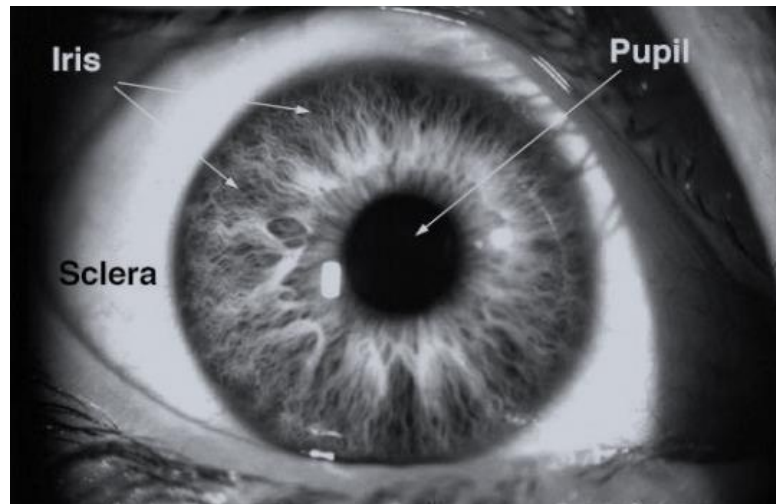


Modely oka

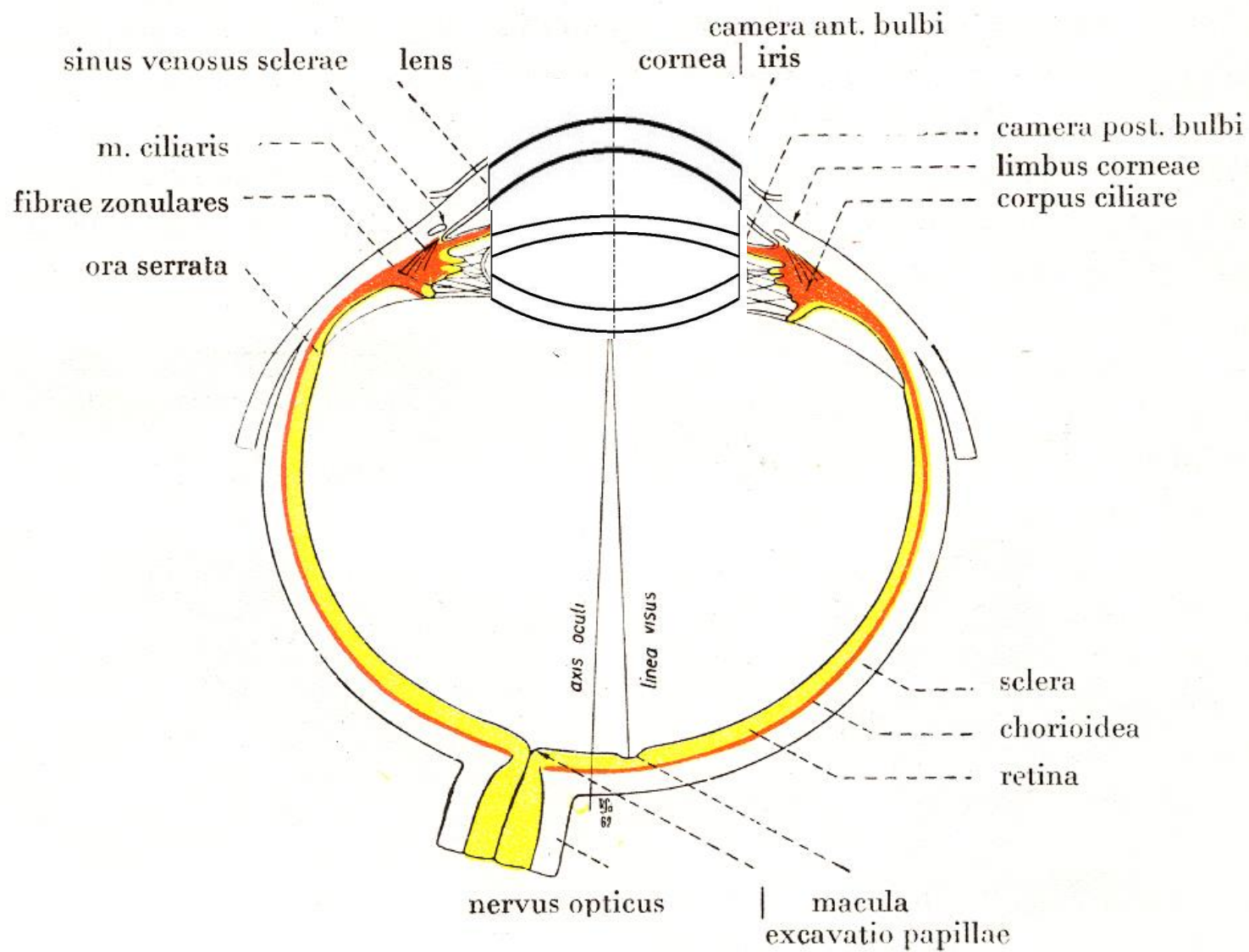


Allvar Gullstrand

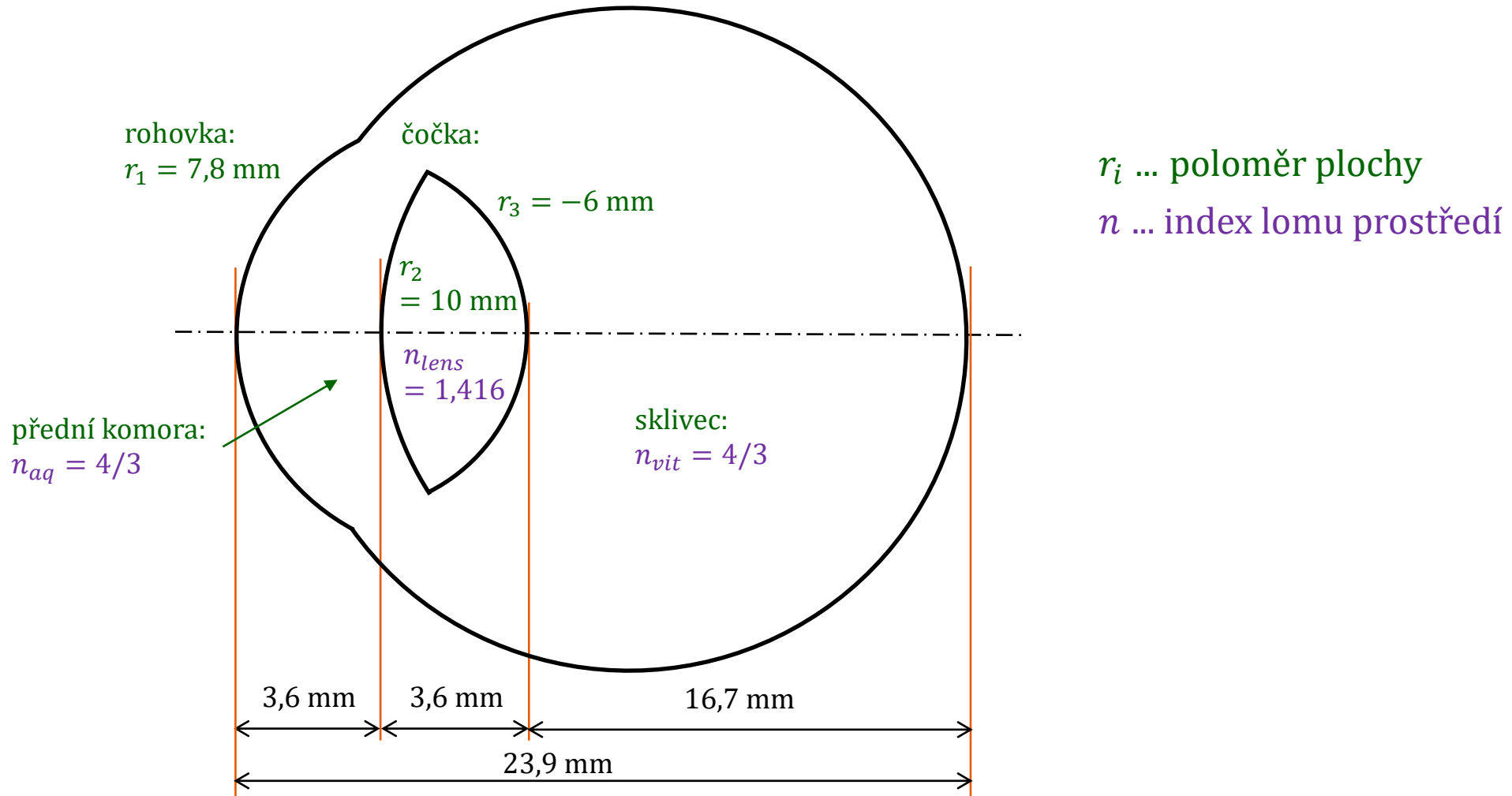
- 1862, Landskrona – 1930, Stockholm. Otec byl proslulým lékařem.
- Studoval lékařství v Uppsale, Vídni a Stockholmu, byl profesorem oftalmologie na univerzitě v Uppsale.
- Výzkum zaměřil na *dioptriku oka*, tj. na studie lidského oka jako systému čoček. Studoval astigmatismus pomocí cylindrických čoček a vyvinul fotografickou techniku pro zkoumání stupně rohovkového astigmatismu.
- Od roku 1901 spolupracoval s Carl Zeiss v Jeně na konstrukci oftalmologických optických přístrojů. Důležitý výsledek (1911): Gullstrandův oftalmoskop se štěrbinovým osvětlením pro pozorování očního pozadí. Navrhl také korekční čočky pro korekci oka po operaci katarakty.
- Přispěl podstatnou měrou k pokroku nauky o oku, jeho výzkum umožnil podstatně zlepšit korekci očních vad. V roce 1924 navrhl **model oka** se šesti plochami.
- Jeho dílo je zásadně přínosné pro pochopení fyziologie lidského zraku, jeho teoretická práce významně posunula oftalmologickou praxi.
- **V roce 1911 získal Nobelovu cenu za fyziologii a medicínu za práci v oční optice.**



Gullstrandovo schematické oko



Emsleyovo schematické oko



Gullstrandovo schematické oko

rohovka:

$$r_1 = 7,7 \text{ mm}$$

$$r_2 = 6,8 \text{ mm}$$

$$d_1 = 0,0 \text{ mm}$$

$$d_2 = 0,5 \text{ mm}$$

$$n = 1,376$$

jádro čočky:

$$r_4 = 7,911 \text{ mm}$$

$$r_5 = -5,76 \text{ mm}$$

$$d_4 = 4,146 \text{ mm}$$

$$d_5 = 6,565 \text{ mm}$$

$$n = 1,406$$

čočka:

$$r_3 = 10,0 \text{ mm}$$

$$r_6 = -6,0 \text{ mm}$$

$$d_3 = 3,6 \text{ mm}$$

$$d_6 = 7,2 \text{ mm}$$

$$n = 1,386$$

sklivec:

$$n_{skl} = 1,336$$

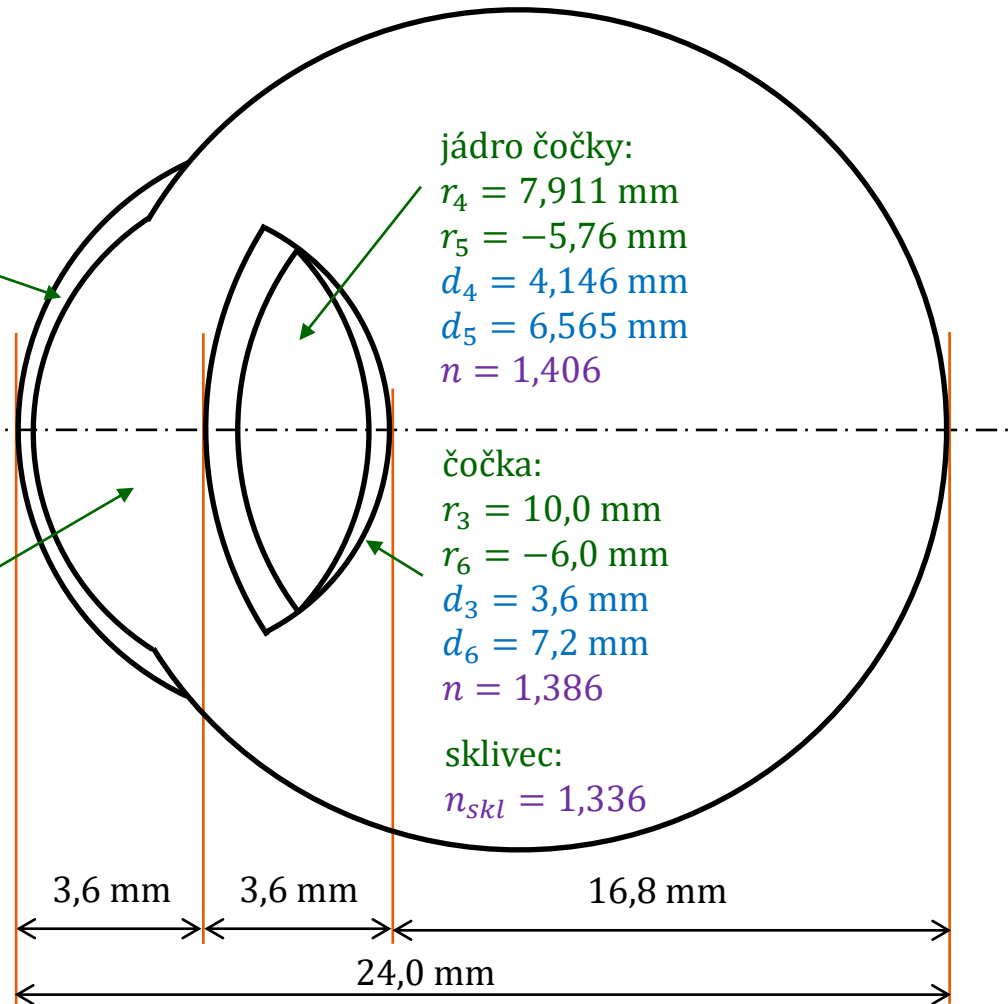
r_i ... poloměr plochy

d_i ... vzdálenost plochy od přední plochy rohovky (1. plocha)

n ... index lomu prostředí

přední komora:

$$n = 1,336$$



3,6 mm

3,6 mm

16,8 mm

24,0 mm

Gullstrandovo oko: rohovka

plocha č.	→		←	
	1	2	2	1
n	1,0000	1,3760	1,3360	1,3760
n'	1,3760	1,3360	1,3760	1,0000
r	0,0077	0,0068	-0,0068	-0,0077
d	0,0005		0,0005	
d_1 (od 1. plochy)	0	0,0005		
x				
$X = n/x$				
$\varphi' = (n' - n)/r$				
$X' = X + \varphi'$				
$p = 1/(1 - X'd/n')$				
pX'				
$x' = n'/X'$				

obrazová ohnisková
vzdálenost a celková
optická mohutnost

předmětová ohnisková
vzdálenost a celková
optická mohutnost

$$f' = \quad \text{mm}$$

$$f = \quad \text{mm}$$

$$\varphi'_c = \quad \text{D}$$

$$\varphi_c = \quad \text{D}$$

vzdálenosti od 2. plochy

vzdálenosti od 1. plochy

$$S'_{F'} = \quad \text{mm}$$

$$S_F = \quad \text{mm}$$

$$S'_{H'} = \quad \text{mm}$$

$$S_H = \quad \text{mm}$$

$$S'_{N'} = \quad \text{mm}$$

$$S_N = \quad \text{mm}$$

vzdálenosti od 1. plochy
rohovky

vzdálenosti od 1. plochy
rohovky

$$S_{1F'} = \quad \text{mm}$$

$$S_{1F} = \quad \text{mm}$$

$$S_{1H'} = \quad \text{mm}$$

$$S_{1H} = \quad \text{mm}$$

$$S_{1N'} = \quad \text{mm}$$

$$S_{1N} = \quad \text{mm}$$

Gullstrandovo oko: čočka

	→				←			
plocha č.	3	4	5	6	6	5	4	3
n	1,336	1,386	1,406	1,386	1,336	1,386	1,406	1,386
n'	1,386	1,406	1,386	1,336	1,386	1,406	1,386	1,336
r	0,010	0,007911	-0,00576	-0,006	0,006	0,00576	-0,007911	-0,010
d	0,000546	0,002419	0,000635		0,000635	0,002419	0,000546	
d_1 (od 1. plochy)	0,0036	0,004146	0,006565	0,0072				
x								
$X = n/x$								
$\varphi' = (n' - n)/r$								
$X' = X + \varphi'$								
$p = 1/(1 - X'd/n')$								
pX'								
$x' = n'/X'$								

obrazová ohnisková vzdálenost a celková optická mohutnost

předmětová ohnisková vzdálenost a celková optická mohutnost

$$f' = \quad \text{mm}$$

$$f = \quad \text{mm}$$

$$\varphi'_c = \quad \text{D}$$

$$\varphi_c = \quad \text{D}$$

vzdálenosti od 6. plochy

vzdálenosti od 3. plochy

$$S'_{F'} = \quad \text{mm}$$

$$S_F = \quad \text{mm}$$

$$S'_{H'} = \quad \text{mm}$$

$$S_H = \quad \text{mm}$$

$$S'_{N'} = \quad \text{mm}$$

$$S_N = \quad \text{mm}$$

vzdálenosti od 1. plochy rohovky

vzdálenosti od 1. plochy rohovky

$$S_{1F'} = \quad \text{mm}$$

$$S_{1F} = \quad \text{mm}$$

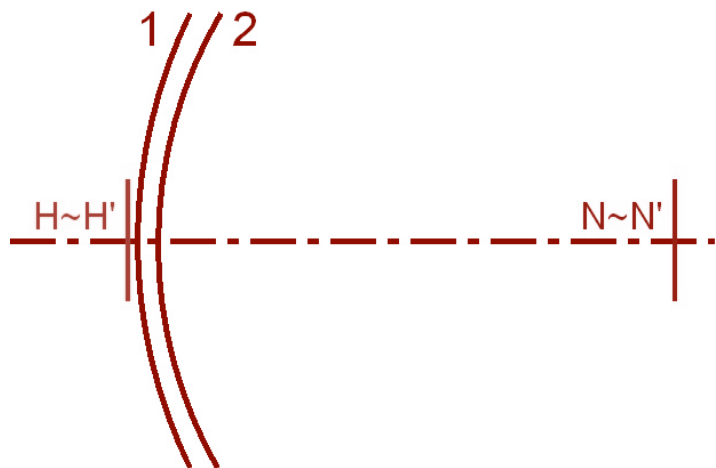
$$S_{1H'} = \quad \text{mm}$$

$$S_{1H} = \quad \text{mm}$$

$$S_{1N'} = \quad \text{mm}$$

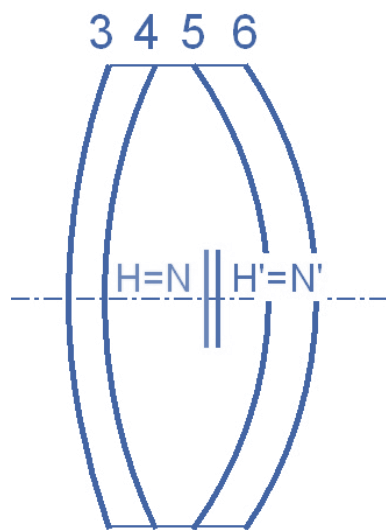
$$S_{1N} = \quad \text{mm}$$

Gullstrandovo oko: rohovka a čočka



Rohovka

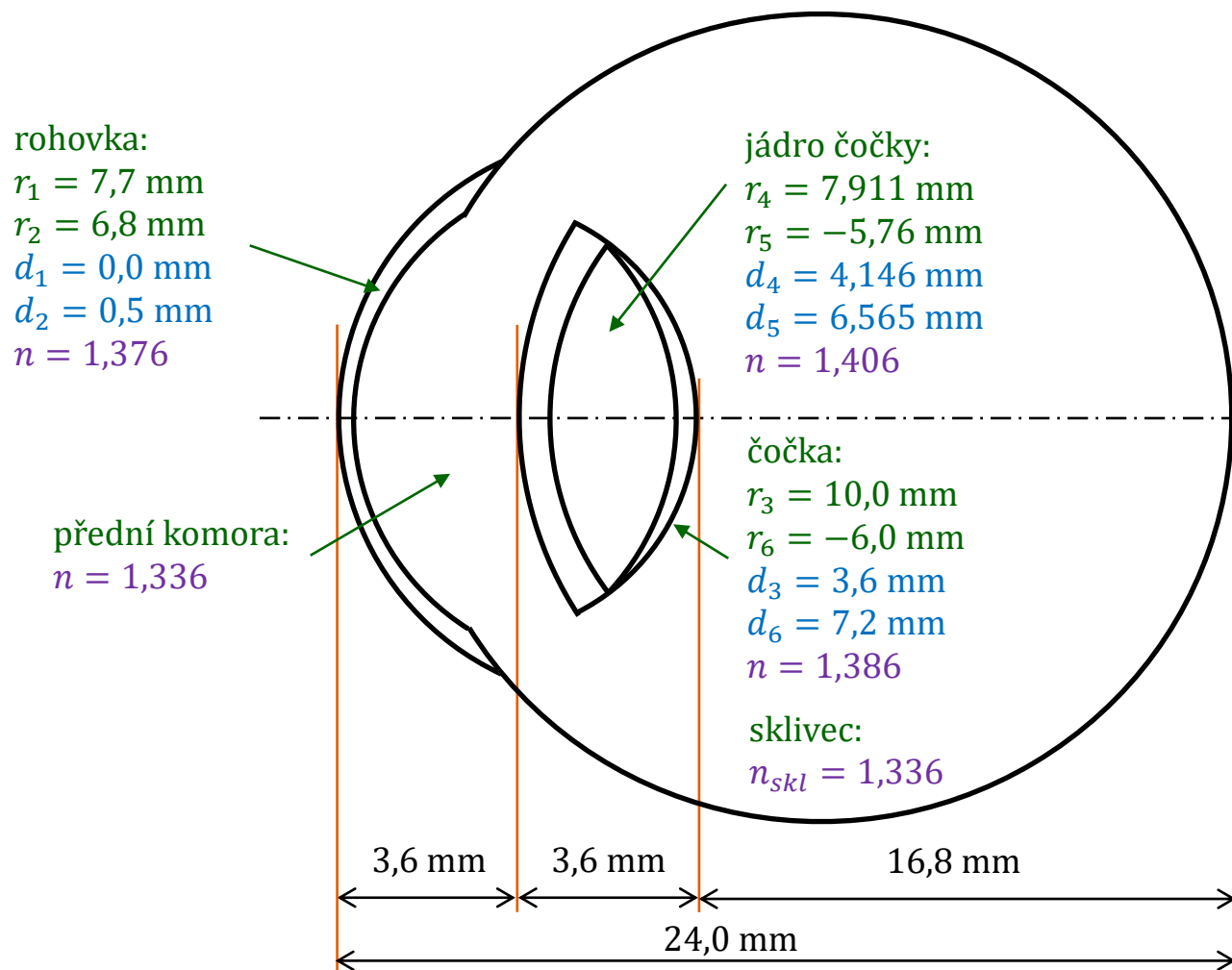
$f' = 31,031 \text{ mm}$	$f = -23,227 \text{ mm}$
$\varphi'_c = 43,053 \text{ D}$	$\varphi'_c = 43,053 \text{ D}$
$s_{1F'} = 30,981 \text{ mm}$	$s_{1F} = -23,277 \text{ mm}$
$s_{1H'} = -0,051 \text{ mm}$	$s_{1H} = -0,050 \text{ mm}$
$s_{1N'} = 7,754 \text{ mm}$	$s_{1N} = 7,755 \text{ mm}$



Čočka

$f' = 69,908 \text{ mm}$	$f = -69,908 \text{ mm}$
$\varphi'_c = 19,111 \text{ D}$	$\varphi'_c = 19,111 \text{ D}$
$s_{1F'} = 75,715 \text{ mm}$	$s_{1F} = -64,230 \text{ mm}$
$s_{1H'} = 5,807 \text{ mm}$	$s_{1H} = 5,678 \text{ mm}$
$s_{1N'} = 5,807 \text{ mm}$	$s_{1N} = 5,678 \text{ mm}$

Optický systém celého Gullstrandova oka



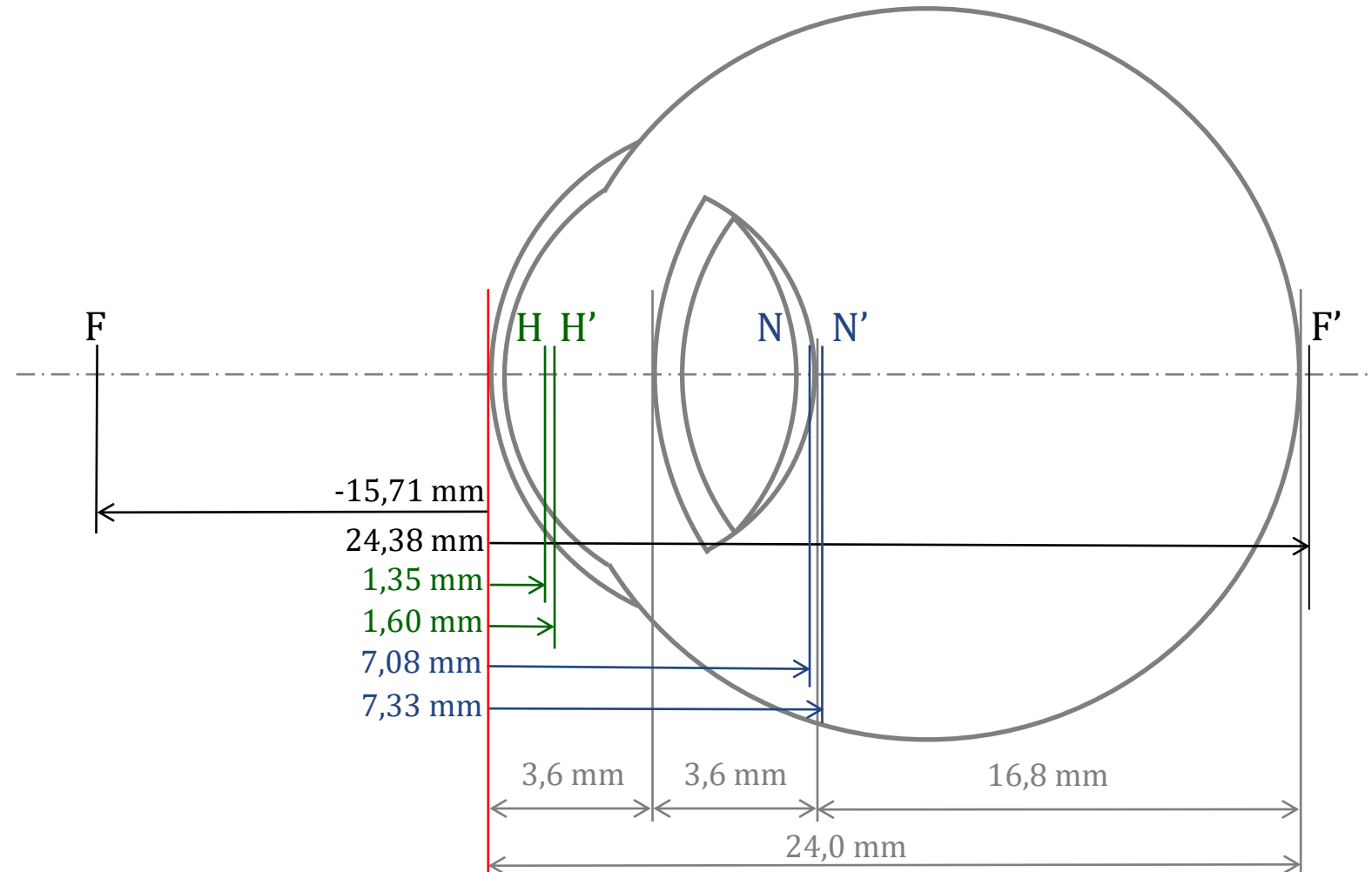
obrazová ohnisková
vzdálenost a celková
optická mohutnost

předmětová ohnisková
vzdálenost a celková
optická mohutnost

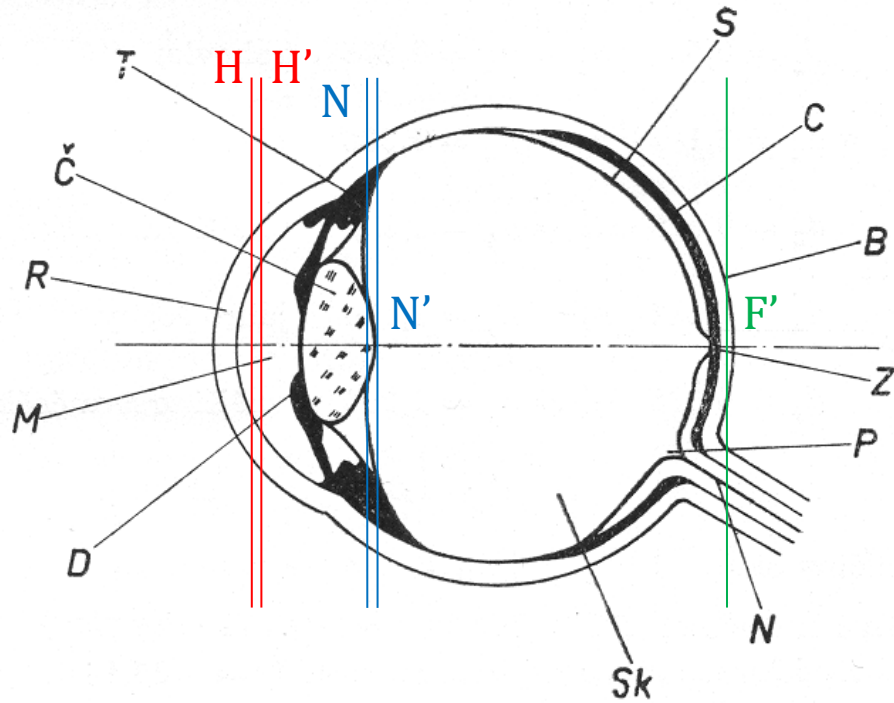
$f' =$	mm	$f =$	mm
$\varphi'_c =$	D	$\varphi'_c =$	D
vzdálenosti od 6. plochy		vzdálenosti od 1. plochy	
$S'_{F'} =$	mm	$S_F =$	mm
$S'_{H'} =$	mm	$S_H =$	mm
$S'_{N'} =$	mm	$S_N =$	mm
vzdálenosti od 1. plochy rohovky		vzdálenosti od 1. plochy rohovky	
$S_{1F'} =$	mm	$S_{1F} =$	mm
$S_{1H'} =$	mm	$S_{1H} =$	mm
$S_{1N'} =$	mm	$S_{1N} =$	mm

Gullstrandovo oko: kardinální body

bod	poloha
H	1,35 mm
H'	1,60 mm
N	7,08 mm
N'	7,33 mm
F	-15,71 mm
F'	24,38 mm



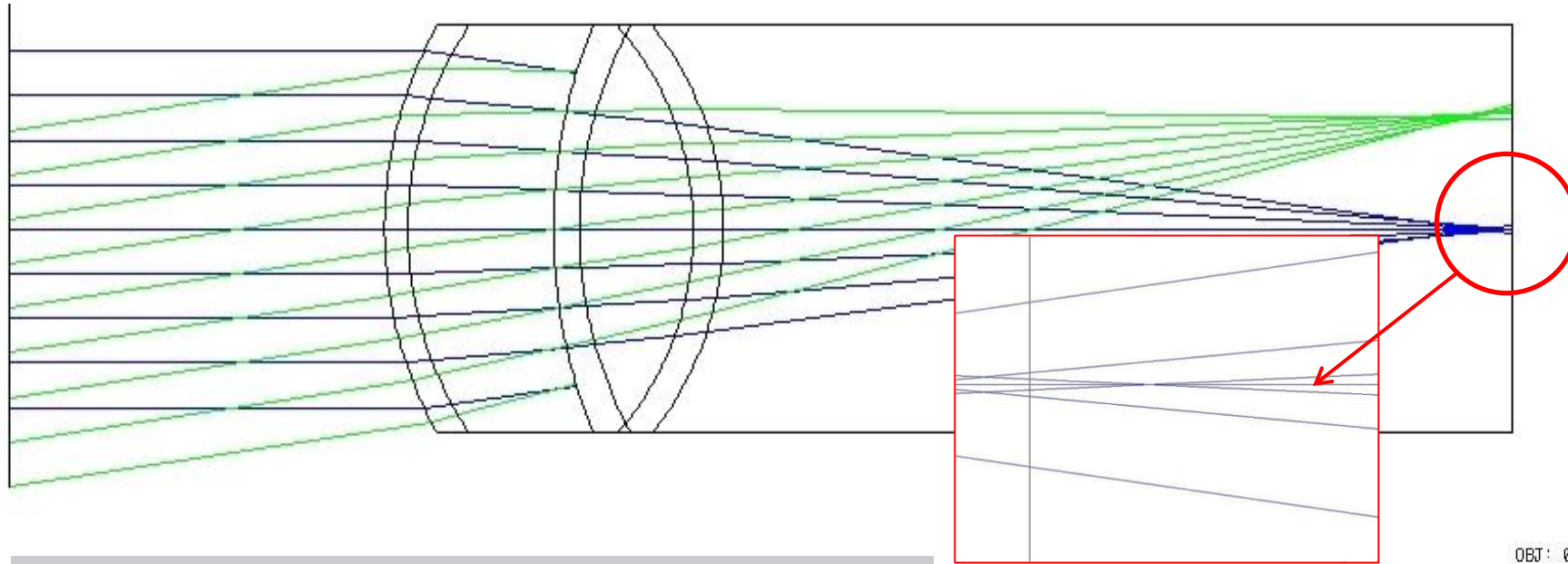
Optický systém Gullstrandova oka



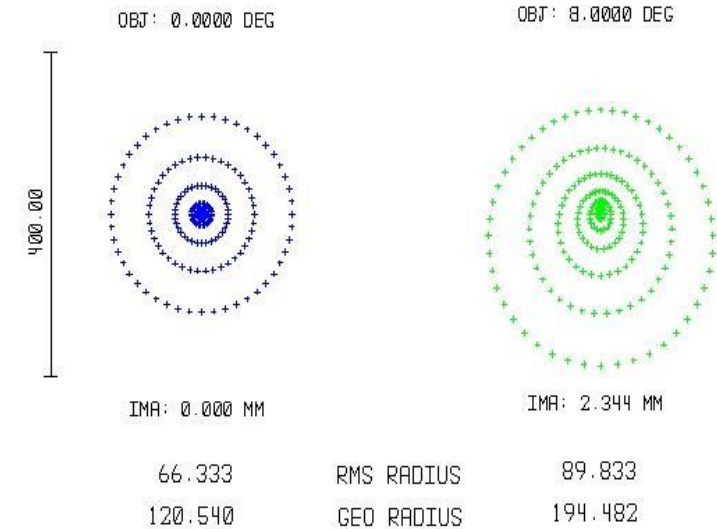
- | | |
|-------------------|--------------------------|
| R - rohovka | S - sítnice |
| M - přední komora | C - cévnatka |
| D - duhovka | B - bělima |
| Č - čočka | Z - žlutá skvrna, fovea |
| T - ciliární sval | P - papila, slepá skvrna |
| | N - oční nerv |
| | Sk - sklivec |

	akom. klid	akom. max.
Indexy lomu :		
rohovka	1,376	1,376
komorová voda a sklivec.....	1,336	1,336
čočka ekvivalentní.....	1,406	1,406
čočka.....	1,386	1,386
Místo :		
první lámavá plocha rohovky	0	0
druhé lámavé plochy rohovky	0,5	0,5
první lám. plochy čočky	3,6	3,2
první lám. pl. ekviv. čočky	4,146	3,8725
druhé lám. pl. ekviv. čočky.....	6,565	5,5275
druhé lám. pl. čočky	7,2	7,2
optické centrum čočky		
Poloměry zakřivení :		
první lám. p. rohovky	7,7	7,7
druhé lám. pl. rohovky.....	6,8	6,8
ekviv. pl. čočky		
první lám. pl. čočky	10,000	5,33
první lám. pl. ekviv. čočky	7,911	2,655
druhé lám. pl. ekviv. čočky.....	-5,76	-2,655
druhé lám. pl. čočky	-6,000	-5,33
Optická mohutnost :		
první lám. pl. rohovky.....	48,83	48,83
druhé lám. pl. rohovky	-5,88	-5,88
ekviv. pl.		
první lám. pl. čočky	5,000	9,375
jádra čočky	5,985	14,96
drhé lám. pl. čočky	8,33	9,375
Rohovkový systém :		
optická mohutnost.....	43,05	43,05
místo předmětového hl. bodu	-0,0496	-0,0496
místo obrazového hl. bodu.....	-0,0506	-0,0506
předmětová ohnisková vzdálenost	-23,227	-23,227
obrazová ohnisková vzdálenost.....	31,031	31,131
Čočkový systém :		
optická mohutnost.....	19,11	33,06
místo předmětového hl. bodu.....	5,678	5,145
místo obrazového hl. bodu.....	5,808	5,255
ohnisková vzdálenost.....	69,908	40,416
Celkový systém :		
optická mohutnost.....	58,64	70,57
místo předmětového hl. bodu.....	1,348	1,722
místo obrazového hl. bodu.....	1,602	2,086
místo předm. ohniska.....	-15,707	-12,397
místo obraz. ohniska.....	24,387	21,016
předm. ohnisk. vzdál.....	-17,055	-14,169
obraz. ohnisk. vzdál.....	22,785	18,030
místo fovey centralis	24,00	24,00
axiální refrakce	1,00	-9,6
místo blízkého bodu P		-102,3
skutečný střed otáčení oka C'	13,0	13,0
místo předmětového uzlového bodu	7,078	6,533
místo obraz. uzlového bodu.....	7,332	6,847
místo vstupní pupily.....	3,047	2,668
místo výstupní pupily.....	3,667	3,212

Gullstrandovo oko – trasování paprsků



Plocha	Rádus (mm)	Tloušťka (mm)	Index lomu nD (-)
Objekt	nekonečno	nekonečno	1,0000
2	7,70	0,50	1,3771
3	6,80	3,10	1,3374
STO	10,00	0,55	1,3860
5	7,91	2,42	1,4060
6	-5,76	0,64	1,3860
7	-6,00	16,79	1,3360

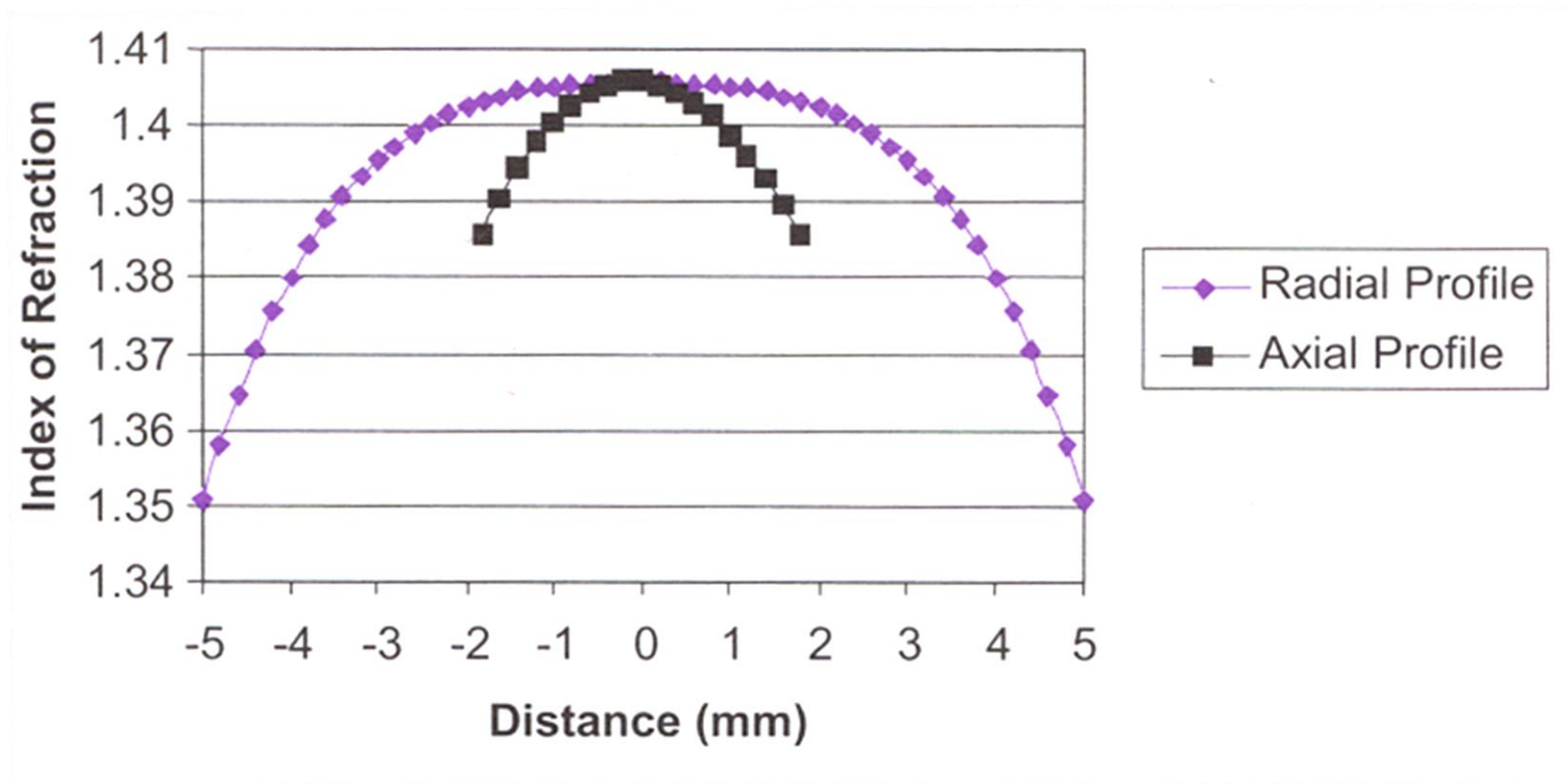


Skutečné hodnoty optických parametrů oka

parametr	průměr	rozptyl	Gullstrandův model
přední plocha rohovky	7,80 mm	7,00 mm – 8,65 mm	7,7 mm
zadní plocha rohovky	6,50 mm	6,20 mm – 6,60 mm	6,8 mm
hloubka přední komory	3,68 mm	2,80 mm – 4,60 mm	3,6 mm
optická mohutnost čočky	20,35 D	15,00 D – 27,00 D	19,11 D
tloušťka čočky	4,00 mm		3,6 mm
poloměr přední plochy čočky	10,20 mm	8,80 mm – 11,90 mm	10,0 mm
poloměr zadní plochy čočky	-6,00 mm		-6,00 mm
osová délka	24,00 mm	20,00 mm – 29,50 mm	24,00 mm
optická mohutnost oka	59,63 D	54,00 D – 65,00 D	58,64 D
rohovka	index lomu: 1,3771	1,376	Abbeovo číslo: 57,1
komorová voda	index lomu: 1,3374	1,336	Abbeovo číslo: 61,3
čočka	index lomu: 1,36-1,41	1,386; 1,406	Abbeovo číslo: 47,7
sklivec	index lomu: 1,336	1,336	Abbeovo číslo: 61,1

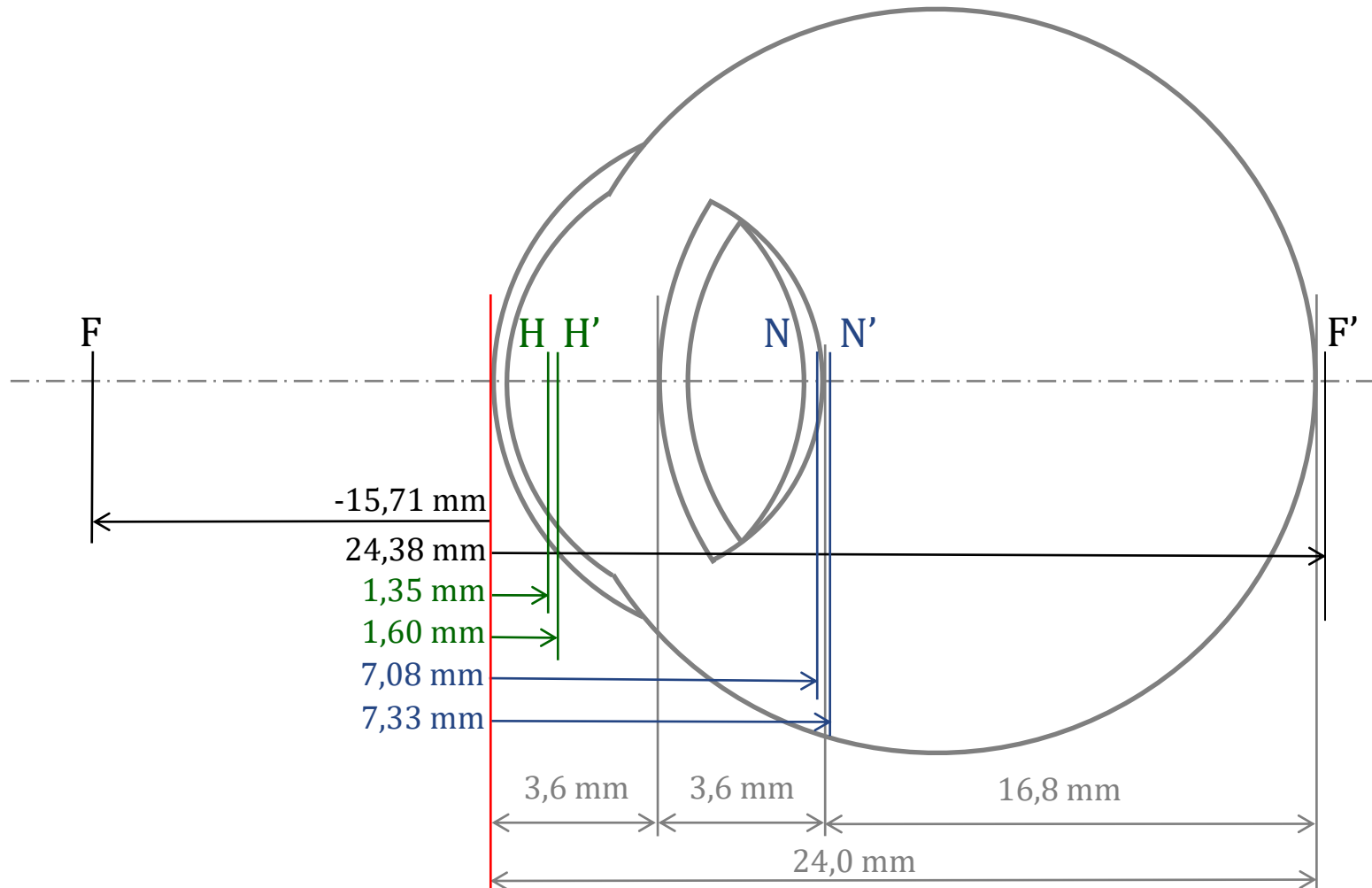
(J. Schwiegerling: Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics, SPIE Press, Bellingham 2004)

Skutečný průběh indexu lomu oční čočky



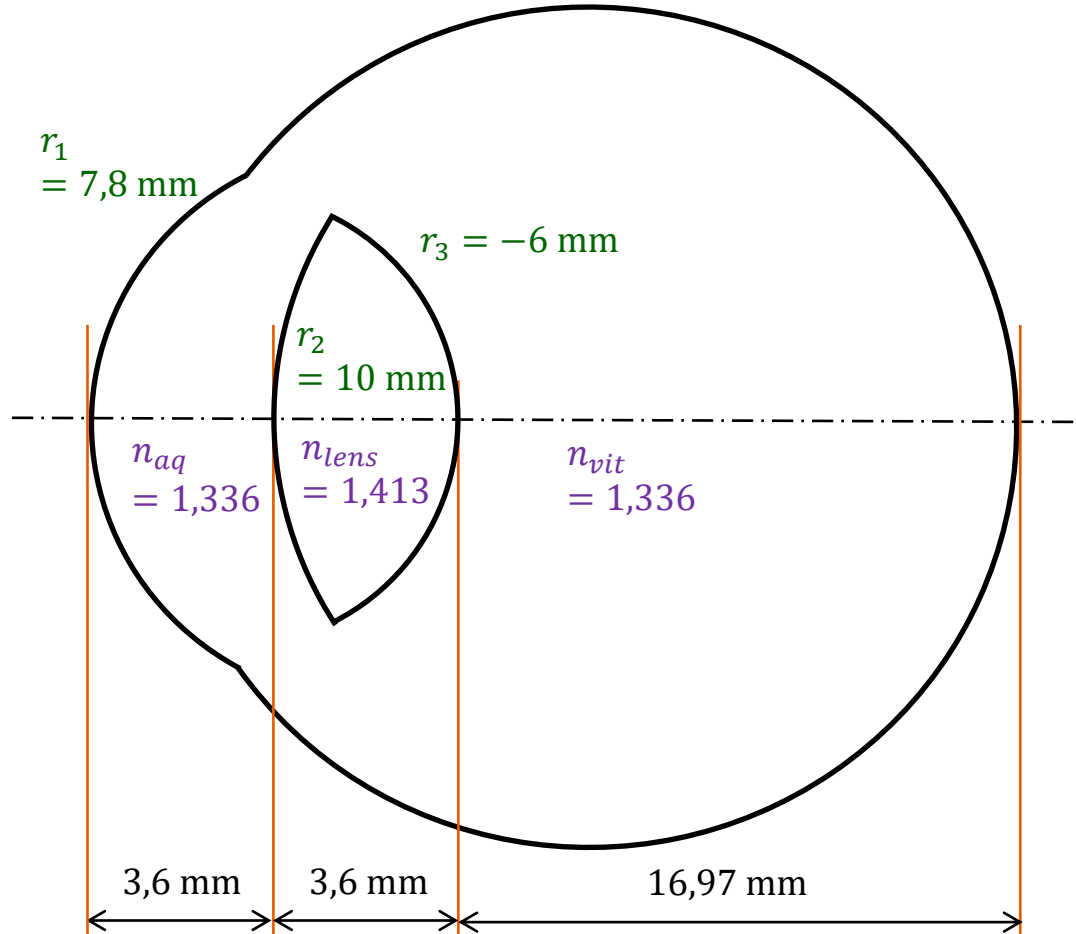
(J. Schwiegerling: Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics, SPIE Press, Bellingham 2004)

Gullstrandovo oko: kardinální body



bod	poloha
H	1,35 mm
H'	1,60 mm
N	7,08 mm
N'	7,33 mm
F	-15,71 mm
F'	24,38 mm

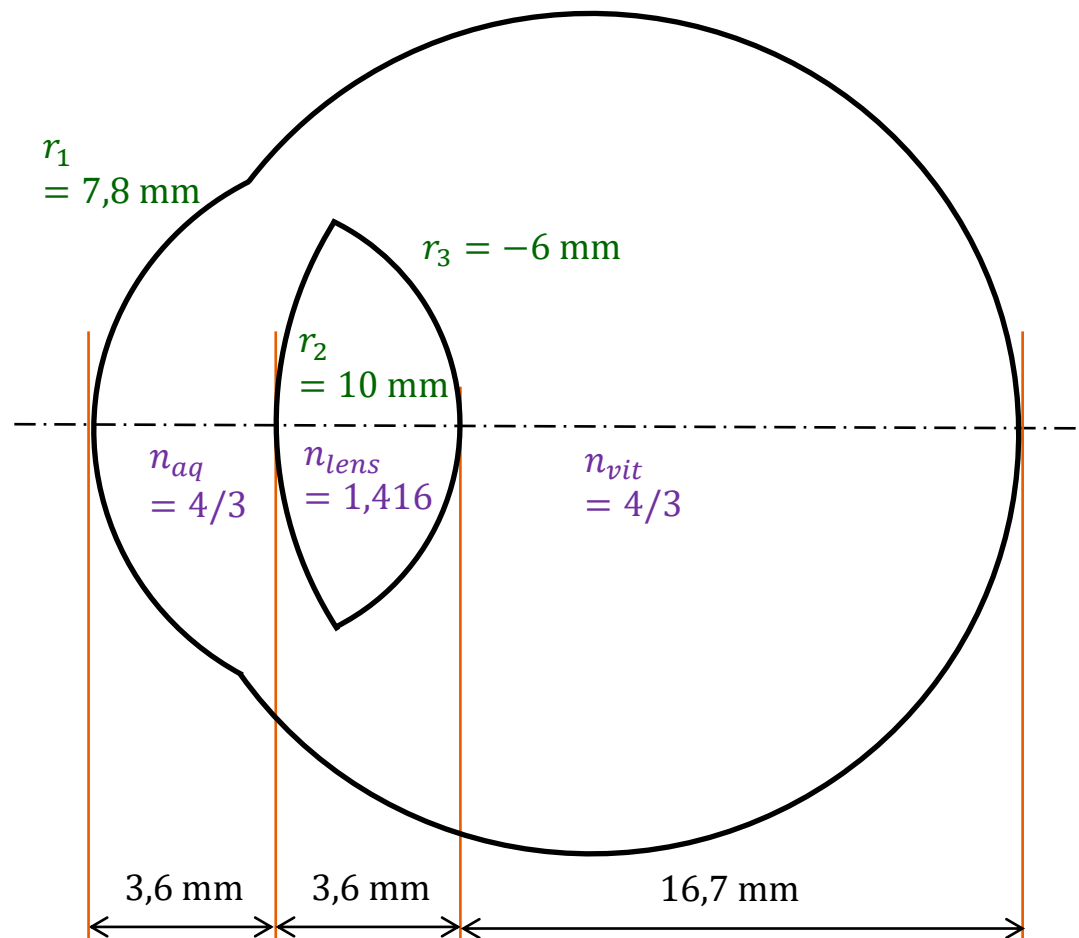
Gullstrandovo zjednodušené schematické oko



- navrženo A. Gullstrandem, vychází z Gullstrandova přesného schematického oka
- má jen 3 plochy, **délka oka je 24,17 mm**
- **rohovka**: blízké plochy nahrazeny jedinou plochou v blízkosti hlavních rovin rohovky
- **čočka**: 2 plochy, není odděleno jádro čočky s vyšším indexem lomu, pro dosažení mohutnosti je index lomu zvýšen na **1,413**
- **celková mohutnost oka je $\varphi'_0 = +59,59 D$**

bod	poloha	Gullstr. přesné oko
H	1,47 mm	1,35 mm
H'	1,75 mm	1,60 mm
N	7,10 mm	7,08 mm
N'	7,39 mm	7,33 mm
F	-15,31 mm	-15,71 mm
F'	24,17 mm	24,38 mm

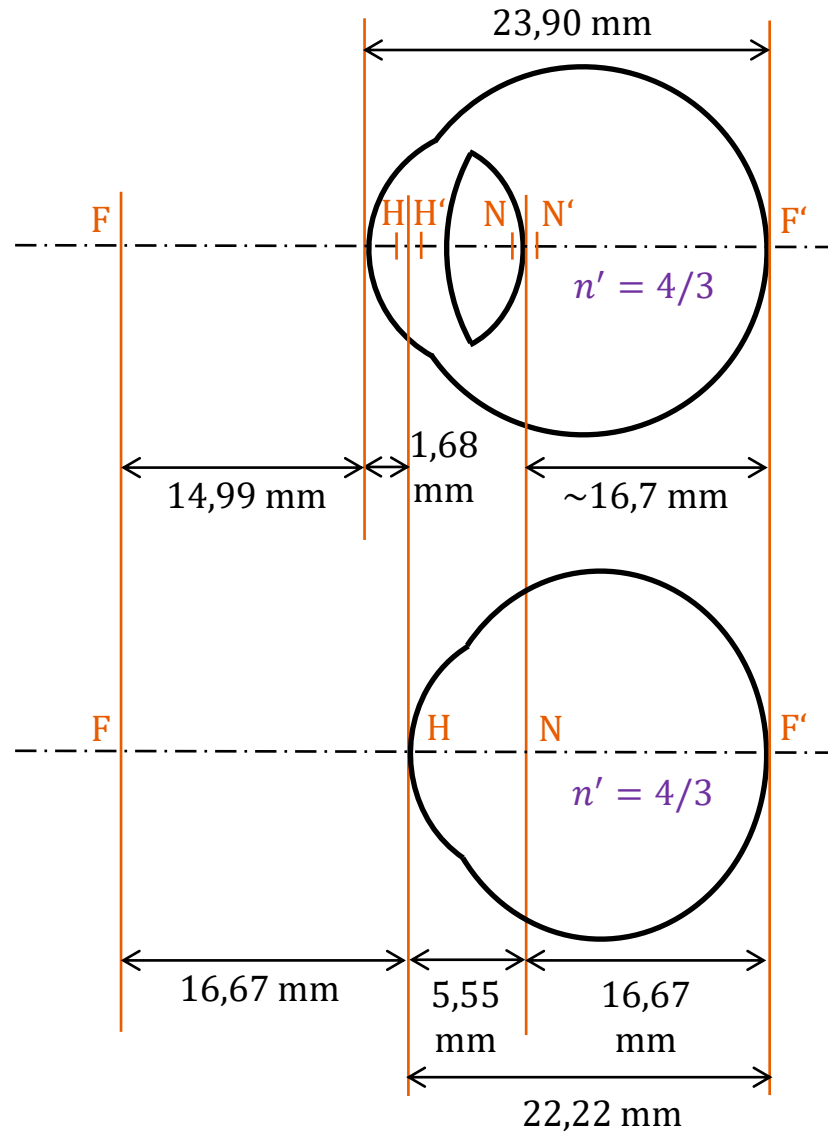
Emsleyovo schematické oko



- navrženo H. H. Emsleyem, který roku 1952 modifikoval Gullstrandovo zjednodušené schematické oko
- změněny **indexy lomu**: komorová voda a sklivec: $n_{aq} = n_{vit} = 4/3 = 1,333 \dots$
čočka: $n_{lens} = 1,416$
- **celková mohutnost** oka je pak
 $\varphi'_0 = +60,48 \text{ D}$
- **délka oka** je zmenšena na **23,90 mm**

bod	poloha	Gullstr. přesné oko
H	1,55 mm	1,35 mm
H'	1,85 mm	1,60 mm
N	7,06 mm	7,08 mm
N'	7,36 mm	7,33 mm
F	-14,99 mm	-15,71 mm
F'	23,90 mm	24,38 mm

Standardní redukované oko (+60 D)



bod	poloha
H	1,55 mm
H'	1,85 mm
N	7,06 mm
N'	7,36 mm
F	-14,99 mm
F'	23,90 mm

- odvodil Emsley z Emsleyova schematického oka (ESO, obrázek a tabulka nahoře)
- soustava s 1 plochou mezi hlavními rovinami ESO a středem křivosti přibližně mezi uzlovými body ESO
- poloměr křivosti plochy je **5,55 mm**
- index lomu prostředí uvnitř oka je $n' = 4/3 = 1,333\dots$
- mohutnost oka (jediné plochy) je $\varphi'_0 = +60$ D
- délka oka je **22,22 mm**

Neparaxiální model oka: "Arizona eye"

Name	Radius	Conic	Index	Abbe	Thickness
	7.8 mm	-0.25			
Cornea	6.5 mm	-0.25	1.377	57.1	0.55 mm
Aqueous	R_{ant}	K_{ant}	1.337	61.3	t_{aq}
Lens	R_{post}	K_{post}	n_{lens}	51.9	t_{lens}
Vitreous	-13.4 mm	0.00	1.336	61.1	16.713 mm
Retina					

$$R_{ant} = 12.0 - 0.4A$$

$$K_{ant} = -7.518749 + 1.285720A$$

$$R_{post} = -5.224557 + 0.2A$$

$$K_{post} = -1.353971 - 0.431762A$$

$$t_{aq} = 2.97 - 0.04A$$

$$t_{lens} = 3.767 + 0.04A$$

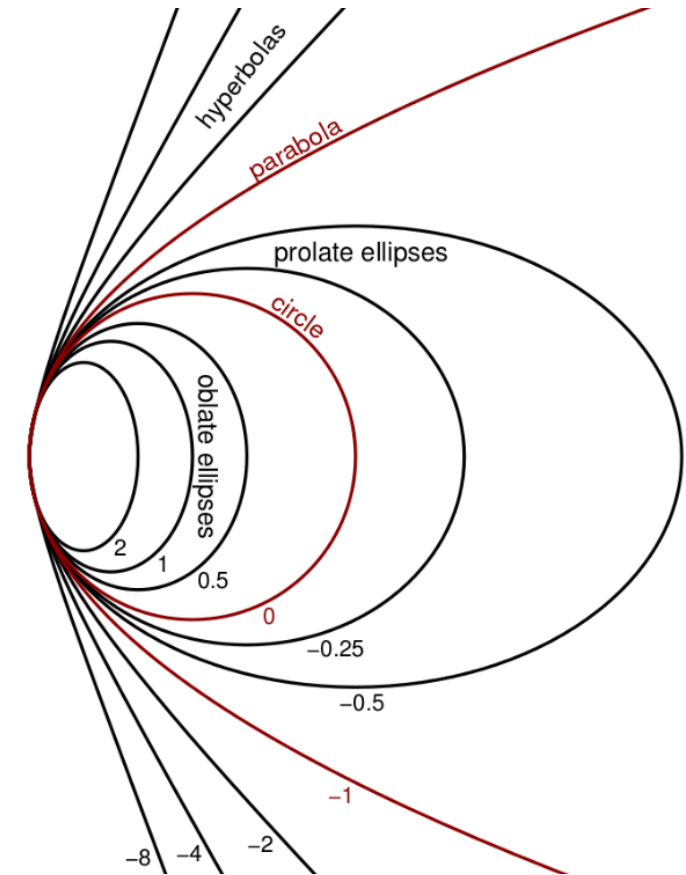
$$n_{lens} = 1.42 + 0.00256A - 0.00022A^2$$

A .. accommodation
(in diopters)

K .. conic constant

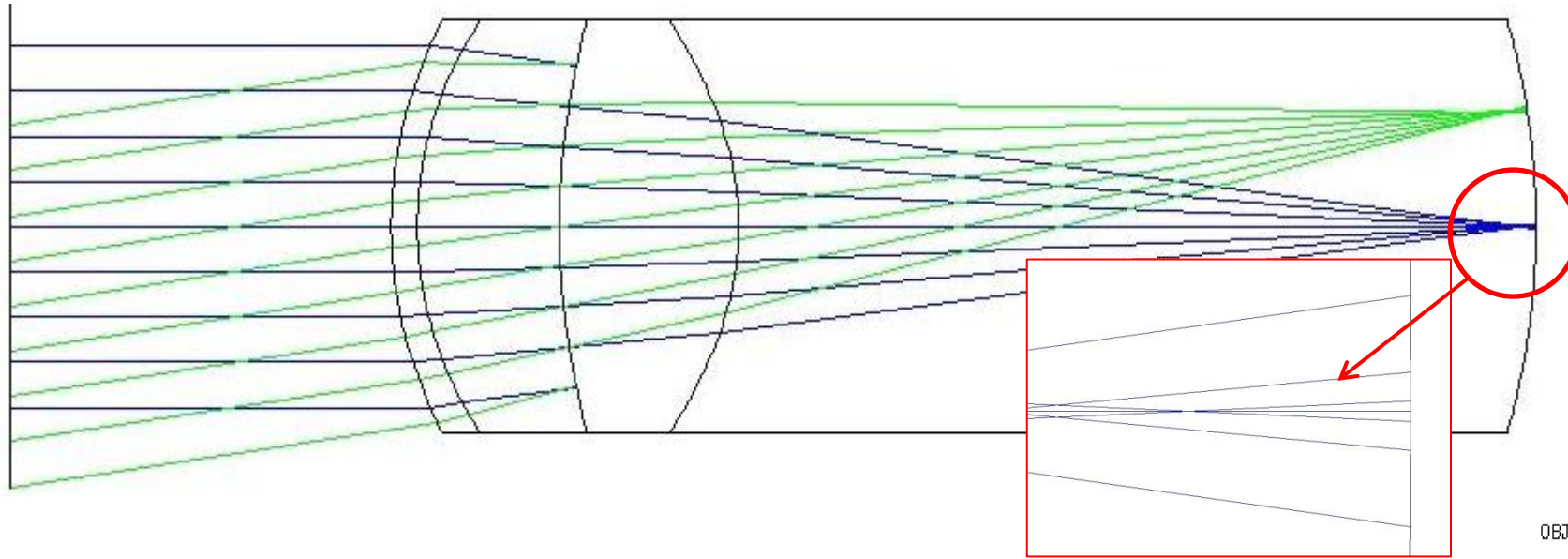
$$z = \frac{r^2 / R}{1 + \sqrt{1 - (K + 1) \frac{r^2}{R^2}}}$$

z = sag of surface
 $r^2 = x^2 + y^2$
R = radius of curvature



$K < -1$	Hyperboloid
$K = -1$	Paraboloid
$-1 < K < 0$	Prolate Spheroid (Ellipsoid)
$K = 0$	Sphere
$K > 0$	Oblate Spheroid (Ellipsoid)

“Arizona eye“ model – trasování paprsků (Zemax)

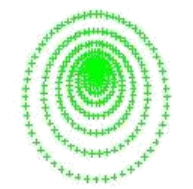
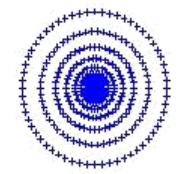


Plocha	Rádus (mm)	Tloušťka (mm)	Conic (-)	Index lomu nD (-)	Abbeovo číslo (-)
Objekt	nekonečno	nekonečno	0	1,0000	
2	7,800	0,550	-0,2500	1,3771	57,1
3	6,500	2,970	-0,2500	1,3374	61,3
STO	12,000	3,767	-7,5187	1,4200	51,9
5	-5,200	16,713	-1,3540	1,3360	61,1
Obraz	-13,400				

OBJ: 0.0000 DEG

OBJ: 8.0000 DEG

2000.00



IMA: 0.000 MM

IMA: 2.289 MM

26.233
44.604

RMS RADIUS
GEO RADIUS

27.476
63.276

Advanced Human Eye Model (AHEM)

