

Praktická geometrická optika

Václav Hlaváč

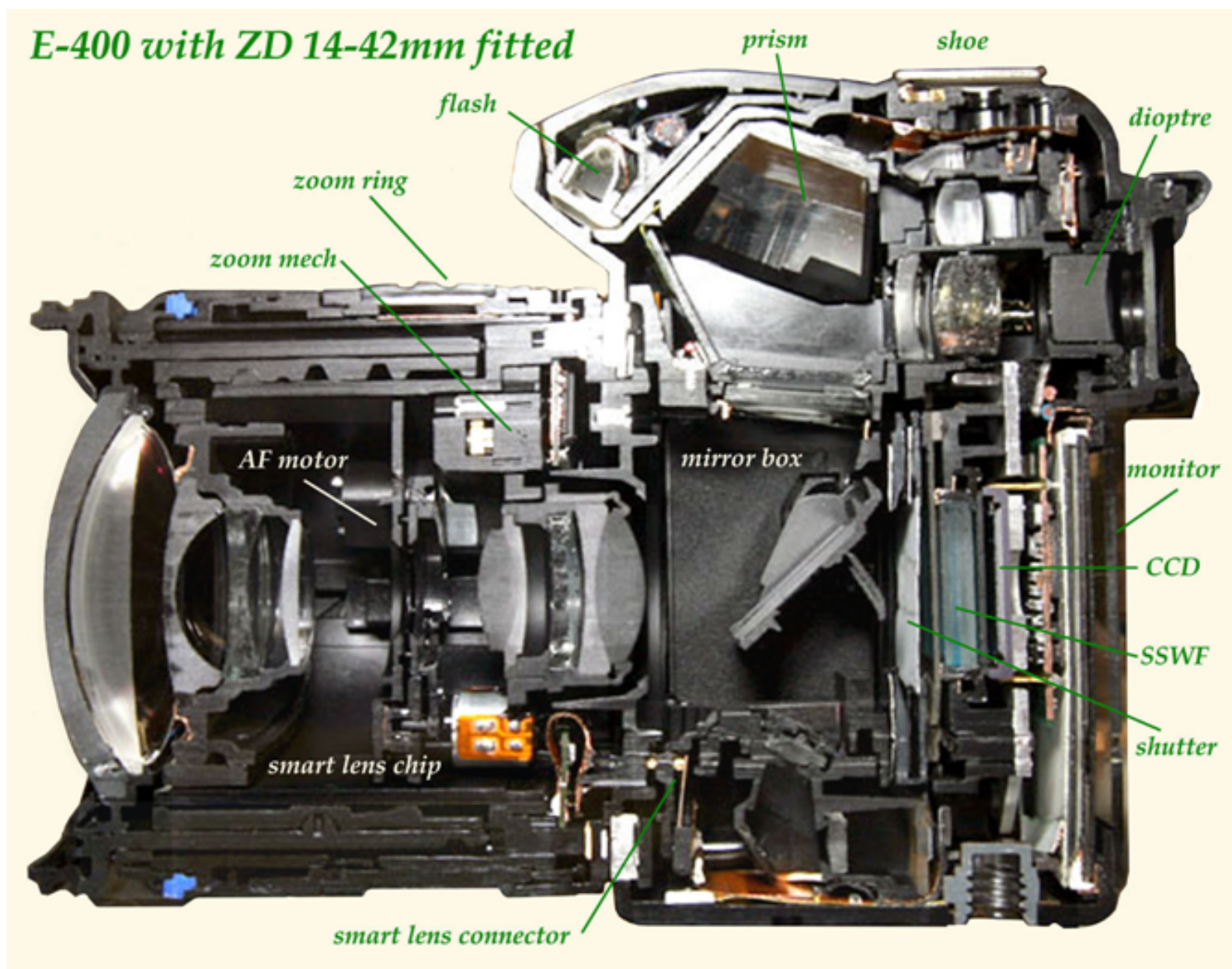
České vysoké učení technické v Praze
Fakulta elektrotechnická, katedra kybernetiky
Centrum strojového vnímání

<http://cmp.felk.cvut.cz/~hlavac>, hlavac@fel.cvut.cz

Osnova přednášky:

- ◆ Motivace, objektiv fotoaparátu.
- ◆ Proč jsou potřebné čočky?
- ◆ Jednoduchý model, geom. optika.
- ◆ Čočka fyzikálně. Hloubka pole a ostrosti.
- ◆ Objektivy.
- ◆ Vady objektivů.

Jednooká zrcadlovka v řezu



Základní části digitálního fotoaparátu

- ◆ **Objektiv.** Pevná nebo proměnná ohnisková vzdálenost.
- ◆ Závěrka. Mechanická nebo elektronická.
- ◆ Optický hledáček (u levnějších fotoaparátů chybí).
- ◆ Matice světlocitlivých senzorů. CCD nebo CMOS.
- ◆ Zesilovač upravující signál senzorů.
- ◆ Analogočíslicový převodník.
- ◆ Počítač převádějící surová obrazová data na zobrazitelná.
- ◆ LCD displej k pozorování obrazů.
- ◆ Paměťové médium na obrazy, často lze vyndat.
- ◆ Zdroj energie, baterie nebo akumulátor.

Úkol optické soustavy

- ◆ Optická soustava (objektiv) soustřeďuje dopadající energii (fotony) a na snímači se vytváří obraz.
- ◆ Měřenou fyzikální veličinou je ozáření [W m^{-2}] (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:

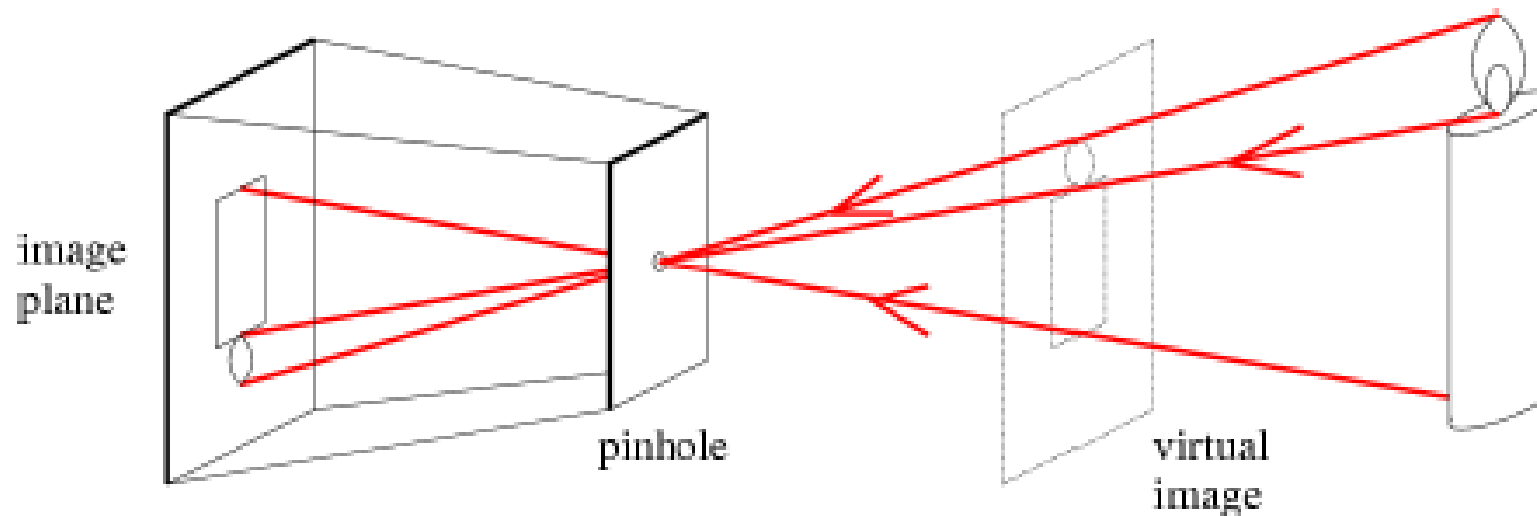
- ◆ Vlnové délky elektromagnetického záření (zde světla) jsou velmi malé ve srovnání s použitými optickými a mechanickými částmi.
- ◆ Energie fotonů (z pohledu kvantové teorie) jsou malé ve srovnání s energetickou citlivostí použitých zařízení.

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 temná komora.
- ◆ 1822 Francouz J.-N. Niepce přidal fotografickou desku \Rightarrow první fotografie.



Velikost dírky v dírkové komoře

Protichůdné jevy.

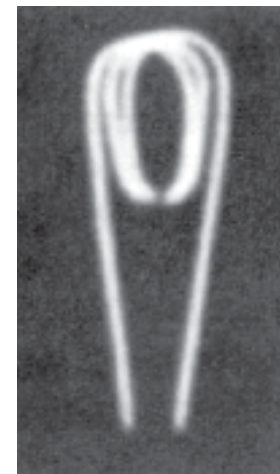
- Větší dírka propustí více světla, ale rozmaže obrázek.
- Při malé dírce se začnou projevovat ohybové jevy a obrázek bude také rozmazán.
- Existuje optimum, kdy je obrázek nejvíce zaostřen. Např. pro $f=100$ [mm] a $\lambda=500$ [nm] je optimální průměr dírky 0,32 [mm].



a



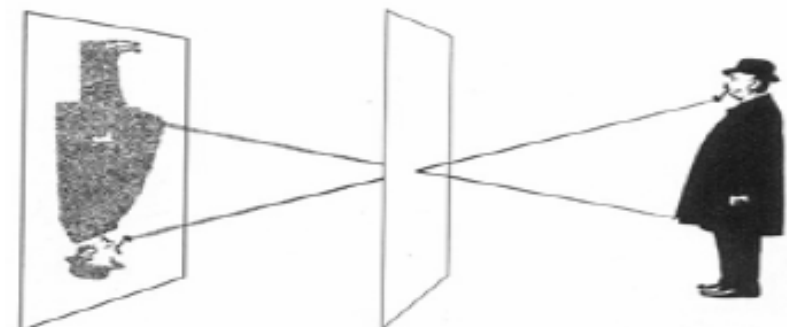
b



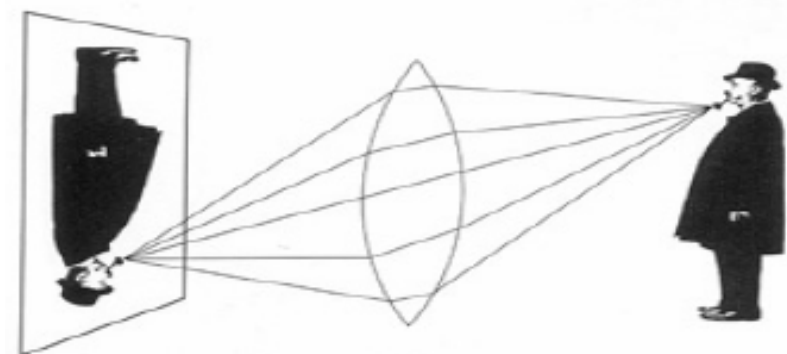
c

Proč se používají čočky?

- ◆ Sbírá jen málo fotonů (světla).
- ◆ Potíže díky ohybu světla na dírce.



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



Čočka z fyzikálního hlediska

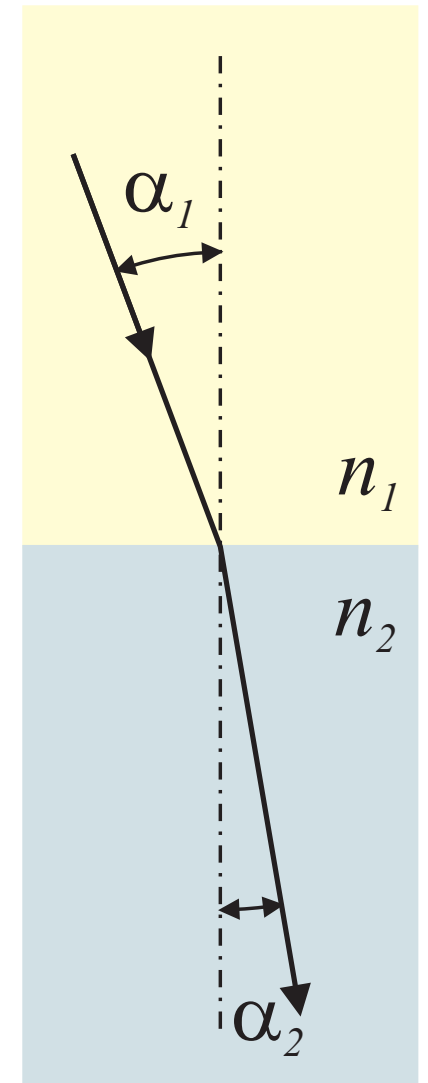
- ◆ Chování čočky vysvětlil holandský matematik Willebrord van Roijen Snell (1580–1626) v roce 1621 zákonem lomu na rozhraní dvou prostředí

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

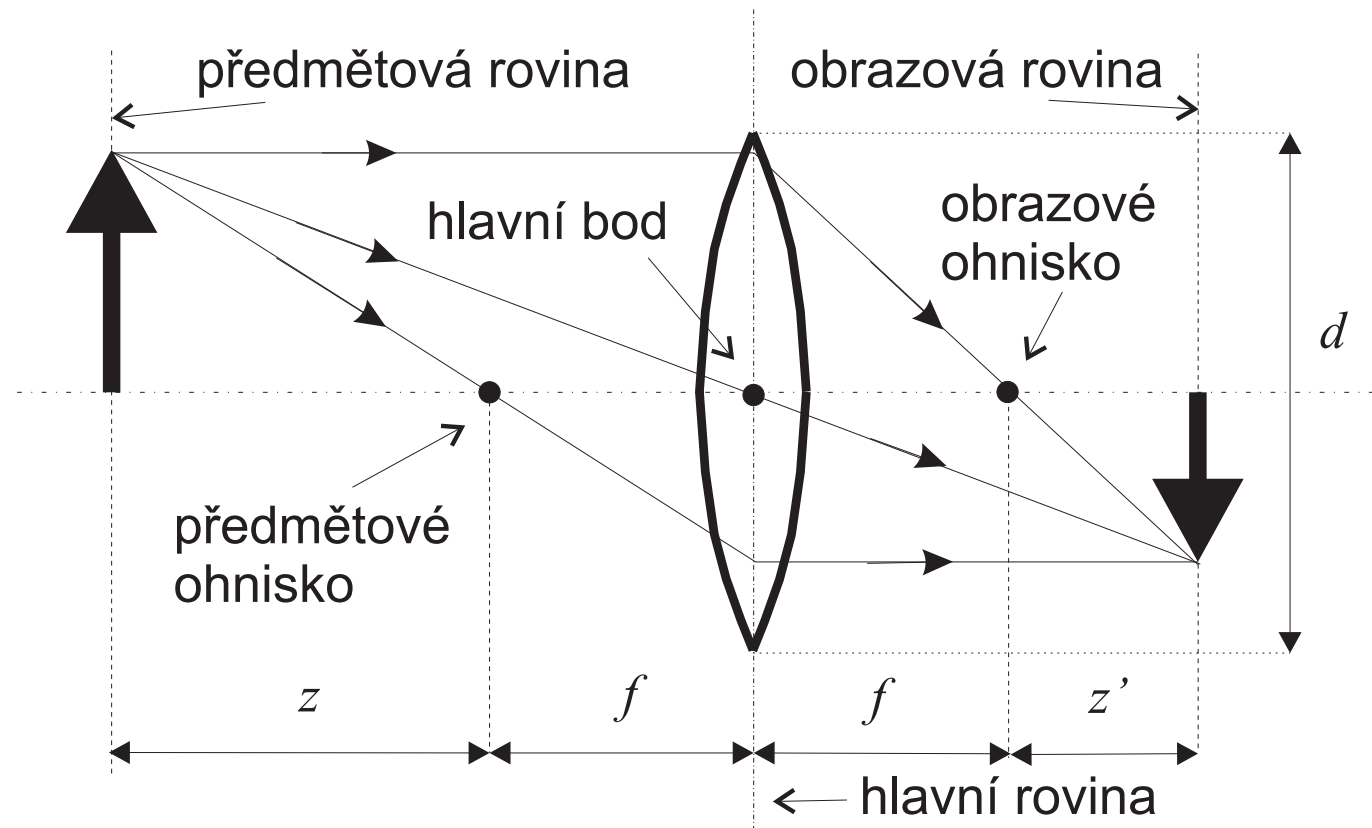
- ◆ n pro žluté světlo $\lambda=589$ [nm] a rozhraní mezi vakuem a X:

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.



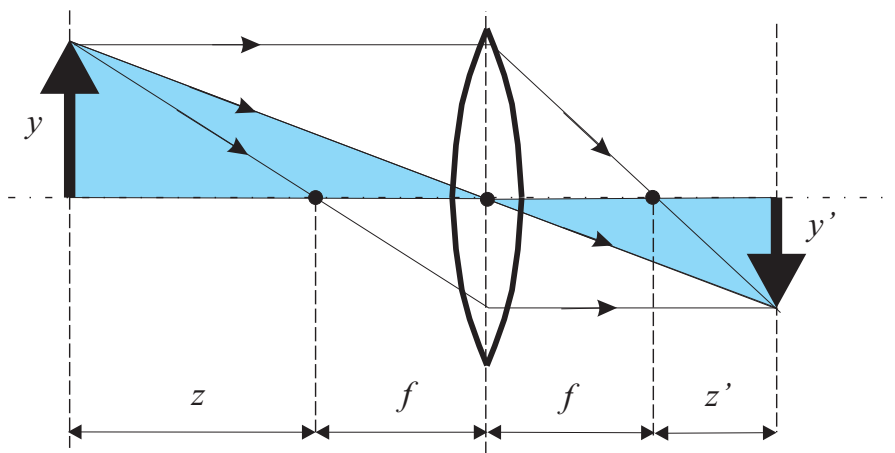
Tenká čočka



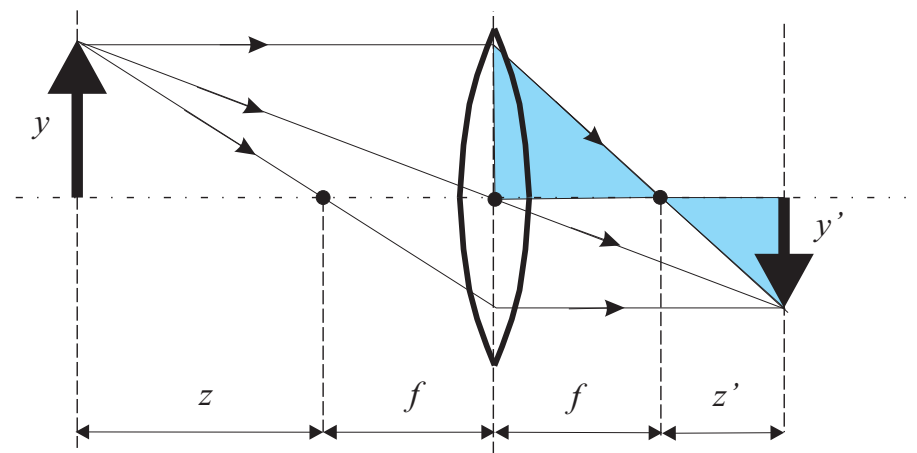
Rovnice tenké čočky v newtonovském tvaru
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{z' + f} + \frac{1}{f + z}$$

nebo jednodušeji
$$f^2 = z z'$$

Odvození rovnice tenké čočky, podobné \triangle



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



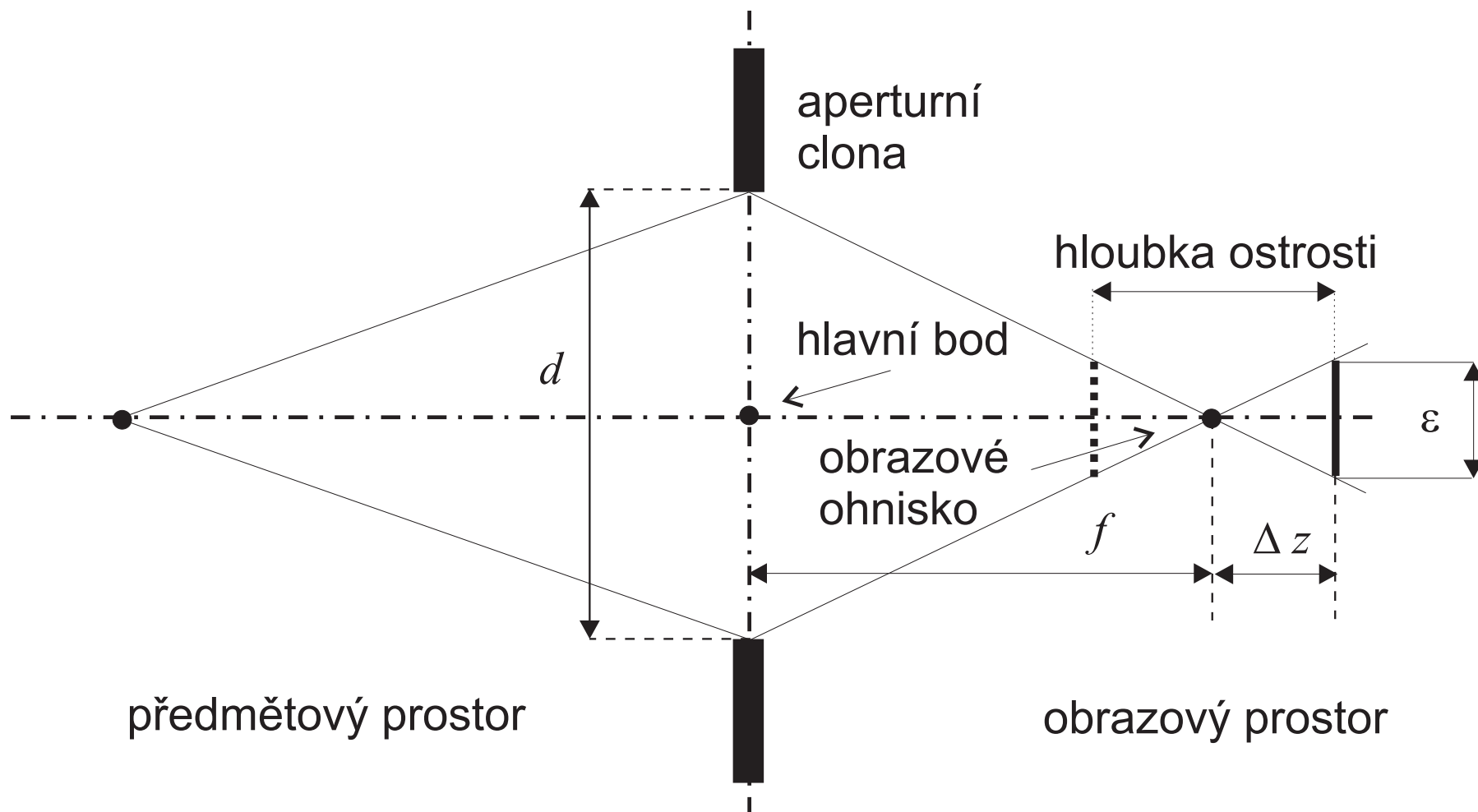
$$\frac{y'}{y} = \frac{z'}{f}$$

Spojením obou rovnic:

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

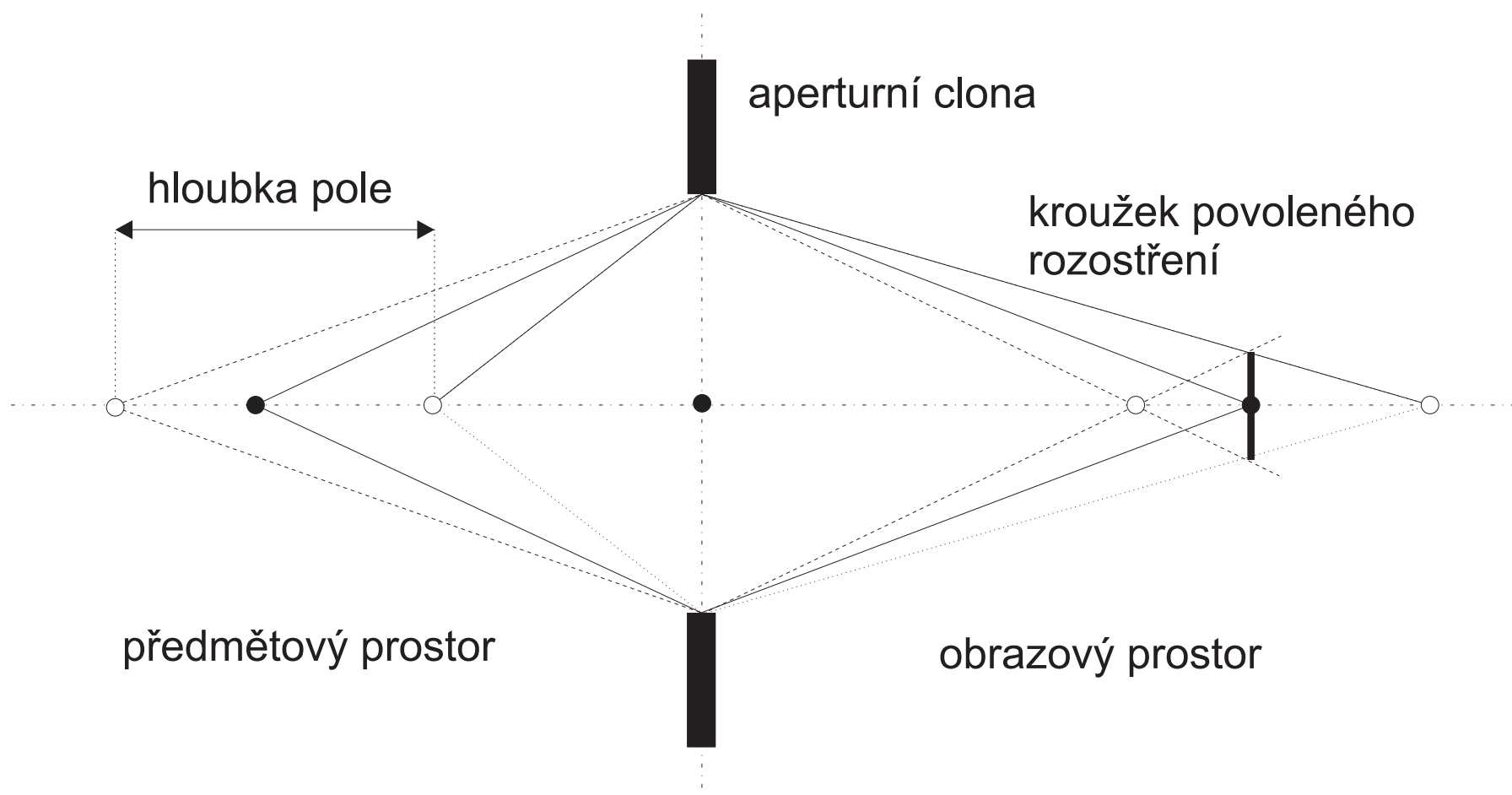
Hloubka ostrosti

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.



Hloubka pole (ostrosti)

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.



Hloubka pole (ostrosti), ilustrace obrázkem



Vliv clony na hloubku pole ostrosti



velký otvor, malá hloubka pole ostrosti



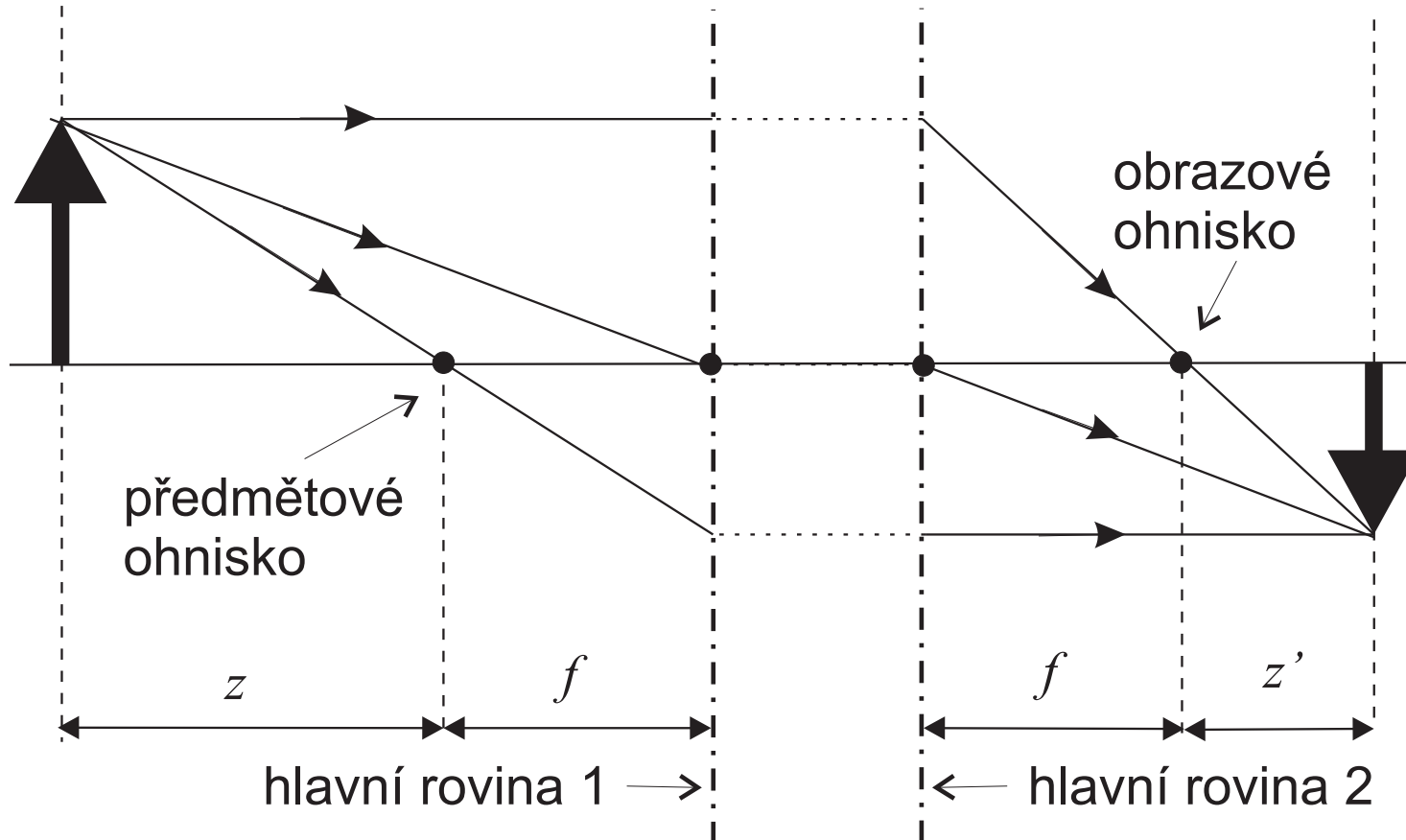
malý otvor, velká hloubka pole ostrosti

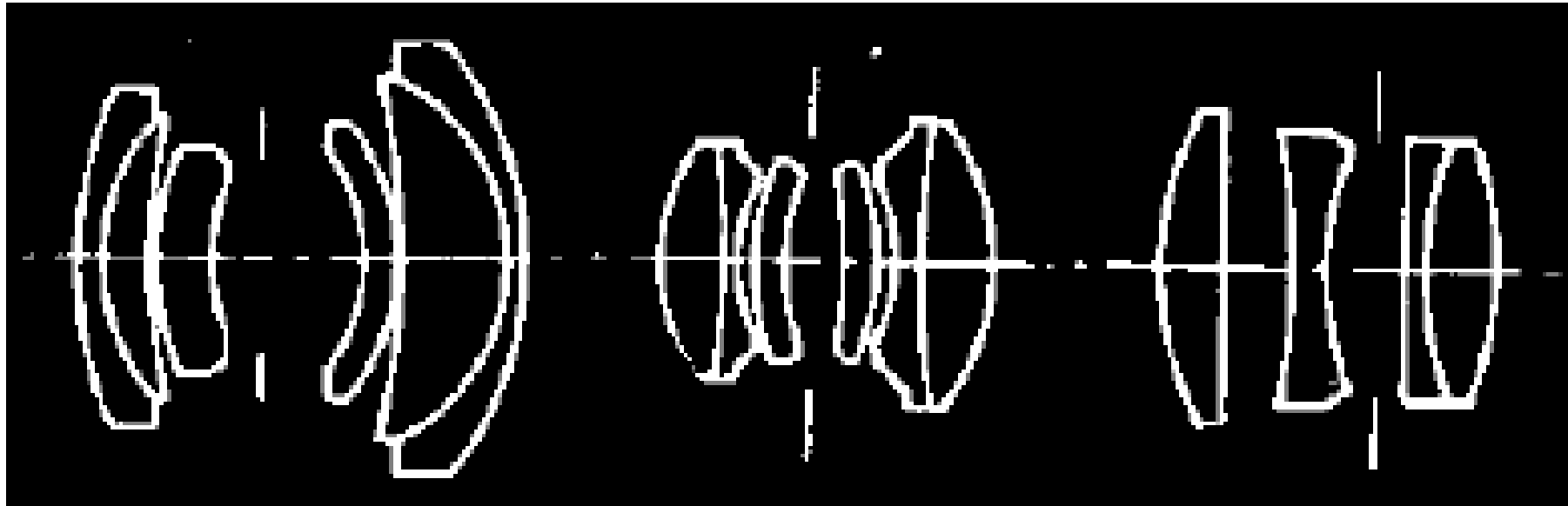
Vliv ohniskové vzdálenosti objektivu na hloubku pole ostrosti



Tlustá (složená) čočka

Aproximace optické soustavy

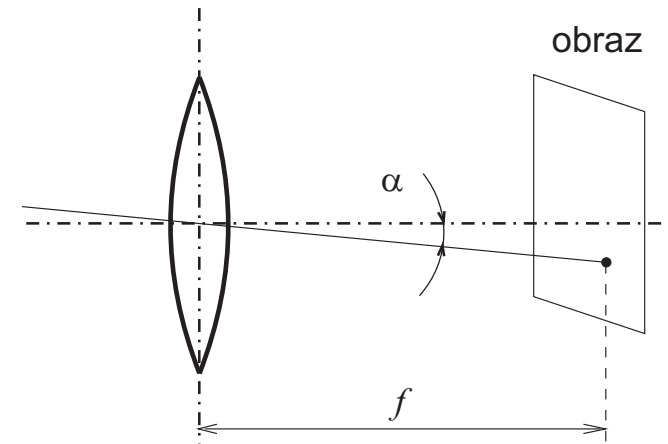




- ◆ Optické soustavy (objektiv) se používají pro odstranění aberací (= optických vad).
- ◆ Hlavní vady: vinětace (přirozená, optická, mechanická), barevné (chromatické) vady, radiální zkreslení.

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

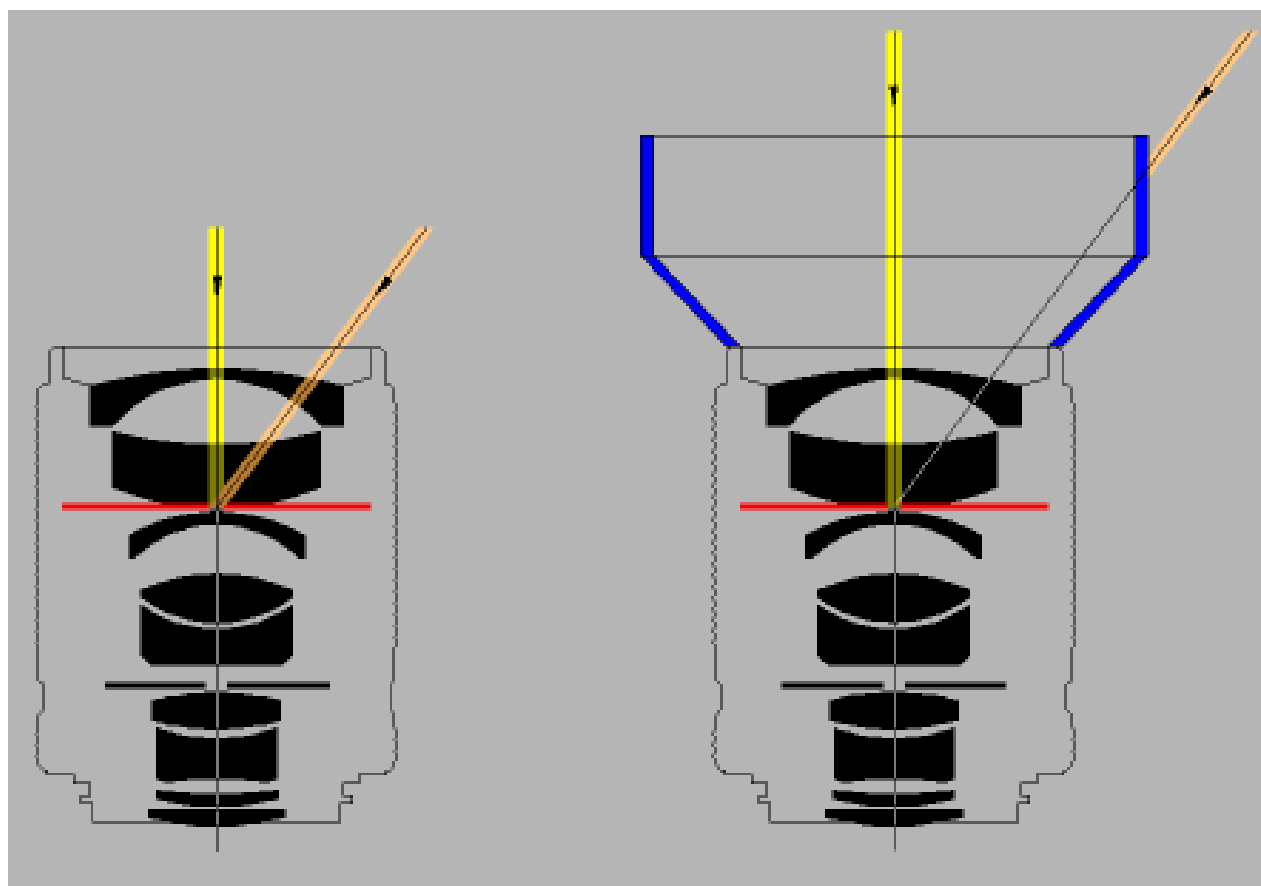
Optická viněta

- ◆ 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.



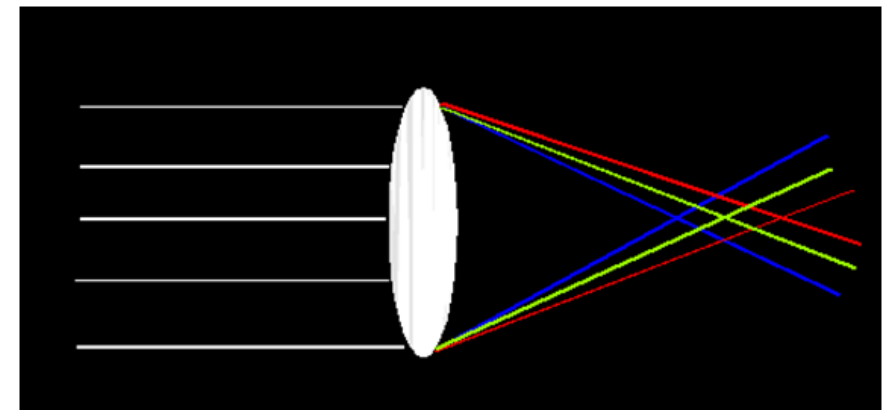
Mechanická viněťace

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



Chromatické vady

- ◆ Způsobeny závislosti indexu lomu čočky na vlnové délce světla.
- ◆ Žádoucí u hranolů pro rozklad světla, nežádoucí u objektivů.
- ◆ Způsobuje barevné chyby na okrajích obrazu, tj. dále od optické osy.
- ◆ Náprava při výrobě objektivů. Dublet: čočka složená z korunového skla a olovnatého skla.



Chromatické vady, prakticky



blízko optické osy, střed obrazu

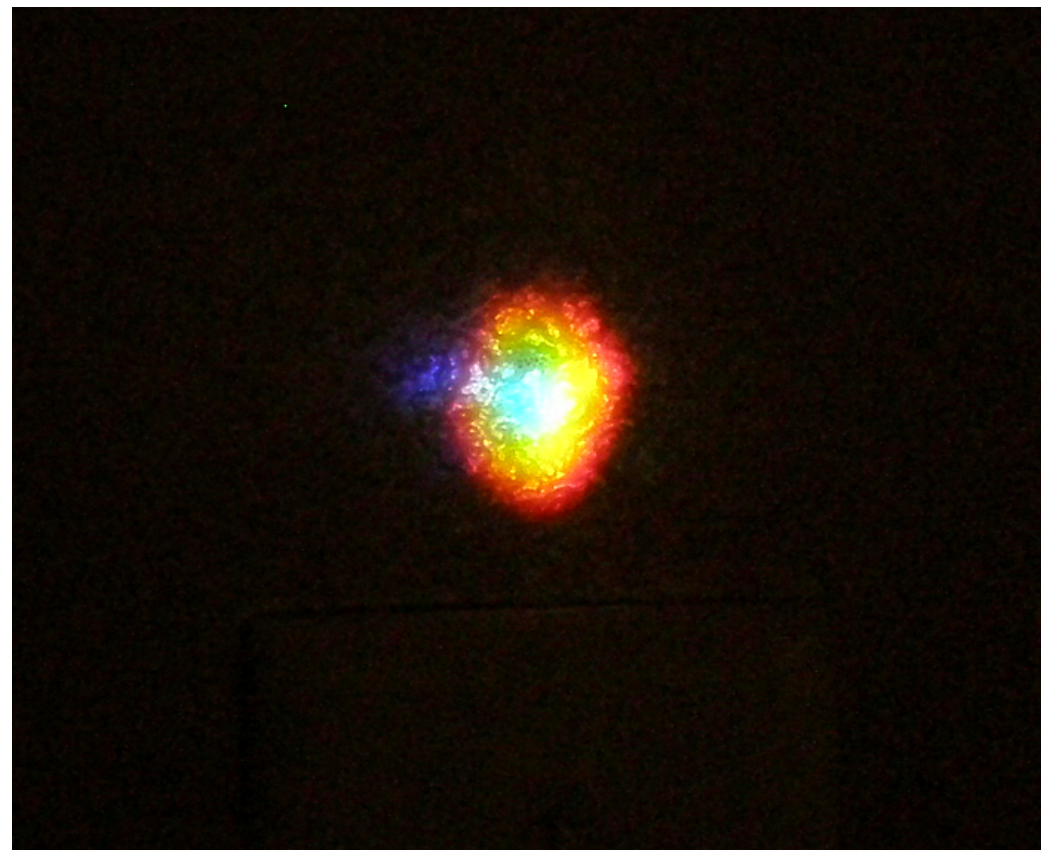


daleko od optické osy, okraj obrazu

Chromatická vada, extrémní případ



Nekvalitní čočka dveřního kukátka
v americkém motelu.



Promítnuté zapadající slunce
na stěnu místnosti ve tmě.

Radiální zkreslení

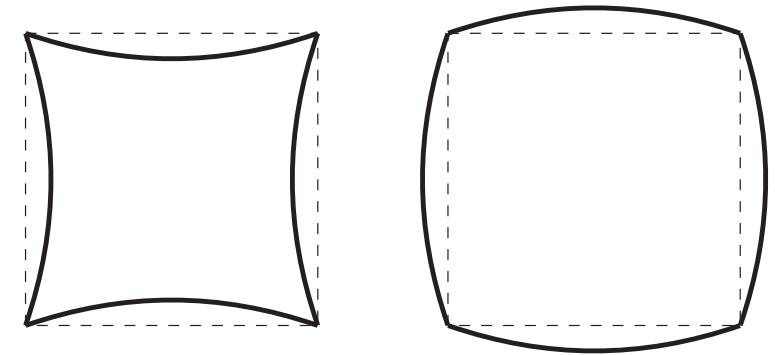
- ◆ Převládající geometrické zkreslení. Projevuje se více u širokoúhlých objektivů.
- ◆ (x', y') jsou souřadnice změřené v obraze, nekorigované; (x, y) jsou korigované souřadnice; (x_0, y_0) jsou souřadnice hlavního bodu; (Δ_x, Δ_y) jsou složky opravy a r je rádius,

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

- ◆ Zkreslení se aproximuje polynomem sudého stupně (proč?), často jen stupně dva.

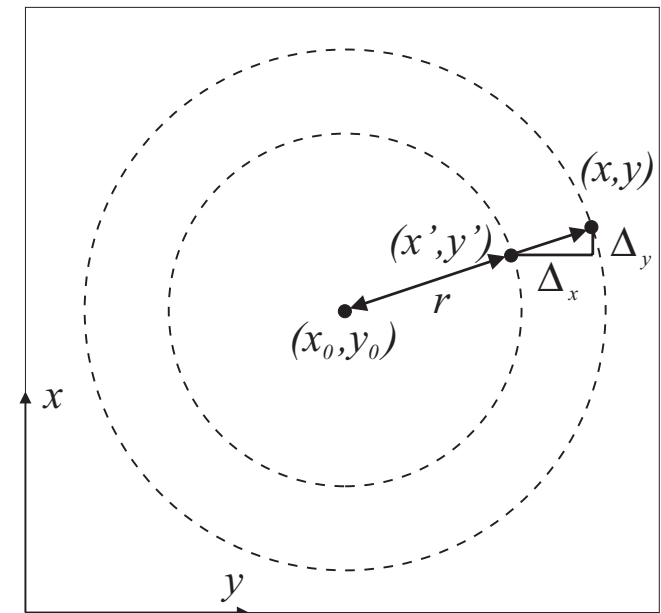
$$\Delta_x = (x' - x_0) (\kappa_1 r^2 + \kappa_2 r^4 + \kappa_3 r^6),$$

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



polštářkové

soudkovité



Radiální zkreslení, prakticky



soudkovité



bez zkreslení



polštářkové