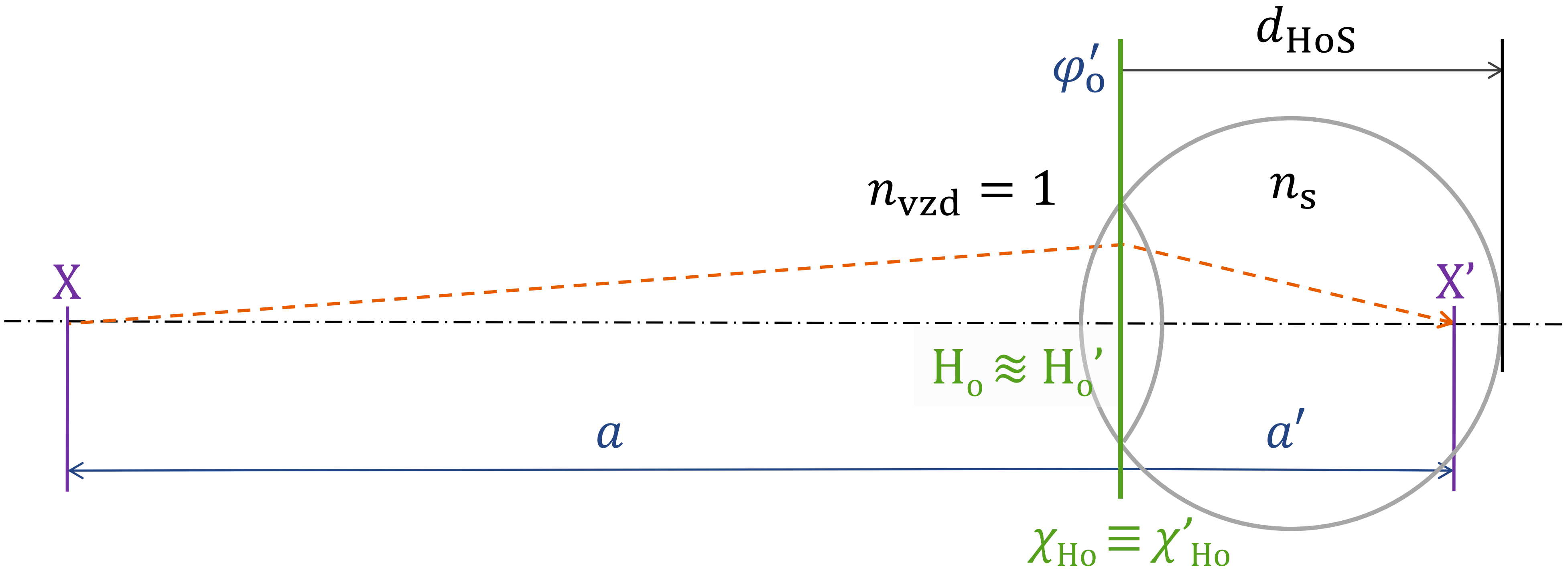
Ametropie

zobrazení optickým systémem oka



Gaussova rovnice:

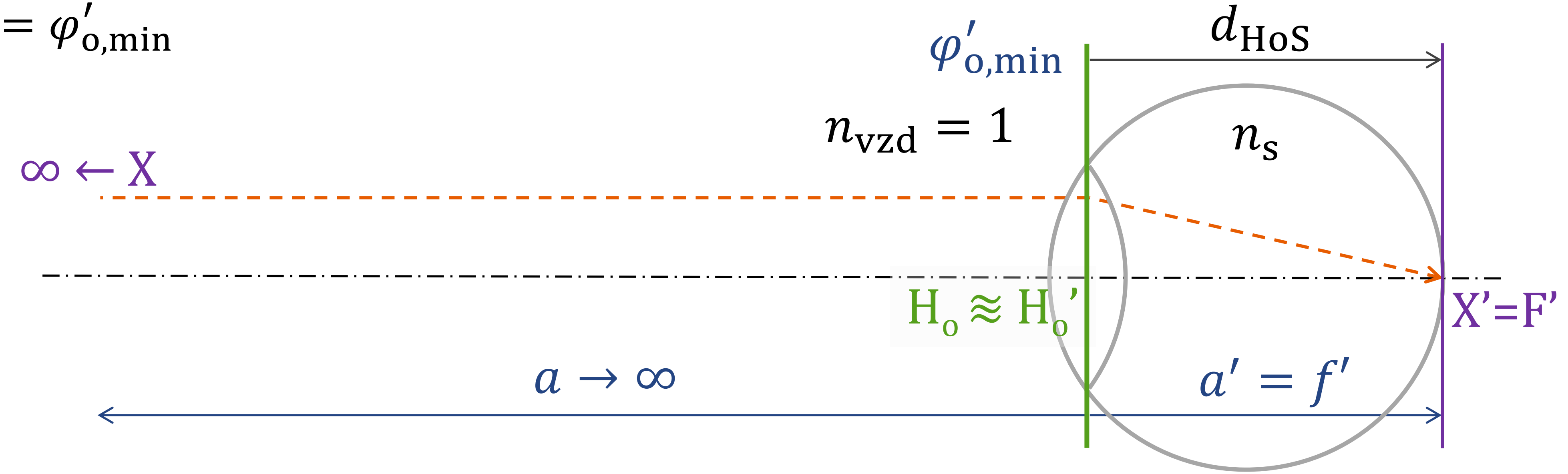
$$\frac{n_s}{a'} = \frac{1}{a} + \varphi'_{\mathrm{o}}$$

d_{HoS} ... vzdálenost obrazové hlavní roviny od sítnice

emetropické oko

zobrazení bodu na optické ose v nekonečnu při *minimální akomodaci* (relaxované oko):

$\varphi'_{\mathrm{o}} = \varphi'_{\mathrm{o,min}}$



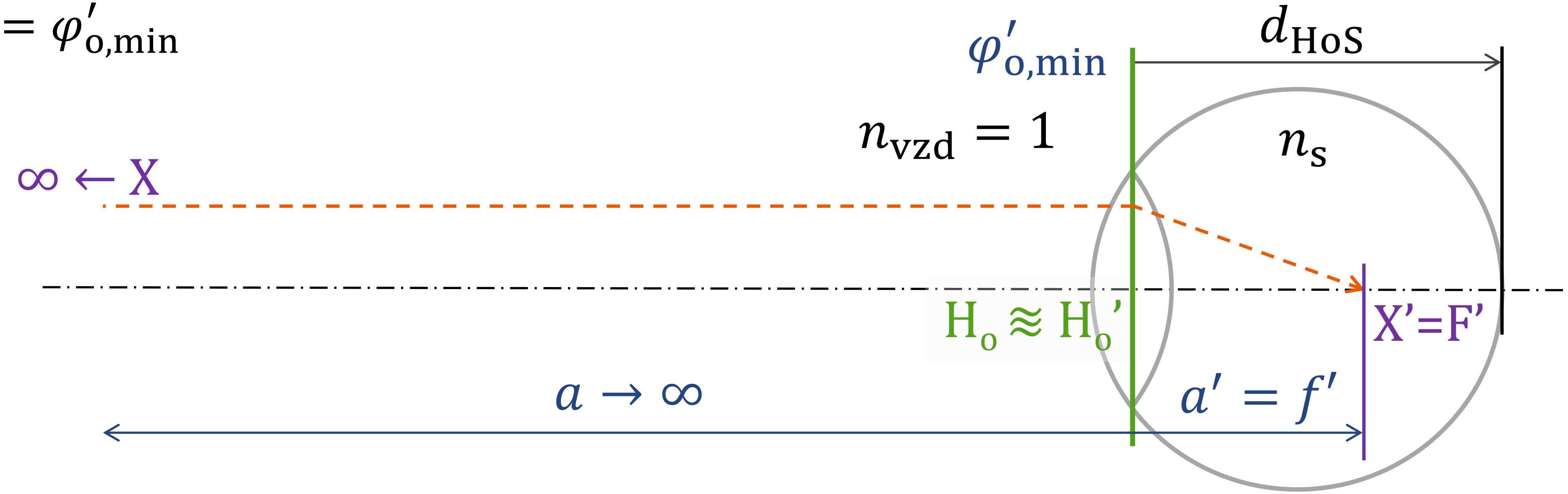
Předmětový bod v nekonečnu se při minimální akomodaci zobrazí na sítnici oka, tedy **obrazové ohnisko leží na sítnici** a platí:

$$d_{\mathrm{HoS}} = f' \Rightarrow \frac{n_{\mathrm{s}}}{f'} = \varphi'_{\mathrm{o,min}} = \frac{n_{\mathrm{s}}}{d_{\mathrm{HoS}}} = D_{\mathrm{HoS}}$$

D_{HoS} ... vergence svazku konvergujícího do bodu sítnice, v obrazové hlavní rovině („dioptrická délka“)

ametropické oko

zobrazení bodu na optické ose v nekonečnu při *minimální akomodaci* (relaxované oko):
$\varphi'_{\mathrm{o}} = \varphi'_{\mathrm{o,min}}$



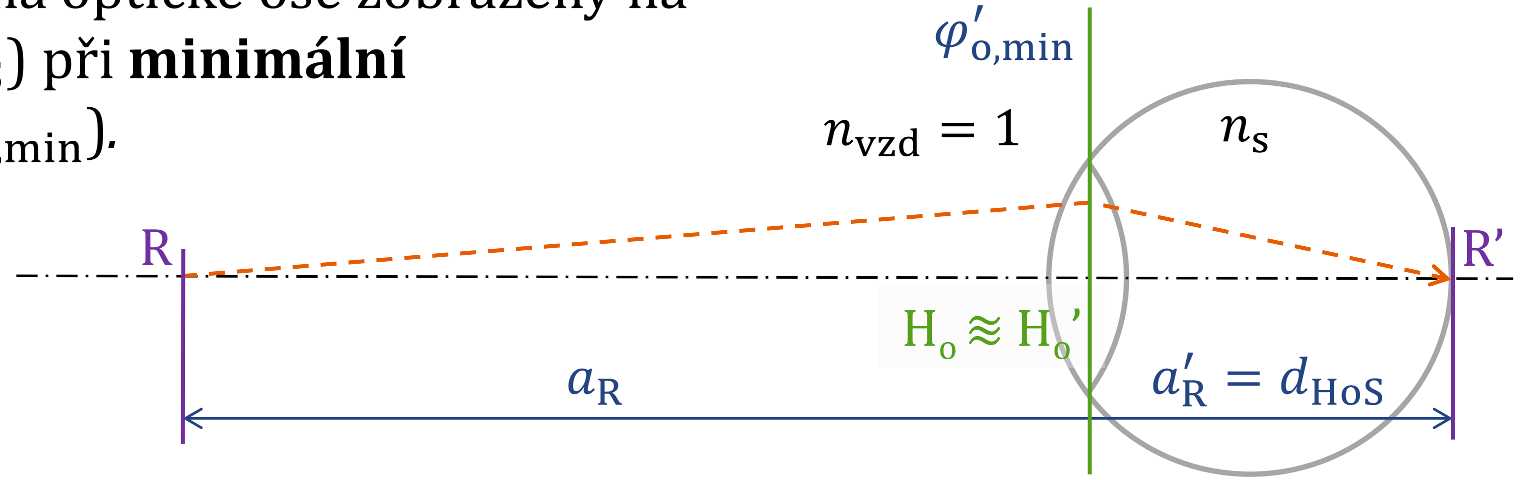
Předmětový bod v nekonečnu se při minimální akomodaci nezobrazí na sítnici oka, tedy **obrazové ohnisko neleží na sítnici** a platí:

$$d_{\mathrm{HoS}} \neq f' \Rightarrow \frac{n_{\mathrm{s}}}{f'} = \varphi'_{\mathrm{o,min}} \neq \frac{n_{\mathrm{s}}}{d_{\mathrm{HoS}}} = D_{\mathrm{HoS}}$$

sférická ametropie ... optický systém oka má ve všech řezech (meridiánech) shodné optické vlastnosti (nejde o astigmatismus); lze ji korigovat sférickými korekčními členy

daleký bod oka (punctum remotum)

Daleký bod R je bod na optické ose zobrazený na sítnici oka ($a'_\mathrm{R} = d_\mathrm{HoS}$) při **minimální akomodaci** ($\varphi'_\mathrm{o} = \varphi'_\mathrm{o,min}$).



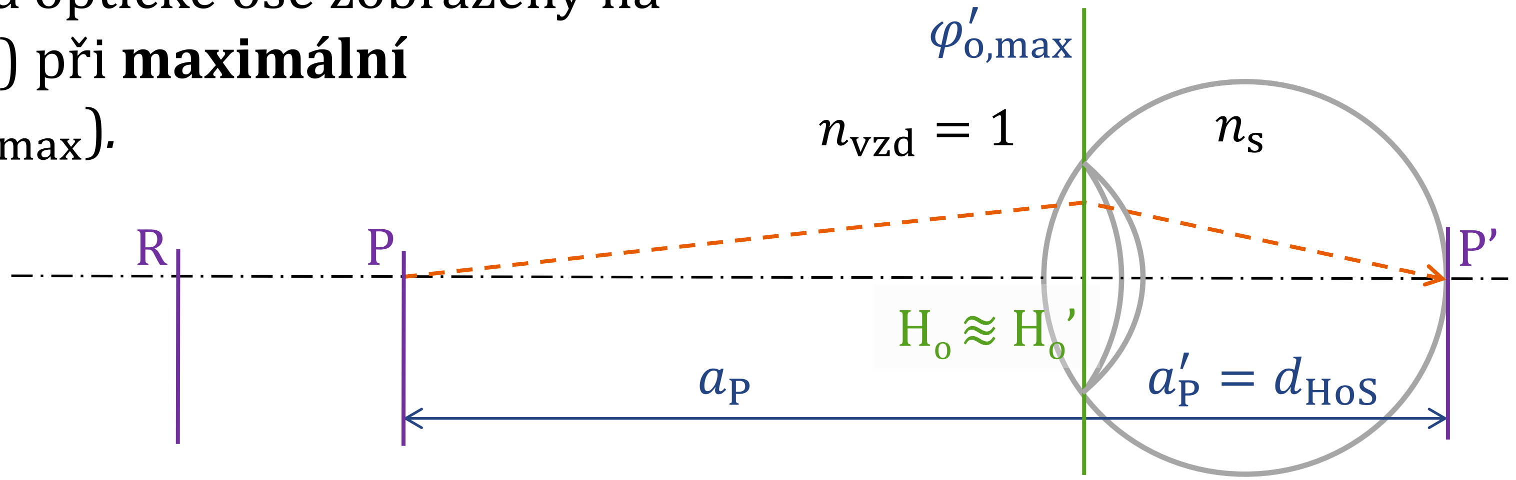
(podle Gaussovy rovnice):

$$\frac{n_\mathrm{s}}{a'_\mathrm{R}} = \frac{n_\mathrm{s}}{d_\mathrm{HoS}} = D_\mathrm{HoS} = \frac{n_\mathrm{vzd}}{a_\mathrm{R}} + \varphi'_\mathrm{o,min} = \frac{1}{a_\mathrm{R}} + \varphi'_\mathrm{o,min} = A_\mathrm{R} + \varphi'_\mathrm{o,min}$$

$A_\mathrm{R} = 1/a_\mathrm{R}$ … *axiální refrakce* (též: *ametropie*, „dioptrická vzdálenost“ dalekého bodu),
… udává, co je nutno přičíst k $\varphi'_\mathrm{o,min}$, aby se součet rovnal D_HoS (emetropický stav)

blízký bod oka (punctum proximum)

Blízký bod P je bod na optické ose zobrazený na sítnici oka ($a'_\mathrm{P} = d_\mathrm{HoS}$) při **maximální akomodaci** ($\varphi'_\mathrm{o} = \varphi'_\mathrm{o,max}$).



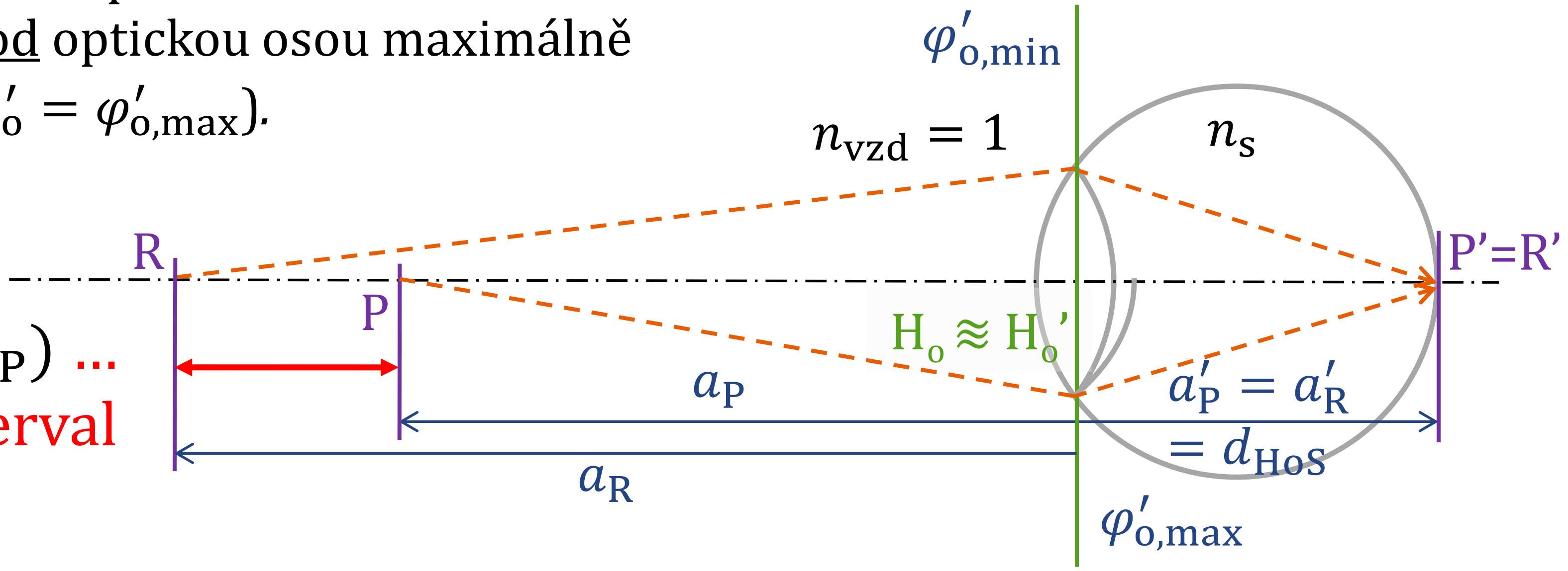
(podle Gaussovy rovnice):

$$\frac{n_\mathrm{s}}{a'_\mathrm{P}} = \frac{n_\mathrm{s}}{d_\mathrm{HoS}} = D_\mathrm{HoS} = \frac{n_\mathrm{vzd}}{a_\mathrm{P}} + \varphi'_\mathrm{o,max} = \frac{1}{a_\mathrm{P}} + \varphi'_\mathrm{o,max} = A_\mathrm{P} + \varphi'_\mathrm{o,max}$$

$A_\mathrm{P} = 1/a_\mathrm{P}$ … „dioptrická vzdálenost“ blízkého bodu, vergence svazku vycházejícího z blízkého bodu P, v předmětové hlavní rovině

akomodační interval a šíře

Situace nad optickou osou odpovídá relaxovanému oku ($\varphi'_o = \varphi'_{o,min}$), situace pod optickou osou maximálně akomodovanému oku ($\varphi'_o = \varphi'_{o,max}$).



(a_R, a_P) … akomodační interval

$$A_Š = A_R - A_P \approx (D_{HoS} - \varphi'_{o,min}) - (D_{HoS} - \varphi'_{o,max}) = \varphi'_{o,max} - \varphi'_{o,min}$$

$A_Š$ … akomodační šíře (akomodační amplituda)

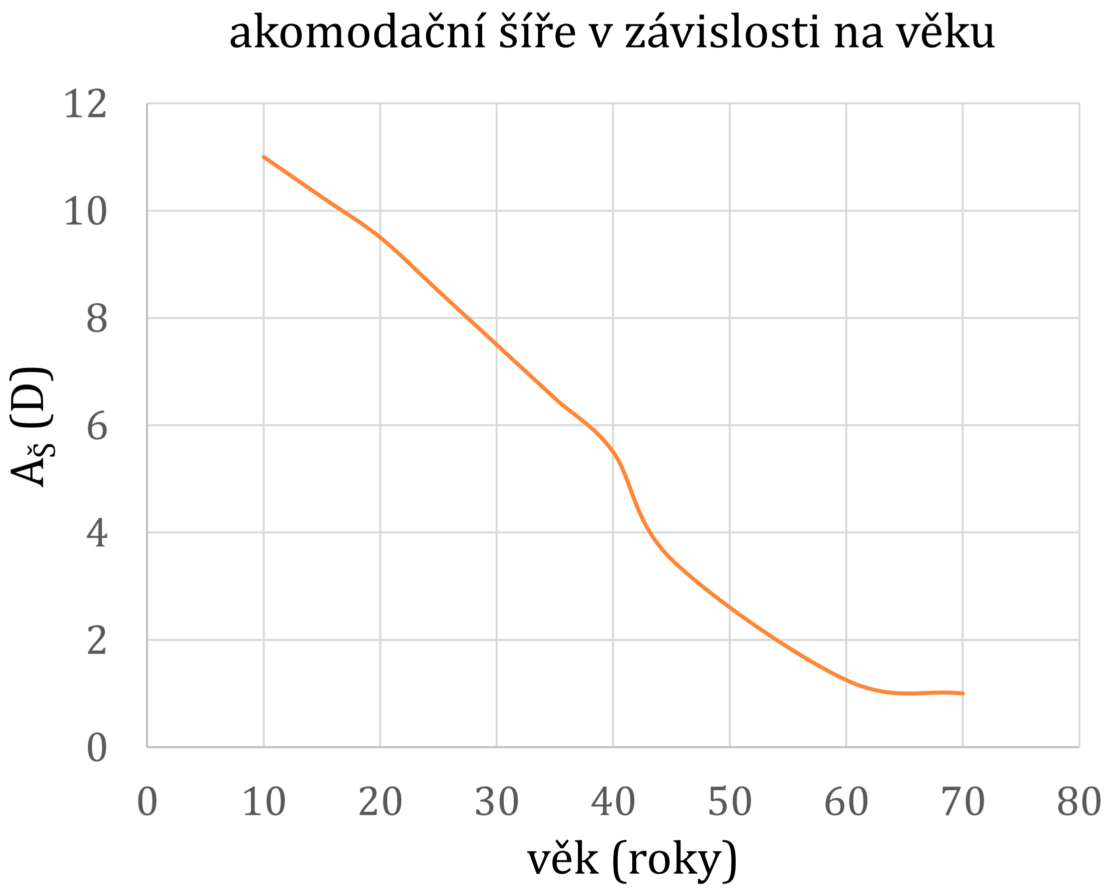
Pozn.: $A_R \approx \varphi'_{o,max} - \varphi'_{o,min} + A_P \Rightarrow A_R \geq A_P$

akomodační šíře (amplituda)

$$A_{\check{S}} = A_R - A_P \approx \varphi'_{o,max} - \varphi'_{o,min}$$

věk	**$A_{\check{S}}$**
10	11,00
15	10,25
20	9,50
25	8,50
30	7,50
35	6,5
40	5,50
45	3,5
60	1,25
70	1,00

věk	**$A_{\check{S}}$ < 5 D**	
	Myop	Hyperop
38	0 %	17 %
40	23 %	67 %
42	57 %	70 %
44	75 %	92 %
45	82 %	100 %

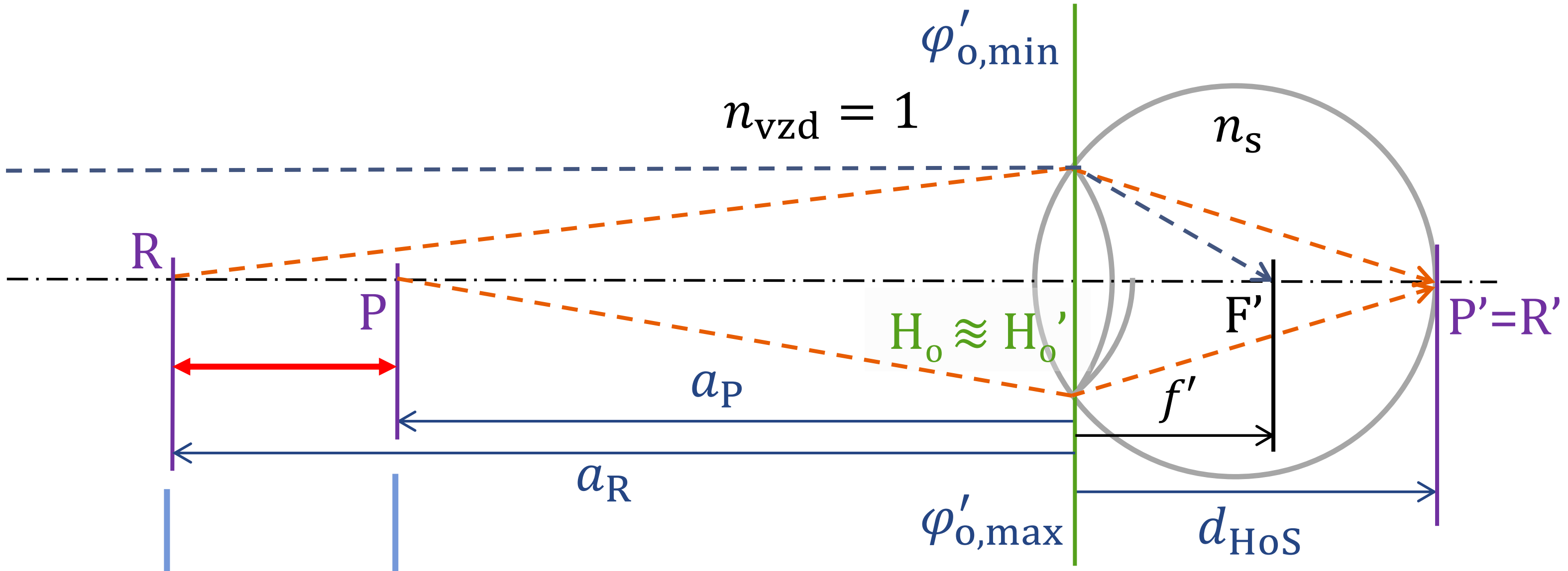


myopie (krátkozrakost)

$$\boxed{\varphi'_{\mathrm{o,min}} > D_{\mathrm{HoS}} = \frac{n_{\mathrm{s}}}{d_{\mathrm{HoS}}}}$$

$$\Rightarrow A_{\mathrm{R}} = D_{\mathrm{HoS}} - \varphi'_{\mathrm{o,min}} < 0 \Rightarrow a_{\mathrm{R}} < 0$$

$$\Rightarrow f' = \frac{n_{\mathrm{s}}}{\varphi'_{\mathrm{o,min}}} < d_{\mathrm{HoS}}$$



$A_{\mathrm{R}} < 0$
$\Rightarrow a_{\mathrm{R}} < 0$

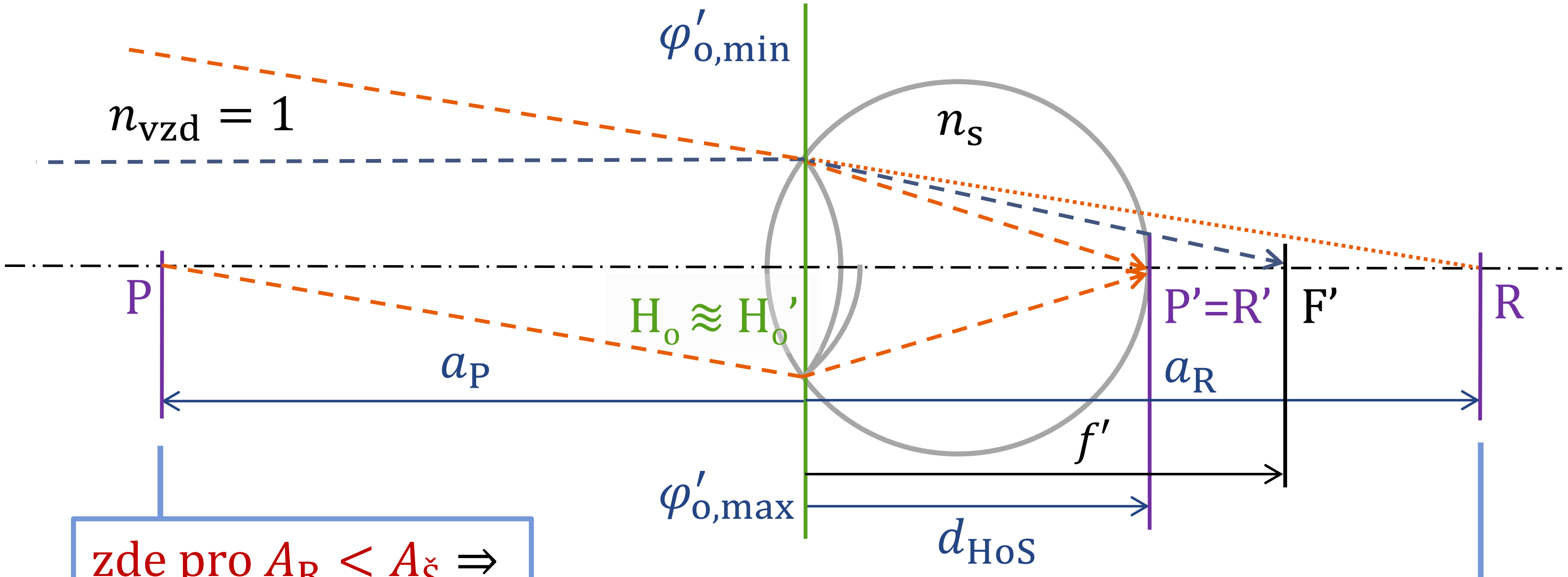
$A_{\mathrm{P}} < A_{\mathrm{R}} < 0$
$\Rightarrow a_{\mathrm{R}} < a_{\mathrm{P}} < 0$

hypermetropie (hyperopie, dalekozrakost) I

$$\boxed{\varphi'_{\mathrm{o,min}} < D_{\mathrm{HoS}} = \frac{n_{\mathrm{s}}}{d_{\mathrm{HoS}}}}$$

$$\Rightarrow A_{\mathrm{R}} = D_{\mathrm{HoS}} - \varphi'_{\mathrm{o,min}} > 0 \Rightarrow a_{\mathrm{R}} > 0$$

$$\Rightarrow f' = \frac{n_{\mathrm{s}}}{\varphi'_{\mathrm{o,min}}} > d_{\mathrm{HoS}}$$



zde pro $A_{\mathrm{R}} < A_{\mathrm{Š}} \Rightarrow$
$A_{\mathrm{P}} = A_{\mathrm{R}} - A_{\mathrm{Š}} < 0$
$\Rightarrow a_{\mathrm{P}} < 0$

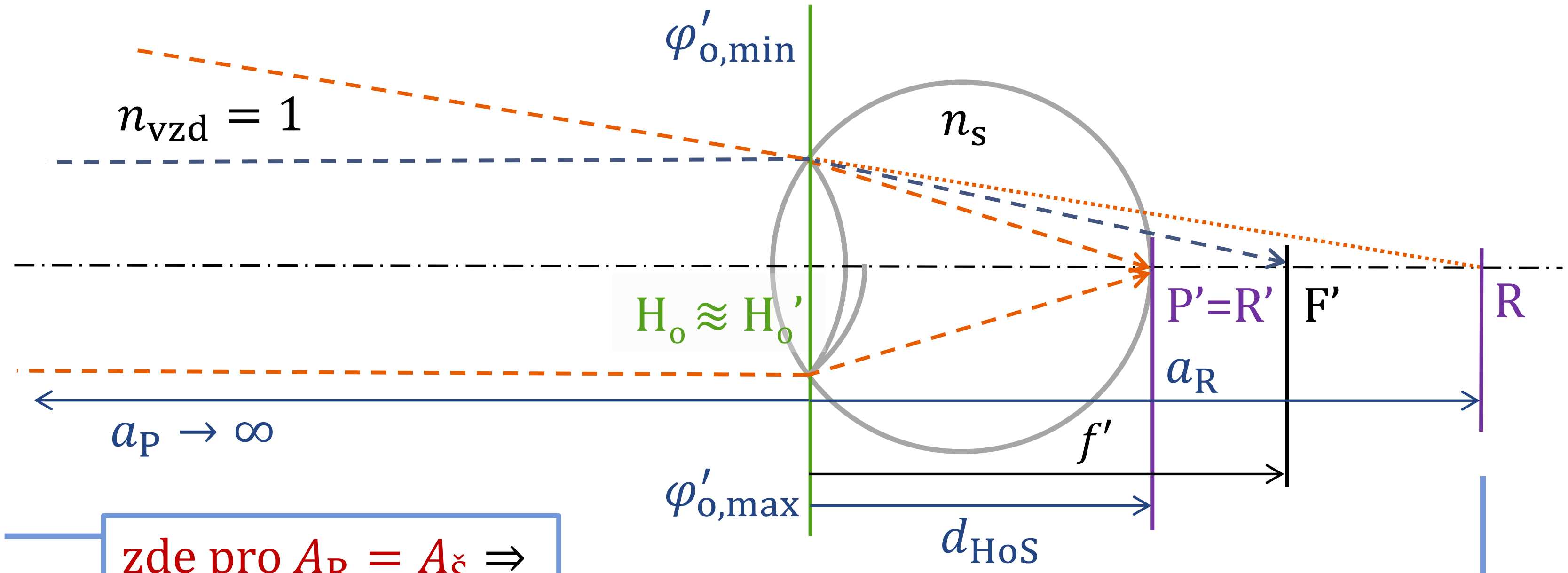
$A_{\mathrm{R}} > 0$
$\Rightarrow a_{\mathrm{R}} > 0$

hypermetropie (hyperopie, dalekozrakost) II

$\boxed{\varphi'_{\mathrm{o,min}} < D_{\mathrm{HoS}}}$

$\Rightarrow A_{\mathrm{R}} > 0 \Rightarrow a_{\mathrm{R}} > 0$

$\Rightarrow f' > d_{\mathrm{HoS}}$



zde pro $A_{\mathrm{R}} = A_{\check{\mathrm{S}}} \Rightarrow$
$A_{\mathrm{P}} = A_{\mathrm{R}} - A_{\check{\mathrm{S}}} = 0$
$\Rightarrow a_{\mathrm{P}} \to \infty$

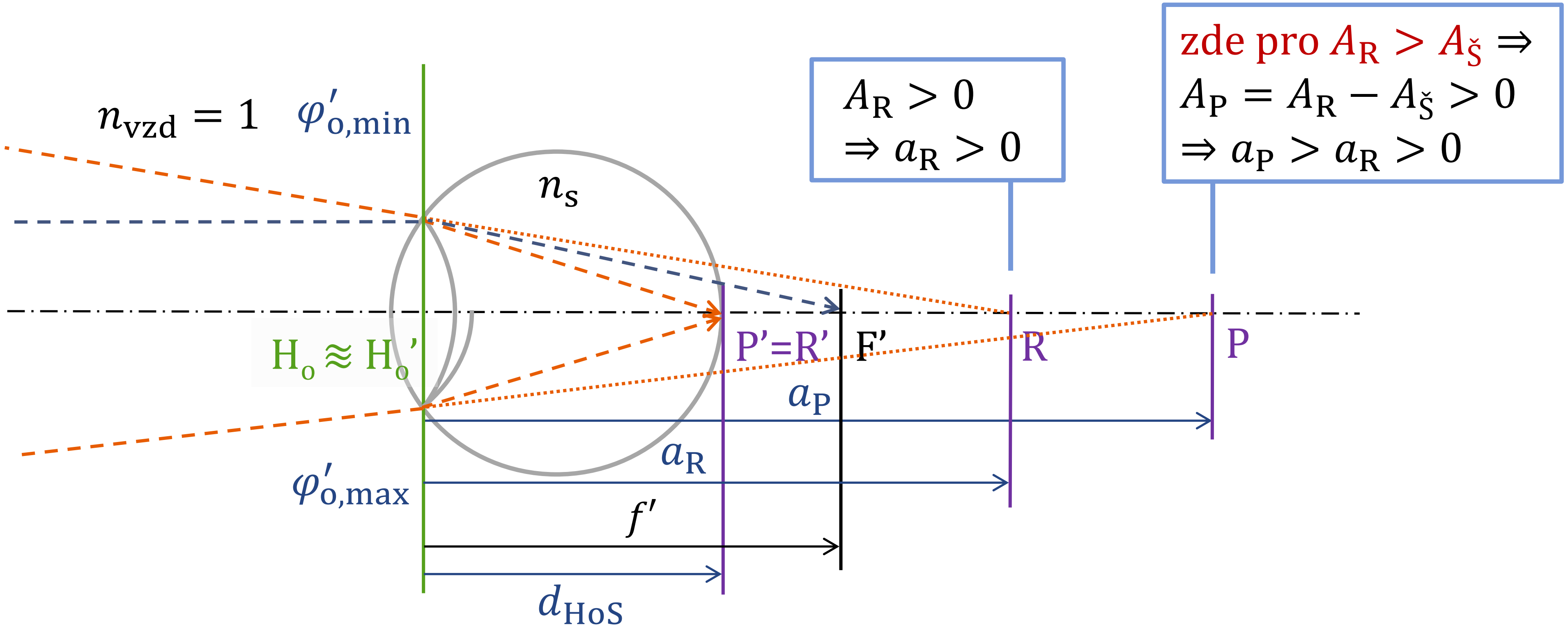
$A_{\mathrm{R}} > 0$
$\Rightarrow a_{\mathrm{R}} > 0$

hypermetropie (hyperopie, dalekozrakost) III

$$\boxed{\varphi'_{\mathrm{o,min}} < D_{\mathrm{HoS}}}$$

$\Rightarrow A_{\mathrm{R}} > 0 \Rightarrow a_{\mathrm{R}} > 0$

$\Rightarrow f' > d_{\mathrm{HoS}}$



příklad

Př. 1

Vypočtěte a graficky znázorněte intervaly ostrého vidění pro a) emetropa ($A_{\mathrm{R}} = 0$), b) myopa s $A_{\mathrm{R}} = -4$ D, a c) hypermetropa s $A_{\mathrm{R}} = +4$ D, ve všech případech pro tři akomodační šíře: 2 D, 4 D a 6 D.

refrakční vada podle věku a v populaci

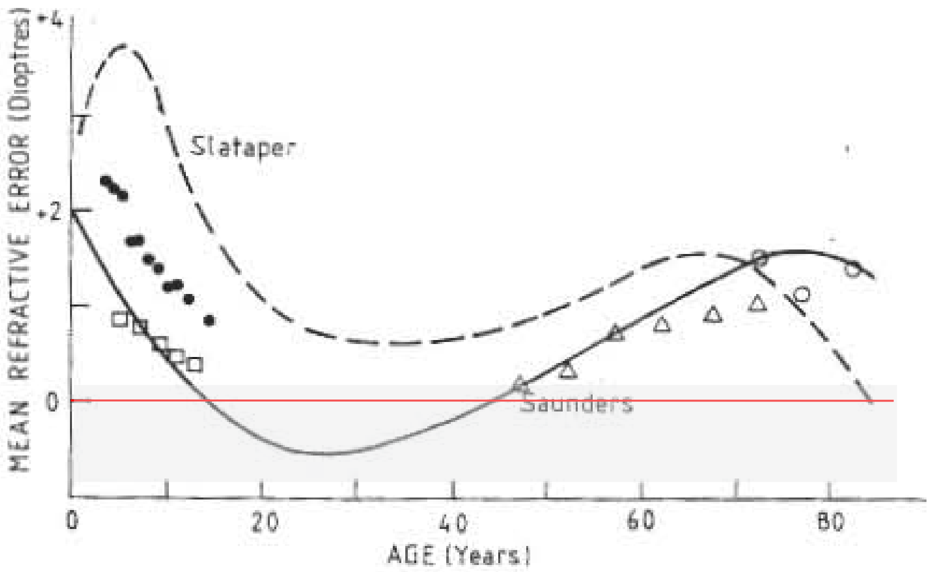
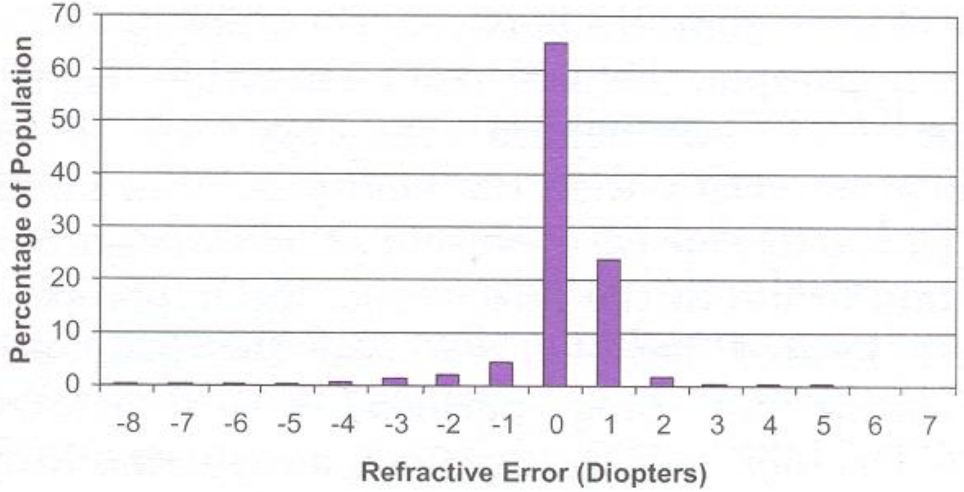


Fig. 2.2 *Changes in ocular refraction with age. The smooth broken and unbroken curves are due to Slataper (1950) and Saunders (1981) respectively, and are largely based on results for self-selecting clinical patients. The isolated symbols are data for mainly unselected, non-clinical groups, as collected by the following authors: filled circles, mean ocular refraction in vertical meridian, Sorsby* et al. *(1961); open squares, mean equivalent sphere, Hirsch (1952); open triangles, mean equivalent sphere, Hirsch (1958); open circles, mean equivalent sphere, Lavery* et al. *(1988).*



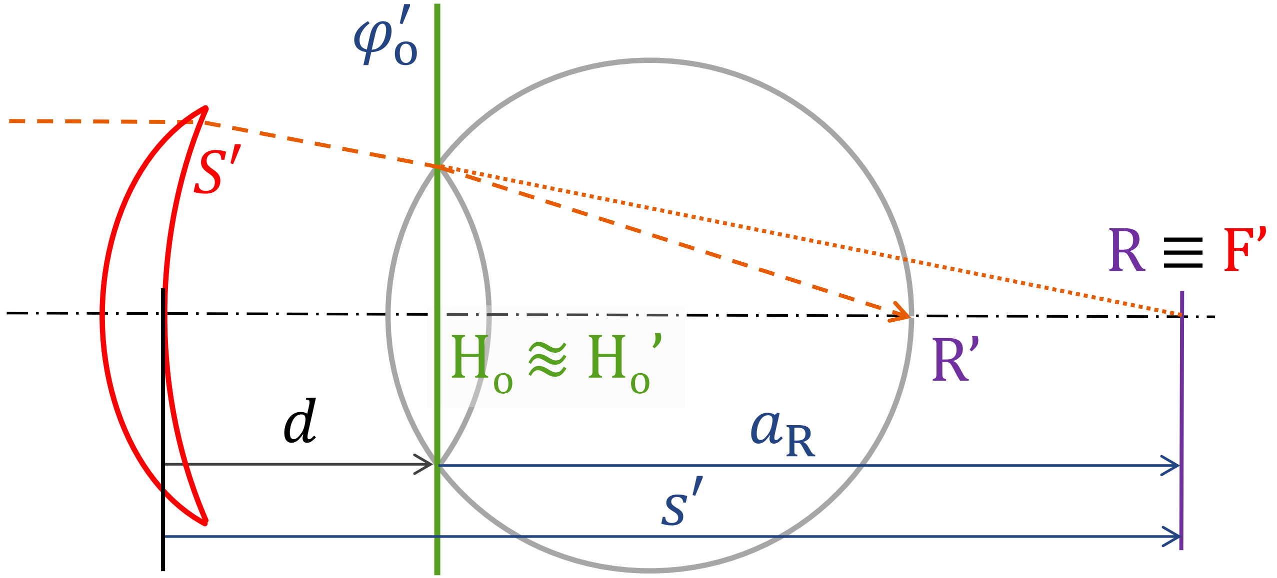
Rozdělení četnosti refrakčních vad v populaci

(J. Schwiegerling: Visual and Ophthalmic Optics. SPIE Press, Bellingham 2004)

korekce ametropie I

Obrazové ohnisko F' korekční čočky leží v dalekém bodě R oka (korekční podmínka).

Předmětový bod na optické ose v nekonečnu je proto korekční čočkou zobrazen do dalekého bodu R oka a pak optickým systémem oka na jeho sítnici.



$$s' = d + a_\mathrm{R} \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{s'} = S' = \frac{1}{a_\mathrm{R} + d}$$

$$\Rightarrow \quad S' = \frac{A_\mathrm{R}}{1 + dA_\mathrm{R}}$$

$$\Rightarrow \quad A_\mathrm{R} = \frac{S'}{1 - dS'}$$

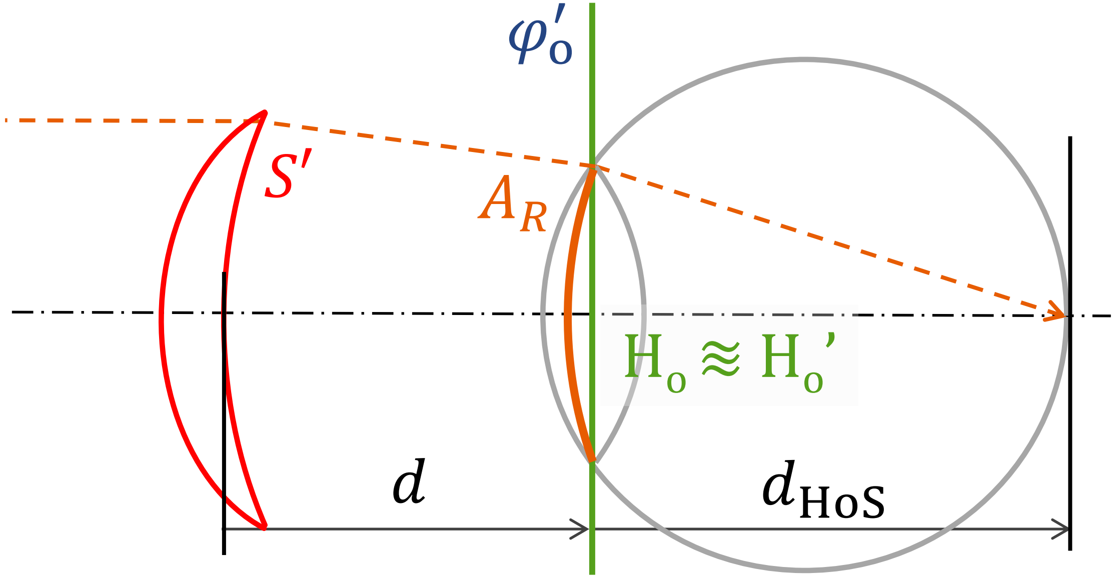
(s' je sečná obrazová ohnisková vzdálenost korekční čočky, d (vertex distance) měříme od vrcholu zadní plochy korekční čočky po předmětovou hlavní rovinu oka, přibližně po přední plochu oka)

korekce ametropie II

Rovnoběžný svazek z osového předmětového bodu v nekonečnu je korekční (brýlovou) čočkou transformován na svazek, který má v předmětové hlavní rovině oka vergenci A_R. Na obrazové hlavní rovině oka je pak vergence svazku rovna $A_\mathrm{R} + \varphi'_{\mathrm{o,min}}$. Protože platí

$$A_\mathrm{R} + \varphi'_{\mathrm{o,min}} = D_{\mathrm{HoS}},$$

odpovídá tato vergence optické délce D_{HoS} a bod z nekonečna je ostře zobrazen na sítnici.



Potřebnou vrcholovou lámavost S' korekční čočky stanovíme zpětnou propagací $(-d)$ svazku z předmětové hlavní roviny oka na zadní lámavou plochu korekční čočky.

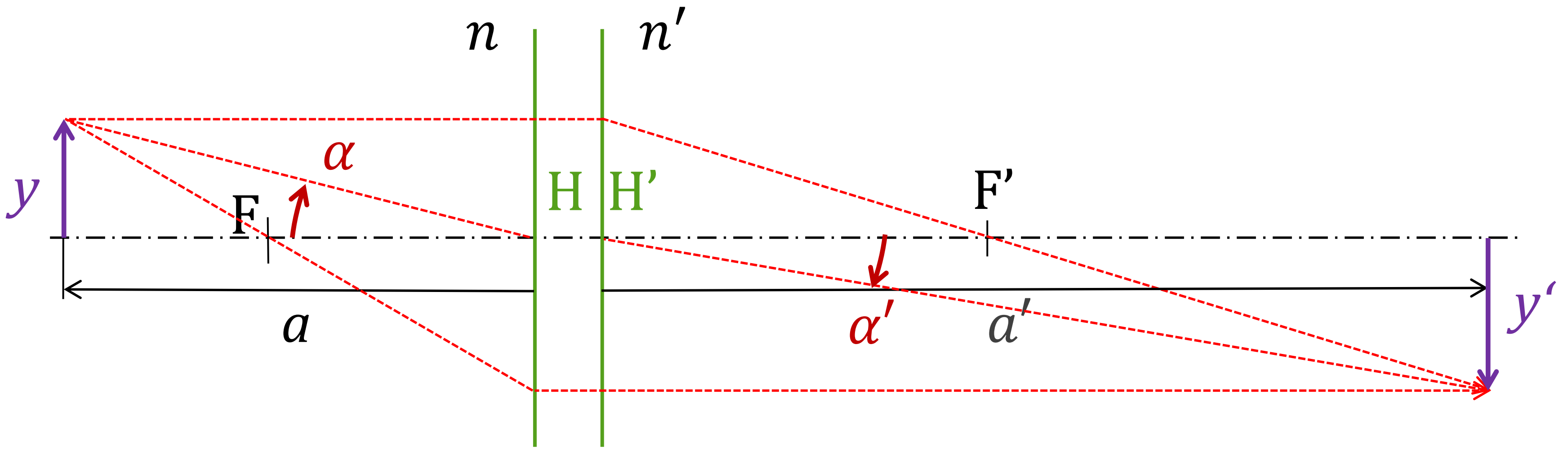
$$S' = \frac{A_\mathrm{R}}{1 + dA_\mathrm{R}}$$

Platí i opačný vztah (přímá propagace svazku), kterým lze určit axiální refrakci oka A_R z vrcholové lámavosti S'.

$$A_\mathrm{R} = \frac{S'}{1 - dS'}$$

(d měříme od vrcholu zadní plochy korekční čočky po předmětovou hlavní rovinu oka, přibližně po přední plochu oka)

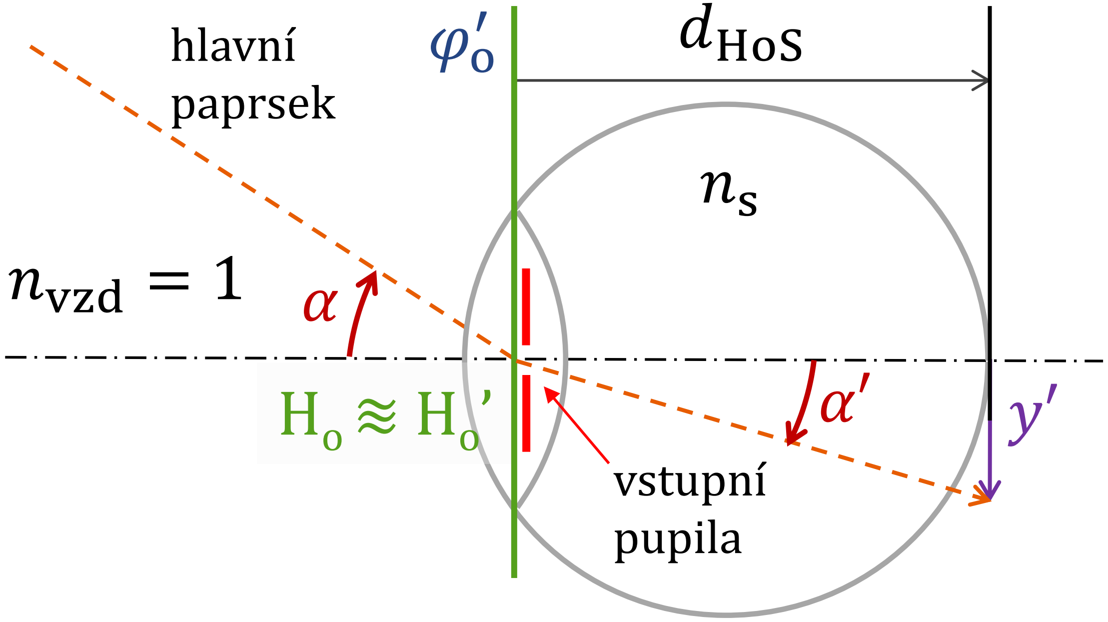
užitečný vztah



$$\frac{y'}{y} = \frac{A}{A'} \qquad \frac{y}{a} = \operatorname{tg}\alpha \qquad \frac{y'}{a'} = \operatorname{tg}\alpha' \qquad \Rightarrow \frac{\operatorname{tg}\alpha'}{\operatorname{tg}\alpha} = \frac{y'}{y}\frac{a}{a'} = \frac{A}{A'}\frac{a}{a'} = \frac{n}{n'}$$

velikost obrazu na sítnici nekorigovaného oka

Velikost rozostřeného sítnicového obrazu (pro nekorigované ametropické oko) se určí jako vzdálenost mezi body, kde hlavní paprsky vycházející z krajních bodů předmětu protínají sítnici.



$$y' = d_{\mathrm{HoS}} \,\mathrm{tg}\, \alpha'$$

$$\mathrm{tg}\, \alpha' = \frac{\mathrm{tg}\, \alpha}{n_{\mathrm{s}}}$$

$$\Rightarrow \quad y'_{\mathrm{u}} = \frac{d_{\mathrm{HoS}}}{n_{\mathrm{s}}} \,\mathrm{tg}\, \alpha$$

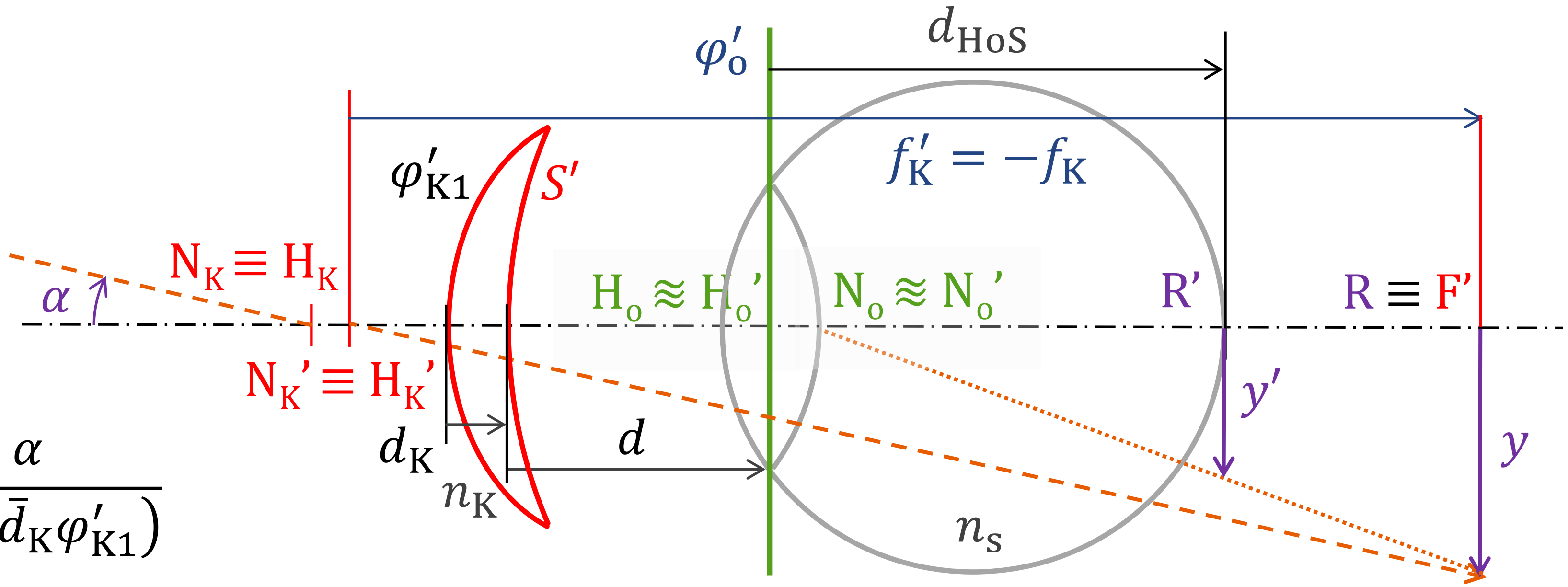
emetrop:

$$\frac{d_{\mathrm{HoS}}}{n_{\mathrm{s}}} = \frac{f'_{\mathrm{o}}}{n_{\mathrm{s}}} = -f_{\mathrm{o}}$$

$$y' = -f_{\mathrm{o}} \mathrm{tg}\, \alpha$$

velikost obrazu na sítnici ametropického oka

předmět o úhlové velikosti α se zobrazí do ohniska korekční čočky s tloušťkou d_K a indexem lomu n_K a mohutností první plochy φ'_K1 a vznikne obraz o výšce



$$y = -f_\mathrm{K} \operatorname{tg} \alpha = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{\varphi'_\mathrm{K}} = \frac{\operatorname{tg} \alpha}{S'\left(1 - \bar{d}_\mathrm{K}\varphi'_\mathrm{K1}\right)}$$

ten je dále okem zobrazen na sítnici, vznikne obraz o výšce y' a platí:

$$y' = \frac{A_\mathrm{R}}{A'_\mathrm{R}} y = \frac{a'_\mathrm{R} A_\mathrm{R}}{n_\mathrm{s}} y = \frac{d_\mathrm{HoS} A_\mathrm{R}}{n_\mathrm{s}} y = \frac{d_\mathrm{HoS} A_\mathrm{R}}{n_\mathrm{s} S'\left(1 - \bar{d}_\mathrm{K}\varphi'_\mathrm{K1}\right)} \operatorname{tg} \alpha$$

$$\frac{A_\mathrm{R}}{S'} = (1 + dA_\mathrm{R}) = \frac{1}{(1 - dS')}$$

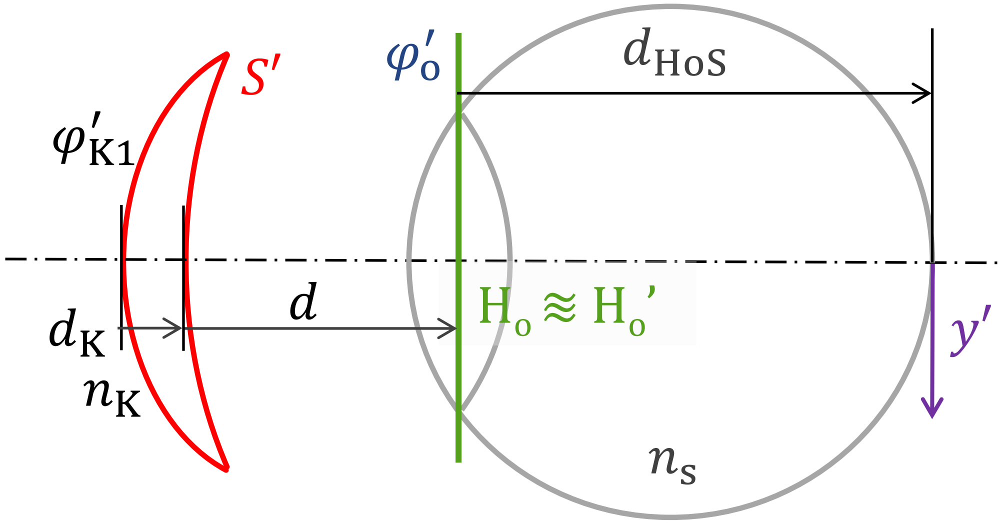
$$y' = \frac{1}{(1 - dS')} \frac{1}{\left(1 - \bar{d}_\mathrm{K}\varphi'_\mathrm{K1}\right)} \frac{d_\mathrm{HoS}}{n_\mathrm{s}} \operatorname{tg} \alpha$$

ÚFI ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ FSI VUT

velikost obrazu na sítnici ametropického oka

$$y' = \frac{1}{(1 - dS')} \frac{1}{(1 - \bar{d}_K \varphi'_{K1})} \frac{d_{HoS}}{n_S} \operatorname{tg} \alpha = F_P \times F_T \times y'_u \approx \frac{1}{(1 - dS')} \frac{d_{HoS}}{n_S} \operatorname{tg} \alpha$$

F_P	y'_u	$\approx \dots$
zvětšení korekční čočky	bez korekce	aproximace tenké korekční čočky



“Mohutnostní” (Power) faktor:

$F_P = 1/(1 - dS') = (1 + dA_R) = A_R/S'$

… zásadní vliv na zvětšení korekční čočky

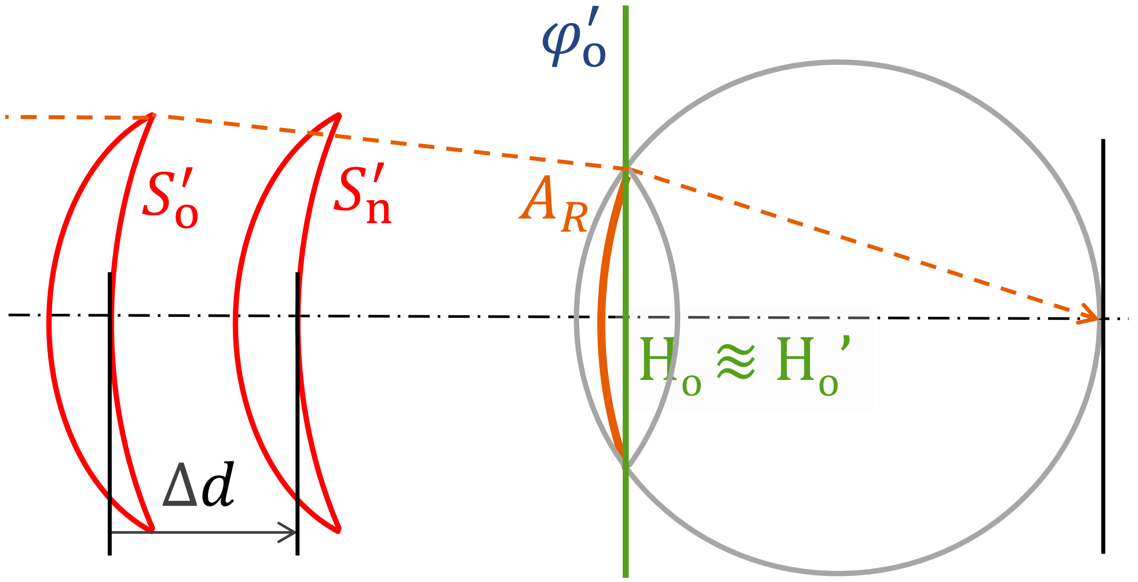
Tvarový faktor: $F_T = 1/\left(1 - \bar{d}_K \varphi'_{K1}\right)$

… přední plocha obvykle spojná, zvětšení její mohutnosti nebo centrální tloušťky **zvětší** tvarový faktor a tím i sítnicový obraz

… rozptylky mají velmi malou redukovanou centrální tloušťku, tvarový faktor je blízký jedné

přepočet vrcholové lámavosti

Vrcholová lámavost korekční čočky v původní poloze je S'_o. Při změně polohy (vzdálenosti) korekční čočky je nutno změnit také její vrcholovou lámavost na S'_n , tak, aby odpovídala vergenci svazku za původní čočkou v místě zadní plochy nové čočky. Pak bude na předmětové hlavní rovině oka opět dosaženo požadované vergence svazku A_R.



Požadovanou vergenci S'_n proto určíme z původní vergence S'_o propagací vergence o vzdálenost Δd měřené od vrcholu zadní plochy korekční čočky v původní poloze k vrcholu zadní plochy čočky v nové poloze.

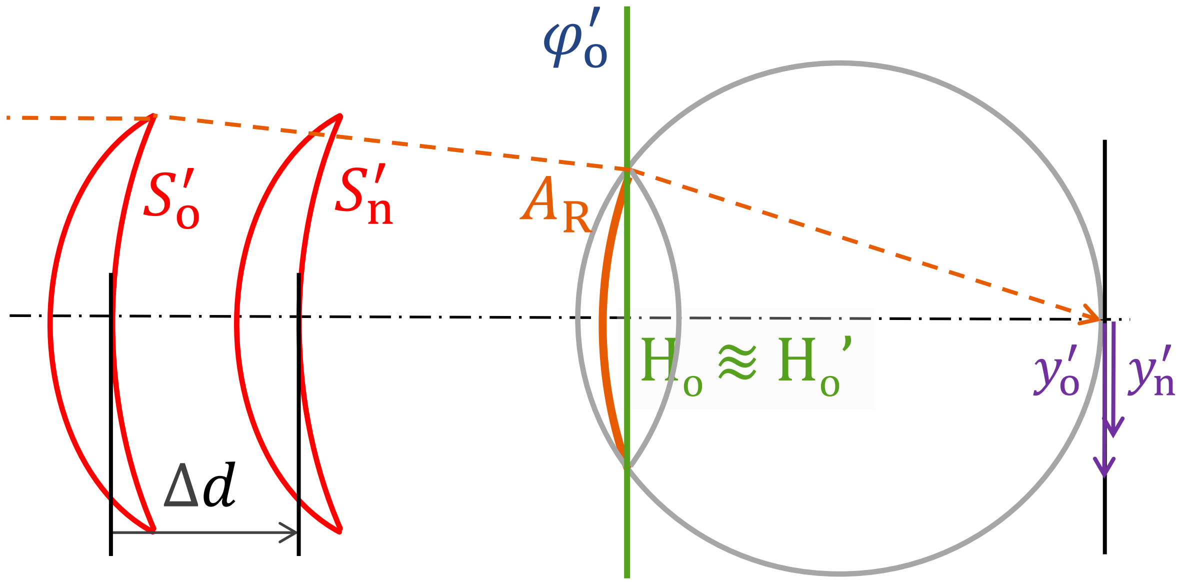
$$\Rightarrow \quad S'_\mathrm{n} = \frac{S'_\mathrm{o}}{1 - \Delta d S'_\mathrm{o}}$$

($\Delta d = d_\mathrm{o} - d_\mathrm{n}$ je kladné při posunutí korekční čočky směrem k oku a záporné při posunutí od oka)

přepočet velikosti obrazu na sítnici

Při změně polohy (vzdálenosti) korekční čočky se změní také velikost obrazu (téhož předmětu) na sítnici.

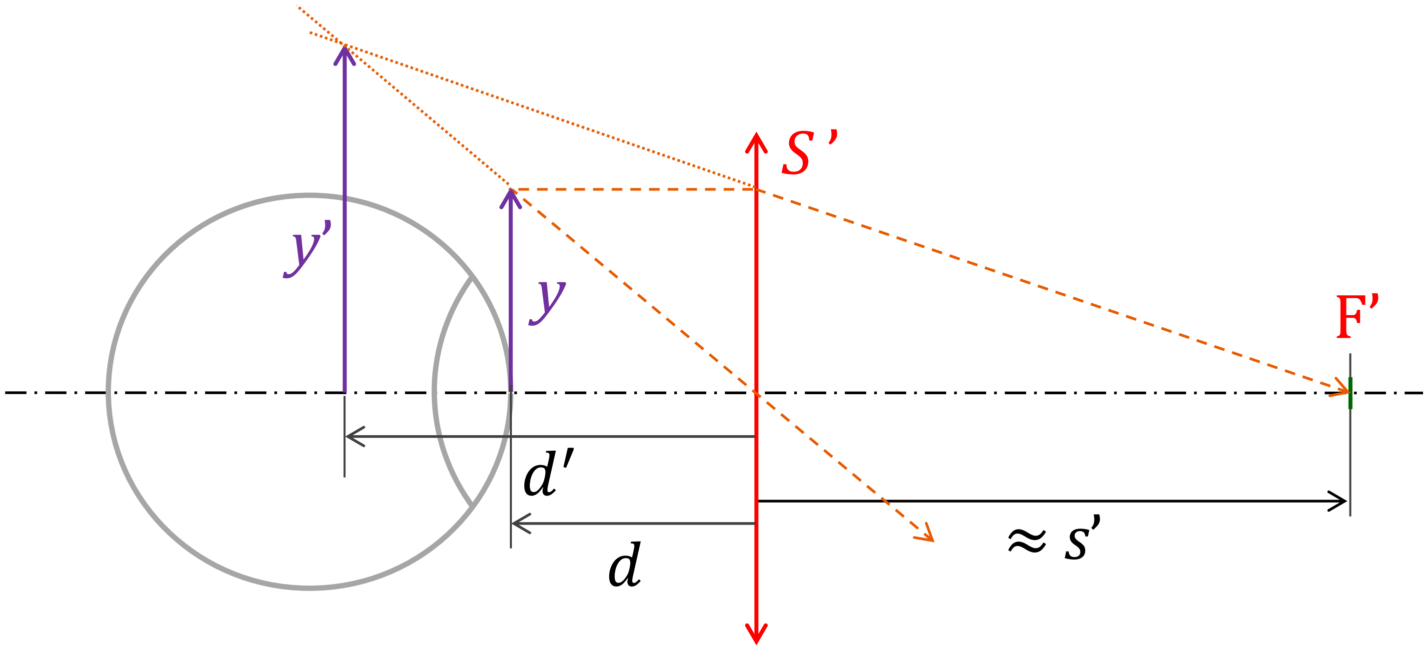
Pro poměr β_{no} velikostí nového a původního sítnicového obrazu platí:



$$\beta_{\mathrm{no}} = \frac{y'_{\mathrm{n}}}{y'_{\mathrm{o}}} = \frac{F_{\mathrm{Pn}}}{F_{\mathrm{Po}}} = \frac{A_{\mathrm{R}}}{S'_{\mathrm{n}}}\frac{S'_{\mathrm{o}}}{A_{\mathrm{R}}} = \frac{S'_{\mathrm{o}}}{S'_{\mathrm{n}}} = S'_{\mathrm{o}}\frac{1 - \Delta d S'_{\mathrm{o}}}{S'_{\mathrm{o}}} = 1 - \Delta d S'_{\mathrm{o}}$$

($\Delta d = d_{\mathrm{o}} - d_{\mathrm{n}}$ je kladné při posunutí korekční čočky směrem k oku a záporné při posunutí od oka)

zdánlivá velikost oka za brýlovou čočkou



Podle Gaussovy rovnice:

$$\frac{1}{d'} = \frac{1}{d} + \varphi' \approx \frac{1}{d} + S'$$

$(d, d' < 0)$

velikost obrazu oka y' za brýlovou čočkou:

$$y' = \frac{d'}{d} y = \frac{y}{1 + dS'}$$