce pod různými úhly, např. soustředí rovnoběžné paprsky do jednoho ohniska (spojka), nebo převede svazek paprsků z ohniska na rovnoběžné paprsky.



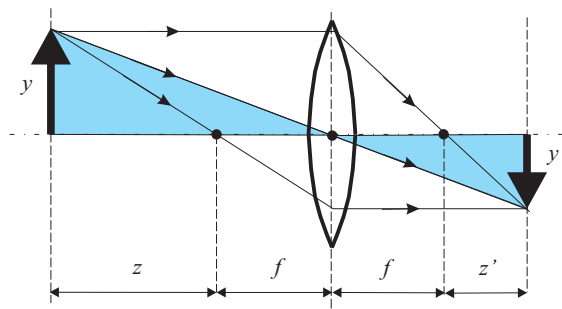
Čočka, matematický model



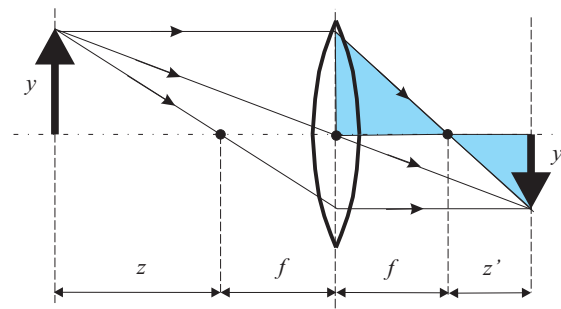
Rovnice tenké čočky v newtonovském tvaru $\frac{1}{f} = \frac{1}{z' + f} + \frac{1}{f + z}$

nebo jednodušeji $f^2 = z z'$

Odvození rovnice tenké čočky, myšlenka: podobné $\triangle$



$$\frac{y'}{y} = \frac{z' + f}{z + f}$$



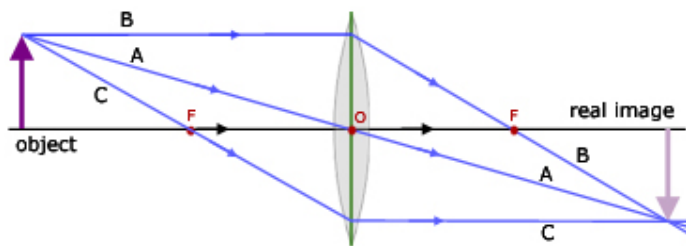
$$\frac{y'}{y} = \frac{z'}{f}$$

Spojením obou rovnic:

$$\begin{aligned} \frac{z' + f}{z + f} &= \frac{z'}{f} \\ f(z' + f) &= z'(z + f) \\ fz' + f^2 &= zz' + fz' \\ f^2 &= zz' \end{aligned}$$

Paprskové diagramy

Paprskové diagramy sjednodušují pochopení objektivů pro různá použití rozlišením tří případů:



- A. Paprsek procházející hlavním bodem čočky;
- B. Paprsek rovnoběžný s optickou osou, který čočka láme a prochází ohniskem;
- C. Paprsek procházející ohniskem na předmětové straně objektivu, který čočka láme a vychází rovnoběžný s optickou osou.

Rozlišíme mezi dvěma užitečnými skupinami obrazů (také v paprskových diagramech):

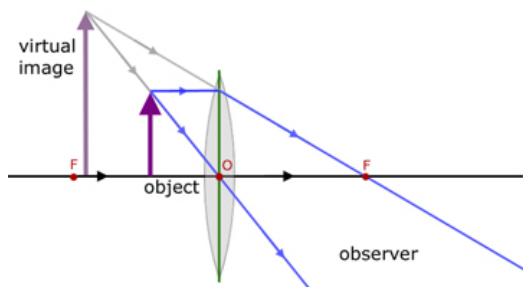
- ◆ **Reálné obrazy** vytvářejí skutečné světelné paprsky přicházející do ohniska, např. film promítaný na plátno;
- ◆ **Virtuální obrazy** vytvářejí paprsky, které vycházejí pouze zdánlivě, např. obraz pozorovaný lupou.

Ukážeme diagramy vytvářející obraz objektu umístěného v různých místech. F je ohnisko na objektové straně čočky (vlevo).

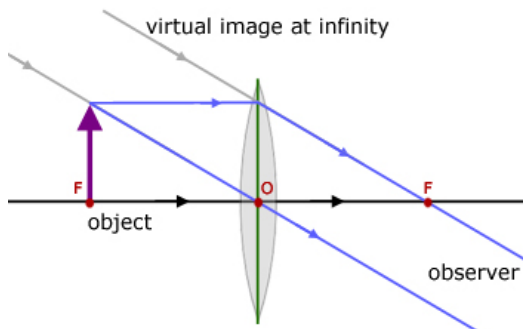
- ◆ Objekt je mezi F a čočkou.
- ◆ Objekt je v F .
- ◆ Objekt je mezi F a $2F$.
- ◆ Objekt je ve vzdálenosti $2F$ od čočky.

Možná uspořádání podle pozice objektu

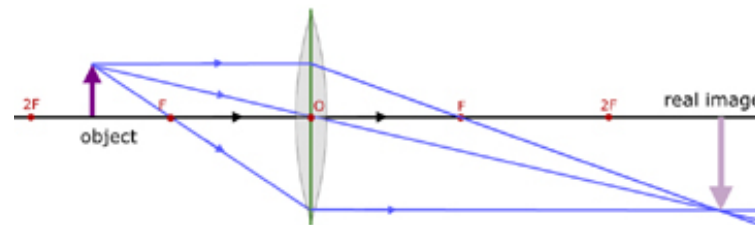
- ◆ **Zvětšovací sklo, lupa.** Objekt je mezi F a čočkou; Je virtuální, ve stejném směru, zvětšený.



- ◆ Objekt v F ; rovnoběžné paprsky, obraz je v nekonečnu, tj. žádný obraz.



- ◆ **Projektor.** Objekt je mezi F a $2F$

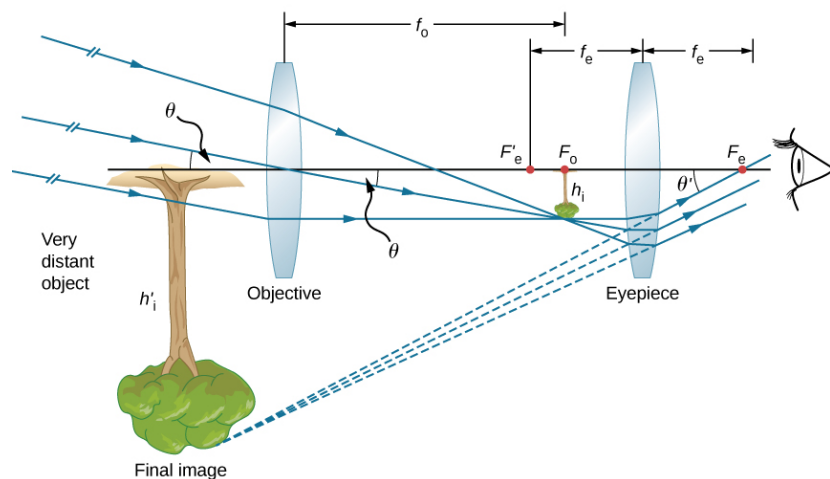


- ◆ **1:1 Kopírka.** Objekt je ve vzdálenosti $2F$.
Podobně jako na obr. výše. Nyní je obraz ve stejné vzdálenosti za čočkou, přičemž objekt je před čočkou. Podobně jako u projektoru, je obraz převrácený a reálný. Navíc je obraz stejně veliký jako objekt.
- ◆ **Čočka fotoaparátu nebo kamery.** Vzdálenost k objektu je $> 2F$, obvykle $\gg F$.
Normální, širokoúhlé a telecentrické objektivy.

Další uspořádání, dalekohled, mikroskop

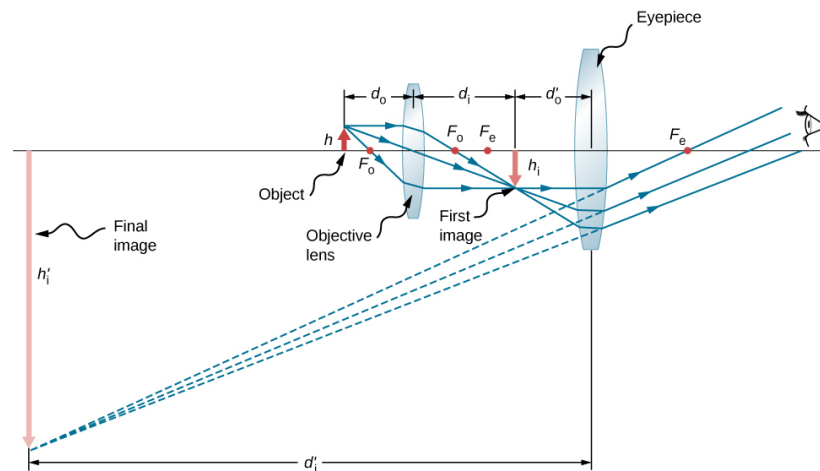
Astronomický teleskop s čočkami

- ◆ Používá se pro pozorování velkých vzdálených objektů. Velký optický otvor.
- ◆ Ohnisková vzdálenost hledáčku je menší než ohnisková vzdálenost objektivu.
- ◆ Ohnisková vzdálenost objektivu je velká pro velká zvětšení.

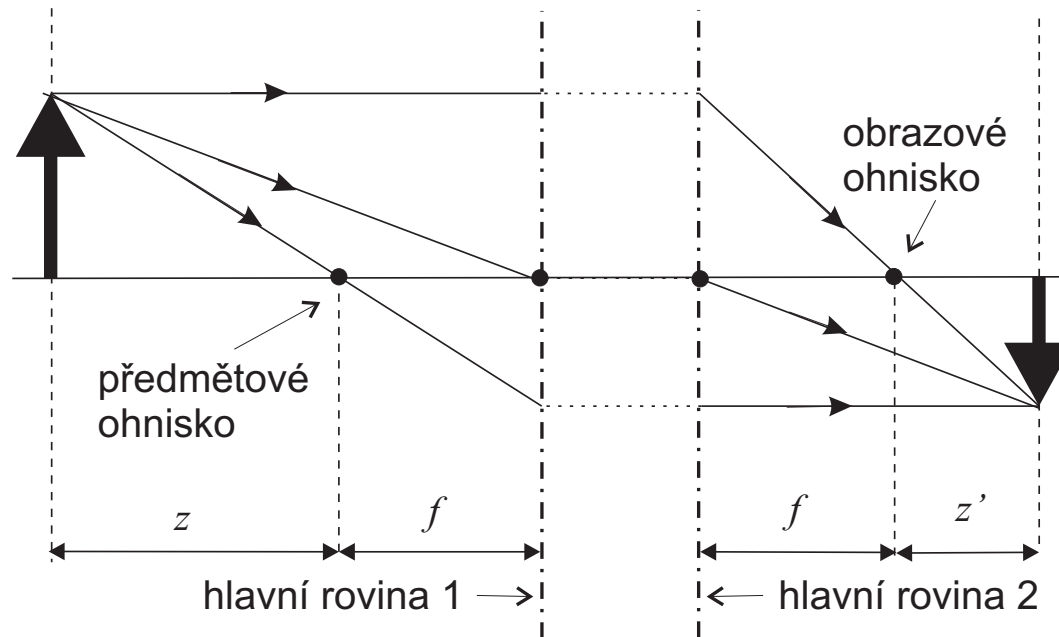


Mikroskop

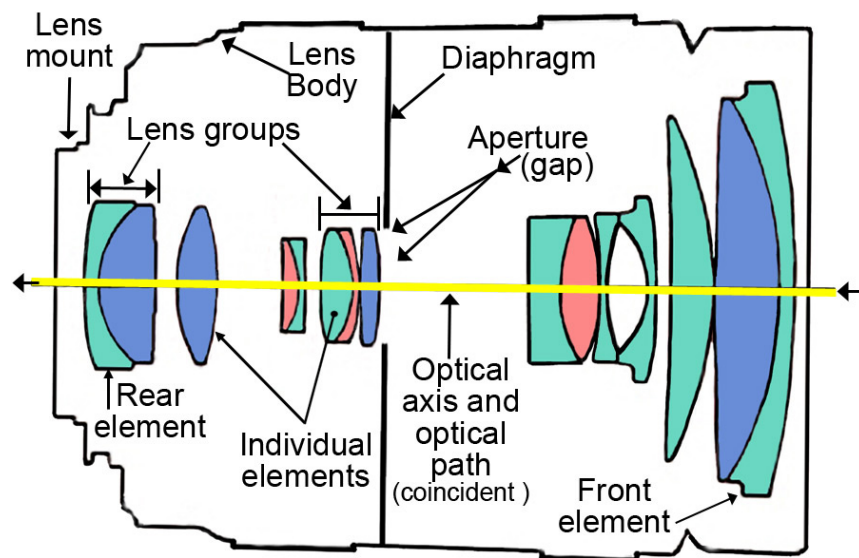
- ◆ Používá se pro pozorování blízkých, velmi malých objektů. Malý optický otvor.
- ◆ Ohnisková vzdálenost hledáčku je větší než ohnisková vzdálenost objektivu.
- ◆ Ohnisková vzdálenost objektivu je velká pro velká zvětšení.



Thick (compound) lens Approximation of optical system



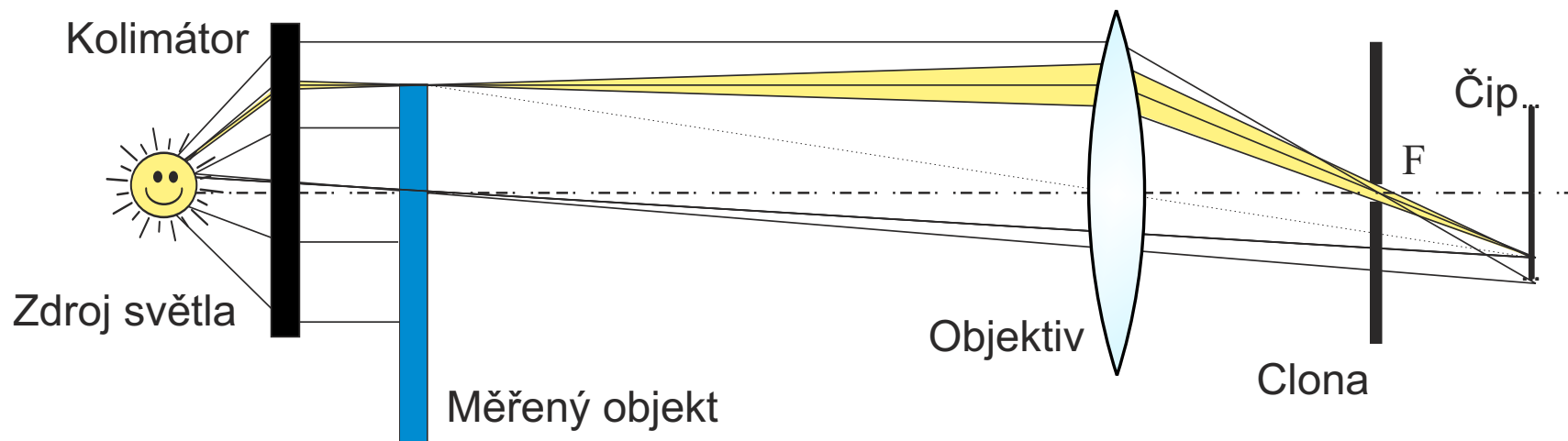
Soustavy čoček, příklad implementace



- ◆ Optické soustavy (objektiv) se používají pro odstranění aberací (= optických vad).
- ◆ Hlavní optické vady: vinětace (přirozená, optická, mechanická), barevné (chromatické) vady, sférická vada, koma, astigmatismus a geometrické (radiální/tangenciální) zkreslení. Optické vady vysvětlíme v této přednášce později.

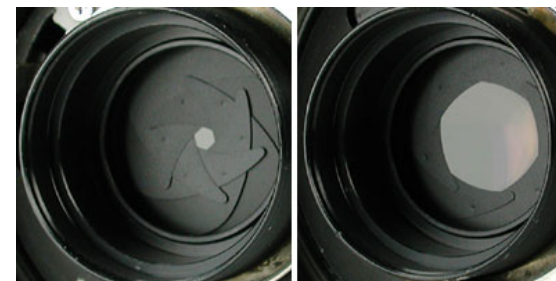
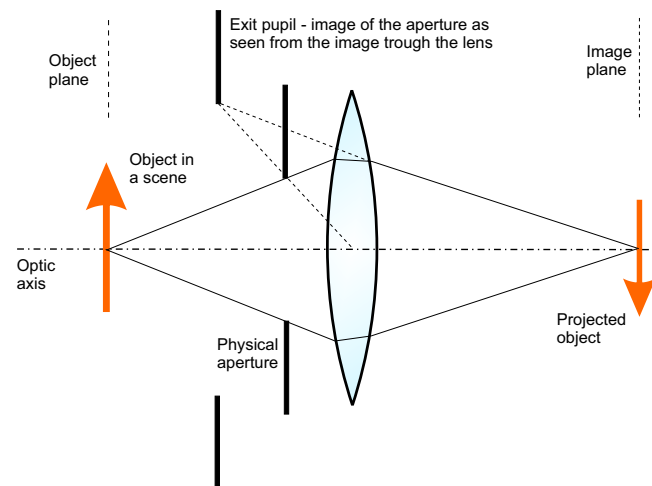
Telecentrický objektiv

- ◆ Použity jen hlavní paprsky, tj. šikmé paprsky procházející centrem clony umístěné v bodu zosťrení. Tyto paprsky jsou $\approx$ rovnoběžné s optickou osou.
- ◆ Vstupní čočka musí mít větší průměr než měřený objekt.
- ◆ Výhodné tam, kde se mění poloha měřeného objektu na optické ose nebo objekt je “tlustý”



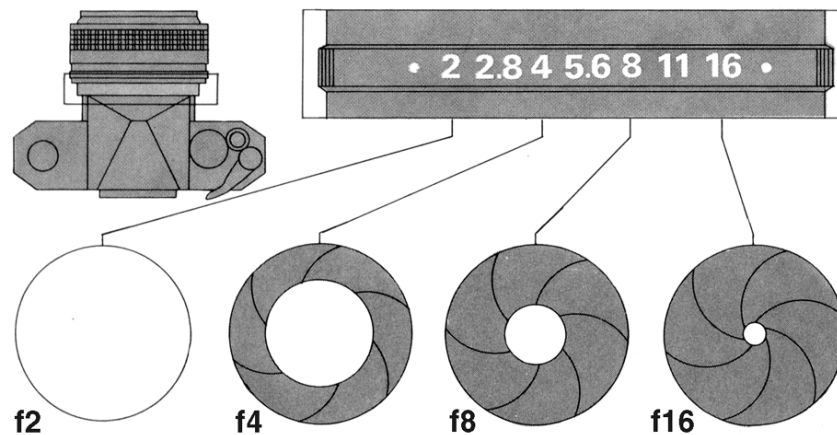
Clona

- ◆ Tenký rovinný neprůhledný objekt umístěný kolmo na optickou osu s dírkou uprostřed.
- ◆ Úkolem clony je nepropustit část světelné energie (paprsků), aby se nedostala na obrazovou rovinu.
- ◆ Velikost clonového otvoru se u běžných fotoaparátů a kamer dá nastavit, ať ručně nebo motoricky.
- ◆ Nastavitelný clonový otvor se přirovnává k duhovce oka (angl. iris), jejíž velikost se také podle množství světla mění. Nastavitelná clona obvykle sestává z nastavitelných lístečků.



Jedna z konstrukcí nastavitelné clony.

Clona 2, příklady



f2.8



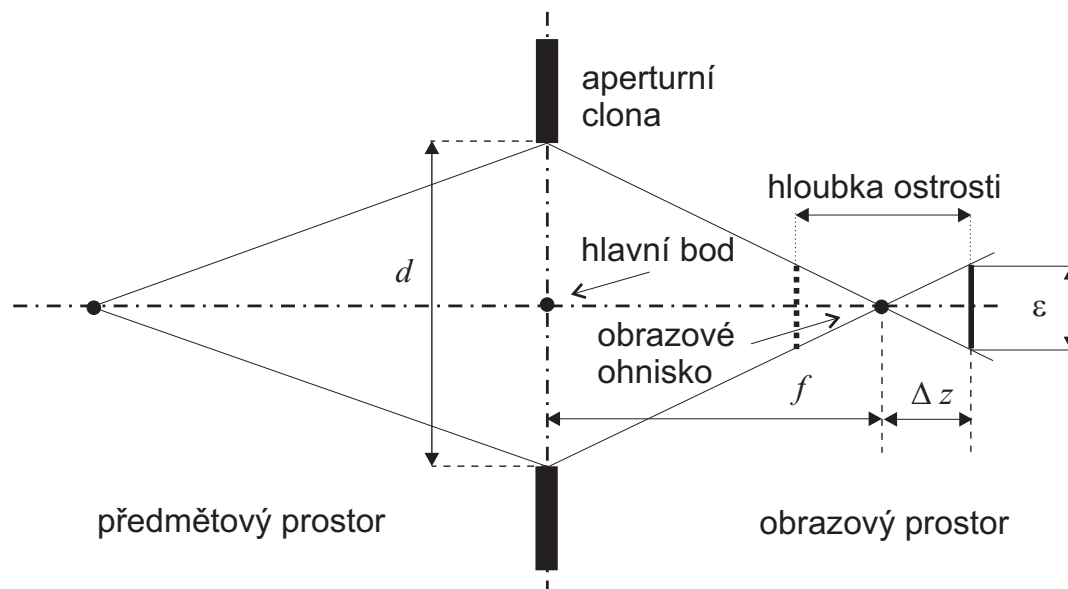
f8



f22

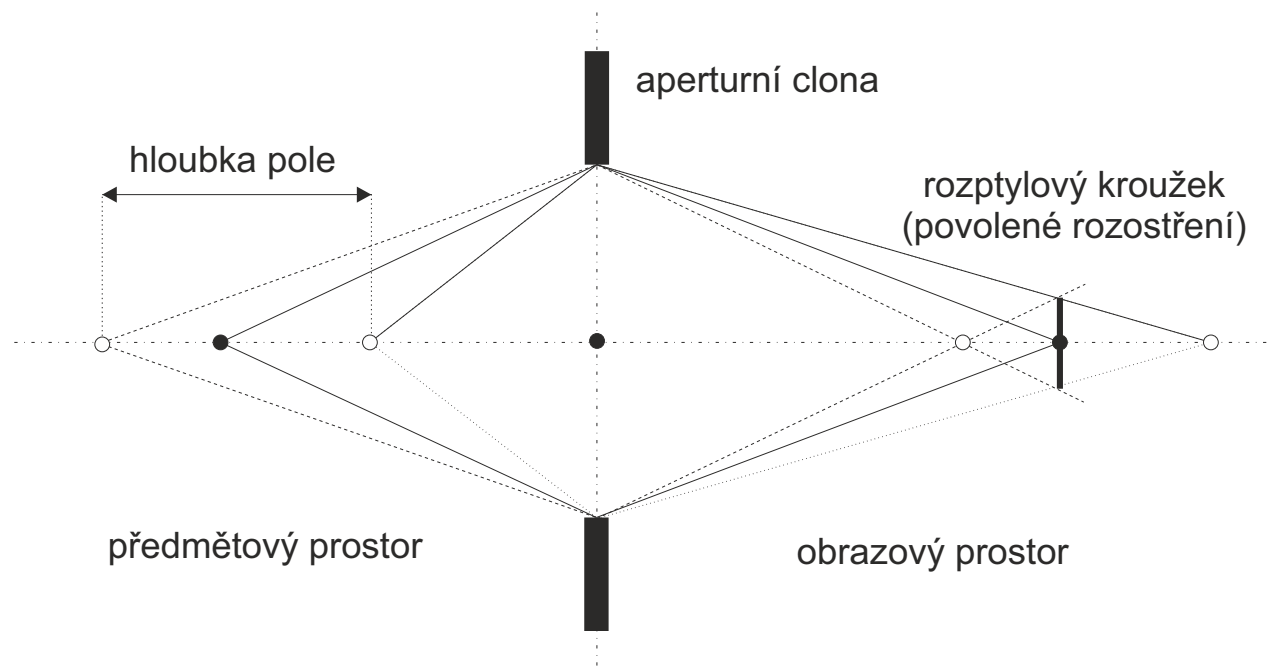
Hloubka ostrosti

- ◆ Vysvětluje, proč je možné mírně posunout obrazovou rovinu (v obrazovém prostoru) ve směru optické osy a mít stále dostatečně zaostřený obraz, a to díky konečné velikosti pixelu na senzoru nebo zrna fotocitlivého materiálu u zrna.
- ◆ Rozptylový kroužek má průměr ε .



Hloubka pole

Hloubka pole udává rozsah vzdáleností od středu promítání v předmětovém prostoru, v němž se objekty zobrazují dostatečně zaostřené. Tento parametr je pro fotografa prakticky zajímavý.



Vliv clony na hloubku pole ostrosti (1)

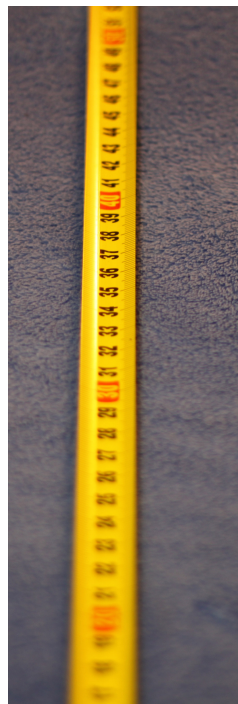


velký otvor, malá hloubka pole ostrosti



malý otvor, velká hloubka pole ostrosti

Vliv clony na hloubku pole (2)



$f=1,8$



$f=8$



$f=22$

Objektiv Canon EF 50 mm f/1.8 II s nejmenší clonou 1:1,8.

Vliv ohniskové vzdálenosti na hloubku pole



Parametry objektivů (1)

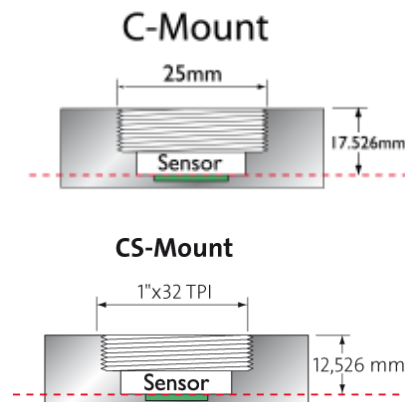
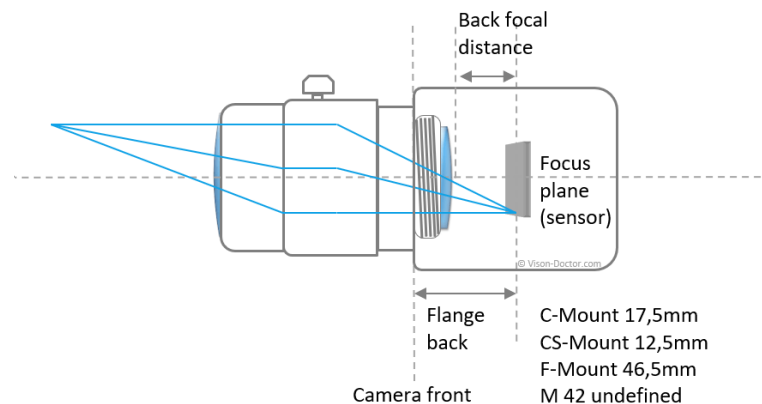
Ohnisková vzdálenost – pevná, transfokátor (zoom),
nastavitelná motorem či ručně.

Clona

- ◆ Apertura (velikost otvoru) odpovídá největšímu průměru světelného svazku procházejícího optickou soustavou. Apertura se řídí velikostí clony.
- ◆ Clona může být pevná, ručně nastavitelná nebo motorizovaná.

Připojení objektivu

- ◆ C – vzdálenost zadního čela objektivu od čipu je asi 17 mm.
- ◆ CS – cca 12 mm, ostatní parametry jsou stejné.
- ◆ Objektiv pro C kameru lze přizpůsobit k CS kameře mezikroužkem tloušťky 5 mm. Opačně nelze.



Parametry objektivů (2)

Ostření – pevně nastavené, ruční nebo motorické.

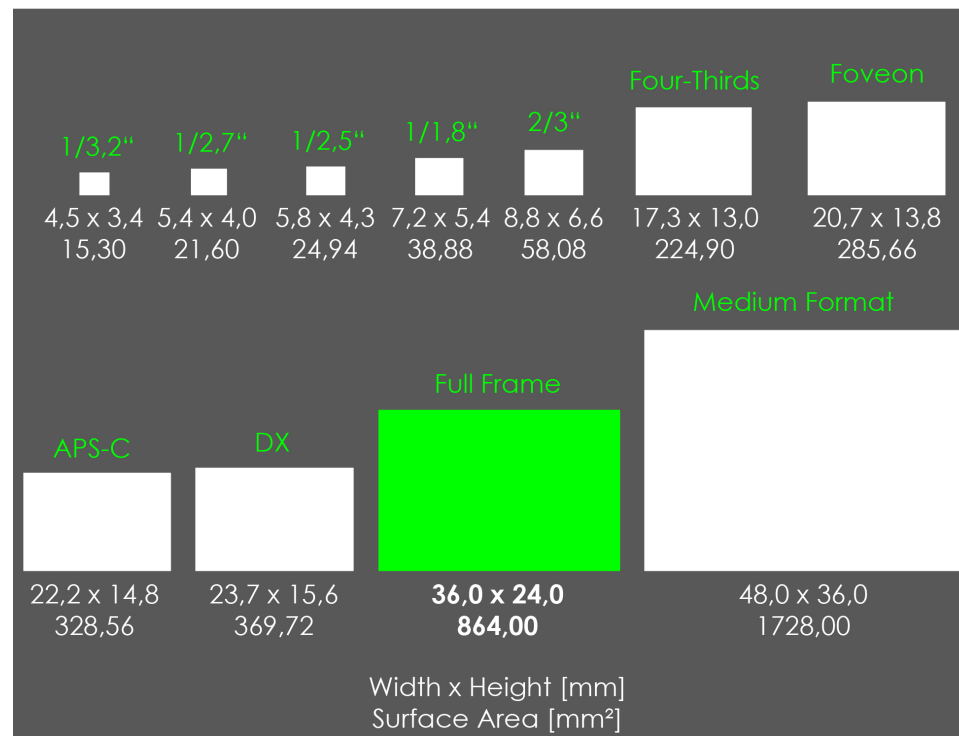
Vzdálenosti, na které ostří – lze měnit mezikroužky za cenu zhoršení optických vlastností.

Formát – jaký největší čip lze použít. 1", 2/3", 1/2", 1/3", 1/4".

Závit pro filtr – např. čirý filtr se používá na ochranu objektivu.

Radiální zkreslení – se neuvádí v katalogu, ale je důležité pro měřicí aplikace. Objektivy s krátkou ohniskovou vzdáleností typicky větší zkreslení (několik pixelů).

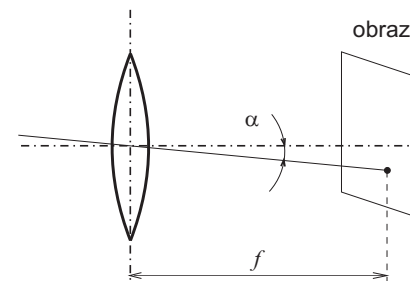
Camera Sensor Formats



Poděkování Markus Kohlpaintner (figure)

Přirozená vinětace

- ◆ Činitel $\cos^4 \alpha$ popisuje systematickou optickou vadu zvanou **přirozená vinětace**.
Odvození viz rovnice ozáření v přednášce o pořízení obrazu z fyzikálního hlediska.
- ◆ Popisuje jev, kdy jsou více zeslabovány paprsky lámající se s větším úhlem α (dále od optické osy).
- ◆ Tato chyba je více patrná u širokoúhlých objektivů než u teleobjektivů.
- ◆ Jelikož je přirozená vinětace systematickou chybou, lze ji pro radiometricky kalibrovanou kameru kompenzovat.



originál



vinětace

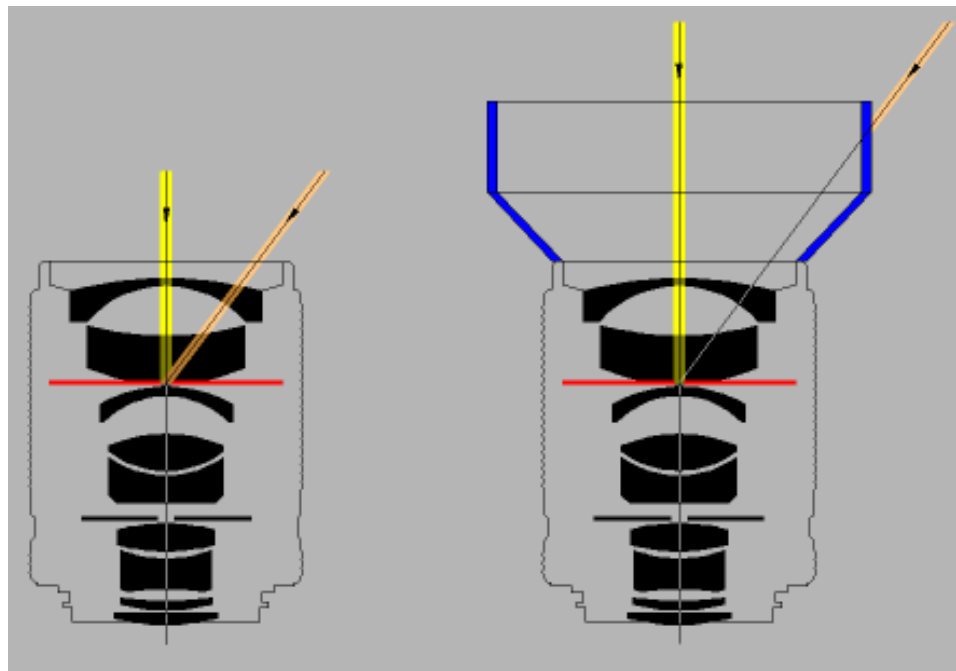
Optická vinětace

- ◆ 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 clonových otvorech.



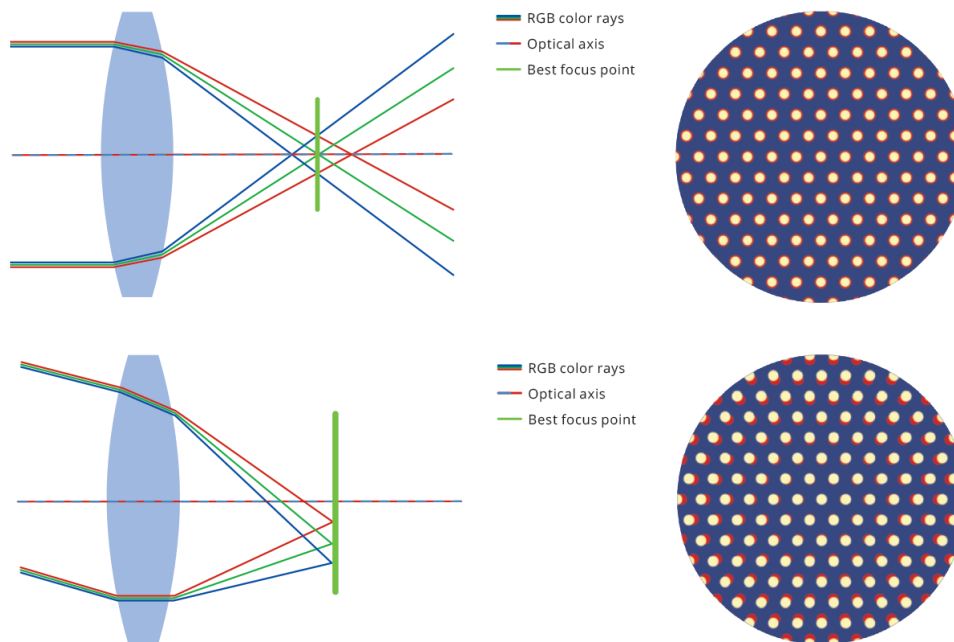
Mechanická vinětace

- ◆ Týká se jen nepozorných uživatelů.
- ◆ Sluneční clona musí odpovídat příslušnému objektivu.



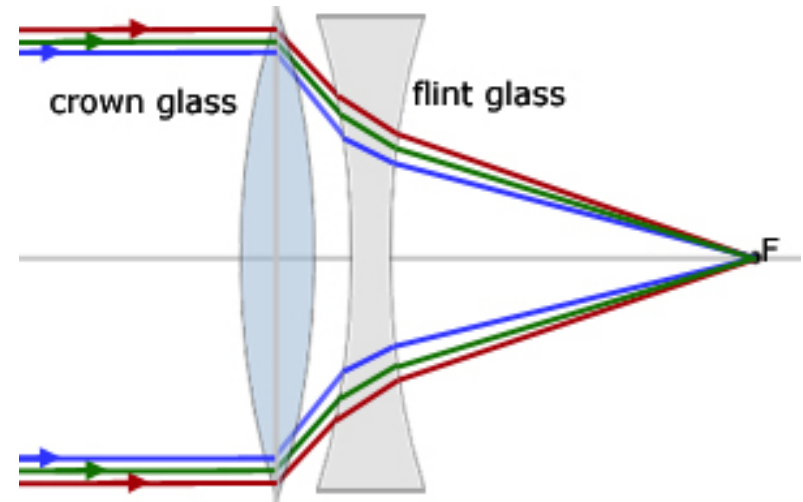
Chromatické vady

- ◆ Chromatické vady jsou způsobeny závislostí indexu lomu čočky na vlnové délce světla. Tato vlastnost je žádoucí u hranolů pro rozklad světla, ale nežádoucí u objektivů.
- ◆ Čočka zaostřuje záření různé barvy (vlnové délky) do různých bodů na optické ose.
- ◆ Dva typy: Podélný/axiální (řádek 1 na obr. níže) and příčný/laterální (řádek 2 na obr. níže). Vada se více projevuje na okrajích obrazu.



Chromatická vada, dublet pro kompenzaci

- ♦ Vada se koriguje při výrobě objektivu.
- ♦ Ke kompenzaci slouží dublet, tj. pár jednoduchých čoček z různých materiálů s různým indexem lomu, obvykle z korunového a olovnatého skla, první s nízkým a druhé s vysokým indexem lomu.



Doublet lens correcting for longitudinal chromatic aberration.

Chromatická laterální vada, prakticky



blízko optické osy, střed obrazu

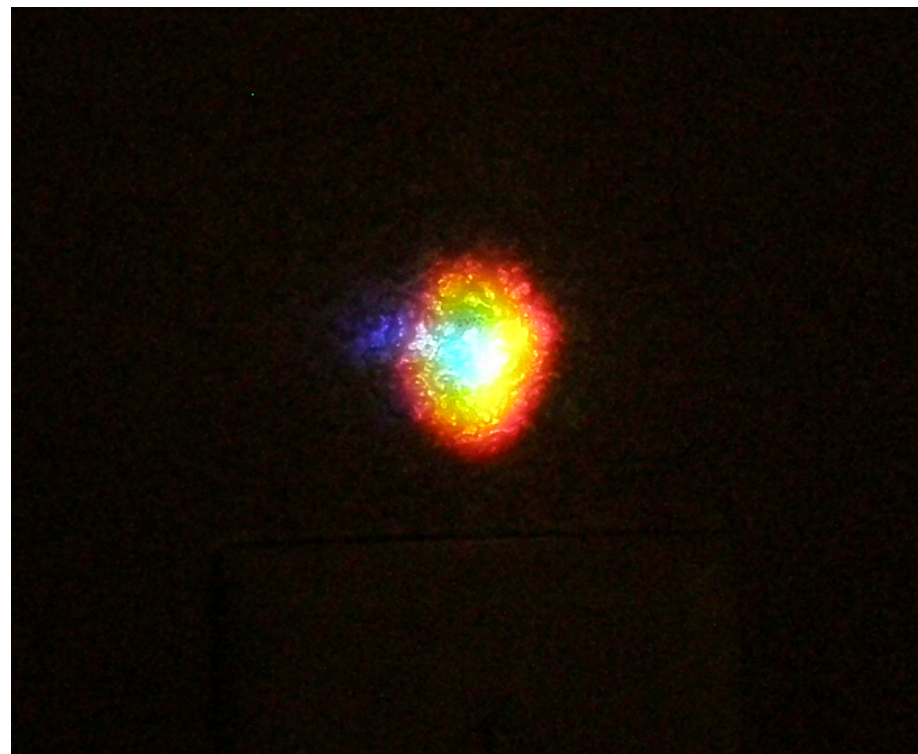


daleko od optické osy, okraj obrazu

Chromatická vada, extrémní případ



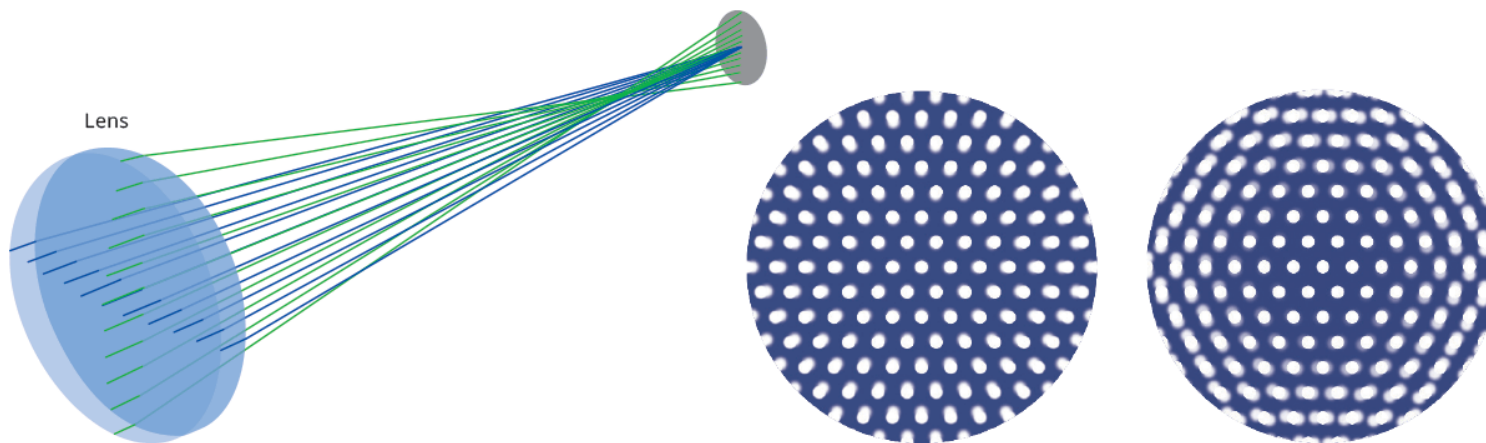
Nekvalitní čočka dveřního kukátka
v americkém motelu.



Promítnuté zapadající slunce
na stěnu místnosti ve tmě.

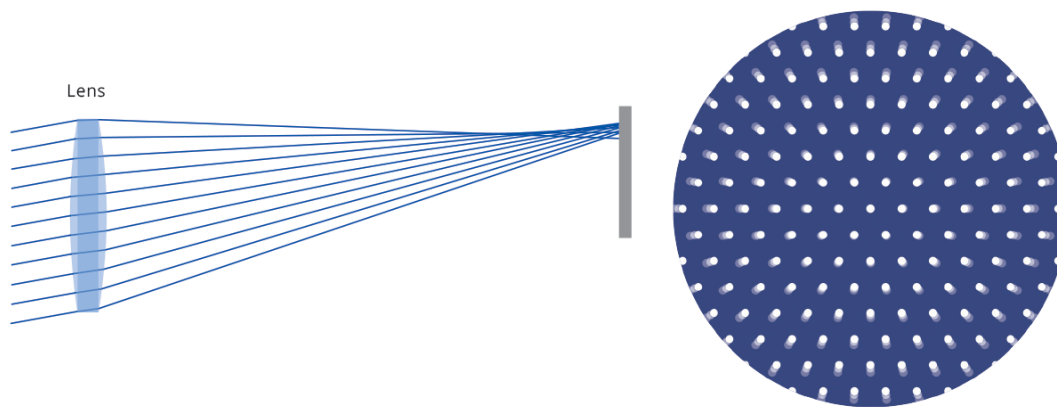
Astigmatismus

- ◆ Astigmatismus je optická vada projevující se tím, že paprsky ležící ve dvou kolmých rovinách (sagitální = horizontální; tangenciální = meridiální = vertikální) kolmých k optické ose mají různý bod zaostření.
- ◆ Astigmatismus způsobuje rozostření v jednom směru, které se ve druhém směru neprojevuje. Když zaostříme senzor podle sagitální roviny, potom se kruh promítnutý do tangenciální roviny jeví jako elipsa, obráceně také.



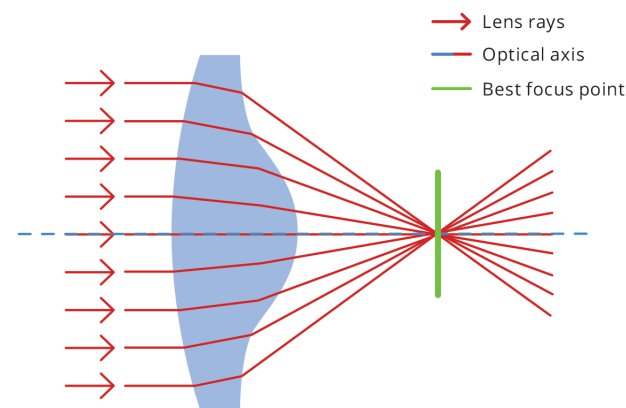
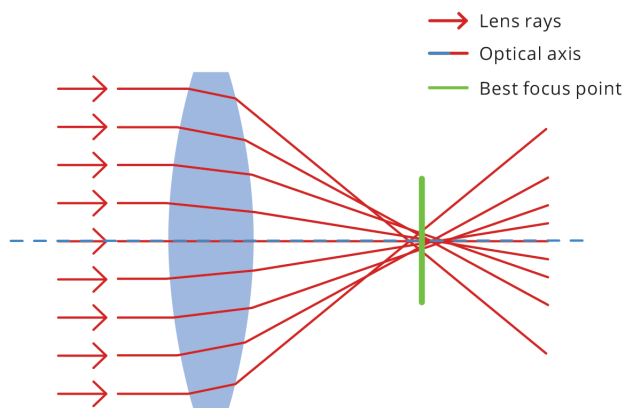
Koma (asymetrická vada)

- ◆ Koma (z latinského comet) se týká paprsků vstupujících do objektivu šikmo. Tyto paprsky se neprotínají v rovině zaostření.
- ◆ Vadu koma lze ukázat, když se vezme jedna čočka a natáčí se vůči Slunci. Když optická osa čočky směřuje ke Slunci, zobrazí se Slunce správně zobrazeno jako kruhové. Když se optická osa od Slunce odchýlí, zobrazí se Slunce jako objekt podlouhlého tvaru, jako např. kometa.
- ◆ Koma je kladné číslo, když se zobrazují paprsky jiných směrů než směr optické osy dále od osy. Koma je záporná v obráceném případě.



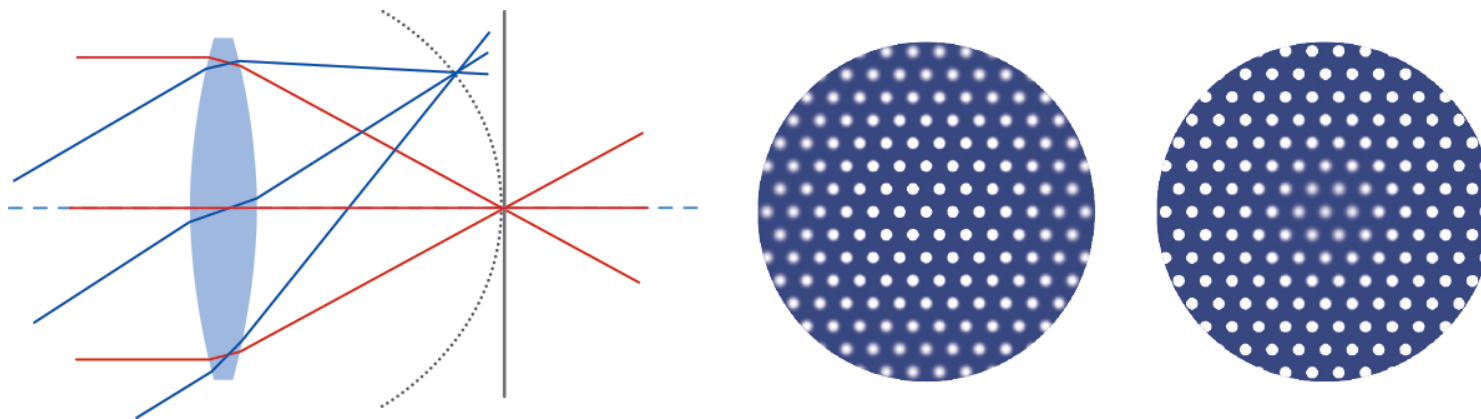
Sférická vada

- ◆ Nazývá se také otvorová vada.
- ◆ Kulové čočky jsou nejobvyklejší, protože se snadno vyrábějí (brousí). Kulový tvar není nejvhodnější pro dokonalé zobrazení. Paprsky rovnoběžné s optickou osou, které na čočku dopadají v různé vzdálenosti od optické osy se lámou do různých bodů na optické ose, což způsobuje neostrost obrazu.
- ◆ Rozmazání se zvětšuje s rostoucí vzdáleností od optické osy.
- ◆ K potlačení sférické vady se používají asférické čočky.



Zobrazení na zakřivené Petzvalově ploše

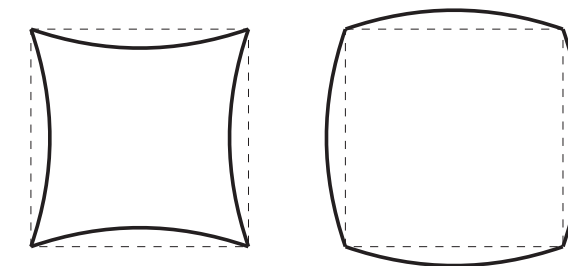
- ◆ Vada zobrazení na zakřivené ploše, v české literatuře také zklenutí obrazu, vyjadřuje jev, kdy se rovnoběžné paprsky dopadající na čočku (objektiv) pod různými úhly nejsou zaostřené v rovině, ale na zakřiveném Petzvalově povrchu, rotačním paraboloidu. (fyzik Josef Maximilian Petzval, *1807 Spišská Belá, †1891 Vídeň).
- ◆ Tato vada způsobuje radiální rozostření, kdy pro určitou vzdálenost světlocitlivého čipu od čočky budou zaostřeny pouze body v určitém kruhu. Vada se projevuje jako radiální geometrické zkreslení, viz dále.



Radiální (geometrické) zkreslení

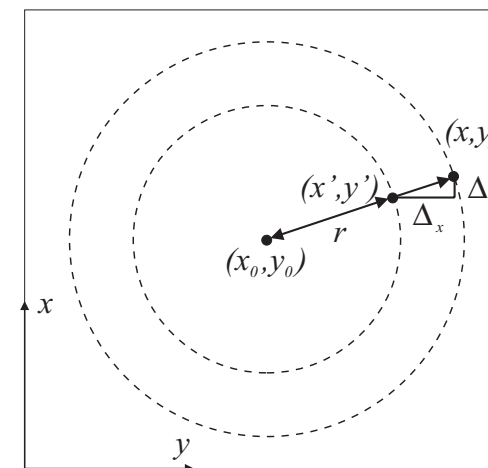
- ◆ Převládající geometrické zkreslení. Projevuje se více u širokoúhlých objektivů.
- ◆ (x', y') jsou souřadnice změřené v obraze, nekorigované; (x, y) jsou korigované souřadnice; (x_0, y_0) jsou souřadnice hlavního bodu; (Δ_x, Δ_y) jsou složky opravy a r je rádius,

$$r = \sqrt{(x' - x_0)^2 + (y' - y_0)^2}.$$
- ◆ Zkreslení se aproximuje polynomem sudého stupně (proč?), často jen stupně dva.



polštářkové

soudkovité



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

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

Radiální zkreslení, prakticky



soudkovité

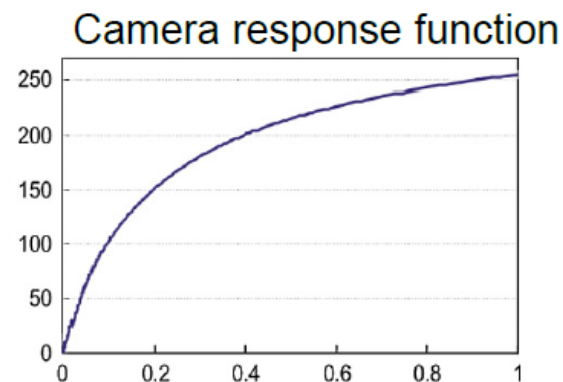
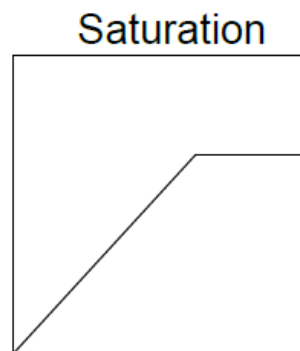
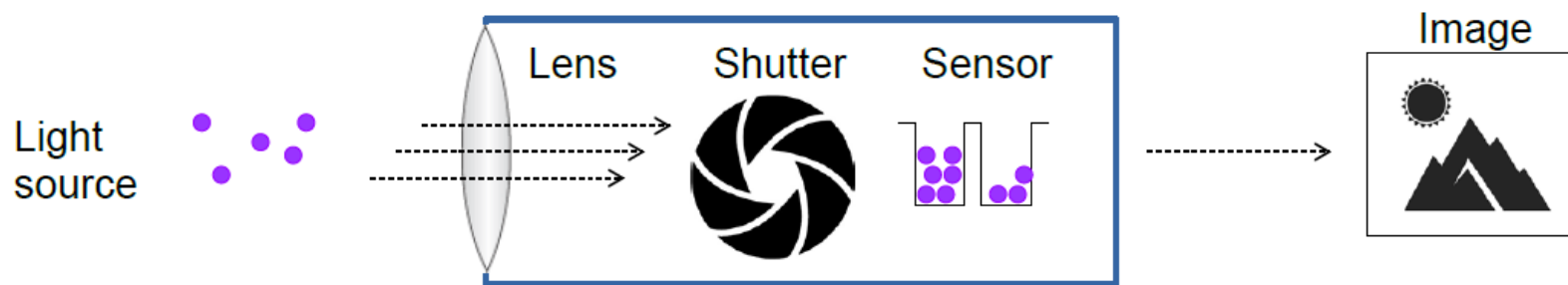


bez zkreslení



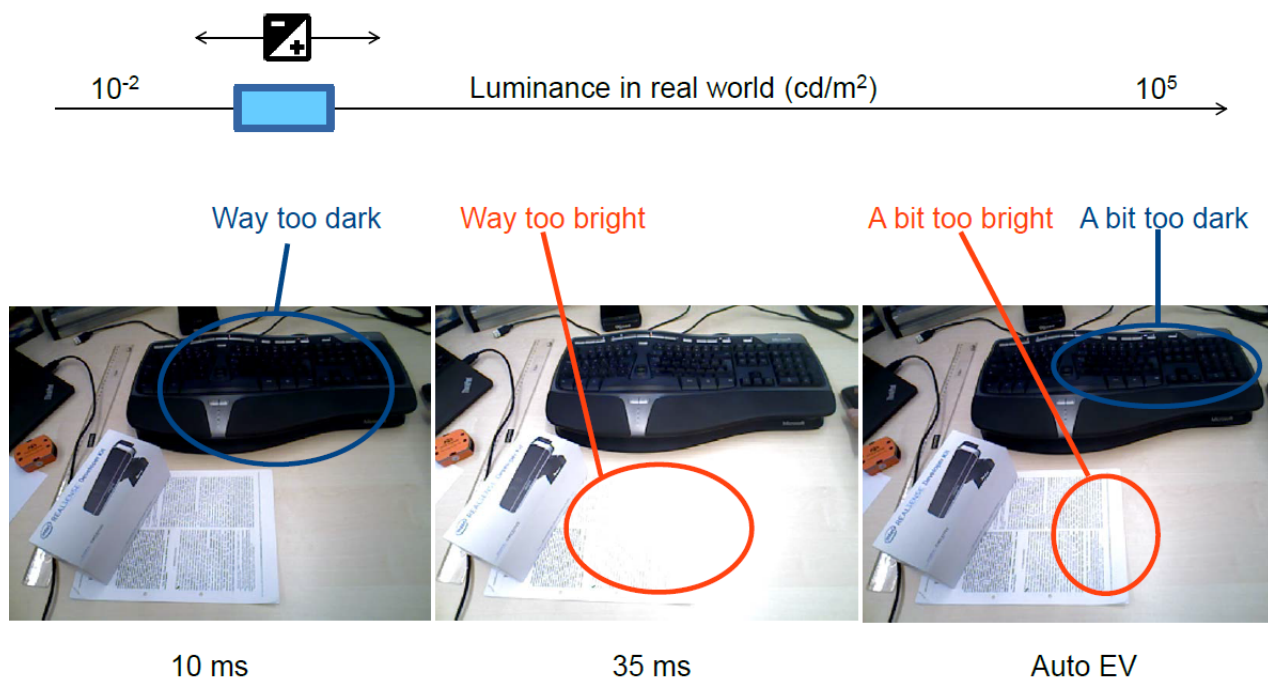
polštářkové

Vytvoření obrazu v kameře z radiometrického hlediska



Poděkování: Sergey Alexandrov

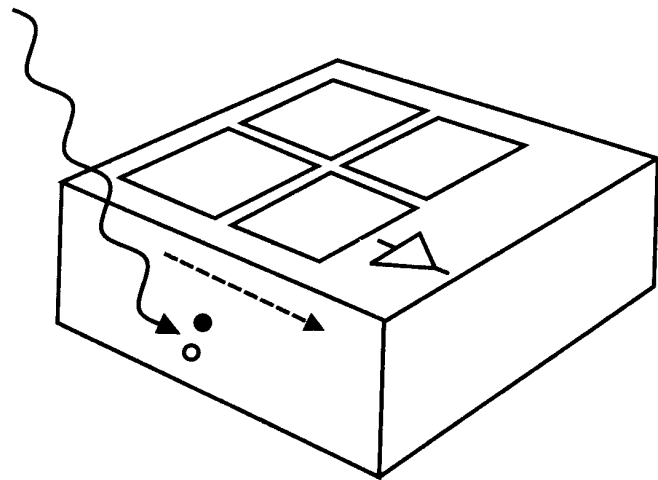
Ukázka nízkého dynamického rozsahu v jasu



Luminance [cd/m^2]: noc osvětlená Měsícem 10^{-2} ;
 osvětlení interiéru 10^2 ; denní světlo (zataženo/jasně nebe) $10^3/10^5$.

Poděkování: Sergey Alexandrov

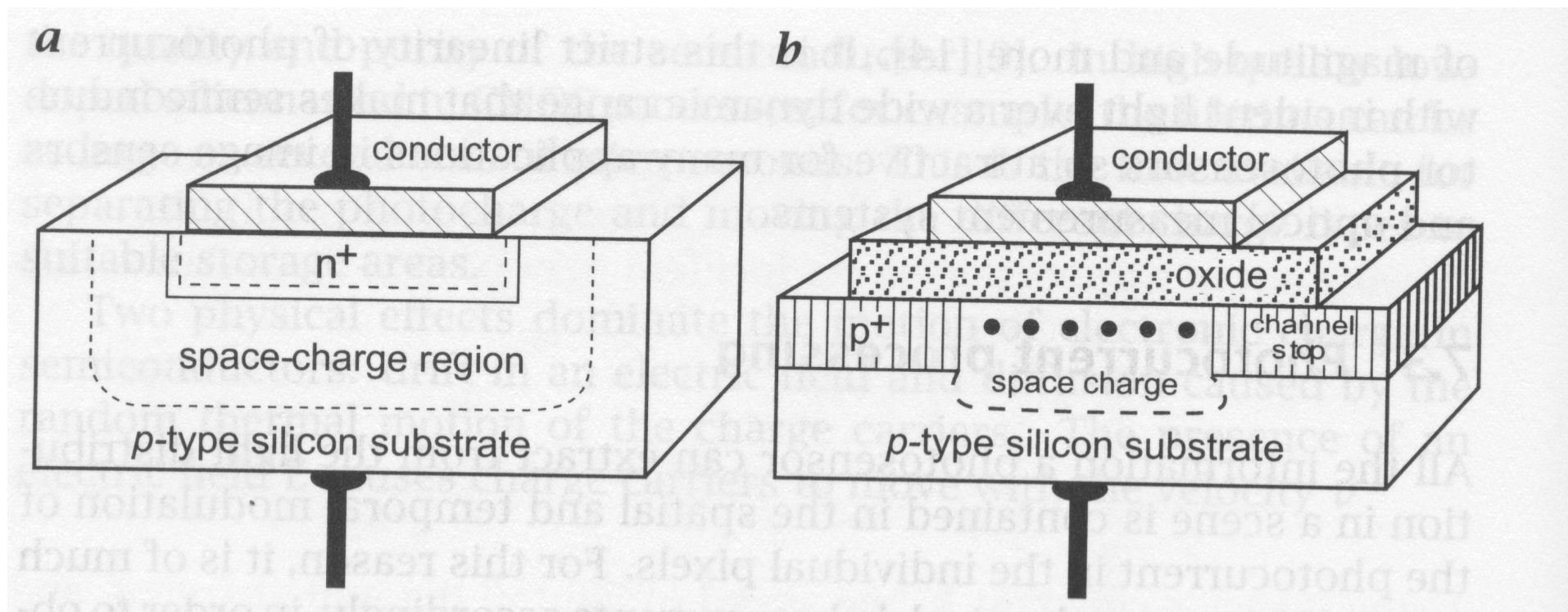
Princip fotopřeměny v polovodičích



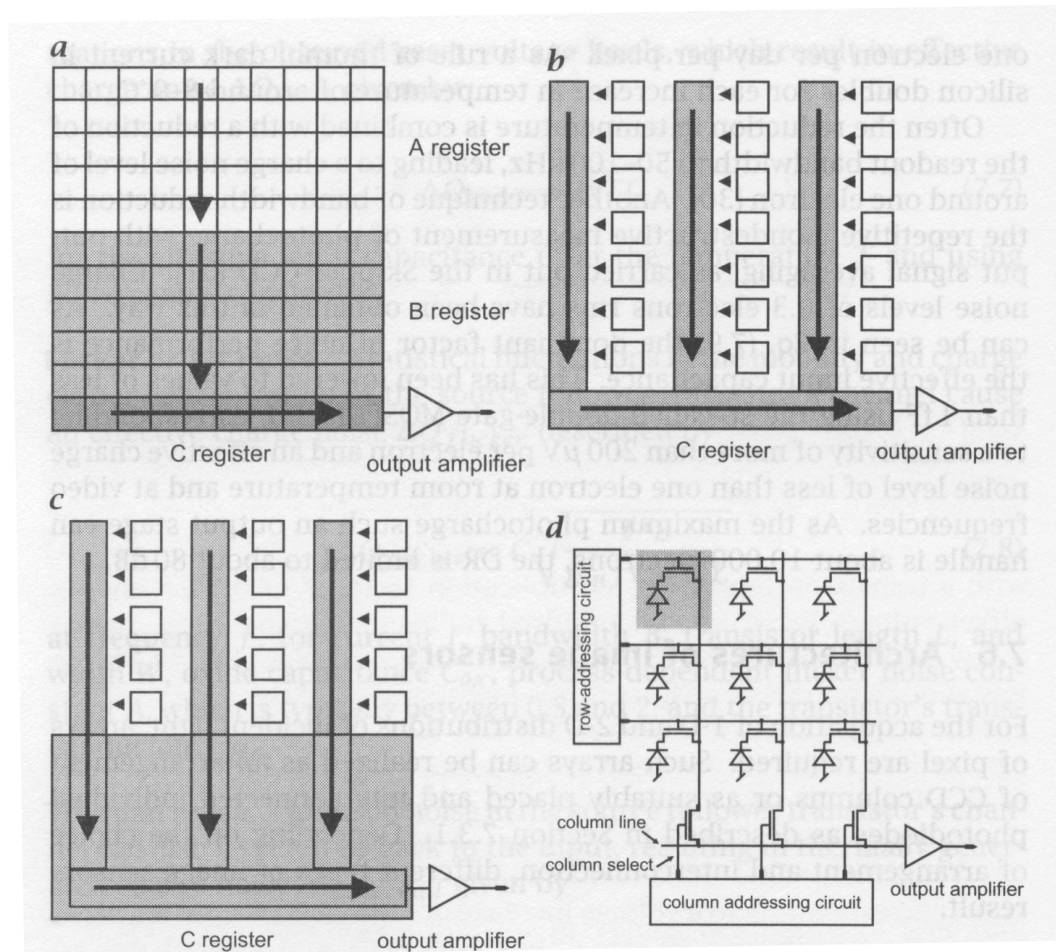
- ◆ Příchozí záření (fotony) se v hmotě polovodiče mění na nábojové páry elektron-díra.
- ◆ Polovodič je ve statickém elektrickém poli, což nábojové páry přemění na krátký proudový impuls.
- ◆ Proudový impuls se musí zesílit a zpracovat. Např. v CCD se použije k nabití kondenzátoru.

Fotodiioda a MOS struktura

Průřez dvěma hlavními principy pro generování proudu a uschování náboje.



Architektury CCD



CCD čip, vlastnosti technologie

- + **Linearita:** CCD senzory pracují na principu přeměny fotonu na pár elektron-díra a integrování získaného náboje.
- + **Nízký šum:** je dán integrační povahou měření. Nechlazený čip při televizním vyčítání má SNR asi 60 dB.
- + **Účinnost:** Současné senzory mají vysokou účinnost asi 40%, tj. pár elektron-díra je generován zhruba každým třetím fotonem.
- **Vyčítání:** jen celého čipu najednou.
- **Omezený rozsah intenzit:** je dán maximální kapacitou jednotlivého kondenzátoru.

CMOS čip, vlastnosti technologie

http://www.ims-chips.de/products/vision/hdrc_alt/hdrc_ima.html

<http://www.imec.be/bo>

<http://www.vector-international.be/C-Cam/cmosccd.html>

- + **Logaritmická citlivost:** CMOS senzory pracují na principu fotodiody. Měří se protékající proud v okamžiku vyčítání.
- + **Vyčítání:** lze v jakémkoliv pořadí, např. můžeme číst oblast zájmu.
- + **Kamera i procesor na 1 čipu:** CMOS technologie je dobře zvládnutá (procesory, paměti). Chytrá kamera (smart camera).
- **Vyšší šum:**

Kamery, hledisko uživatele (1)

- ◆ **Prostorové rozlišení:** počet pixelů ve sloupci a řádku. TV CCIR/PAL 768×576 . TV RS170/NTSC 640×484 . Netelevizní kamery až 2000×2000 , stále se zvyšuje, velmi drahé.
- ◆ **Rozlišení v jasu:** pro digitální se udává počet bitů, výstup typicky 8 bitů. Pro analogové SNR, obvykle >50 dB.
- ◆ **Citlivost:** v luxech. Nutno přepočítat podle uváděné clony a AGC.
- ◆ **AGC:** automatická regulace zesílení, ano, ne, vypínatelná, ručně řízené zesílení.
- ◆ **Závěrka:** běžně od $1/50$ s do $1/10000$ s.

Kamery, hledisko uživatele (2)

- ◆ **Formát:** velikost čipu, udává se jednak v palcích ekvivalentního průměru vidiconu, jednak v milimetrech. 1/2" odpovídá 4.8x6.5 mm.
- ◆ **Rozměr pixelu:** čtvercový i nečtvercový.
- ◆ **Výstup pro automatickou clonu:**
- ◆ **AWB:** Automatic White Balance. Automatické vyrovnaní bílé. Mění poměr R a B vůči G.
- ◆ **Gama korekce:** vypínatelná/pevná. Přímý signál $\gamma = 1$. Typicky $\gamma = 0,45$ (zdůrazňuje černou). Kompenzuje charakteristiku obrazovky a citlivost lidského oka.
- ◆ **Závit:** C mount / CS mount.

Prokládané/neprokládané řádkování

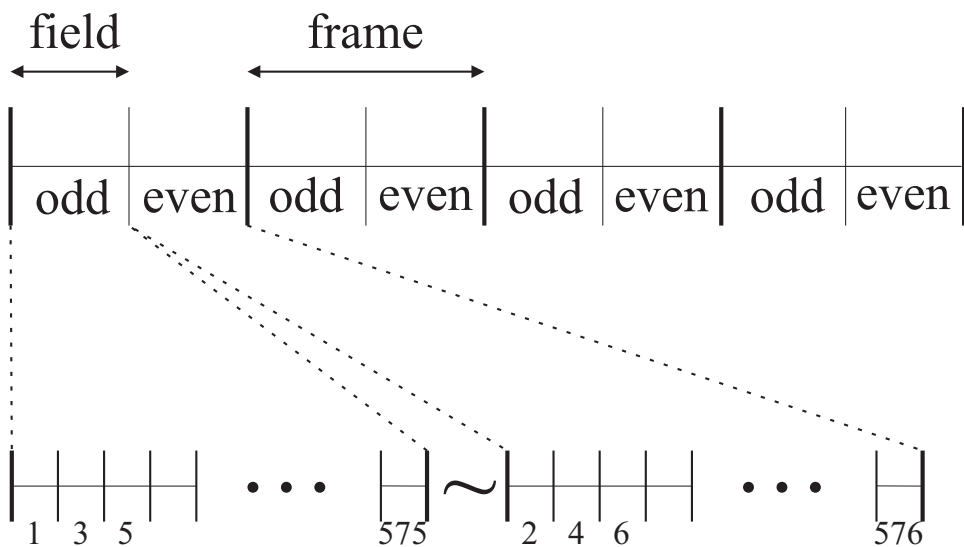
	1				768
1					
2					
3					
4					
574					
575					
576					

Prokládané řádkování.

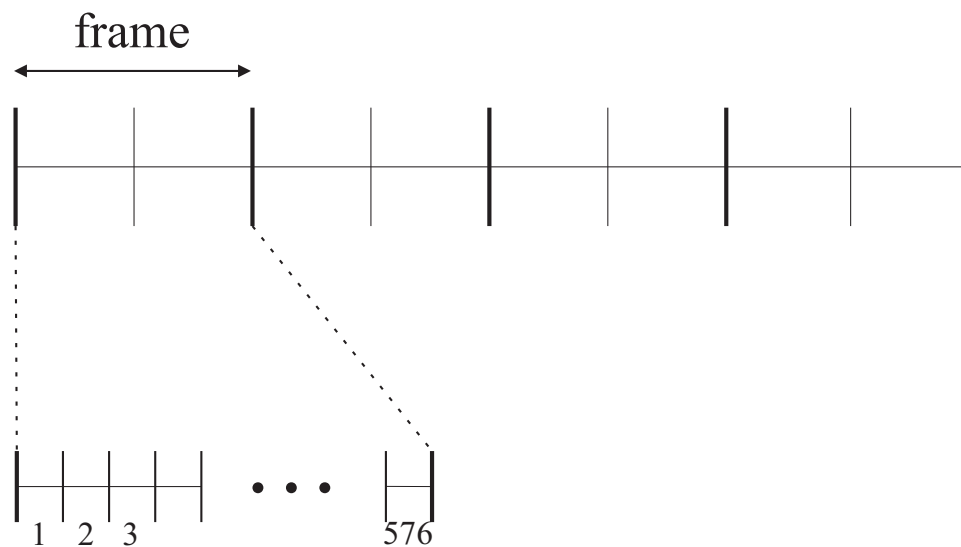
	1				768
1					
2					
3					
4					
574					
575					
576					

Neprokládané řádkování.

Signál, prokládané/neprokládané řádkování



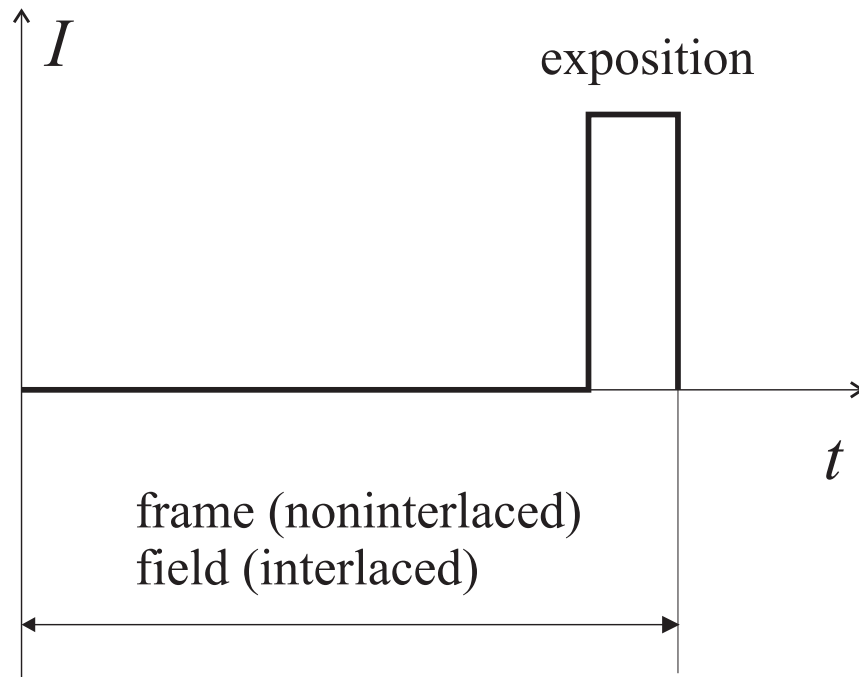
Prokládané řádkování.



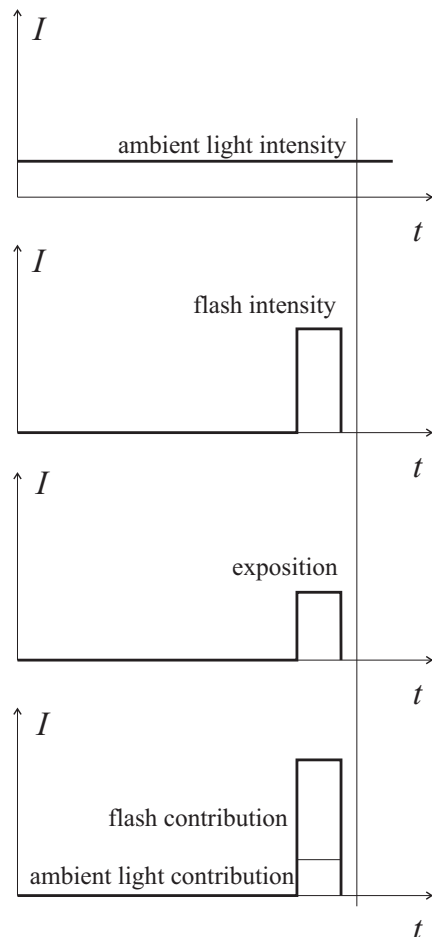
Neprokládané řádkování.

Elektronická závěrka

Zkrácená expozice se používá buď, když je mnoho světla nebo pro snímání rychlých dějů (podobně jako u fotoaparátu).



Blesk a potlačení okolního světla



- ◆ Závěrka kamery se zkrátí.
- ◆ Záblesk se nastaví do doby otevření závěrky.
- ◆ Poměr integrálu jasu okolního osvětlení po dobu otevření závěrky a integrálu jasu záblesku po dobu otevření závěrky nám udává vliv okolního osvětlení v obraze.
- ◆ Jako zábleskové zařízení se často používá LED dioda.

Uspořádání barevných kamer

- ◆ Ruční výměna barevných filtrů před objektivem ručně.
- ◆ Tříčipové – optické oddělení pomocí filtrů a (polopropustných) zrcadel.
- ◆ Jednočipová s filtry na čipu. Barevné rozlišení je menší než odpovídá počtu pixelů.

Rozložení barevných filtrů u jednočipové kamery

R	G	R	G		
G	B	G	B		
R	G	R	G		
G	B	G	B		

Aditivní barevný model.

C	Y	C	Y		
M	G	M	G		
C	Y	C	Y		
M	G	M	G		

Subtraktivní barevný model.

Barevný skener

