



INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

## Inovace a zvýšení atraktivity studia optiky reg. c.: CZ.1.07/2.2.00/07.0289

Přednášky - Metody Návrhu Zobrazovacích Soustav SLO/MNZS

### Principy korekce aberací OS.

Miroslav Palatka

*Tento projekt je spolufinancován Evropským sociálním fondem a státním rozpočtem České republiky.*

# **Principy korekce aberací OS.**

*Seidlové aberace tenké čočky pro případ clony v její rovině a případ posunuté clony - shrnutí.*

*Možné principy (způsoby) korekce jednotlivých základních*

*1.monochromatických aberací :*

- *otvorové vady,*
- *komy,*
- *astigmatismu,*
- *křivosti pole,*
- *zkreslení*

*2.chromatických (barevných) aberací :*

- *optické materiály*  
( *index lomu, Abbeovo číslo, diagram - mapa*)
- *barevná vada polohy*
- *barevná vada velikosti*

# Seidlový aberace tenké čočky

(clona v rovině čočky)

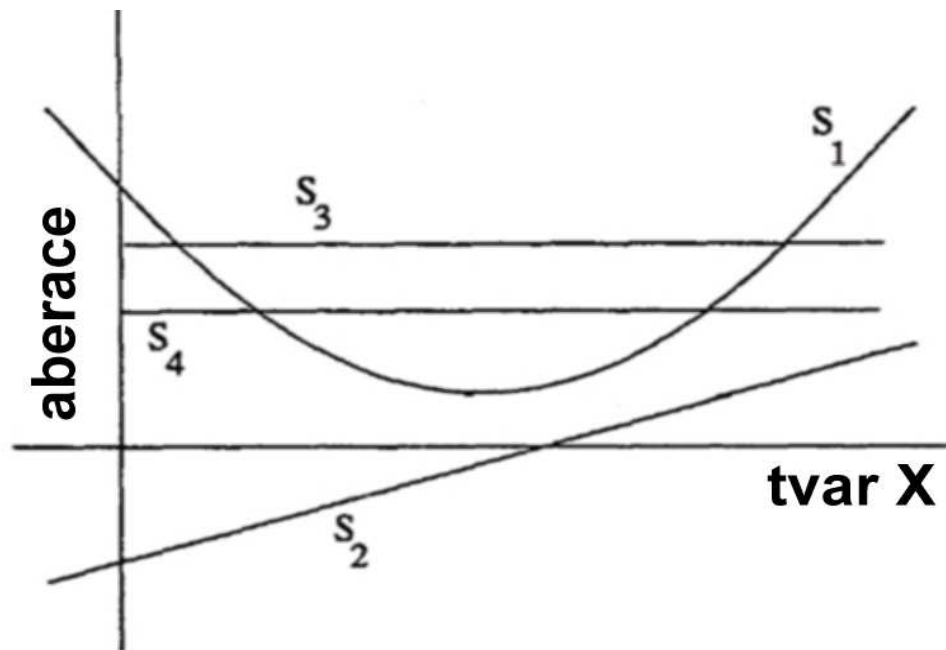
$$S_{1C} = \frac{h^4 K^3}{4} \left[ \frac{n+2}{n(n-1)^2} \left( X + \frac{2(n^2-1)}{n+2} Y \right)^2 + \left( \frac{n}{n-1} \right)^2 - \left( \frac{n}{n+2} \right) Y^2 \right]$$

*otvorová vada*

*tvarově závislé  
a nezávislé  
aberace*

$$S_{2C} = -\frac{1}{2} h^2 K^2 H \left[ \frac{n+1}{n(n-1)} X + \frac{2n+1}{n} Y \right]$$

*koma*



$$S_{3C} = H^2 K$$

*astigmatismus*

$$S_{4C} = \frac{H^2 K}{n}$$

*křivost pole*

$$S_{5C} = 0$$

*zkreslení*

$$C_{1C} = \frac{h^2 K}{V}$$

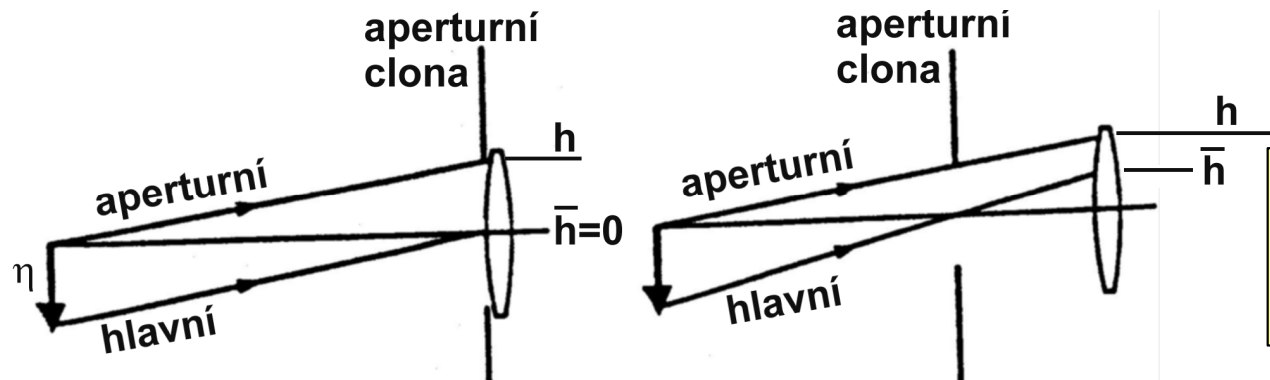
*barevná vada  
polohy*

$$C_{2C} = 0$$

*velikosti*

# Seidlovy aberace tenké čočky

(clona mimo rovinu čočky)



*Parametr výstřednosti:*

$$E = \frac{\bar{h}}{h} \quad \text{nebo} \quad \delta E = \frac{\delta \bar{h}}{h}$$

*koma*

$$S_2 = S_{2C} + H \delta E S_1$$

*astigmatismus*

$$S_3 = S_{3C} + (H \delta E)^2 S_1 + 2 (H \delta E) S_{2C}$$

*zkreslení*

$$S_5 = S_{5C} + (H \delta E)^3 S_1 + 3 (H \delta E)^2 S_{2C} + (3S_{3C} + S_4)(H \delta E)$$

*barevná vada velikosti*

$$C_2 = H \delta E C_{1C}$$

*Aberace „obsahují“  $S_1 \longrightarrow$  všechny mají „kvadratickou“ závislost na tvaru*

## Seidlovy aberace tenké čočky

*Reálné OS jsou samozřejmě tvořeny optickými prvky, které mají nenulovou tloušťku. Přesto jsou vztahy pro Seidlovy aberace odvozené pro případ tenkých čoček velmi užitečné. Lze z nich poznat, jakým způsobem jednotlivé základní aberace závisí na konstrukčních parametrech OS :*

- indexy lomu,*
- poloměry křivosti optických ploch,*
- vzdálenosti optických ploch,*
- průměry optických členů,*
- poloha aperturní clony .*

*Tyto znalosti závislostí pak umožňují volit správný postup (metodu) při korekcích jednotlivých aberací OS.*

# **Principy korekce monochromatických vad**

## Principy korekce otvorové vady

( *tvarování - prohýbání čoček - „bending“* )

*Tato vada je závislá na tvaru čoček a nezávislá na poloze clony. Pro danou vzdálenost předmětu (obrazu) a tedy daný polohový parametr  $Y$  lze vždy nalézt takový tvar čočky, pro který je hodnota otvorové vady minimální.*

$$S_{1C} = \frac{h^4 K^3}{4} \left[ \frac{n+2}{n(n-1)^2} \left( X + \frac{2(n^2-1)}{n+2} Y \right)^2 + \left( \frac{n}{n-1} \right)^2 - \left( \frac{n}{n+2} \right) Y^2 \right]$$

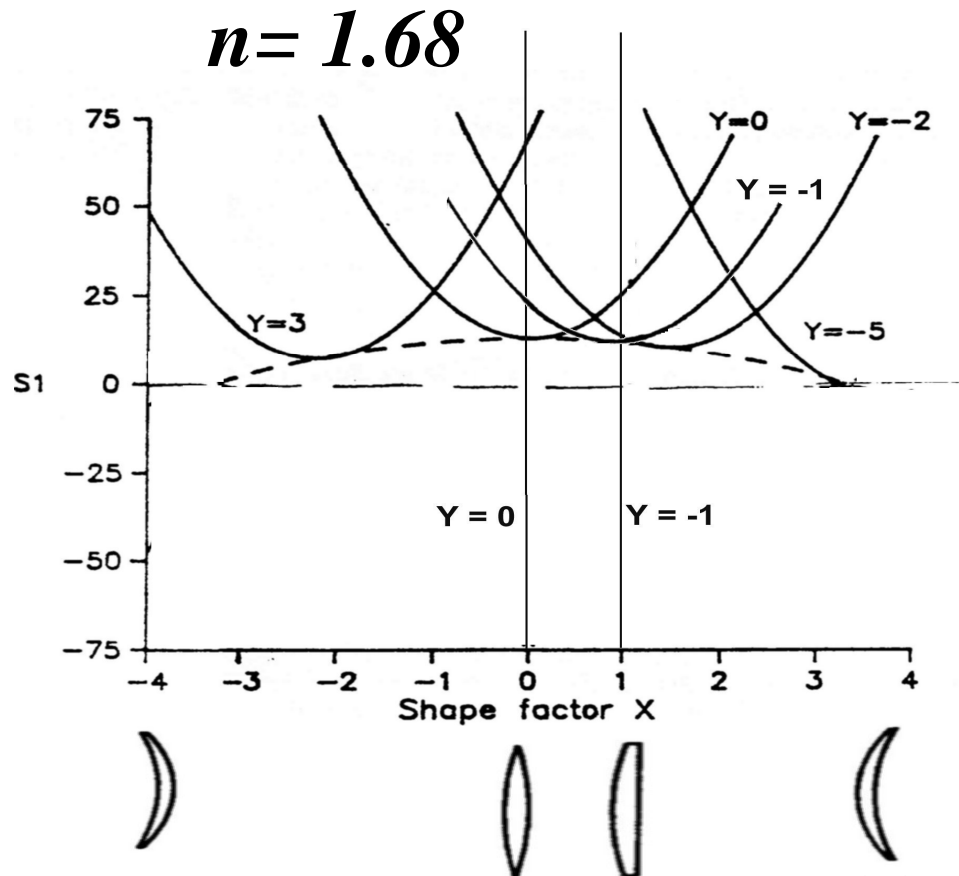
$$S_{1\min} = \frac{h^4 K^3}{4} \left[ \left( \frac{n}{n-1} \right)^2 - \frac{n}{n+2} Y^2 \right] \longleftrightarrow X = -\frac{2(1-n^2)}{n+2} Y$$



# Principy korekce otvorové vady

(*tvarování - prohýbání čoček - „bending“*)

*Pro danou vzdálenost předmětu (obrazu) a tedy daný polohový parametr  $Y$  lze vždy nalézt takový tvar čočky, pro který je hodnota otvorové vady minimální.*



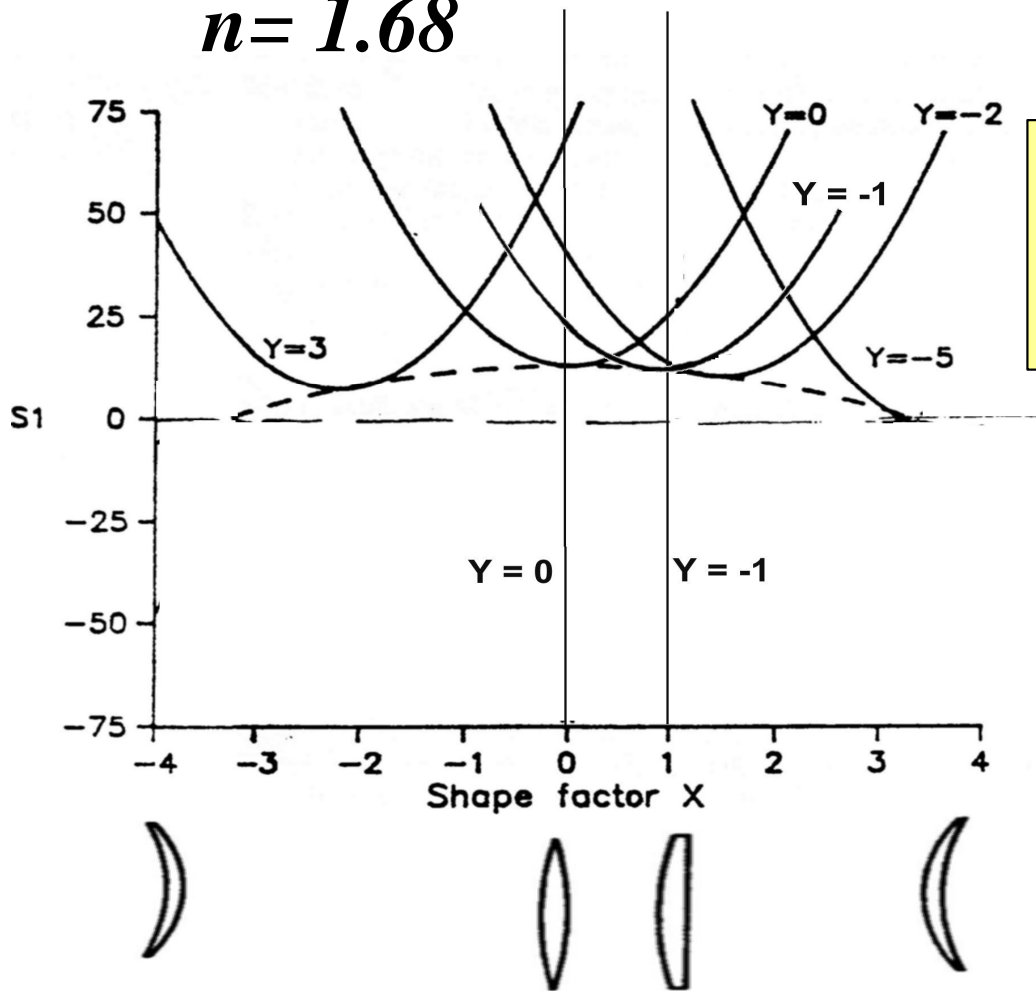
$$X = -\frac{2(1-n^2)}{n+2} Y$$

*Tzv. tvarování - prohýbání  
čoček je nejsilnějším  
nástrojem při korekci  
otvorové vady!!!*

# Principy korekce otvorové vady

( tvarování - prohýbání čoček - „bending“ )

$n = 1.68$



*Nulová otvorová vada*

$$S_{1\min} = \frac{h^4 K^3}{4} \left[ \left( \frac{n}{n-1} \right)^2 - \frac{n}{n+2} Y^2 \right]$$

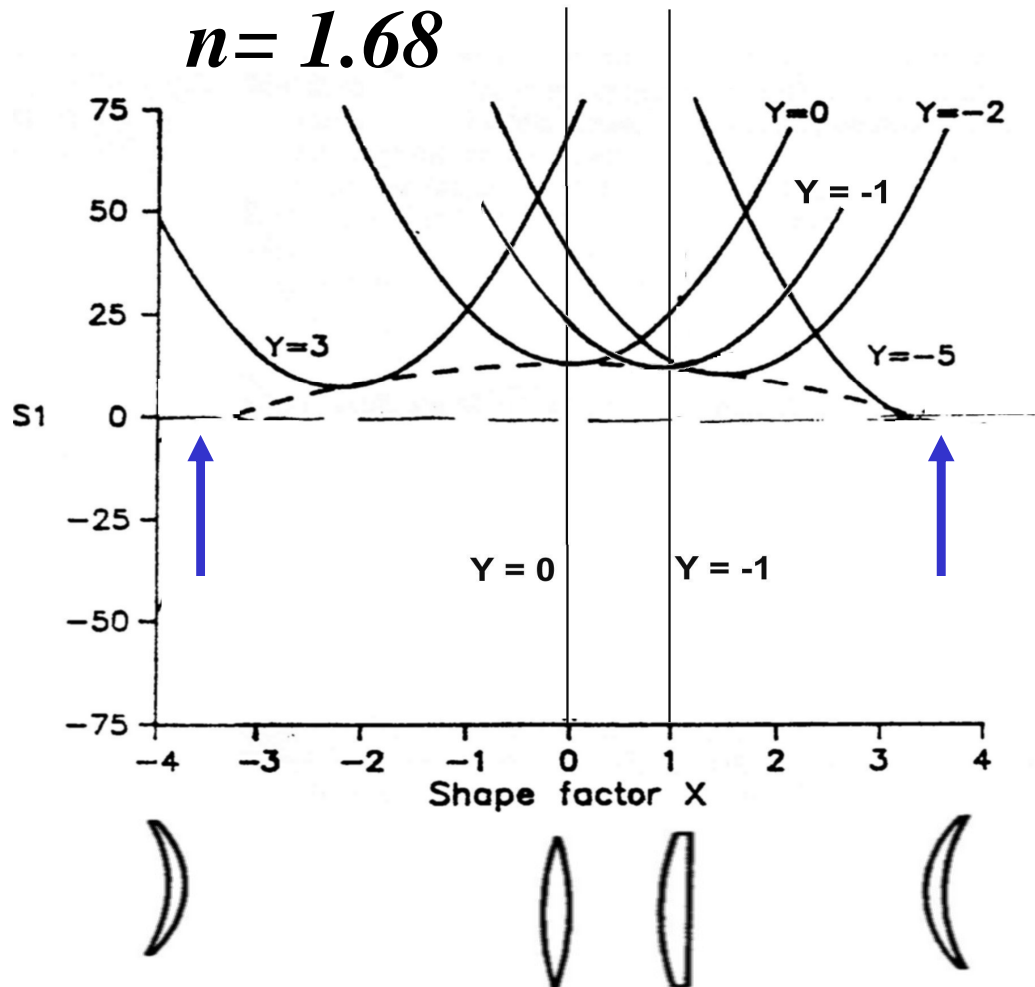
$$S_{1\min} = 0$$

$$Y^2 = \frac{n(n+2)}{(n-1)^2}$$

$$Y^2 > 0$$

# Principy korekce otvorové vady

(*tvarování - prohýbání čoček - „bending“*)



***Nulová otvorová vada***

$$Y^2 = \frac{n(n+2)}{(n-1)^2}$$

$$Y^2 > 0$$

*Např.:*

$$n = 1.68 \quad Y = \pm 3.7$$

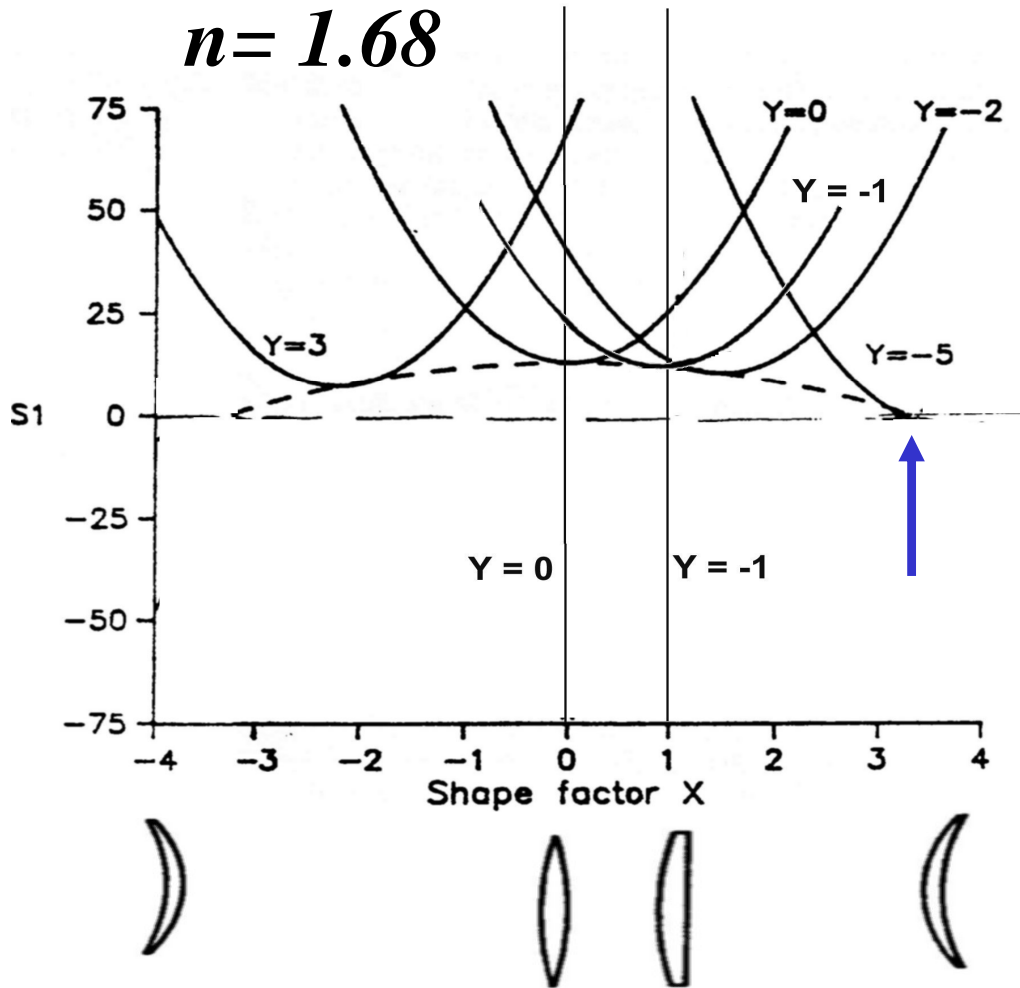


- 1 – *tvar hlubokého menisku,*
- 2 – *reálný předmět+zdánlivý obraz*  
(*zdánlivý předmět+reálný obraz*)

***Aplanatické menisky***

# Principy korekce otvorové vady

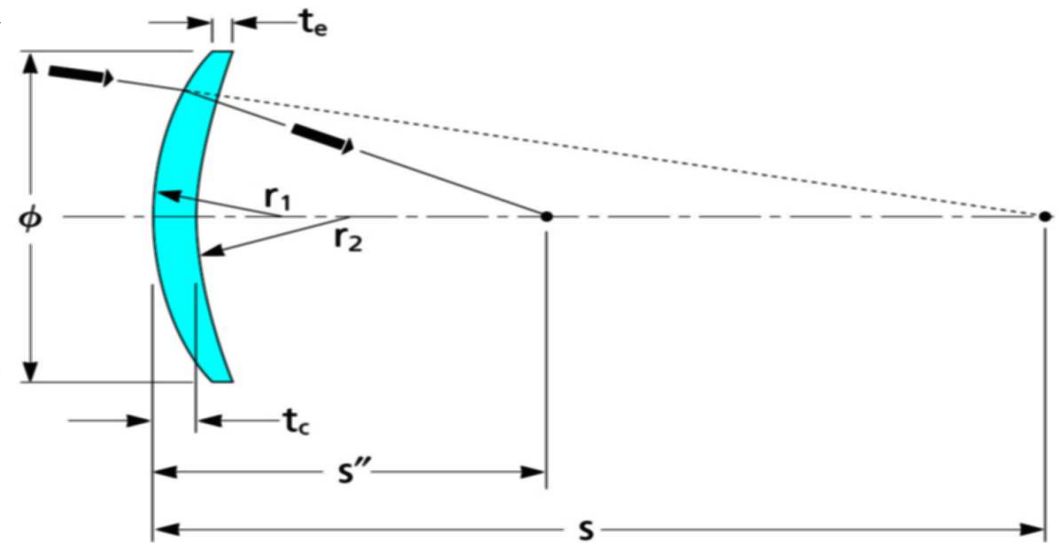
( tvarování - prohýbání čoček - „bending“ )



*Aplanatické menisky*

$$Y^2 = \frac{n(n+2)}{(n-1)^2}$$

$$X = -\frac{2(1-n^2)}{n+2} Y$$

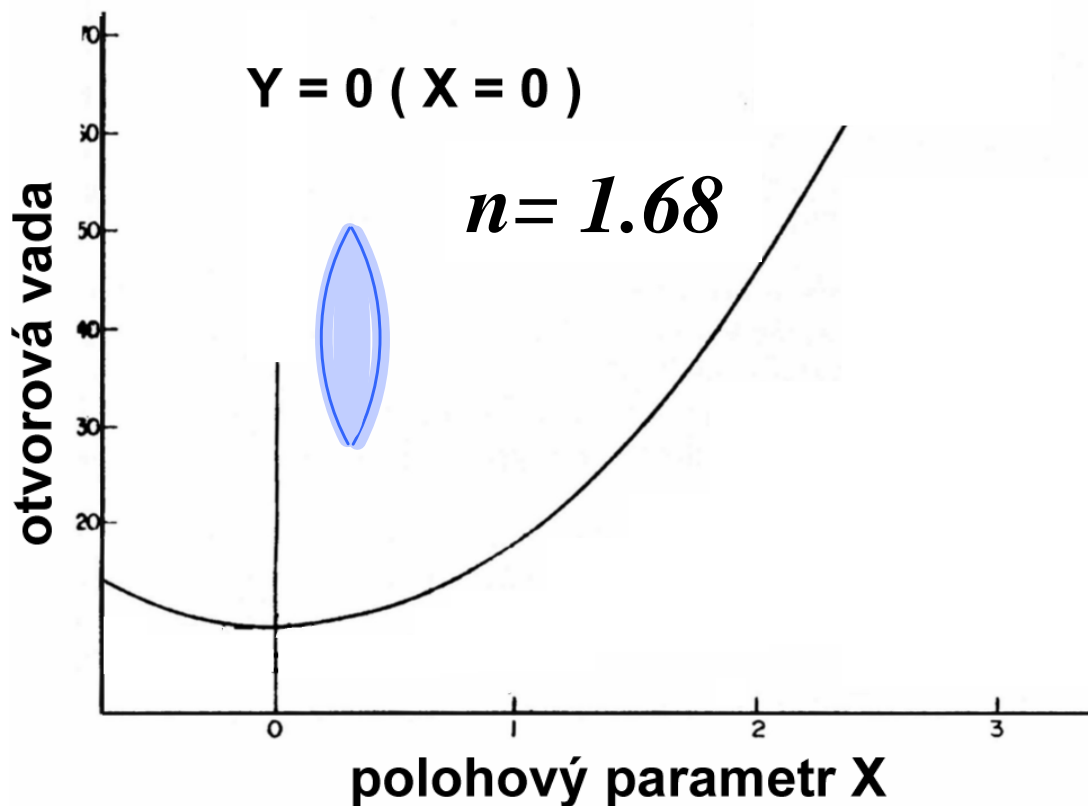


( zdánlivý předmět + reálný obraz )

# Principy korekce otvorové vady

( tvarování - prohýbání čoček - „bending“ )

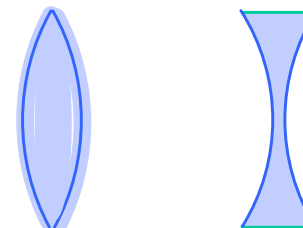
Např. pro případ, kdy čočka zobrazuje se zvětšením  $m = -1$  platí pro polohový parametr  $Y = 0$ . Čočka je pak bikonvexní se stejnými poloměry křivosti a tvarový parametr  $X = 0$ .



Pro otvorovou vadu pak platí vztah:

$$S_{1\min} = \frac{h^4 K^3}{4} \left[ \left( \frac{n}{n-1} \right)^2 \right]$$

O znaménku vady rozhoduje pak znaménko lámavosti  $K$ , tedy znaménko ohniskové vzdálenosti  $f$  (spojka  $X$  rozptylka).



# Principy korekce otvorové vady

( *změna indexu lomu* )

*Analýza vztahu pro  $S1_{min}$  jako funkce indexu lomu  $n$ .*

*Polohový parametr  $Y$  je neměnný. Mění se jen hodnota indexu lomu  $n$ .*

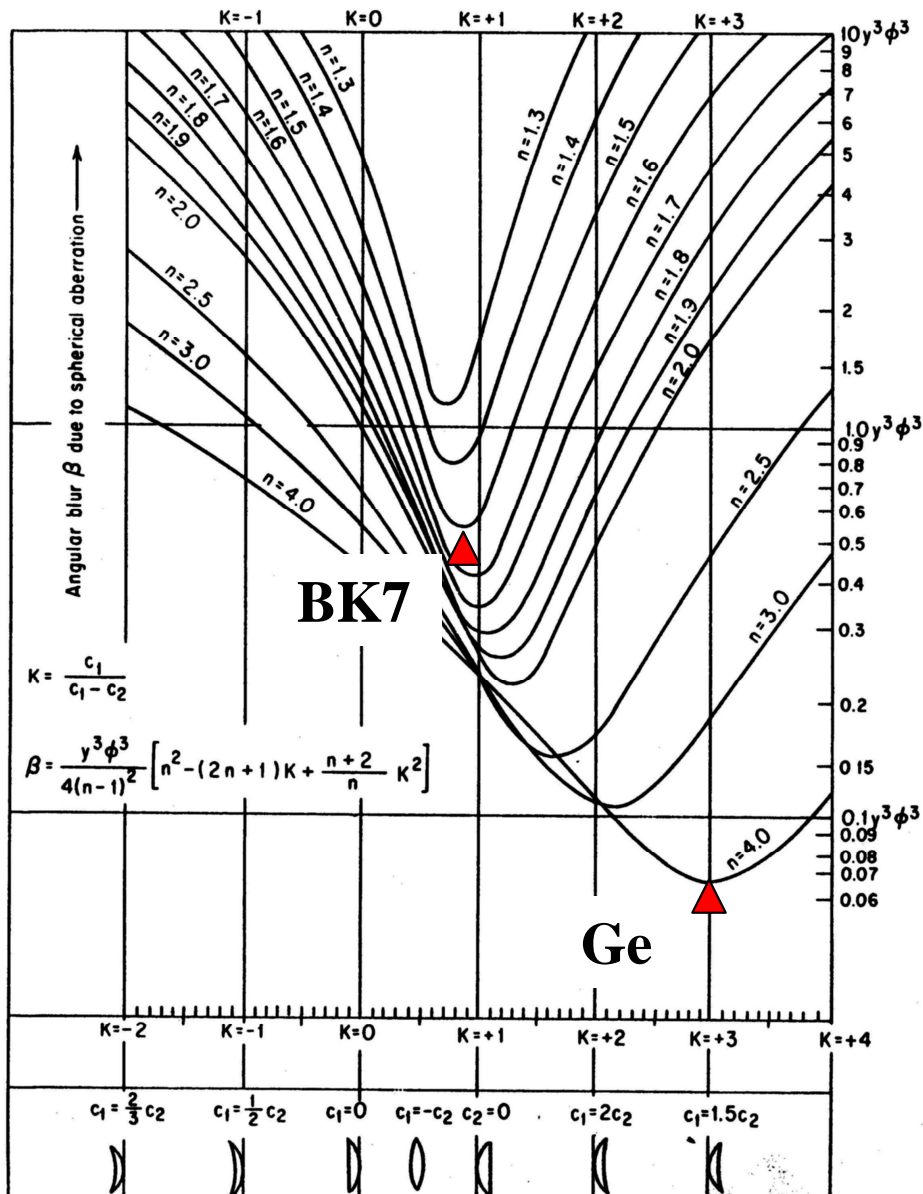
*Nejzajímavější je případ, když je předmět v nekonečnu,  $Y = -1$ .*

*Uvažujme rozsah indexu lomu od 1,5 do 4. (vysoká hodnota indexu lomu 4 odpovídá IČ oblasti a germaniu). Spočítáme pro vybrané hodnoty  $n$  tvarový parametr  $X$  a také minimální hodnotu  $S1_{min}$ , která tomuto parametru odpovídá.*

	$n$	$X(S1_{min})$	$S1_{min}$ (normováno)
běžná optická skla	1,5	0,71	1,00
	1,7	1,02	0,64
	2,0	2,25	0,41
germanium	4,0	5,0	0,13

# Tenká čočka ve vzduchu

*Analýza vztahu pro  $S_{1min}$  jako funkce indexu lomu  $n$ .*



$$S_{1min} = \frac{h^4 K^3}{4} \left[ \left( \frac{n}{n-1} \right)^2 - \frac{n}{n+2} Y^2 \right]$$

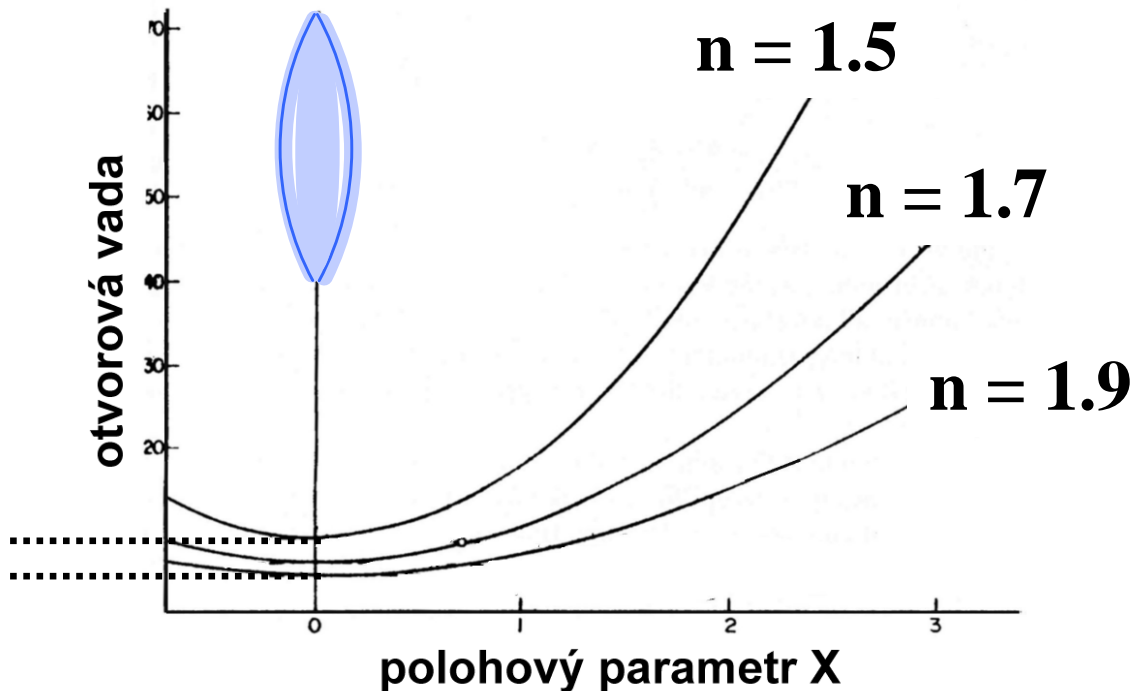
*Pro nízké indexy lomu je optimální tvar čočky bikonvexní, zatímco pro vysoké hodnoty indexu lomu bude mít čočka tvar menisku.*

$$X = -\frac{2(1-n^2)}{n+2} Y$$

*Pro velké hodnoty indexu lomu bude redukována otvorová vada více než v případě nízkých hodnot*  $\longrightarrow$

# Principy korekce otvorové vady

( *změna indexu lomu* )



*bikonvexní čočka*

$$m = -1$$

$$Y = 0; \quad X = 0$$

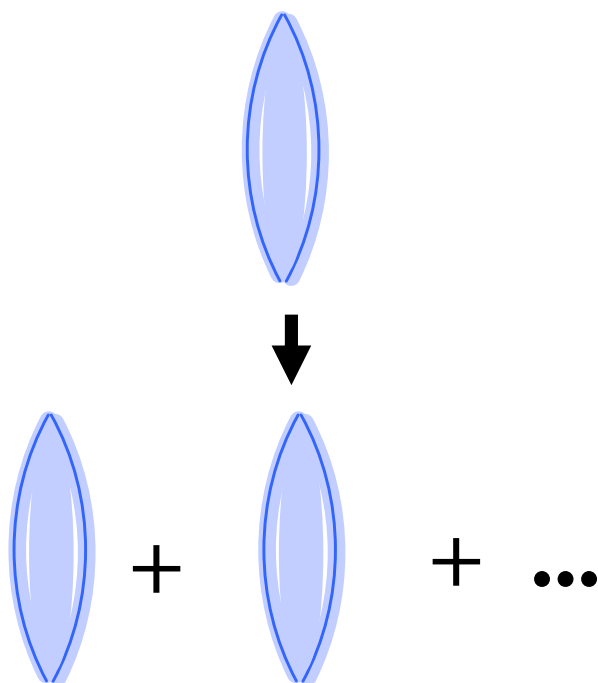
$$S_{1\min} = \frac{h^4 K^3}{4} \left[ \left( \frac{n}{n-1} \right)^2 \right]$$

*Ze vztahu je zřejmé, že čím bude hodnota indexu lomu čočky vyšší, tím bude menší otvorová vada. Tato závislost ale není v případě běžných hodnot indexů lomu v optickém oboru tak velká, aby byla široce využitelná pro korekci otvorové vady ( $n = 1,5 - 1,9$ ) v případě jedné čočky.*



## Principy korekce otvorové vady

( *přidáním dalších čoček – „splitting“* )



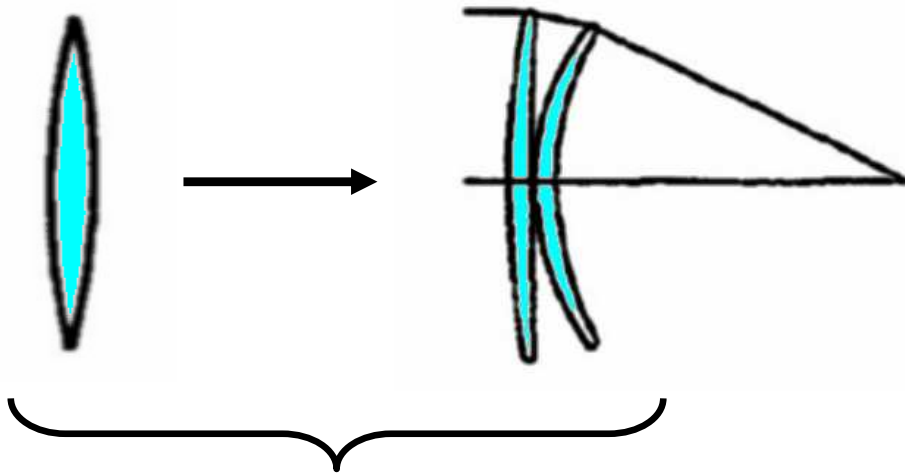
$$S_{1\min} = \frac{h^4 K^3}{4} \left[ \left( \frac{n}{n-1} \right)^2 \right]$$

$$K = K_1 + K_2 = \frac{K}{2} + \frac{K}{2}$$

*Mějme čočku s optimálním tvarem, zaručujícím minimum otvorové vady a s velkým indexem lomu. Další zmenšení otvorové vady lze zajistit pouze „přidáním“ další čočky (pokud neuvažujeme použití asférické plochy).*

## Principy korekce otvorové vady

(přidáním dalších čoček – „splitting“)



$$K = K_1 + K_2 = \frac{K}{2} + \frac{K}{2}$$

*Vezměme namísto jedné spojné čočky s tvarem, zaručujícím minimální otvorovou vadu tyto čočky dvě. Přitom obě jsou tvarovány na minimální otvorovou vadu (první pro předmět v nekonečnu, druhá pro předmět v konečné vzdálenosti).*

## Principy korekce otvorové vady

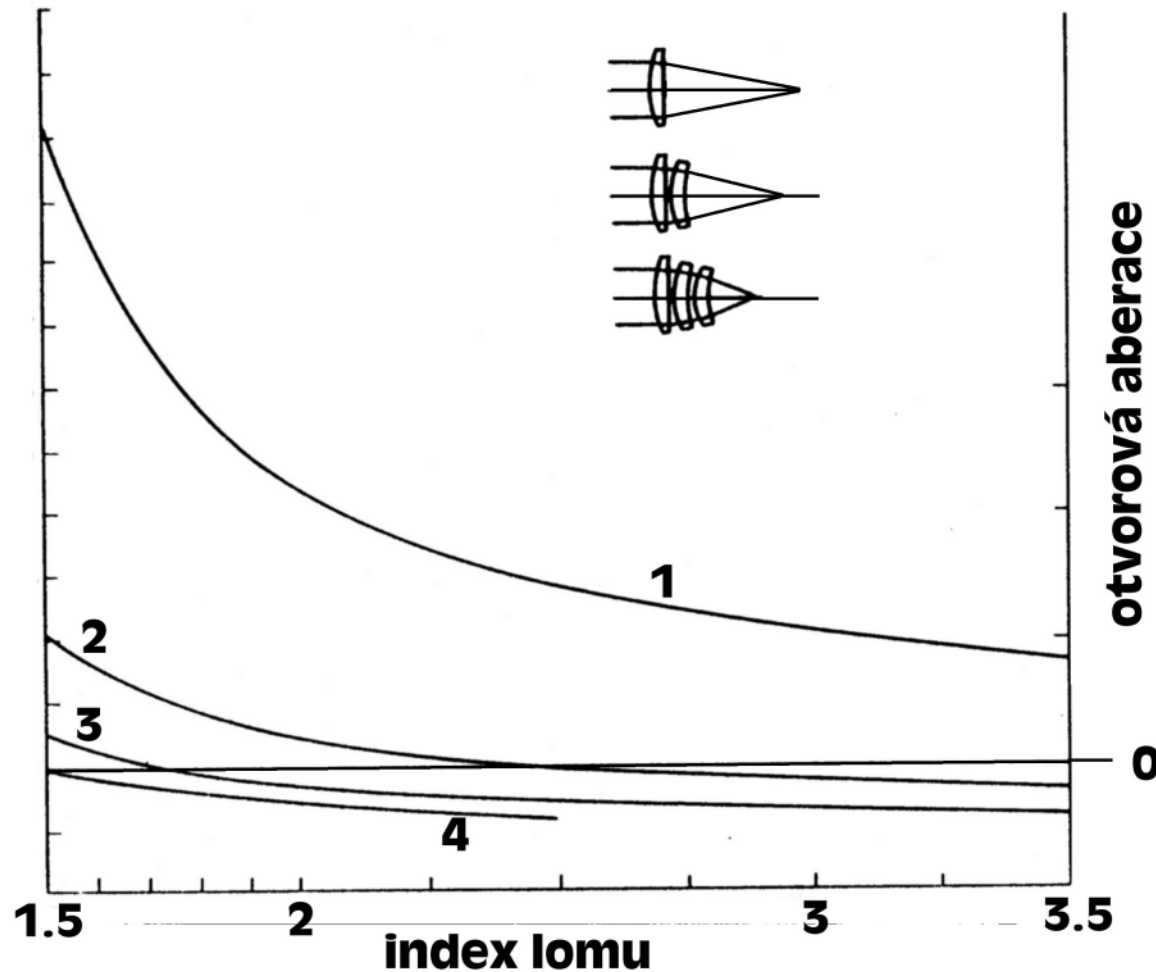
(přidáním dalších čoček – „splitting“)

$$S_{1\min} = \frac{h^4 K^3}{4} \left[ \left( \frac{n}{n-1} \right)^2 \right]$$

$$K = K_1 + K_2 = \frac{K}{2} + \frac{K}{2}$$
$$K^3 = \left( \frac{K}{2} \right)^3 + \left( \frac{K}{2} \right)^3 = \frac{1}{4} K^3$$

*Každá z čoček má cca poloviční optickou lámavost původní jedné čočky, takže tato má celkově neměnnou hodnotu (čočky jsou „v kontaktu“). Potom bude otvorová vada těchto dvou čoček logicky menší než otvorová vada jedné čočky. Čím bude index lomu jednotlivých čoček vyšší, tím lépe.*

# Principy korekce otvorové vady (přidáním dalších čoček – „splitting“)

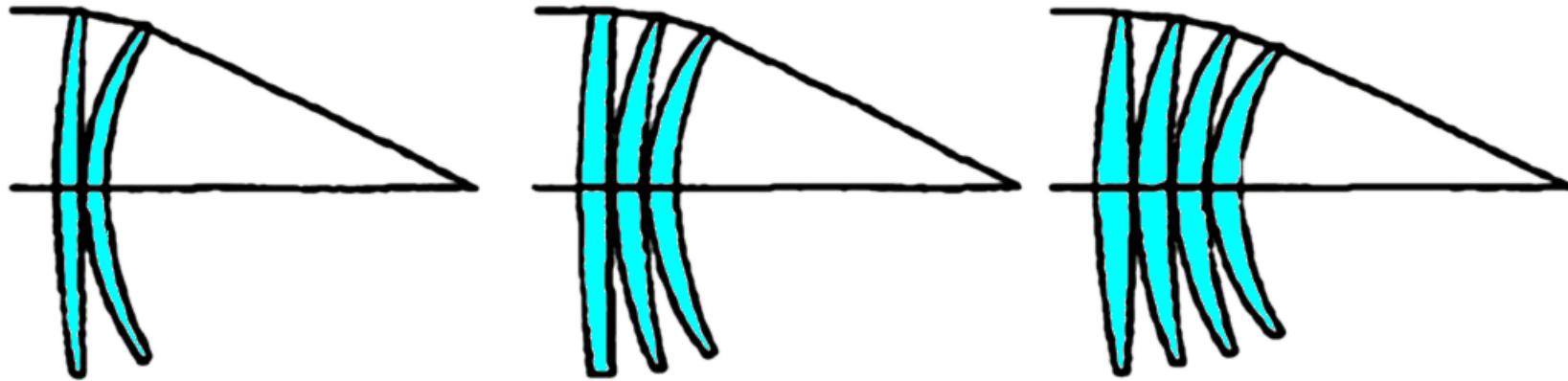


*Otvorová vada více čoček je logicky menší než otvorová vada jedné čočky. Čím bude index lomu jednotlivých čoček vyšší, tím bude korekce lepší.*

# Principy korekce otvorové vady

(přidáním dalších čoček – „splitting“)

*Pro běžná optická skla, kdy je index lomu cca  $n = 1.5$  je nutno pro úplnou korekci použít 4 čočky.*

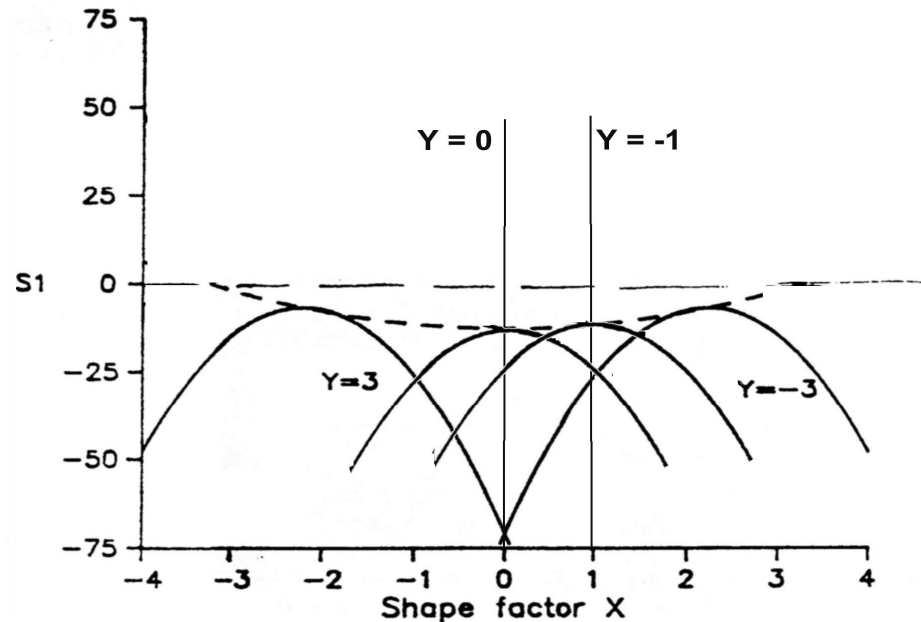
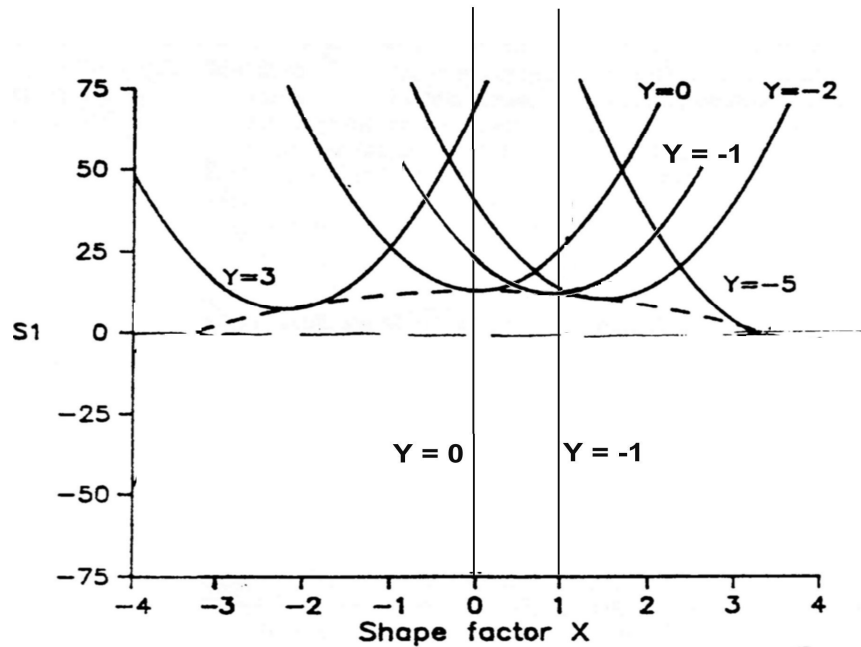


**2 lenses  $n=3$**

**3 lenses  $n=2$**

**4 lenses  $n=1.518$**

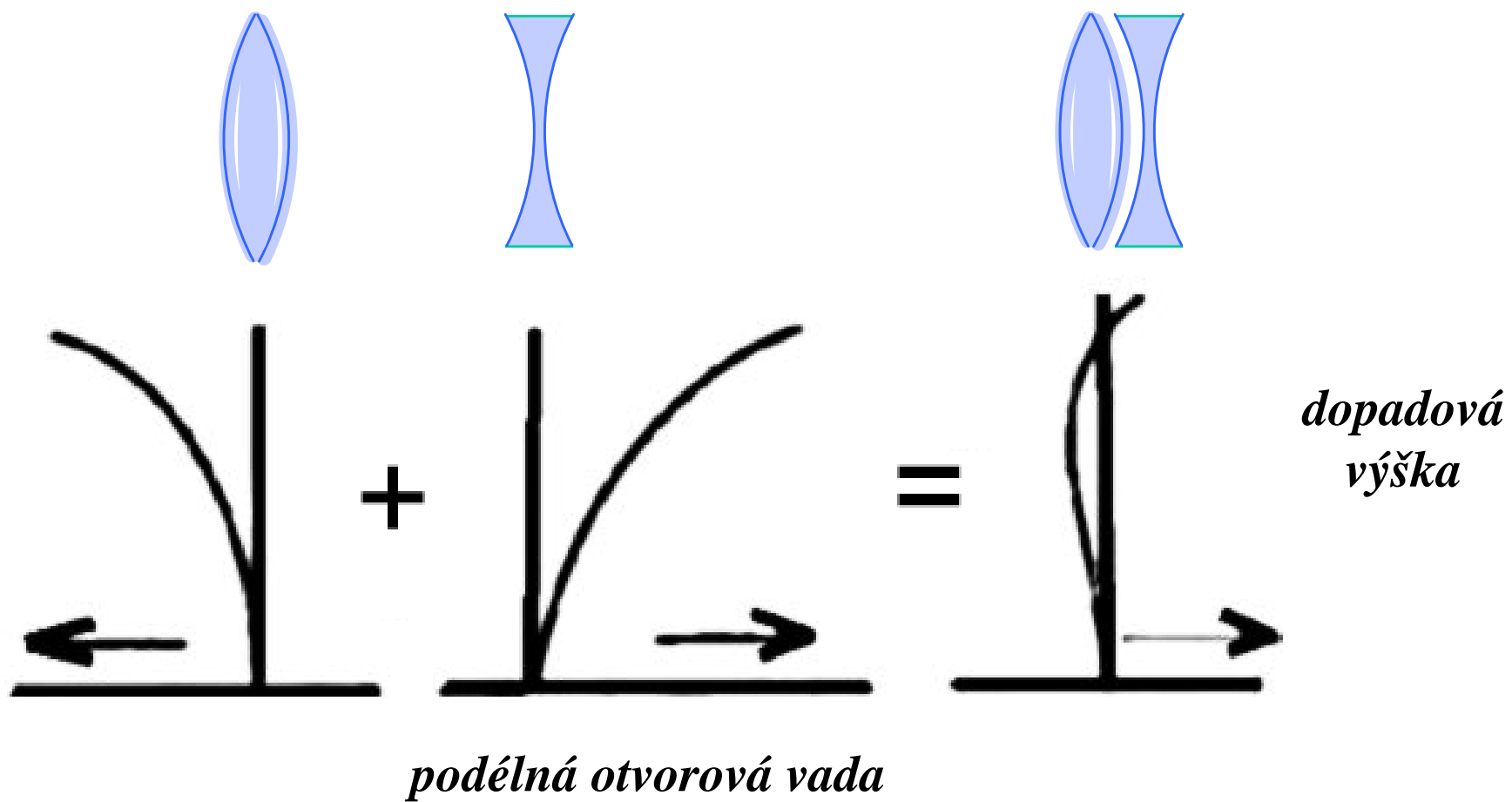
# Principy korekce otvorové vady (použitím kombinace spojka - rozptylka)



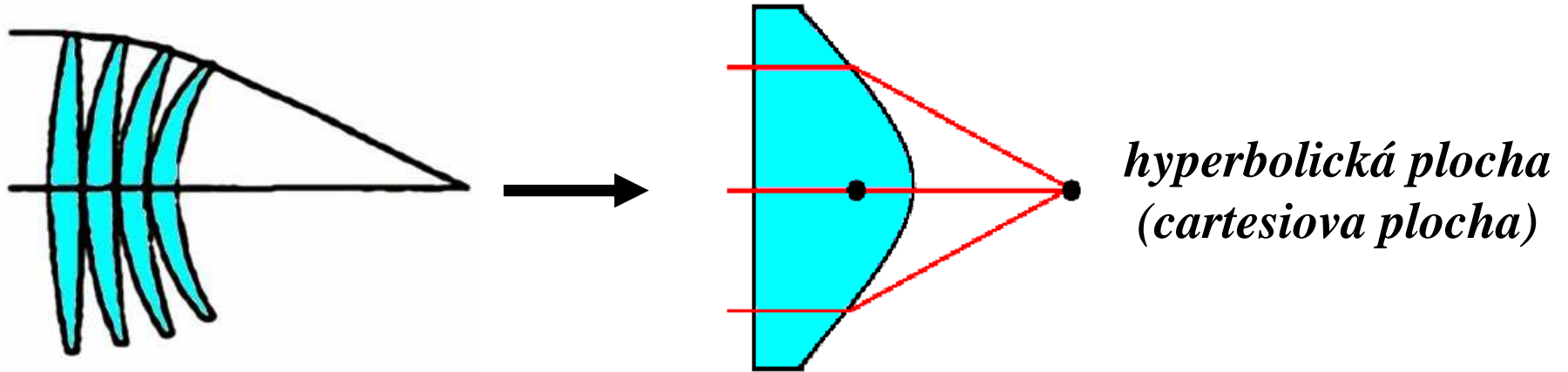
*Korekce otvorové vady je zpravidla nejčastěji prováděna kombinací spojky a rozptylky, protože tato kombinace také umožňuje současně korigovat barevnou vadu polohy. Navíc tato kombinace nijak významně nezávisí na hodnotě indexu lomu, takže je možno využít kombinací různých skel i s poměrně nízkou hodnotou  $n$ .*

# Principy korekce otvorové vady

( *použitím kombinace spojka - rozptylka* )



# Principy korekce otvorové vady ( *použitím asférických ploch* )



*hyperbolická plocha  
(cartesiova plocha)*

**4 lenses n=1.518**

*Cartesiovy plochy – lekce stigmatické zobrazení bodu.*

$$S_{1C} = A^2 h \delta \left( \frac{u}{n} \right) = S_{1_1} + S_{1_2} = A_1^2 h \delta \left( \frac{u}{n} \right)_1 + A_2^2 h \delta \left( \frac{u}{n} \right)_2$$

$$S_{1C} = A^2 h \delta \left( \frac{u}{n} \right) = S_{1_1} + S_{1_2} = 0 h \delta \left( \frac{u}{n} \right)_1 + A_2^2 h 0 = 0$$



# Principy korekce otvorové vady

( *shrnutí* )

$$S_{1\min} = \frac{h^4 K^3}{4} \left[ \left( \frac{n}{n-1} \right)^2 - \frac{n}{n+2} Y^2 \right]$$

*1, tvarováním - prohýbáním čoček (nejsilnější „nástroj“ )*

*2, použitím materiálu s vysokým indexem lomu,*

*3, použitím více čoček ze stejného materiálu,*

*4, kombinací spojka - rozptylka*

*5, náhrada kulových ploch asférickými plochami*

+ velikostí apertury (  $\rho$  )

$$W_{040} \rho^4$$

## Principy korekce komy

( *tvárování* - prohýbání čoček – „bending“)

*Koma je tvarově závislá podobně jako otvorová vada, přičemž na rozdíl od otvorové vady existuje tvar čočky, zaručující nulovou hodnotu komy.*

$$S_{2C} = -\frac{1}{2} h^2 K^2 H \left[ \frac{n+1}{n(n-1)} X + \frac{2n+1}{n} Y \right]$$

*V tomto případě platí pro vztah mezi tvarovým a polohovým parametrem:*

$$X_0 = -\frac{(2n+1)(n-1)}{n+1} Y$$

*Porovnejme tvarové parametry pro minimální otvorovou vadu a nulovou komu za předpokladu, že předmět je v nekonečnu ( $Y = -1$ ).*

## Principy korekce komy

(*tvarování - prohýbání čoček – „bending“*)

*Porovnejme tvarové parametry pro minimální otvorovou vadu a nulovou komu za předpokladu, že předmět je v nekonečnu ( $Y = -1$ ).*

$$X = -\frac{2(1-n^2)}{n+2} Y$$

*otvorová vada*

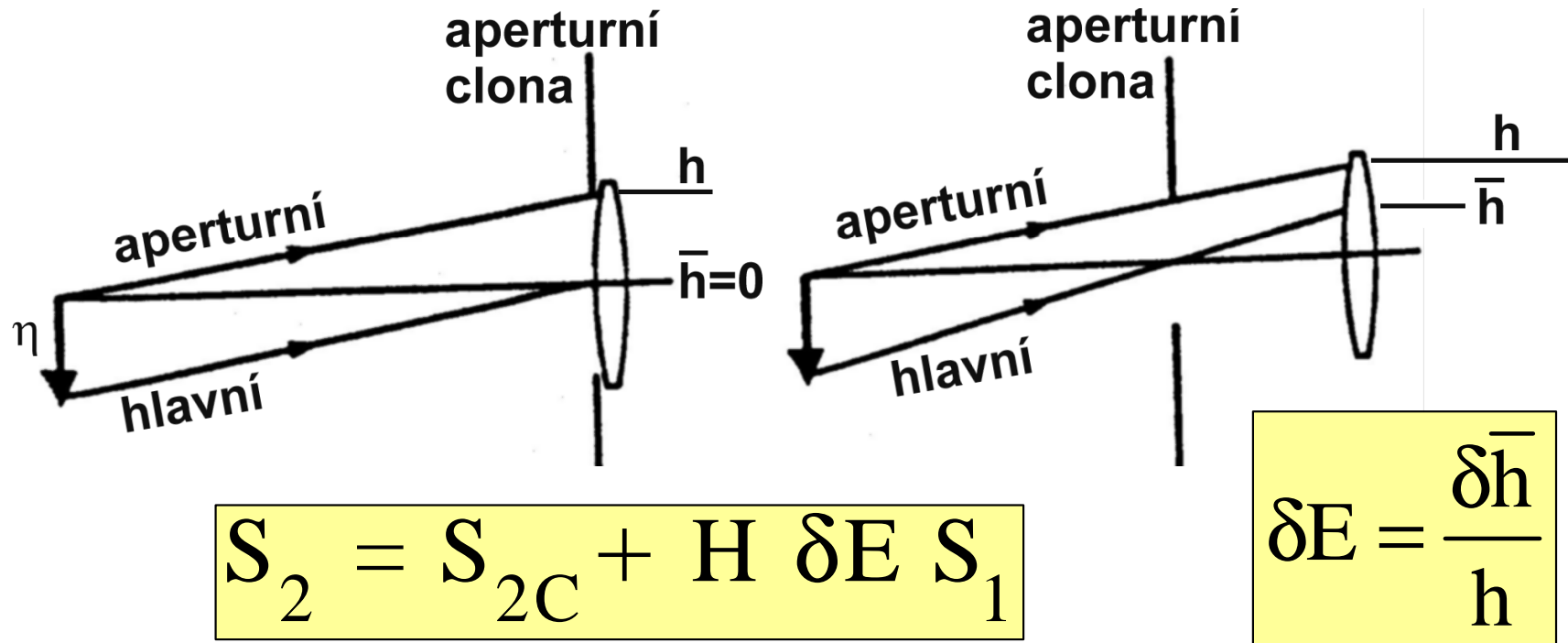
$$X_0 = -\frac{(2n+1)(n-1)}{n+1} Y$$

*koma*

index lomu	X pro S1min	X pro S2 = 0
1.5	0.71	0.8
2	1.5	1.67
2.5	2.33	2.57

*Tabulka ukazuje, že v případě eliminace otvorové vady bude silně redukována také koma (clona je v rovině čočky).*

# Principy korekce komy (*posun clony*)



*Při posunu clony se projevuje změna komy (a astigmatismu). Při určité vzdálenosti bude koma  $S_2 = 0$ . Taková vzdálenost se potom označuje jako tzv. “přirozená” poloha čočky.*

# Principy korekce komy

( *shrnutí* )

$$S_{2C} = -\frac{1}{2} h^2 K^2 H \left[ \frac{n+1}{n(n-1)} X + \frac{2n+1}{n} Y \right]$$

*1, tvarováním - prohýbáním čoček*

*2, posunem clony*

*3, pomocí principu symetrie – později*

+ velikostí apertury (  $\rho$  )

+ velikostí předmětu (  $\eta$  )

$$W_{131} \eta \rho^3 \cos \varphi$$

# Principy korekce astigmatismu

( *posun clony* )

*V případě, že je aperturní clona v rovině tenké čočky, platí:*

$$S_{3C} = H^2 K$$

*I když nahradíme jednu čočku několika, přičemž celkovou lámavost  $K$  zachováme, astigmatismus se nezmění!*

*Jedinou cestou ke korekci astigmatismu je posun clony !!!*

$$S_3 = S_{3C} + (H \delta E)^2 S_1 + 2(H \delta E) S_{2C}$$

*Korekci astigmatismu pak dosáhneme zprostředkovaně přes změnu velikosti otvorové vady nebo komy.*

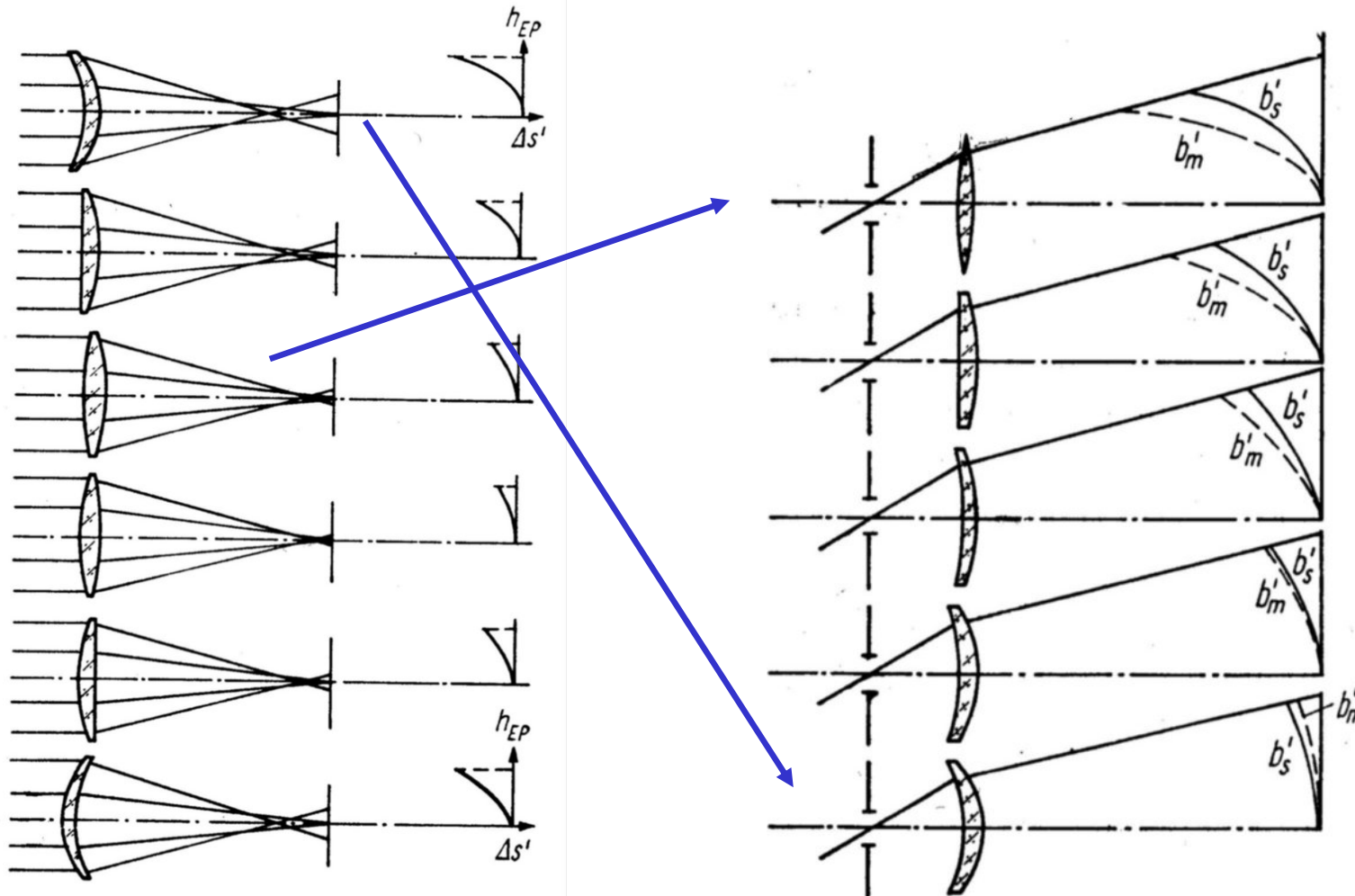
( *tvárováním čočky* )

# Principy korekce astigmatismu

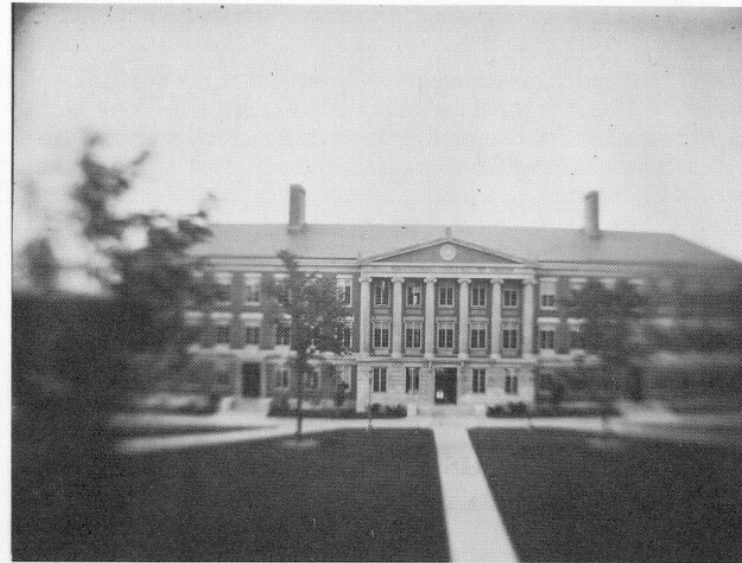
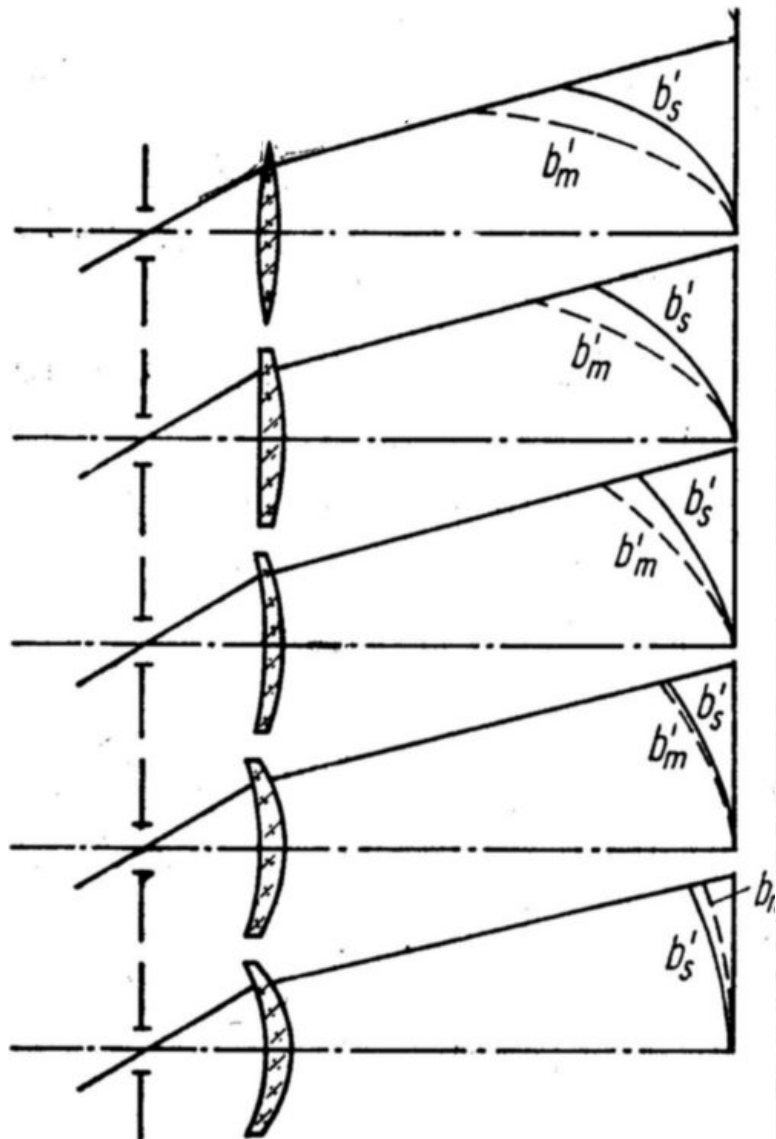
(posun clony)

Korekce astigmatismu dosáhneme zprostředkovaně přes změnu velikosti otvorové vady nebo komy - jejich zhoršením (to eliminujeme malým otvorem).

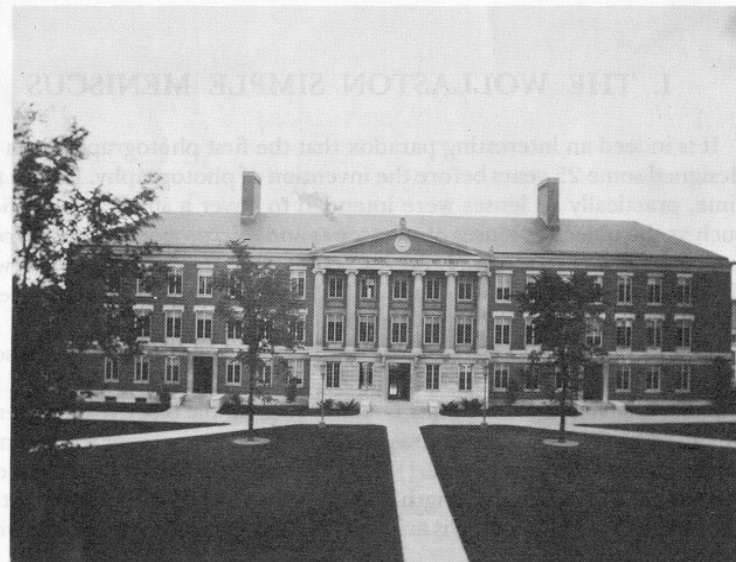
podélná otvorová aberace



# Principy korekce astigmatismu (vliv tvaru čočky)



*bikonvexní*



*menisek*



# Principy korekce astigmatismu

( *shrnutí* )

$$S_{3C} = H^2 K$$

$$S_3 = S_{3C} + (H \delta E)^2 S_1 + 2(H \delta E) S_{2C}$$

- *pouze !!! posunem clony ( + tvarováním čočky )*

+ velikostí apertury (  $\rho$  )

+ velikostí předmětu (  $\eta$  )

$$W_{222} \eta^2 \rho^2 \cos^2 \varphi$$

# Principy korekce křivosti pole

( kombinace spojka + rozptylka „v kontaktu“ )

$$S_{4C} = \frac{H^2 K}{n}$$

$$\frac{K}{n} = \frac{K_1}{n_1} + \frac{K_2}{n_2}$$

*příklad:*

2 čočky v “kontaktu”, *různý index lomu*

**K1 = 4, n1 = 1,8 - spojka**

**K2 = -3, n2 = 1,5 - rozptylka**

$$\frac{K}{n} = \frac{K_1}{n_1} + \frac{K_2}{n_2} = \frac{4}{1.8} - \frac{3}{1.5} = 0.22$$

$$K = K_1 + K_2 = 4 - 3 = 1$$

$$\frac{K}{n} = \frac{1}{1.8} = 0.555$$

- původně

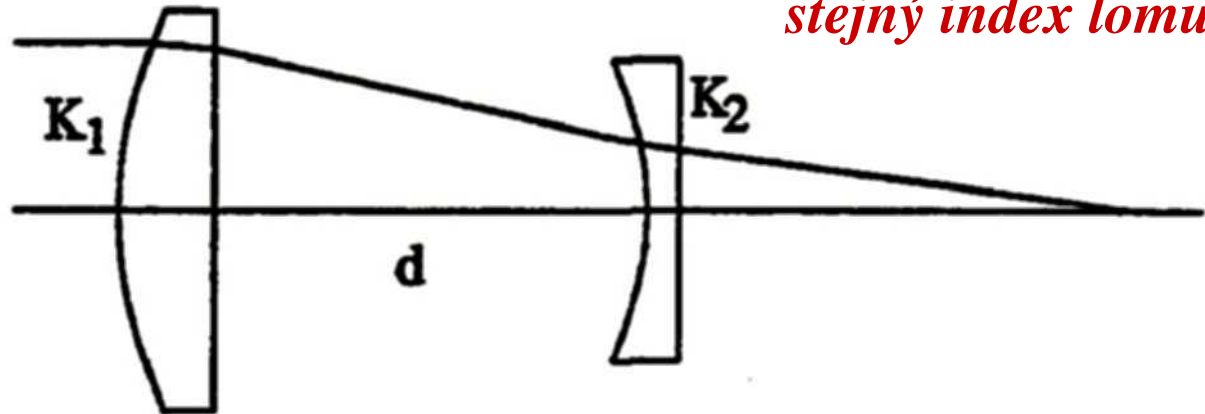
*Křivost je tedy více než 2x menší!*

*Velké požadované lámavosti jednotlivých čoček (4, -3) ale vedou k tomu, že čočky budou mít poměrně velké poloměry křivosti, což není výhodné z výrobních důvodů. Proto se tento způsob využívá jen zřídka.*

# Principy korekce křivosti pole

( kombinace spojka + rozptylka „vzdálené“ )

$$S_{4C} = \frac{H^2 K}{n}$$



$$K = K_1 + K_2 - d K_1 K_2$$

$$K_2 = -K_1$$

$$K = K_1 - K_1 + d K_1 K_1$$

*stejné lámavosti až na znaménko*

$$K = d K_1^2$$

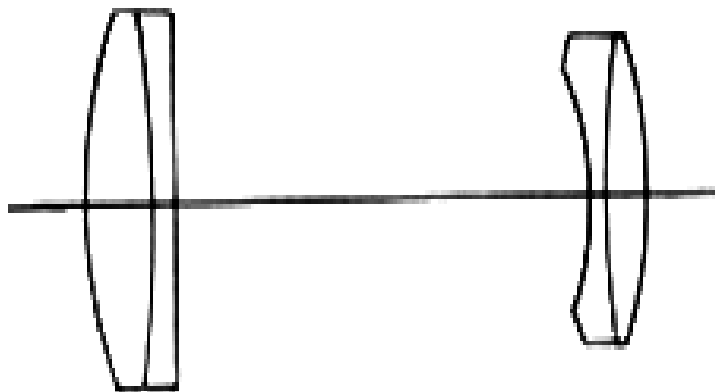
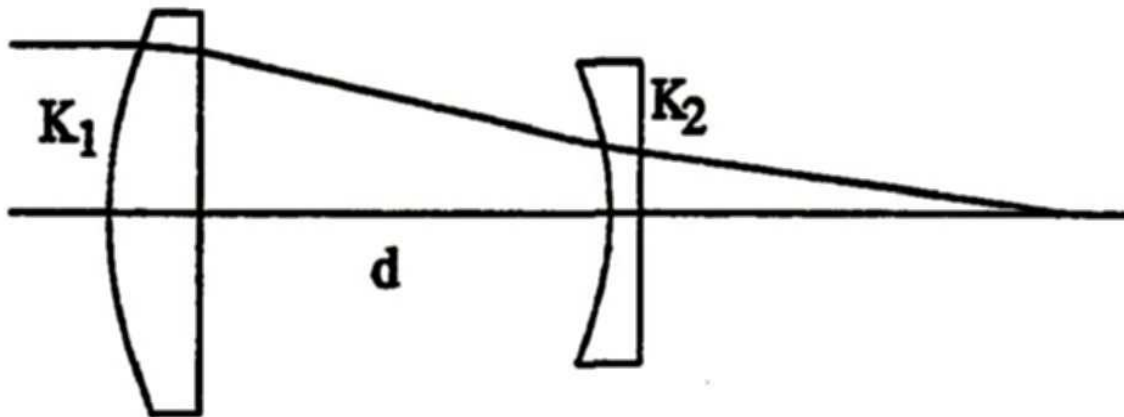
*soustava dvou čoček má nenulovou lámavost ale ( $K_2 = -K_1$ ):*

*nulová křivost pole !!! :*

$$S_4 = \frac{H^2 K}{n} = H^2 \left( \frac{K_1}{n} + \frac{K_2}{n} \right) = 0$$

# Principy korekce křivosti pole

( kombinace spojka + rozptylka „vzdálené“ )



*teleobjektiv*

# Principy korekce křivosti pole

( *tlustá menisková čočka* )

*Lámavost tlusté čočky :*

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left( \frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right) + \left( \frac{(n - 1)^2 d}{nr_1 r_2} \right)$$

$$K = (n - 1) (c_1 - c_2) + \frac{(n - 1)^2 c_1 c_2 d}{n}$$

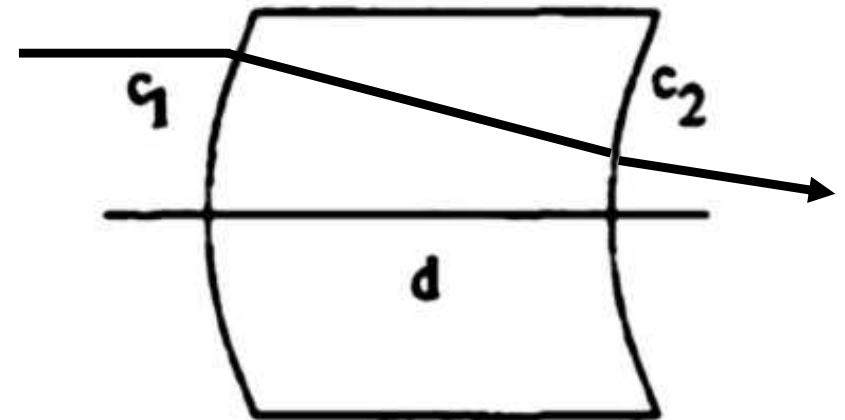
$$c_1 = c_2 \Rightarrow K = \frac{(n - 1)^2 c_1^2 d}{n}$$

*Lámavost K je  
kladná, ale znovu:*

$$S_4 = H^2 \left( \frac{K_1}{n} + \frac{K_2}{n} \right) = 0$$

*Variace předchozího  
řešení spojka-rozptylka*

*stejně křivosti*



*Používá se zřídka  
díky nesnadné  
výrobě menisku*

# Principy korekce křivosti pole

( *shrnutí* )

$$S_4 = \frac{H^2 K}{n}$$

*1, kombinace spojky a rozptylky v kontaktu (čočky musí mít velkou lámavost)*

*2, kombinace spojky a rozptylky ve vzdálenosti d*

*3, tlustá menisková čočka*

+ velikostí apertury (  $\rho$  )

+ velikostí předmětu (  $\eta$  )

$$W_{220} \eta^2 \rho^2$$

# Principy korekce zkreslení

(*posun clony*)

*V případě, že je aperturní clona v rovině tenké čočky, platí:*

$$S_5 = 0$$

*Při posunu clony bude zkreslení bohužel nenulové !!!*

$$S_5 = S_{5C} + (H \delta E)^3 S_1 + 3 (H \delta E)^2 S_{2C} + (3S_{3C} + S_4)(H \delta E)$$

*Korekci zkreslení dosáhneme zprostředkovaně změnou velikosti otvorové vady, komy, astigmatismu a křivosti pole.*

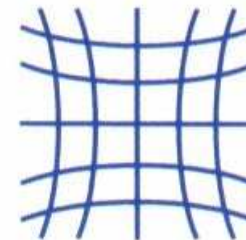
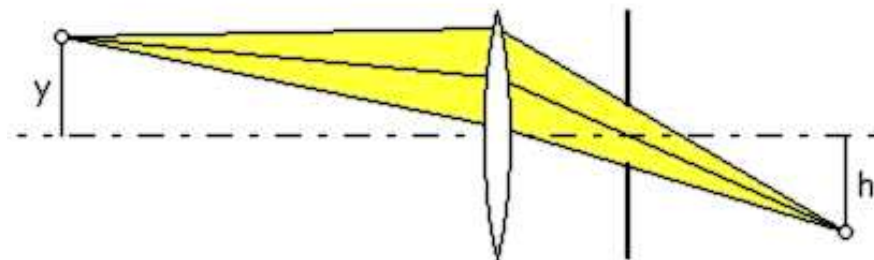
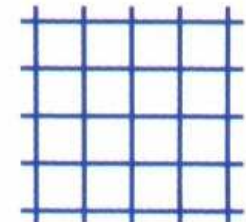
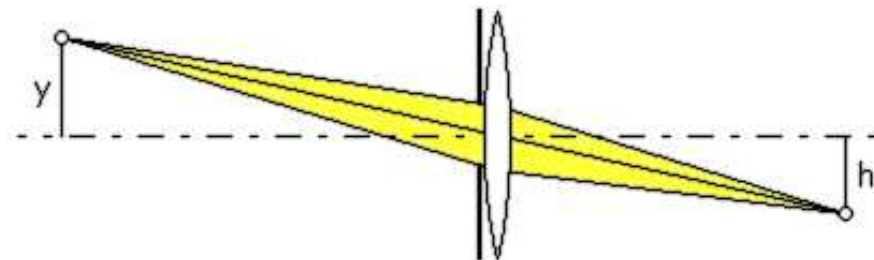
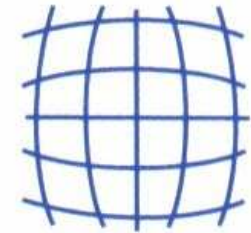
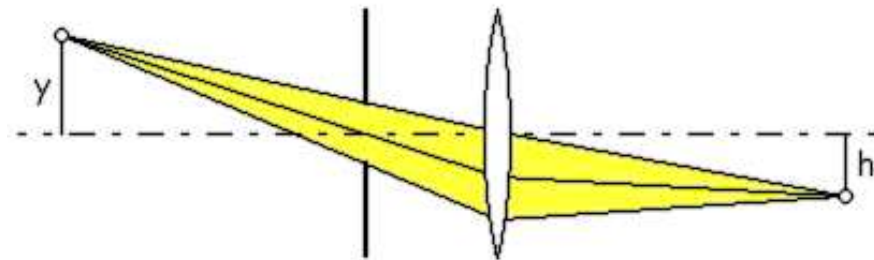
**Korekce zkreslení je velmi obtížná ! (kombinace mnoha faktorů)**

# Principy korekce zkreslení (vliv posunu clony)

*V případě, že je aperturní  
clona v rovině tenké  
čočky, platí:*

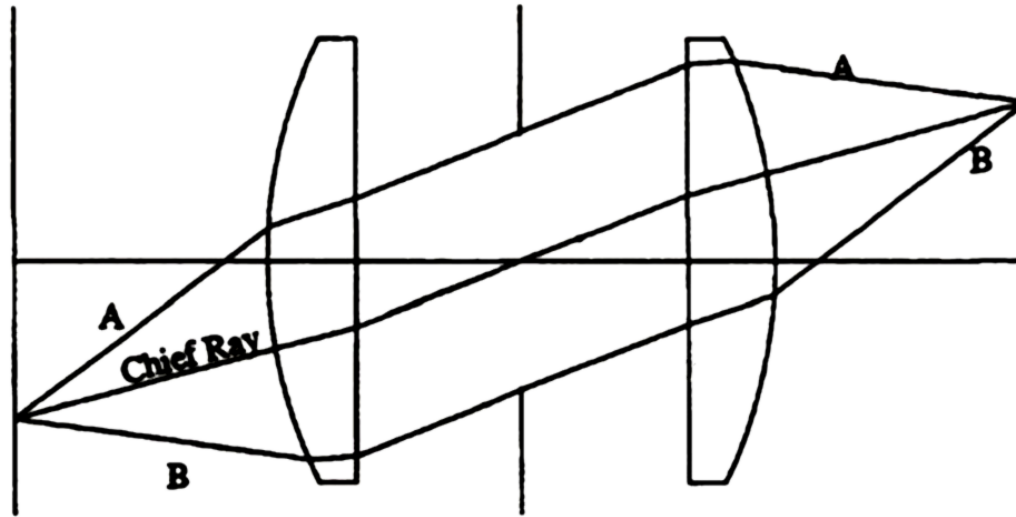
$$S_5 = 0$$

*Při posunu  
clony bude  
zkreslení  
bohužel  
nenulové !!!*





## Principy korekce zkreslení ( *princip symetrie* )

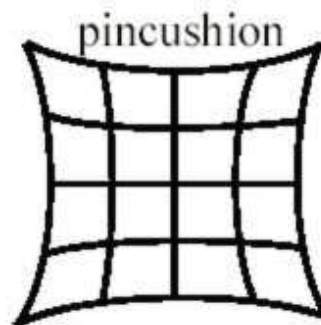
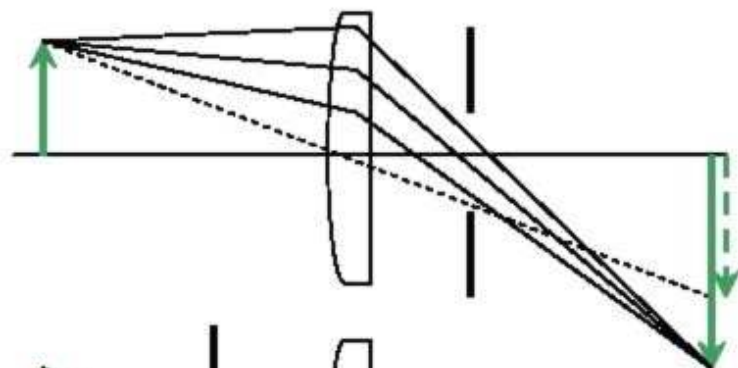


*Příklad OS s jednotkovým zvětšením  $m = -1$  ukazuje „zrcadlovou“ symetrii. Druhá čočka je „zrcadlovým obrazem“ čočky první. V tomto případě je vidět, že optické dráhy paprsku A a paprsku B jsou stejné. Potom jsou stejné i odpovídající vlnové aberace.*

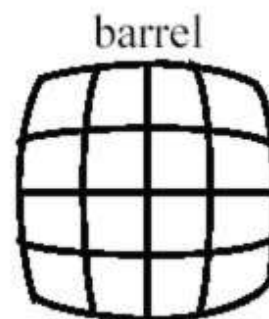
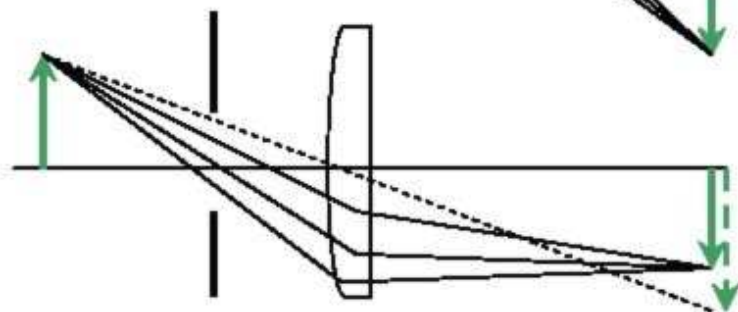
*Tím je principiálně odstraněna **koma, zkreslení a také barevná vada velikosti**. Bohužel otvorová vada a barevná vada polohy naopak narůstá ( vady obou polovin OS mají stejné znaménko).*

# Principy korekce zkreslení

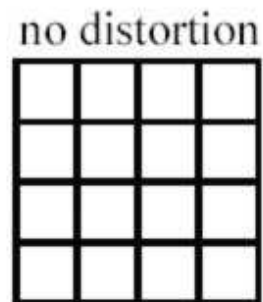
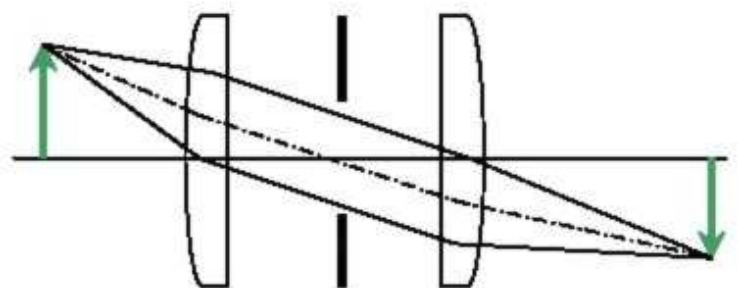
(korekce zkreslení – princip symetrie)



*„poduškové“*

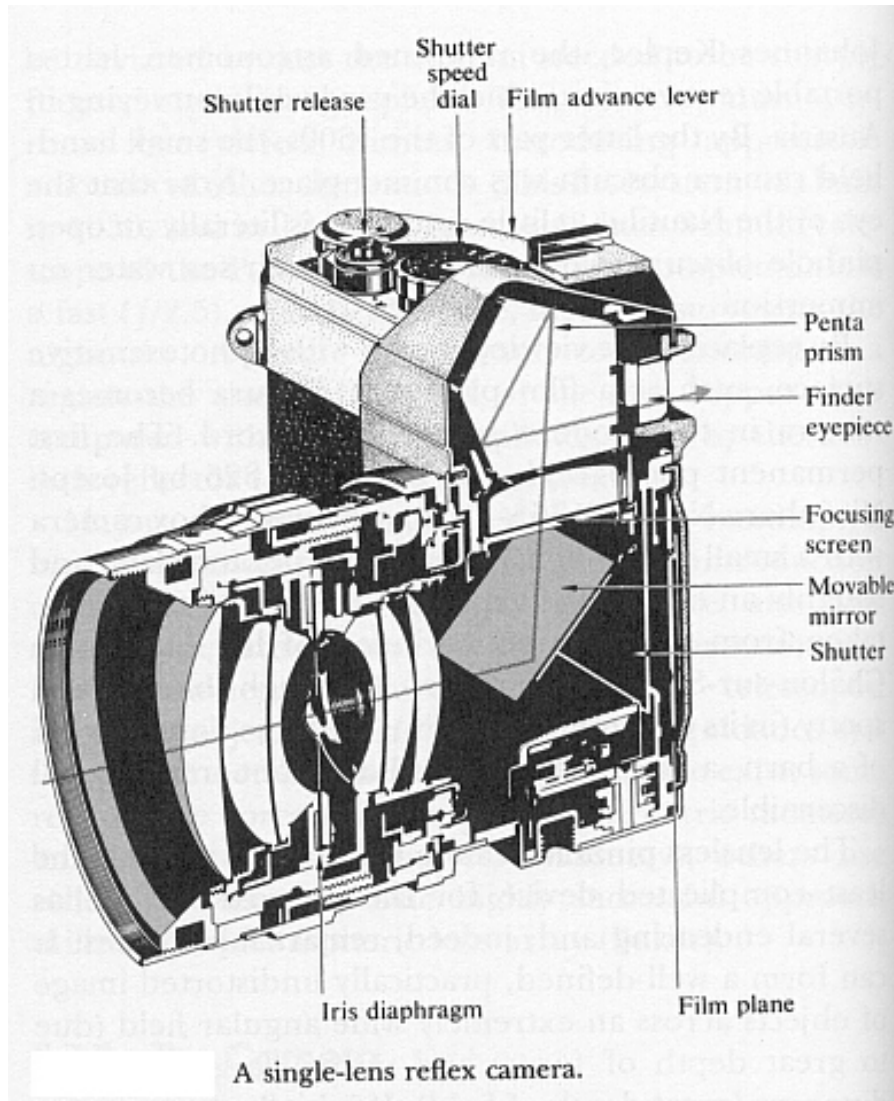


*„soudkové“*

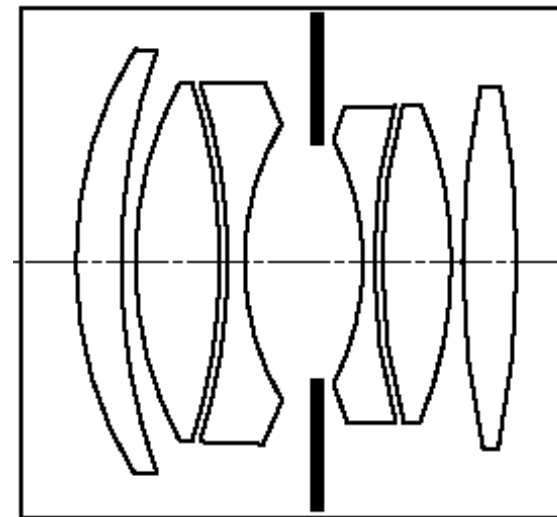


# Princip symetrie

(příklad moderního foto-objektivu)



*Skupiny čoček na obou stranách aperturní clony jsou „stejné“*



*double Gauss objektiv*

## Principy korekce zkreslení ( *shrnutí* )

$$S_5 = S_{5C} + (H \delta E)^3 S_1 + 3 (H \delta E)^2 S_{2C} + (3S_{3C} + S_4)(H \delta E)$$

- *princip symetrie*

+ velikostí předmětu (  $\eta$  )

$$W_{311} \eta^3 \rho \cos \varphi$$

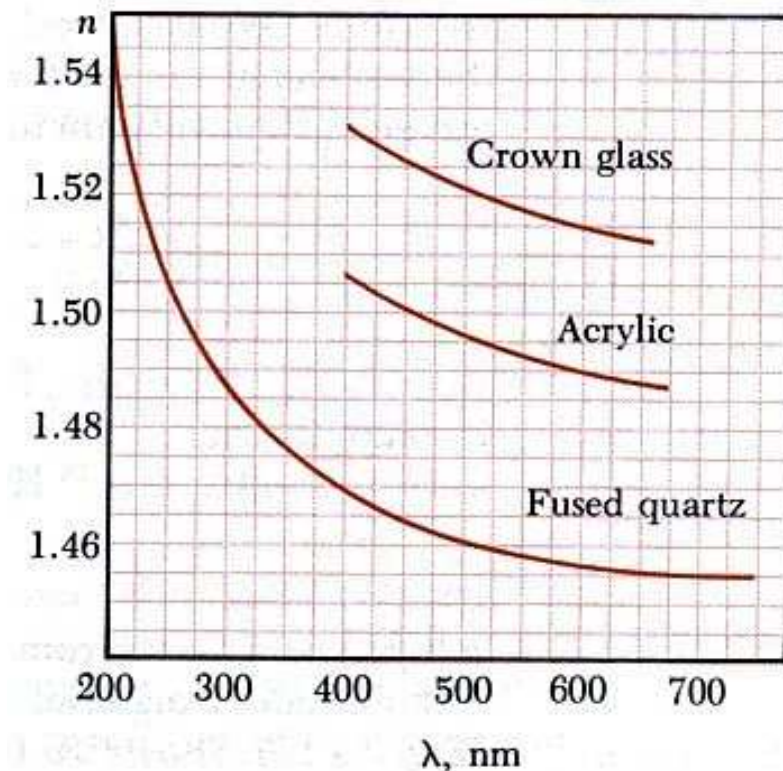
# **Principy korekce chromatických vad**

# Optické materiály - optická skla

# Optické materiály

( *indexy lomu* )

*disperze*



$n(\lambda)$

← *optické sklo*  
( „korunové“ )

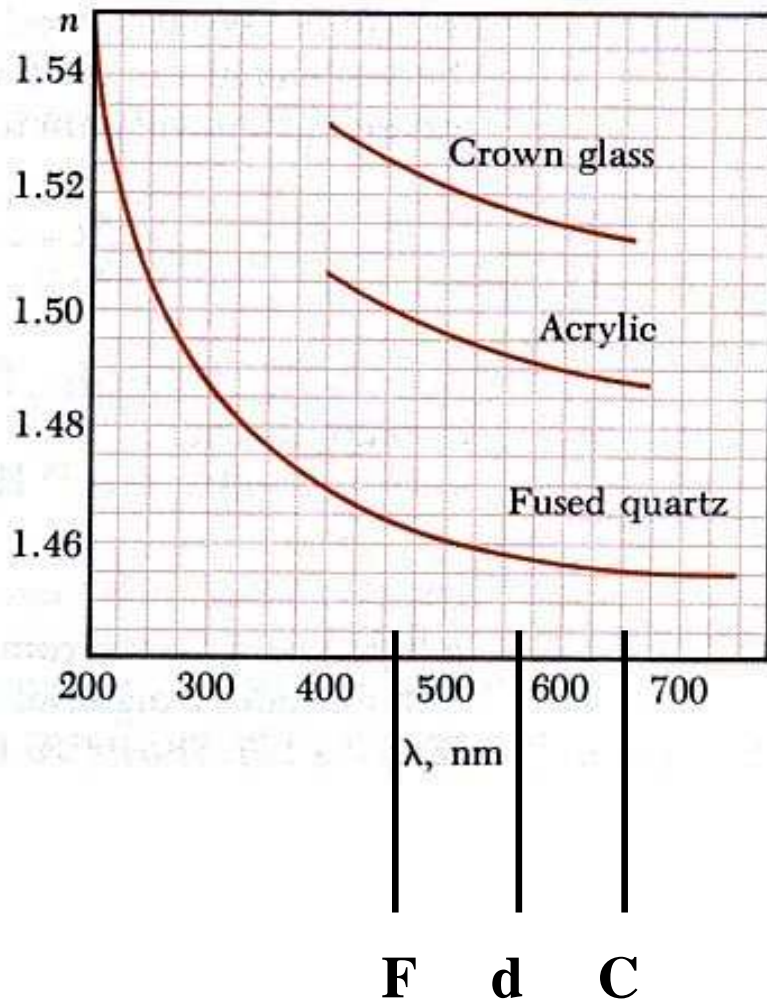
← *plexisklo*

← *křemenné sklo*

*závislost hodnoty indexu lomu na vlnové délce*

# Optické materiály

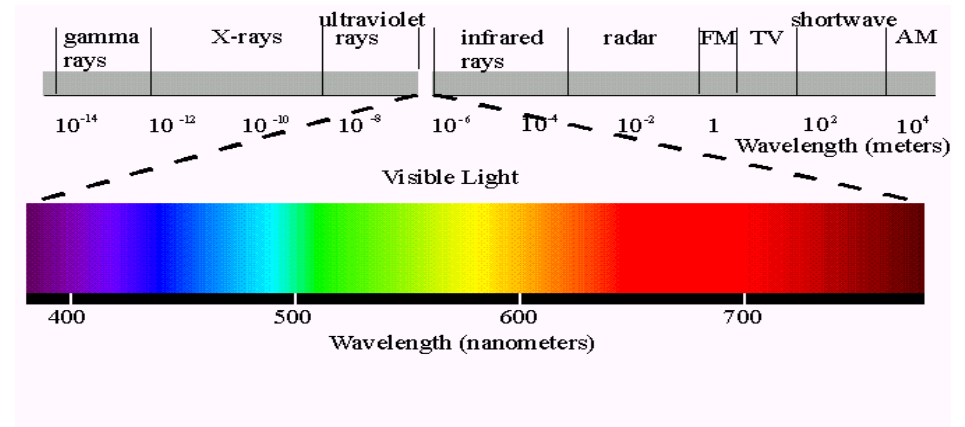
(*index lomu - disperze*)



„standartní“ vlnové délky:

barva	označení	vlnová délka
žlutá	d	587.6nm
modrá	F	486.1nm
červená	C	656.3nm

„Fraunhoferovy čáry“

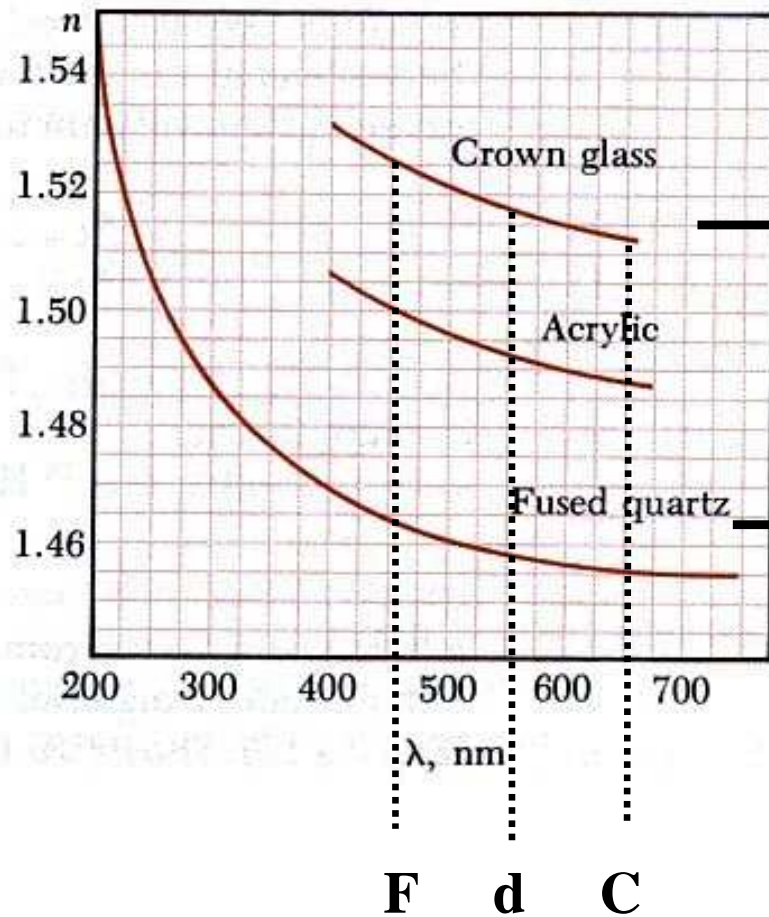




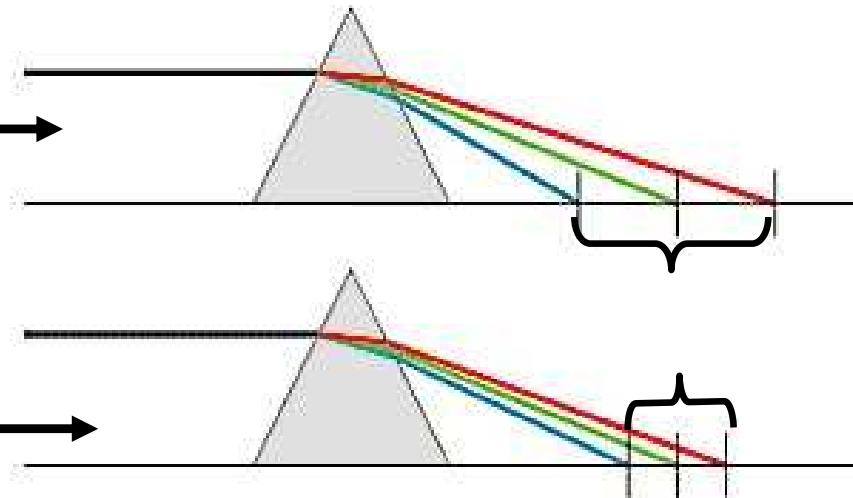
# Optické materiály

( „míra“ disperze - Abbeovo číslo)

*disperze*



Různé materiály mají různou disperzi

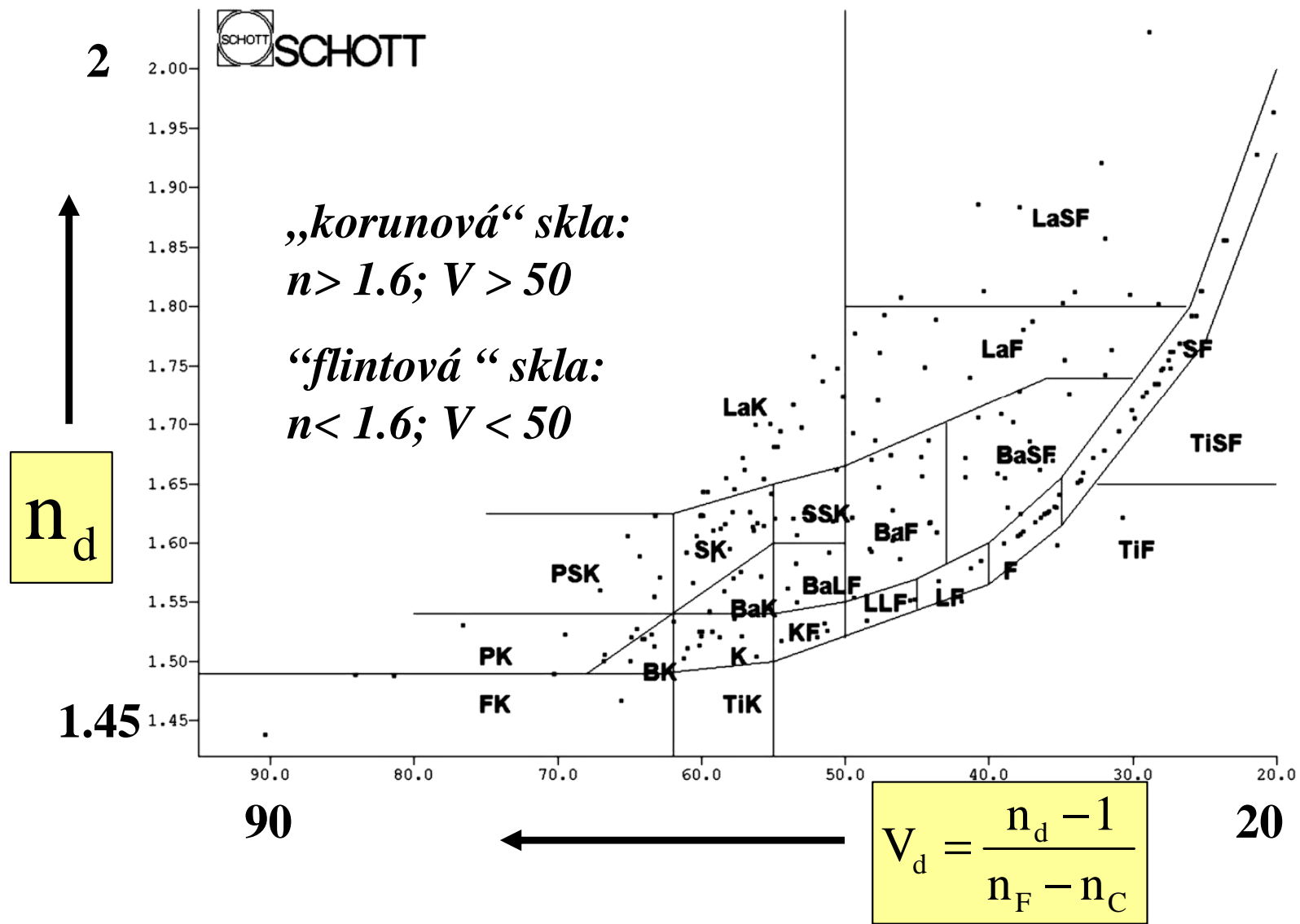


*Abbeovo číslo:*

$$V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$$

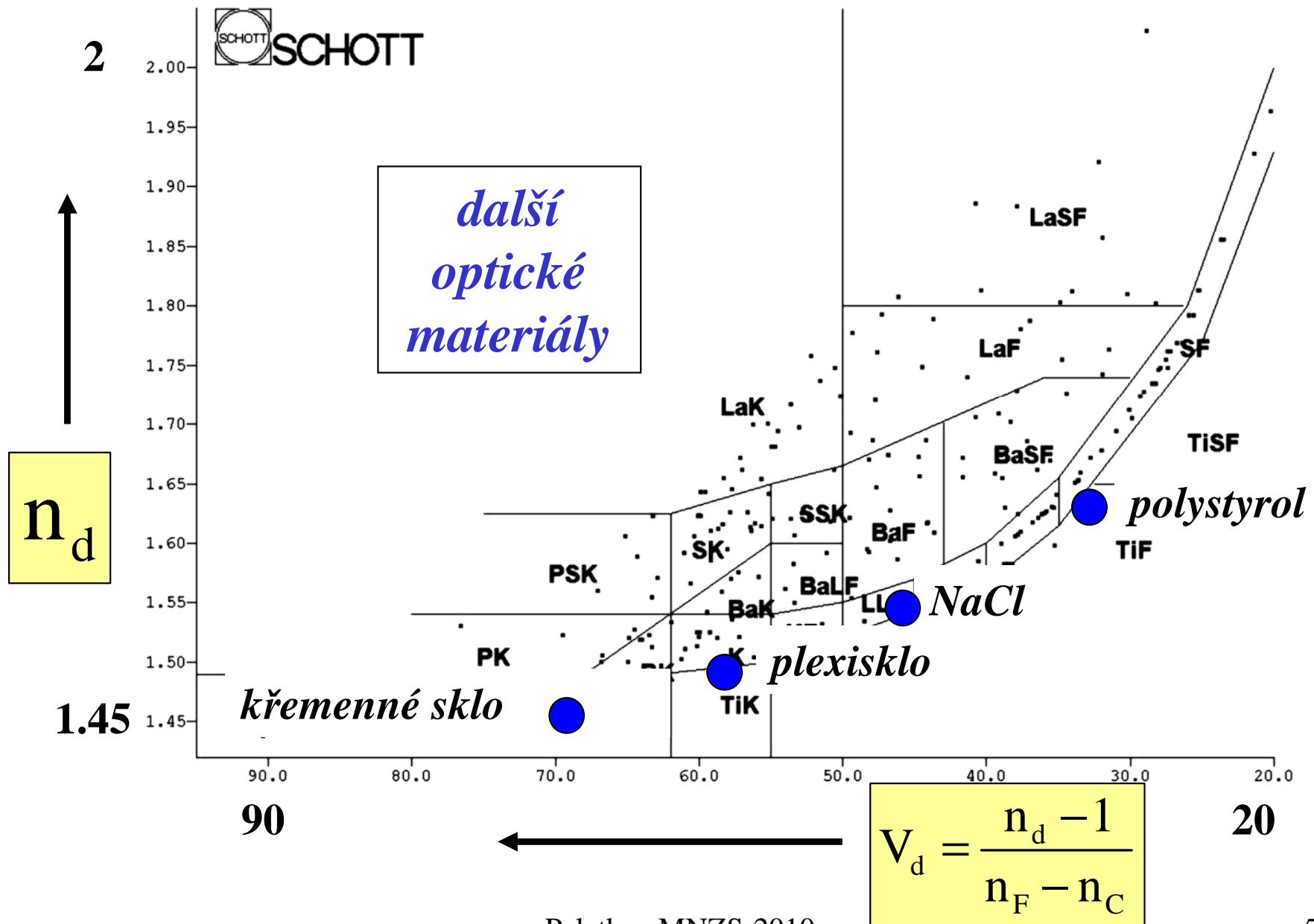
# Optické materiály

(diagram - „mapa“ optických skel)



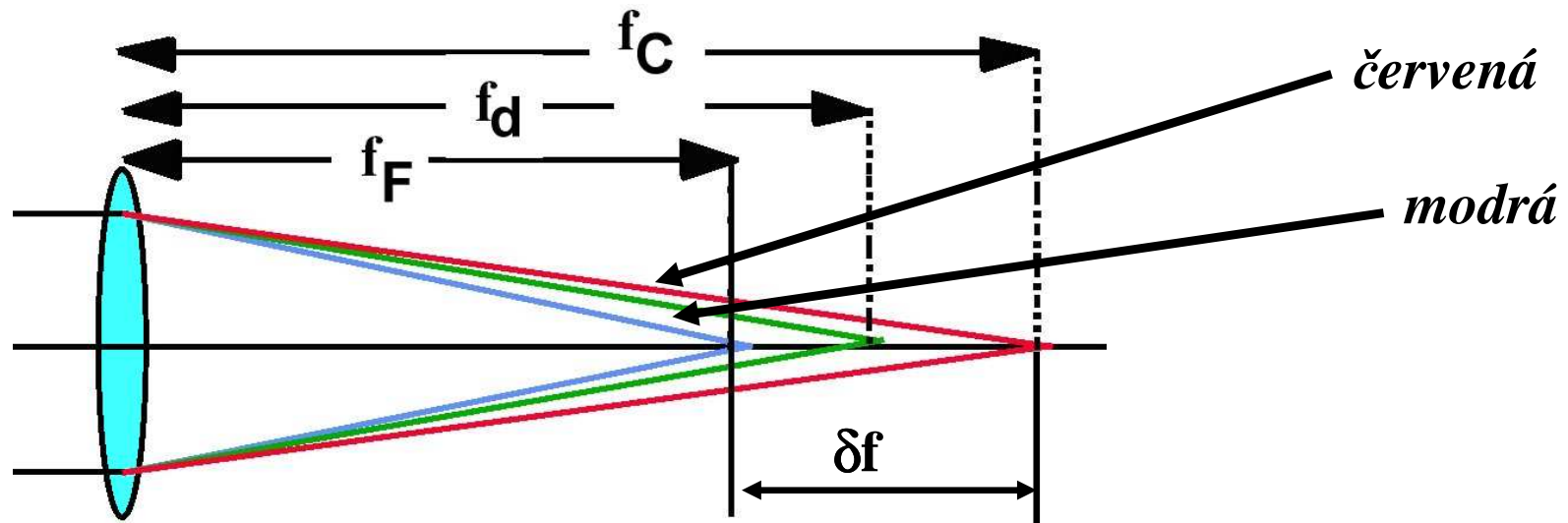
# Optické materiály

(diagram - „mapa“ optických skel)



# Principy korekce chromatických aberací

(barevná vada polohy tenké čočky)



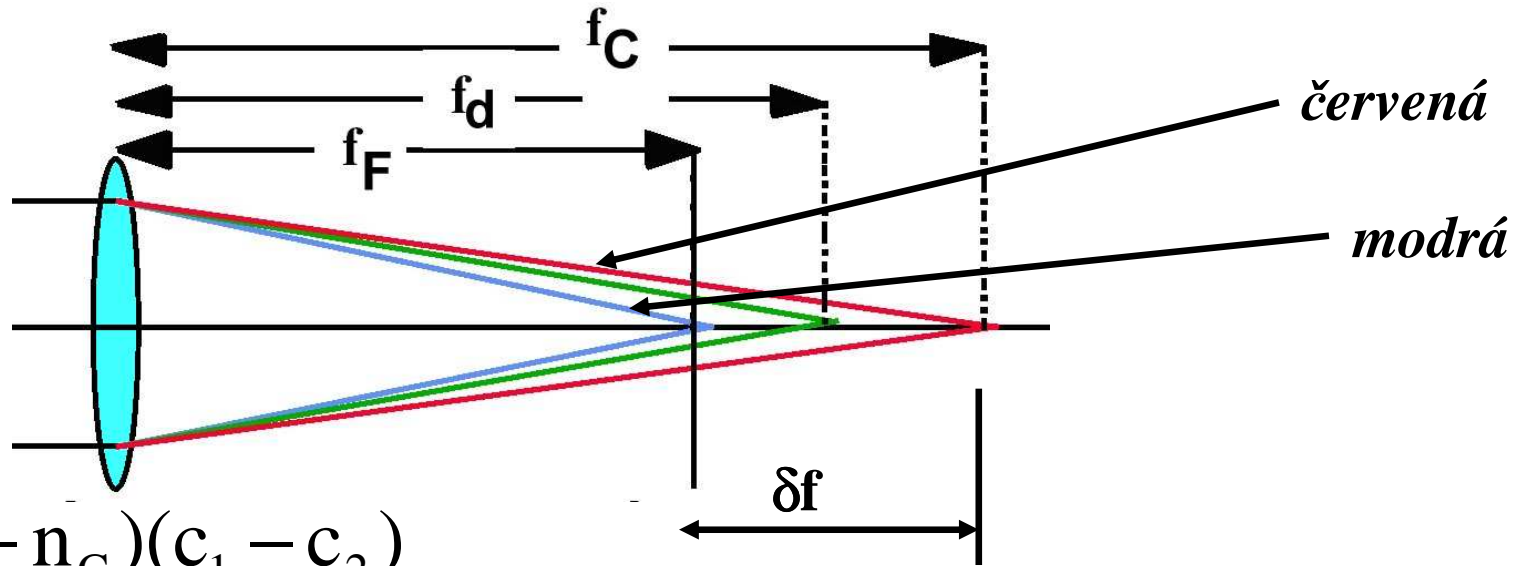
$$K_d = (n_d - 1)(c_1 - c_2)$$

$$\delta K = K_F - K_C = (n_F - 1)(c_1 - c_2) - (n_C - 1)(c_1 - c_2)$$

$$\delta K = (n_F - n_C)(c_1 - c_2)$$

# Principy korekce chromatických aberací

(barevná vada polohy tenké čočky)



$$\delta K = (n_F - n_C)(c_1 - c_2)$$

$$\delta K = (n_F - n_C)(c_1 - c_2) \left( \frac{n_d - 1}{n_d - 1} \right) = \left( \frac{n_F - n_C}{n_d - 1} \right) \underbrace{(n_d - 1)(c_1 - c_2)}$$

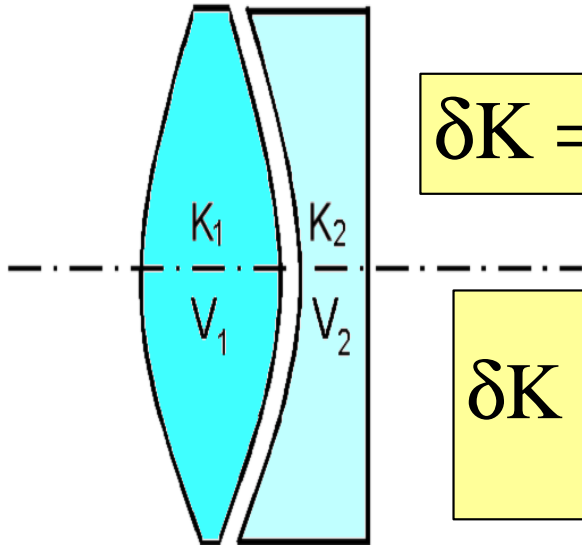
*Změna lámavosti (ohniskové délky)  
tenké čočky v rozsahu barev F- C  
(„červená - modrá“):*

$$\delta K = \frac{K_d}{V}; \quad \delta f = \frac{f_d}{V}$$

# Korekce barevné vady polohy

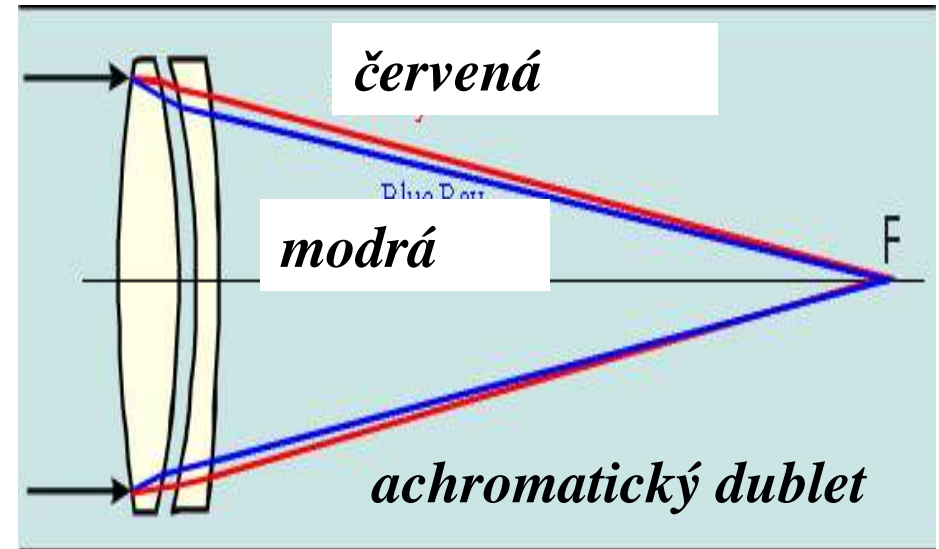
(dvě čočky v kontaktu)

?  $\delta f = 0$  ?



$$\delta K = \delta K_1 + \delta K_2 = 0$$

$$\delta K = \frac{K_1}{V_1} + \frac{K_2}{V_2} = 0$$



$$\frac{K_1}{V_1} = -\frac{K_2}{V_2}$$

podmínka „achromacie“

*Kombinace spojky +K a rozptylky -K vyrobených ze dvou materiálů s různou disperzí - Abbeovým číslem*

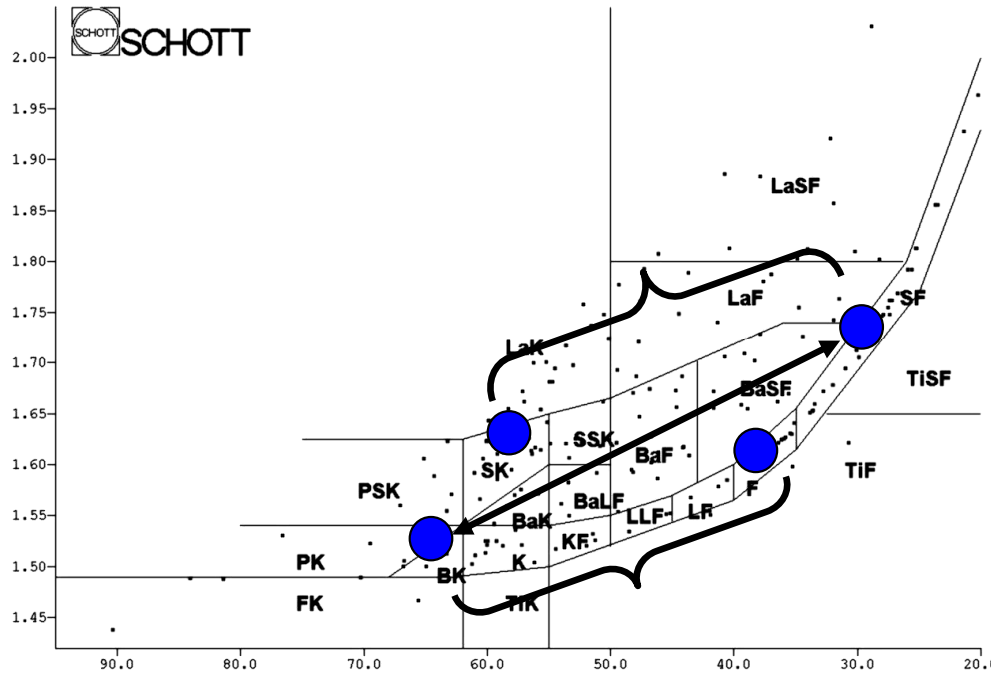
# Korekce barevné vady polohy

(dvě čočky v kontaktu)

*Kombinace spojky +K a rozptylky -K vyrobených ze dvou materiálů s různou disperzí - Abbeovým číslem*

$$\frac{K_1}{V_1} = -\frac{K_2}{V_2}$$

$$n_d$$



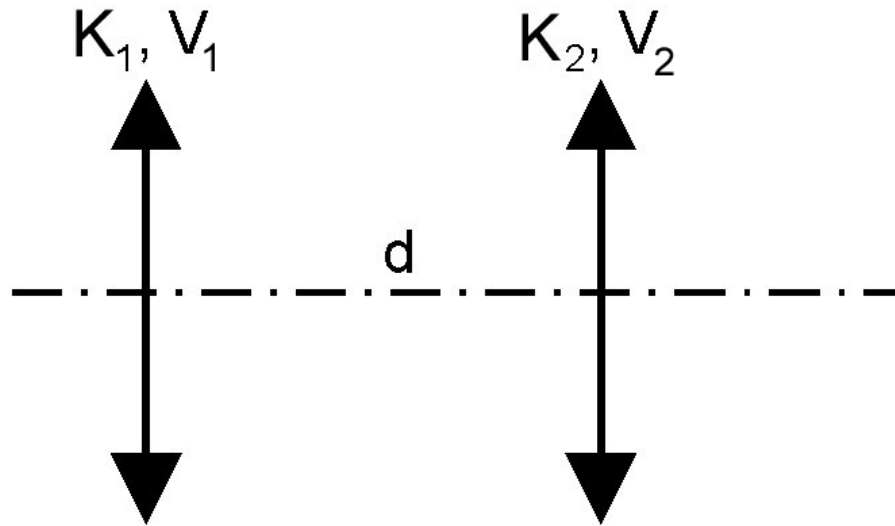
$$V_d = \frac{n_d - 1}{n_F - n_C}$$

*Často používaná skla pro achromatický dublet :*

- BK7 - F2;**
- BK7 - SF2;**
- SK11 - SF5**

# Korekce barevné vady velikosti

(dvě čočky ve vzdálenosti  $d$ )



$$K = K_1 + K_2 - K_1 K_2 d$$

$$\delta K = \delta K_1 + \delta K_2 - (K_1 \delta K_2 + K_2 \delta K_1) d$$

$$\delta K = (1 + d K_2) \delta K_1 + (1 - d K_1) \delta K_2$$

$$\delta K_1 = \frac{K_1}{V_1}; \quad \delta K_2 = \frac{K_2}{V_2}$$

$$\delta K = (1 + d K_2) \frac{K_1}{V_1} + (1 - d K_1) \frac{K_2}{V_2}$$

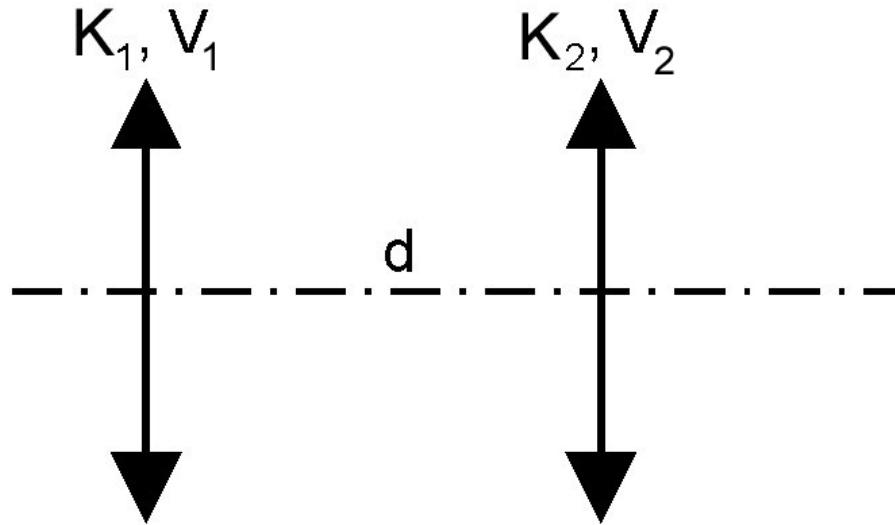
$$\frac{K_1}{V_1} + \frac{K_2}{V_2} = d \left( \frac{K_1 K_2}{V_2} + \frac{K_1 K_2}{V_1} \right) \longrightarrow$$

$$d = \left( \frac{V_1 K_1 + V_1 K_2}{(V_1 + V_2)(K_1 K_2)} \right)$$



# Korekce barevné vady velikosti

(dvě čočky ve vzdálenosti  $d$ )



$$d = \frac{V_1 K_1 + V_1 K_2}{(V_1 + V_2)(K_1 K_2)}$$

*Je možné použít jen jeden druh skla !!! kdy:*

$$V_1 = V_2 = V$$

*Lámavosti nahradíme ohniskovými vzdálenostmi  $f_1$  a  $f_2$   
(zjednodušení podmínky korekce barevné vady velikosti):*

$$d = \frac{V(K_1 + K_2)}{2VK_1K_2} = \frac{K_1 + K_2}{2K_1K_2}$$

$$d = \frac{f_2 + f_1}{2}$$

**podmínka korekce**

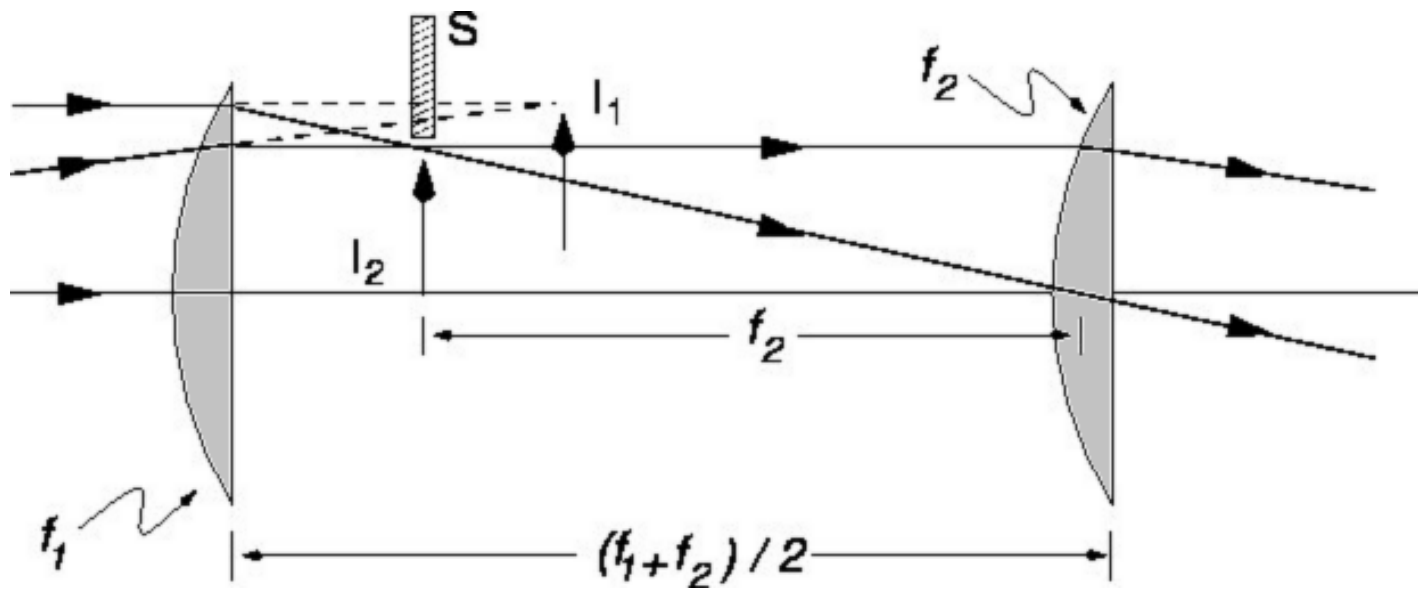
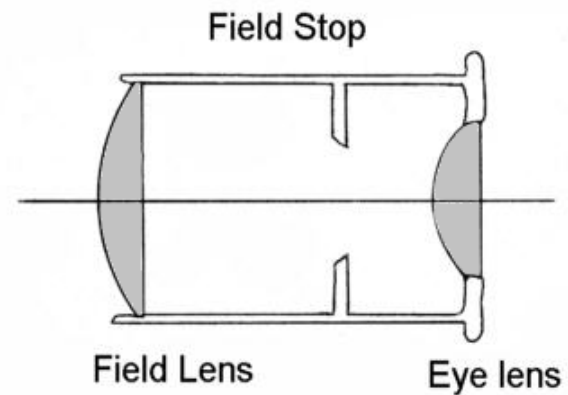
# Korekce barevné vady velikosti

(dvě čočky ve vzdálenosti  $d$ )

$$d = \frac{f_2 + f_1}{2}$$

*Příklad:*

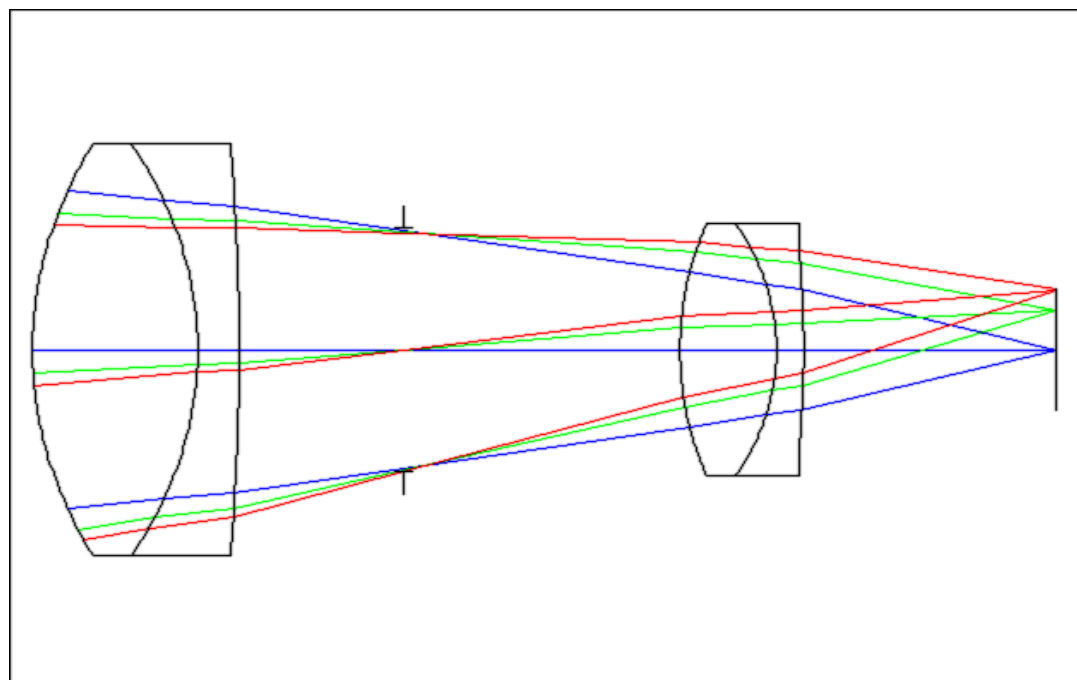
*Huygensův  
okulár*



## Korekce barevné vady polohy i velikosti

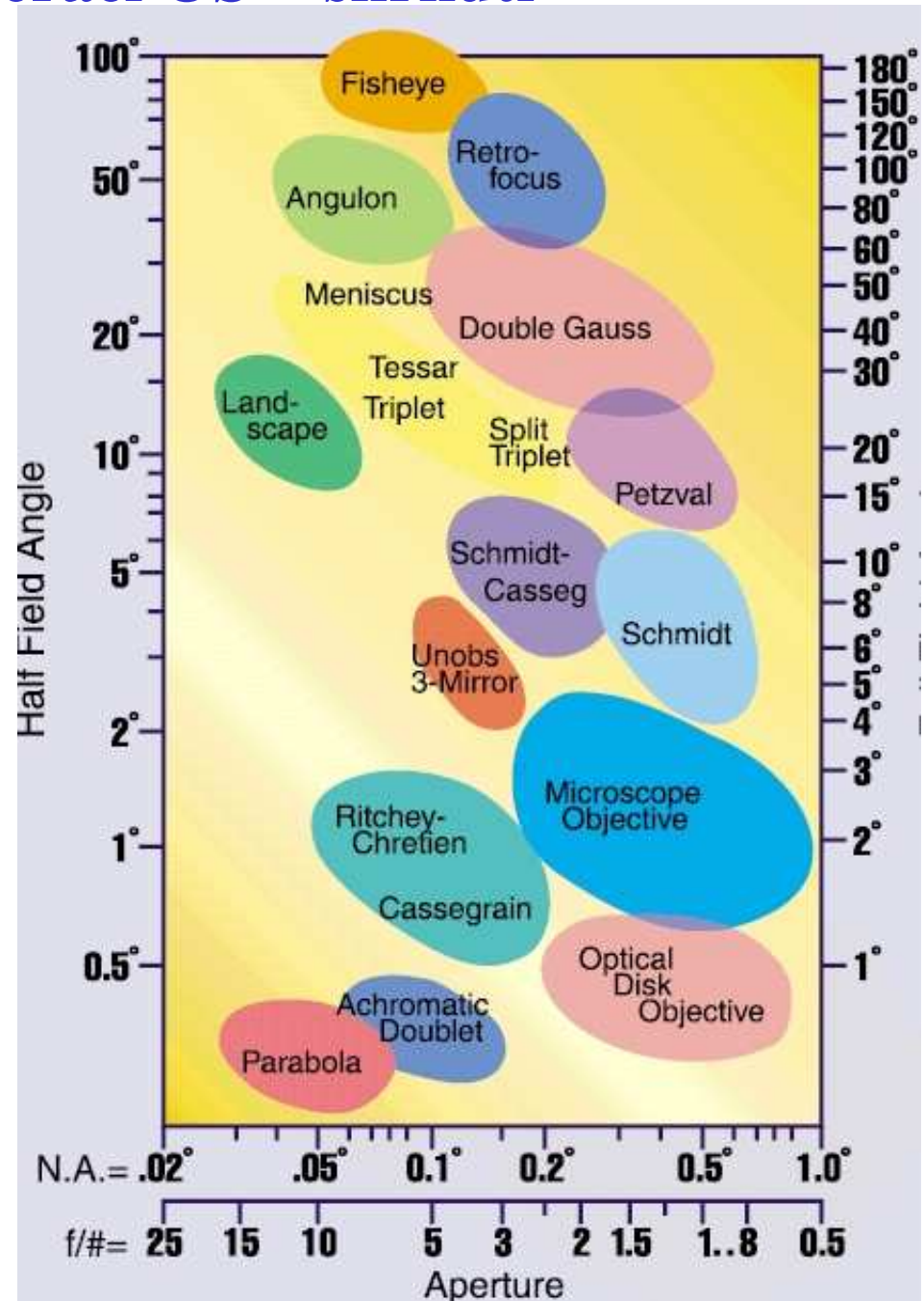
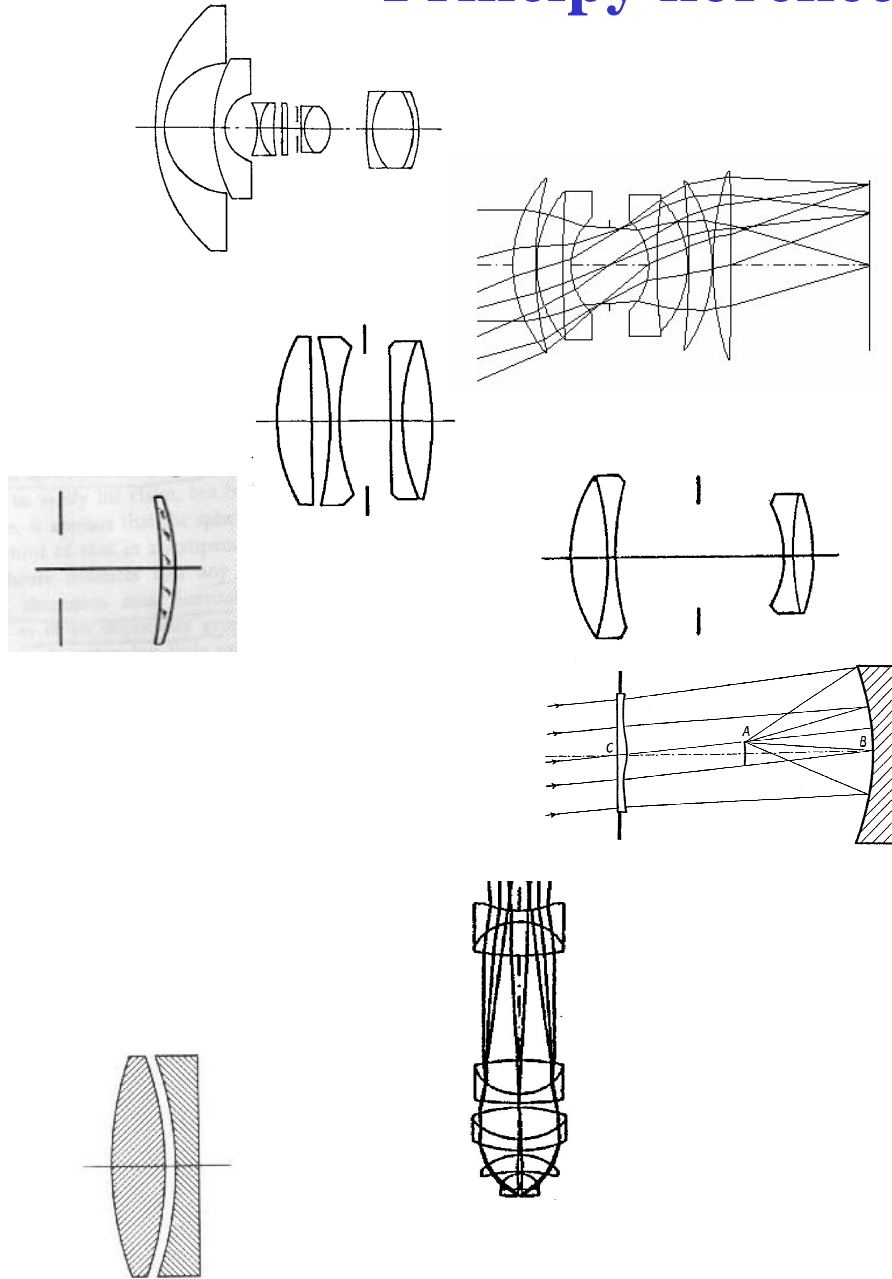
( kombinace uvedených dvou metod )

*dva „dublety“ - spojka-rozptylka  
ve vzdálenosti  $d$*



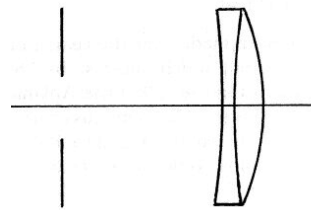
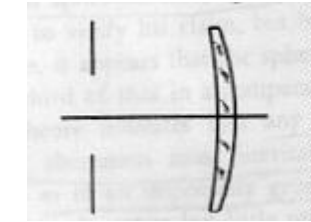
*„Petzvalův“ objektiv*

# Principy korekce aberací OS - shrnutí

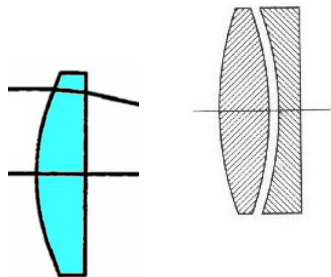


# Principy korekce aberací OS - shrnutí

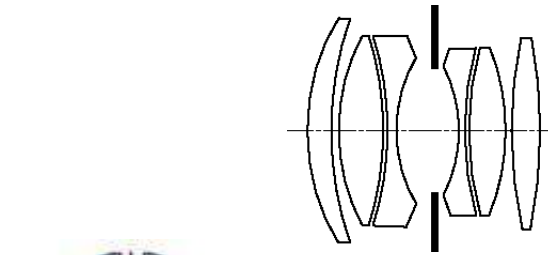
*malé clonové číslo  
+ velké zorné pole*



*posun  
clony*

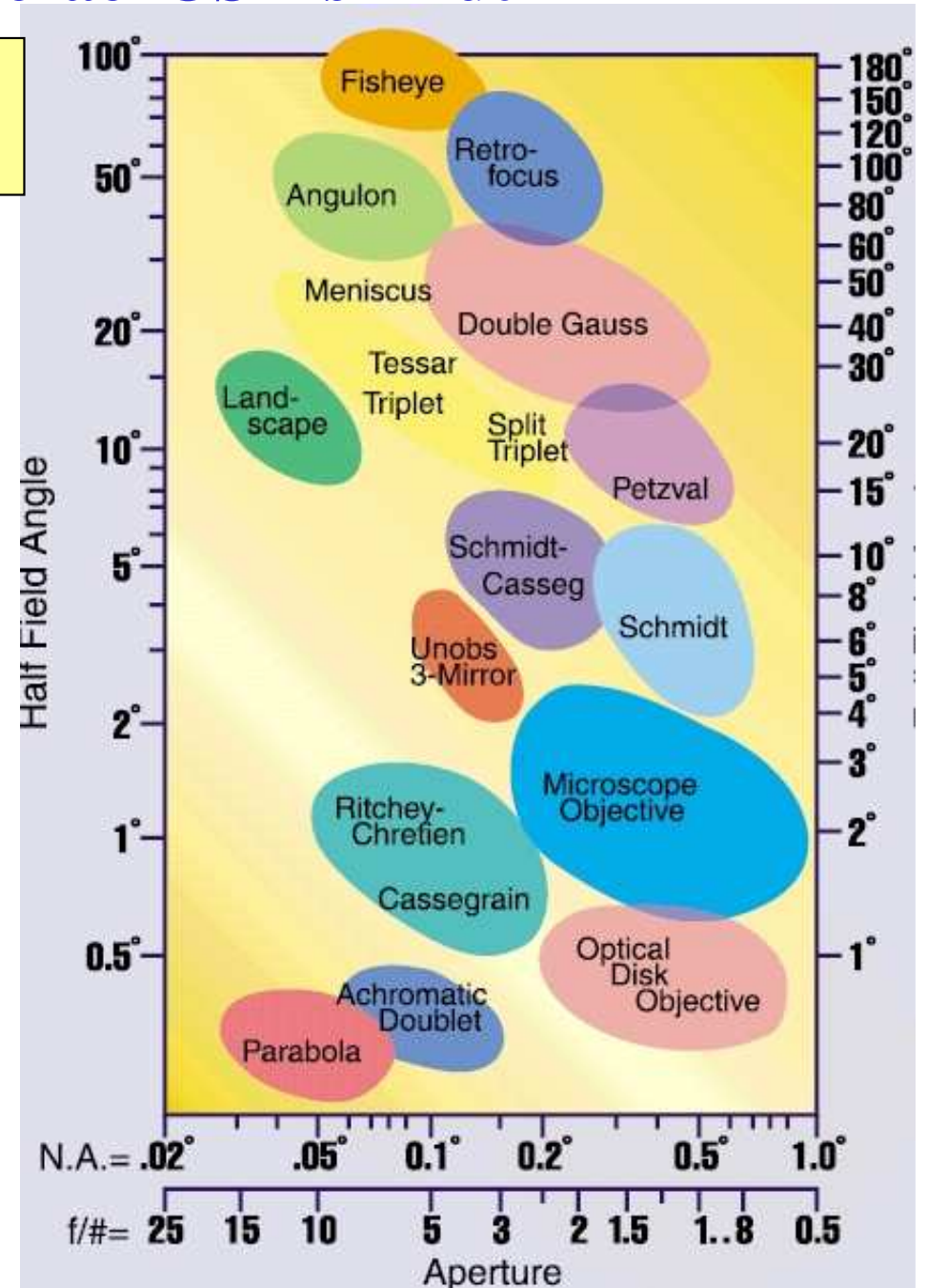


*velké clonové číslo  
+ malé zorné pole*

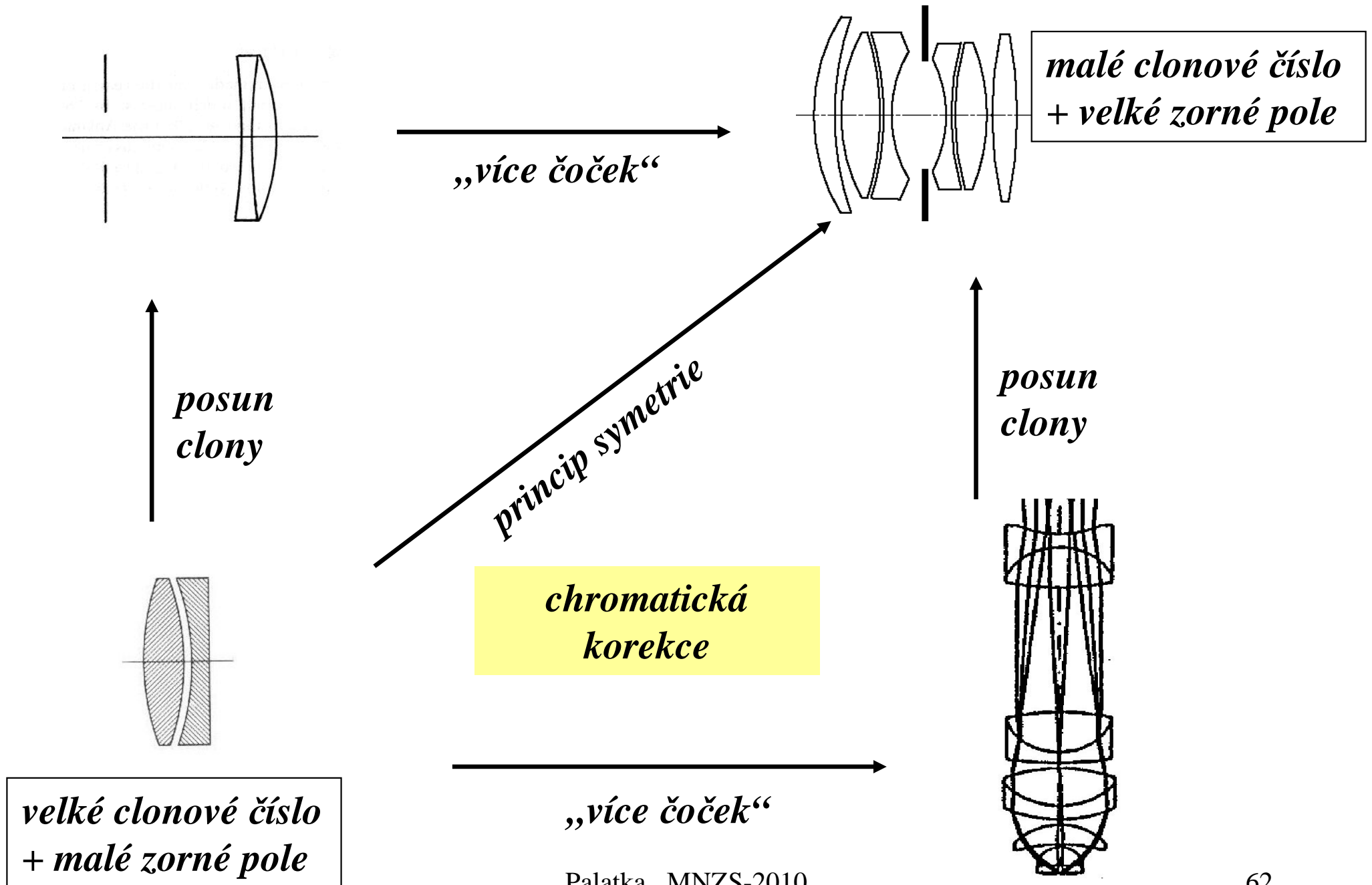


*princíp symetrie*

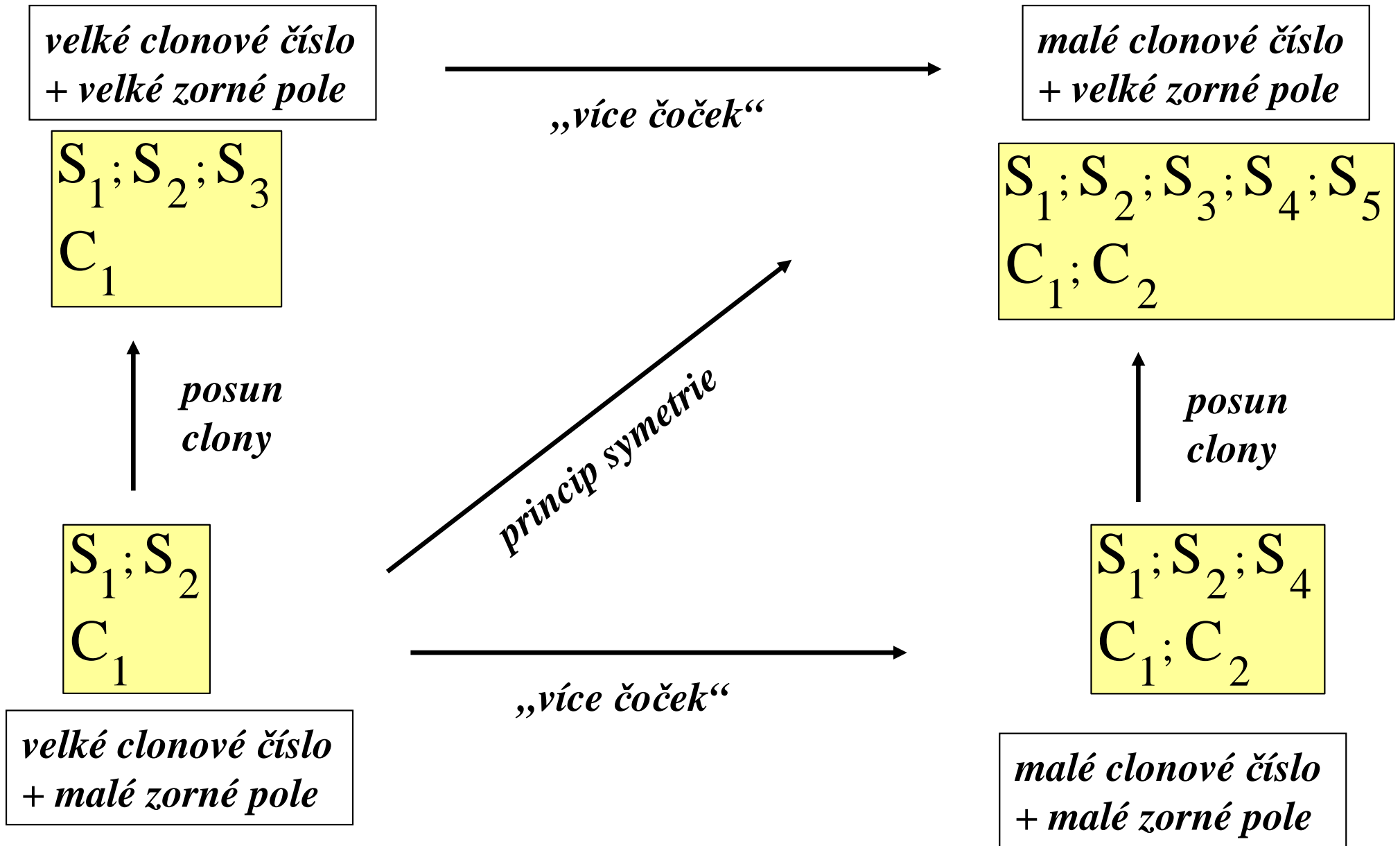
*„více čoček“*



# Principy korekce aberací OS - shrnutí

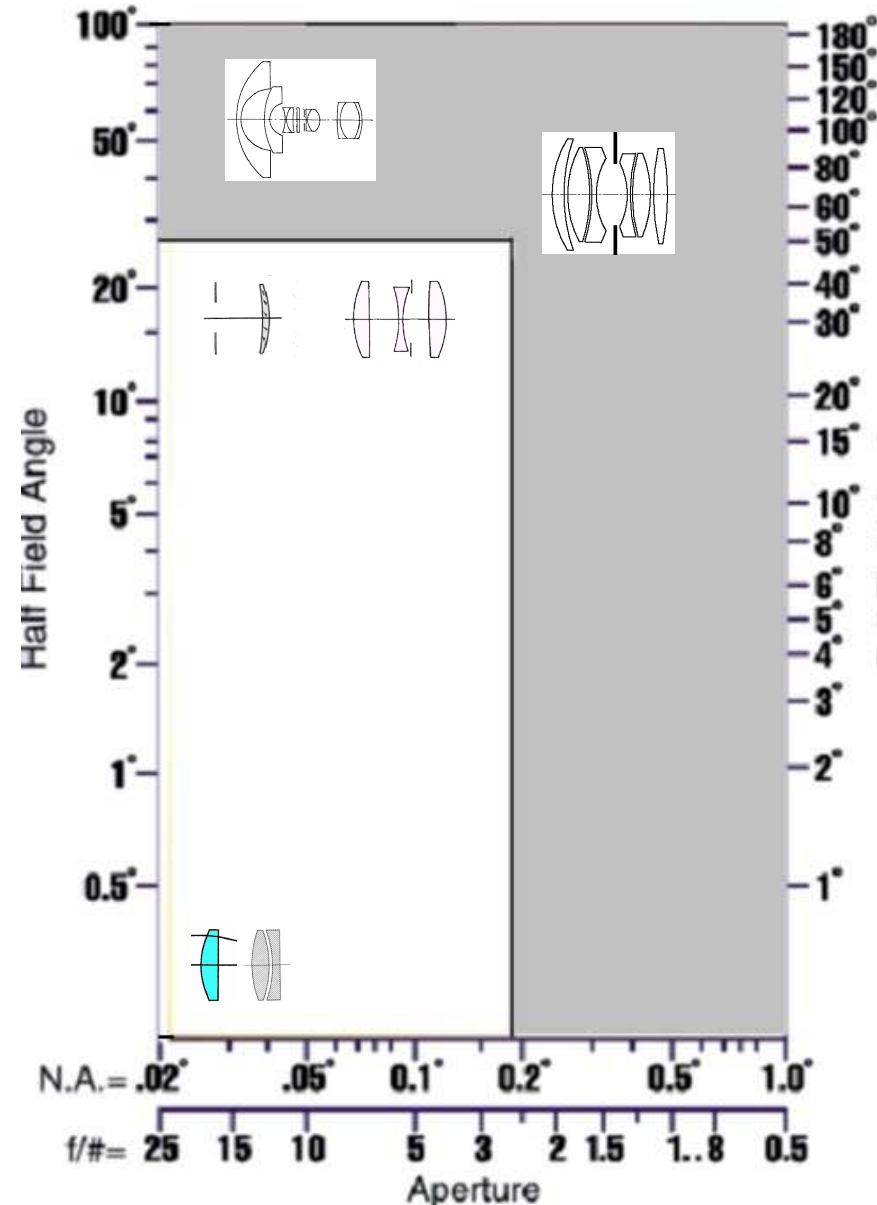


# Principy korekce aberací OS - shrnutí



# Principy korekce aberací OS - shrnutí

*Nejjednodušší OS, která již umožňuje korekci všech monochromatických i barevných aberací třetího řádu, je tříčlenná OS tzv. Cooke triplet. Ve vedlejším diagramu je jeho schéma vpravo nahoře v bílém poli. V tomto diagramu je bíle vyčleněna oblast jednodušších OS, u kterých mají aberace vyšších řádů jen malý vliv na celkové aberace OS.*





## Principy korekce aberací OS - shrnutí

- *tvárování (prohýbání) čoček - „bending“*
- *rozdělení jedné čočky na více čoček – „splitting“*
- *kombinace spojných a rozptylných čoček,*
- *využití rozsahu indexů lomu optických skel*
- *oddálení čoček od sebe*
- *posun clony z roviny čočky (čoček v kontaktu)*
- *použití principu symetrie*
- *náhrada kulových ploch asférickými plochami*
- ...

## **LITERATURA :**

A.Baudyš : Technická optika , skriptum, Praha, 1996

M.J. Kidger : Fundamental optical design, SPIE Press, 2001

M.J. Kidger : Principles of Lens Design, Proc. SPIE CR41,  
30 - 53 (1992)

P. Mouroulis : Geometrical optics and optical design, Oxford  
Press, 1997