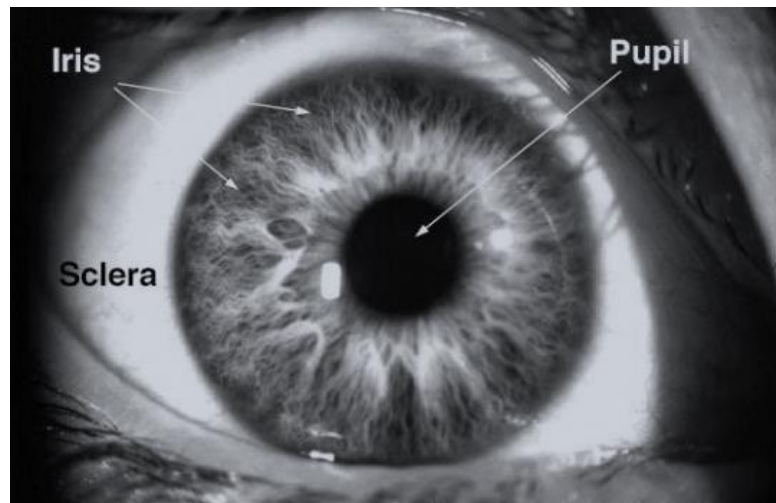


Modely oka

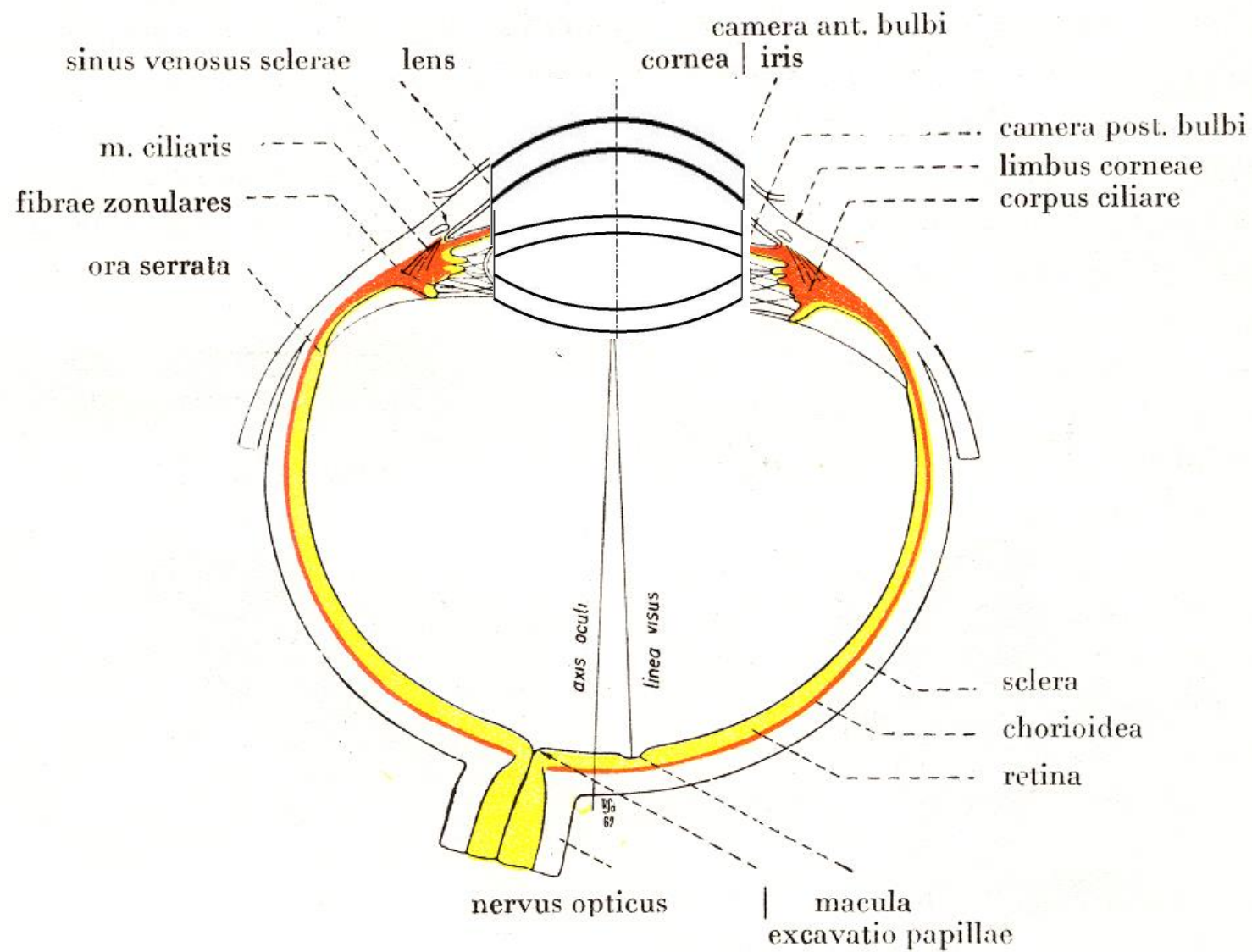


Allvar Gullstrand

- 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 v Carl Zeiss v Jeně na konstrukci oftalmologických optických přístrojů. Důležitý výsledek: Gullstrandův oftalmoskop se štěrbinovým osvětlením pro pozorování očního pozadí z roku 1911. Navrhl 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



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:

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

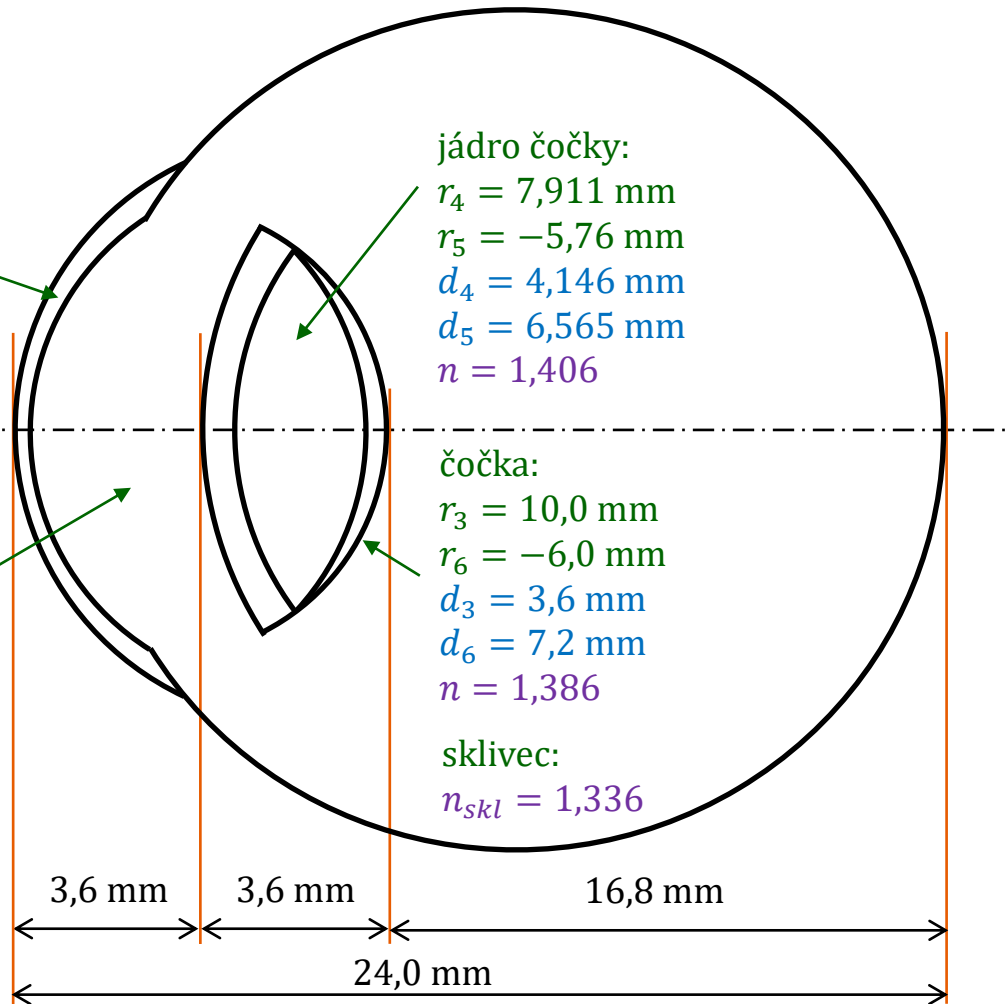
přední komora:

$$n = 1,336$$

r_i ... poloměr plochy

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

n ... index lomu prostředí



Optický systém Gullstrandova oka: 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

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

$$f = \text{mm}$$

$$\varphi'_c = D$$

$$\varphi'_c = D$$

vzdálenosti od 2. plochy

vzdálenosti od 1. plochy

$$s'(F') = \text{mm}$$

$$s(F) = \text{mm}$$

$$s'(H') = \text{mm}$$

$$s(H) = \text{mm}$$

$$s'(N') = \text{mm}$$

$$s(N) = \text{mm}$$

vzdálenosti od 1. plochy rohovky

vzdálenosti od 1. plochy rohovky

$$s_1(F') = \text{mm}$$

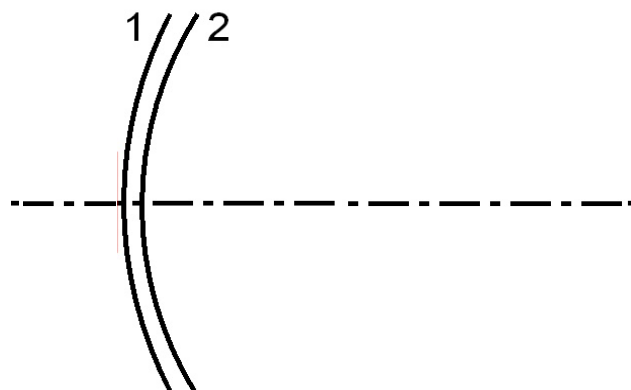
$$s_1(F) = \text{mm}$$

$$s_1(H') = \text{mm}$$

$$s_1(H) = \text{mm}$$

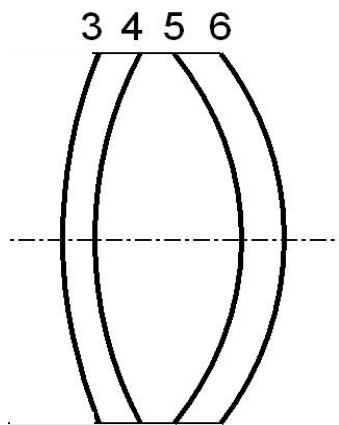
$$s_1(N') = \text{mm}$$

$$s_1(N) = \text{mm}$$



Optický systém Gullstrandova oka: 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

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

$$f = \text{mm}$$

$$\varphi'_c = D$$

$$\varphi_c = D$$

vzdálenosti od 6. plochy

vzdálenosti od 3. plochy

$$s'(F') = \text{mm}$$

$$s(F) = \text{mm}$$

$$s'(H') = \text{mm}$$

$$s(H) = \text{mm}$$

$$s'(N') = \text{mm}$$

$$s(N) = \text{mm}$$

vzdálenosti od 1. plochy rohovky

vzdálenosti od 1. plochy rohovky

$$s_1(F') = \text{mm}$$

$$s_1(F) = \text{mm}$$

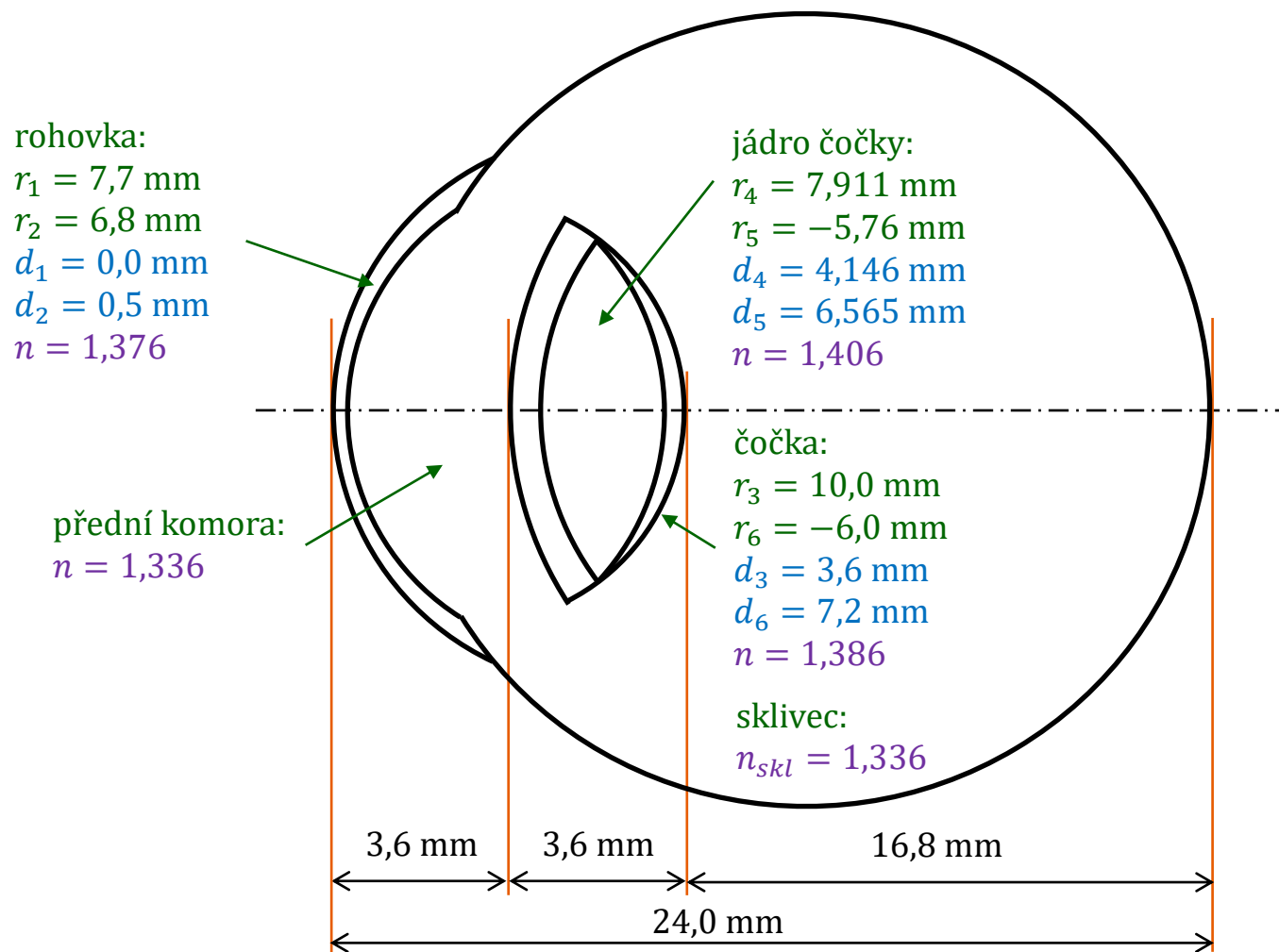
$$s_1(H') = \text{mm}$$

$$s_1(H) = \text{mm}$$

$$s_1(N') = \text{mm}$$

$$s_1(N) = \text{mm}$$

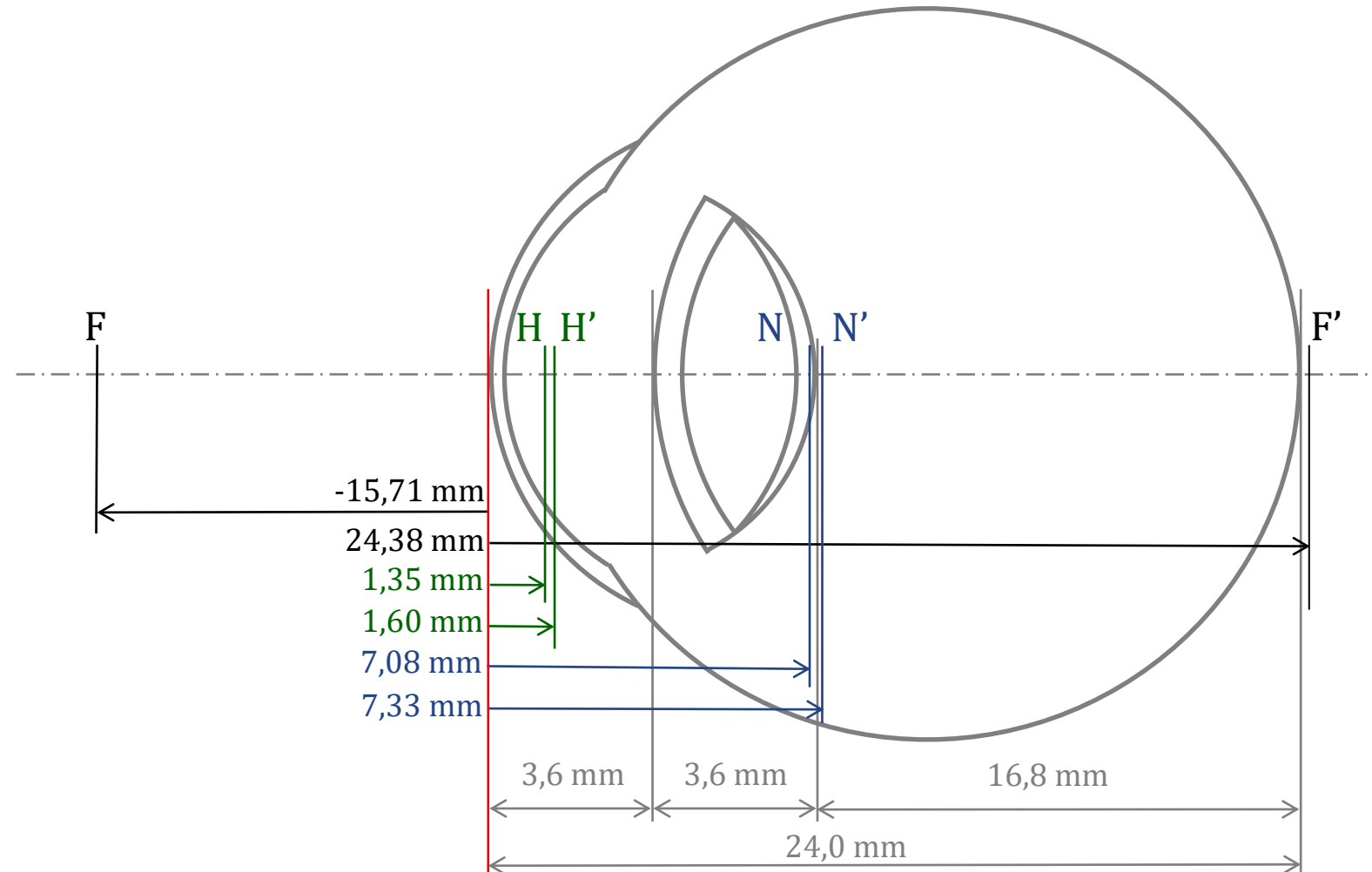
Optický systém celého Gullstrandova oka



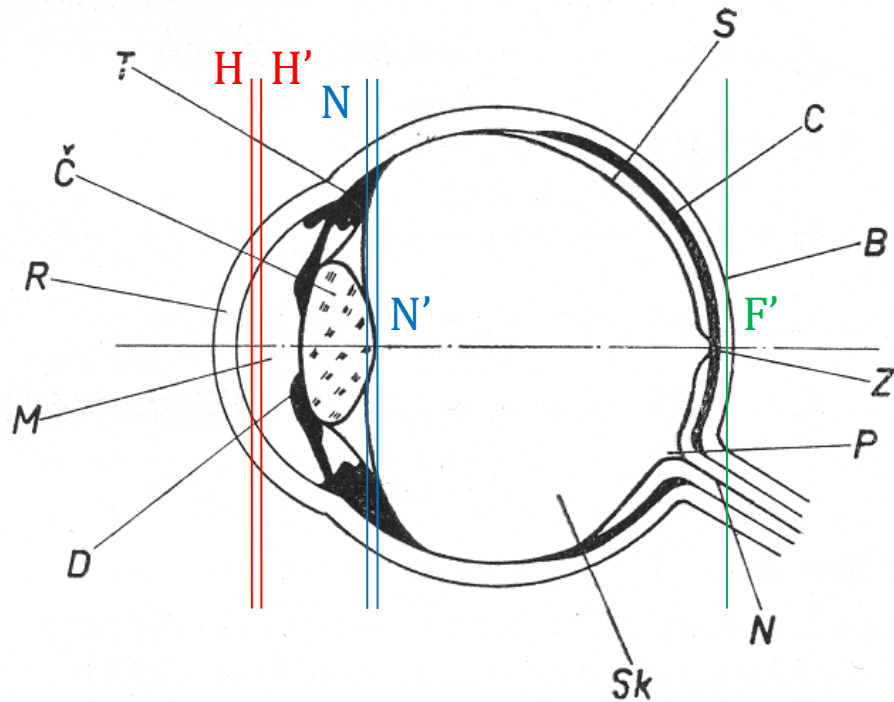
| obrazová ohnisková vzdálenost a celková optická mohutnost | | předmětová ohnisková vzdálenost a celková optická mohutnost | |
|---|----|---|----|
| $f' =$ | mm | $f =$ | mm |
| $\phi'_c =$ | D | $\phi'_c =$ | D |
| vzdálenosti od 6. plochy | | vzdálenosti od 1. plochy | |
| $s'(F') =$ | mm | $s(F) =$ | mm |
| $s'(H') =$ | mm | $s(H) =$ | mm |
| $s'(N') =$ | mm | $s(N) =$ | mm |
| vzdálenosti od 1. plochy rohovky | | vzdálenosti od 1. plochy rohovky | |
| $s_1(F') =$ | mm | $s_1(F) =$ | mm |
| $s_1(H') =$ | mm | $s_1(H) =$ | mm |
| $s_1(N') =$ | mm | $s_1(N) =$ | 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 |



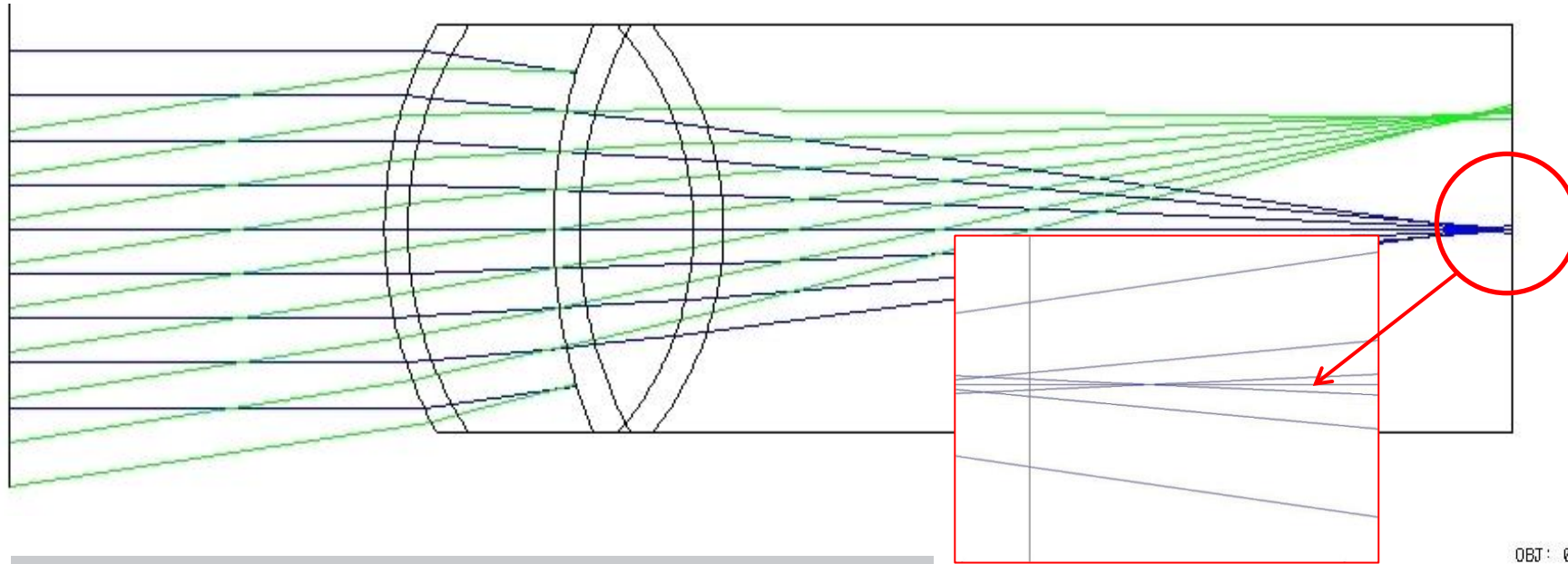
Optický systém Gullstrandova oka



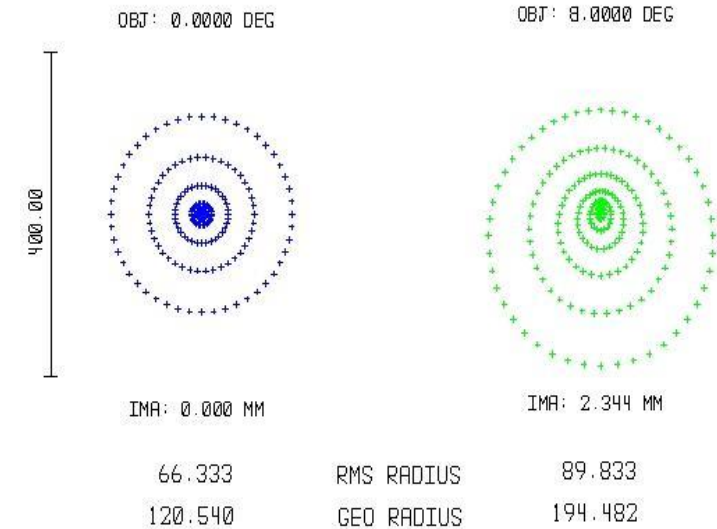
- R - rohovka
- M - přední komora
- D - duhovka
- Č - čočka
- T - ciliární sval
- S - sítnice
- C - cévnatka
- B - bělima
- Z - žlutá skvrna, fovea
- P - papila, slepá skvrna
- N - oční nerv
- Sk - sklivec

| | 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 |

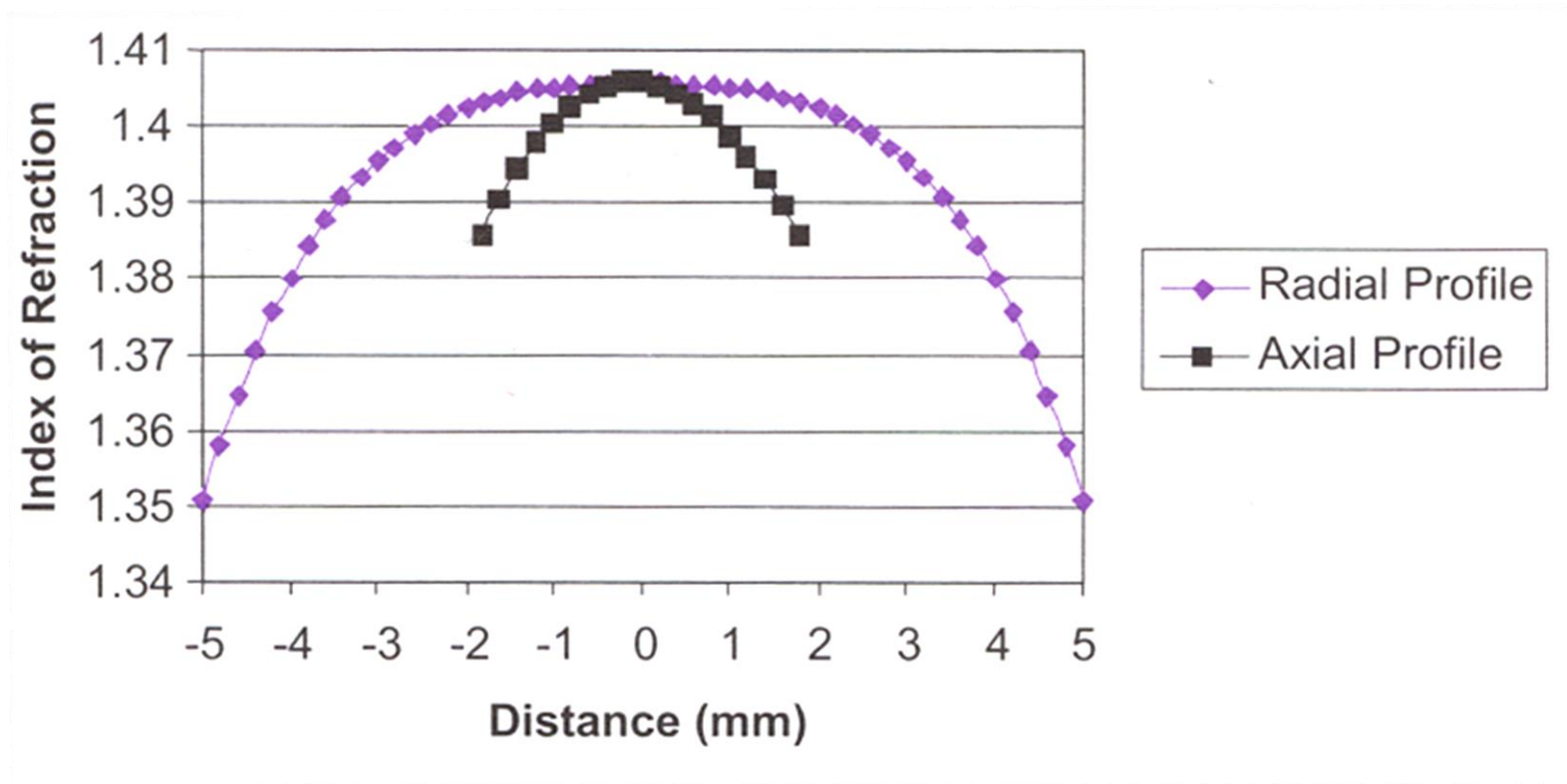


Skutečné hodnoty optických parametrů oka

| 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 |

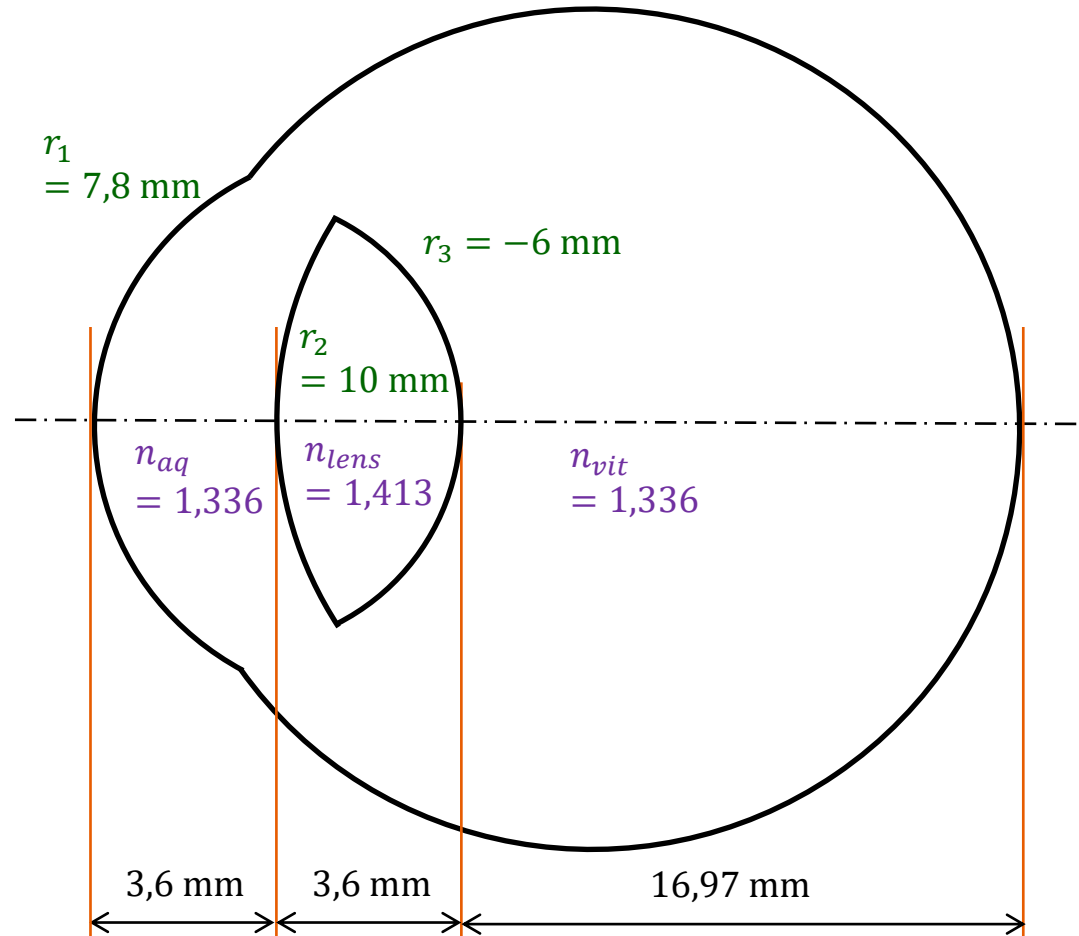
(J. Schwiegerling: Field Guide to Visual and Ophthalmic Optics, SPIE Press, Bellingham 2004)

Skutečný průběh indexu lomu oční čočky



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

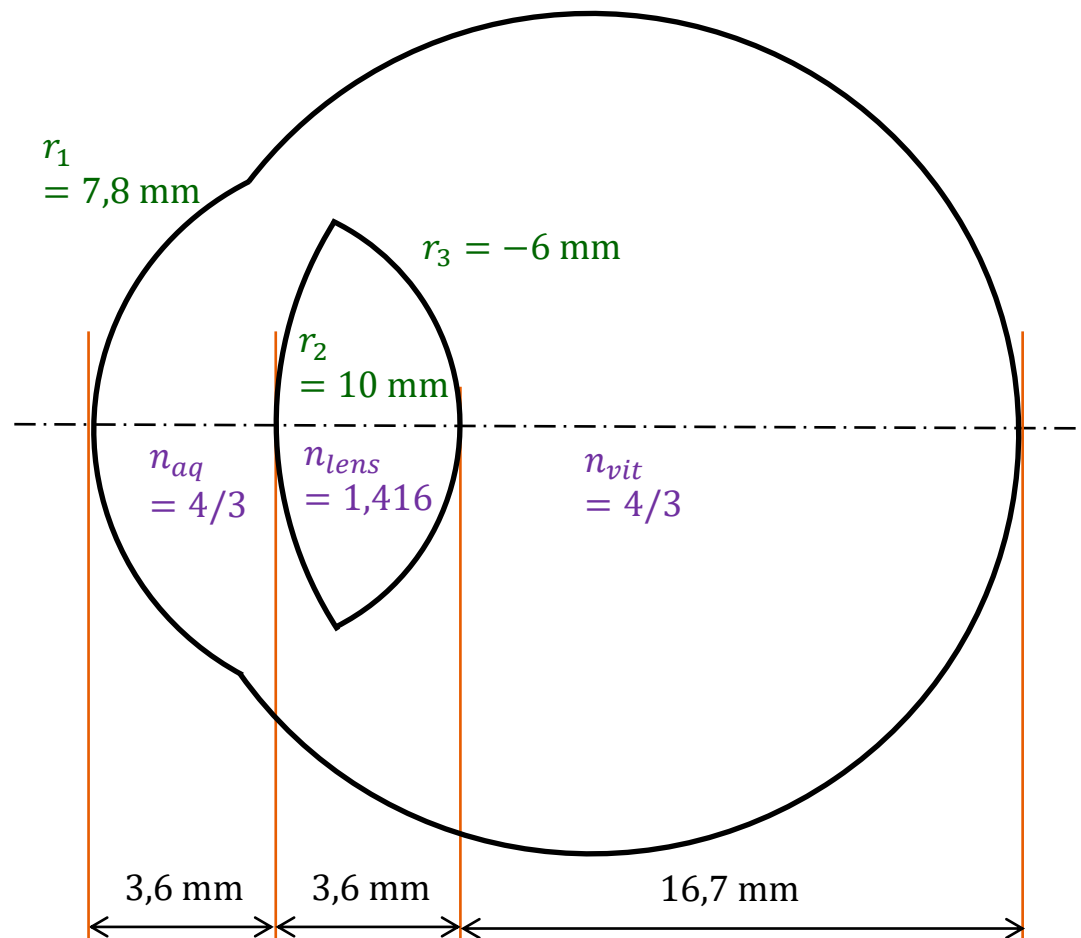
Gullstrandovo zjednodušené schematické oko



- 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 $\varphi'_0 = +59,59 \text{ D}$**

| bod | poloha | Gullstr. přesné oko |
|-----|-----------|---------------------|
| H | 1,47 mm | 1,34 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 |

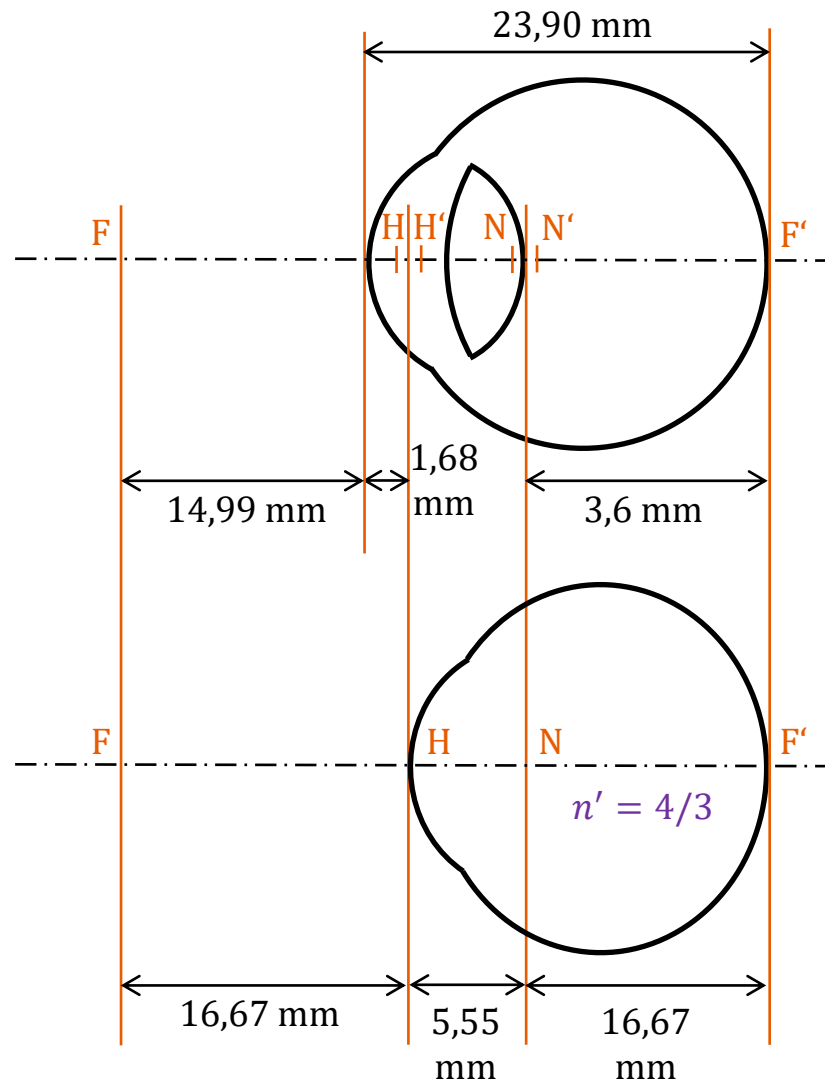
Emsleyovo schematické oko



- 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 | 1,34 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)



- odvodil Emsley z Emsleyova schematického oka (ESO, obrázek 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 $n' = 4/3 = 1,333...$
- mohutnost oka (jediné plochy) je $\varphi'_0 = +60 \text{ D}$
- 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 | | | | | |

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

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

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

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

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

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

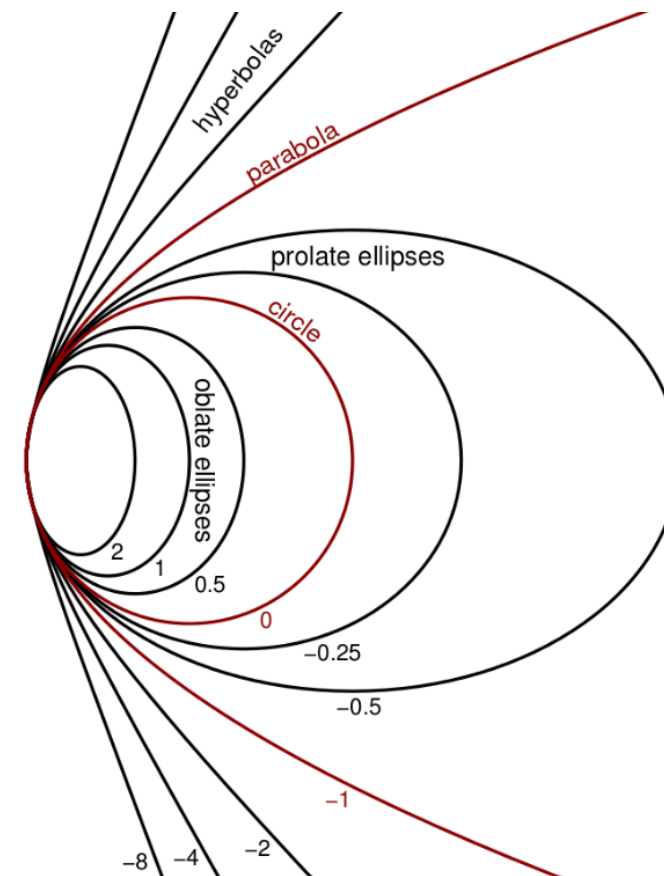
$$n_{lens} = 1.42 + 0.00256A - 0.00022A^2$$

A .. accommodation
(in diopters)

K .. conic constant

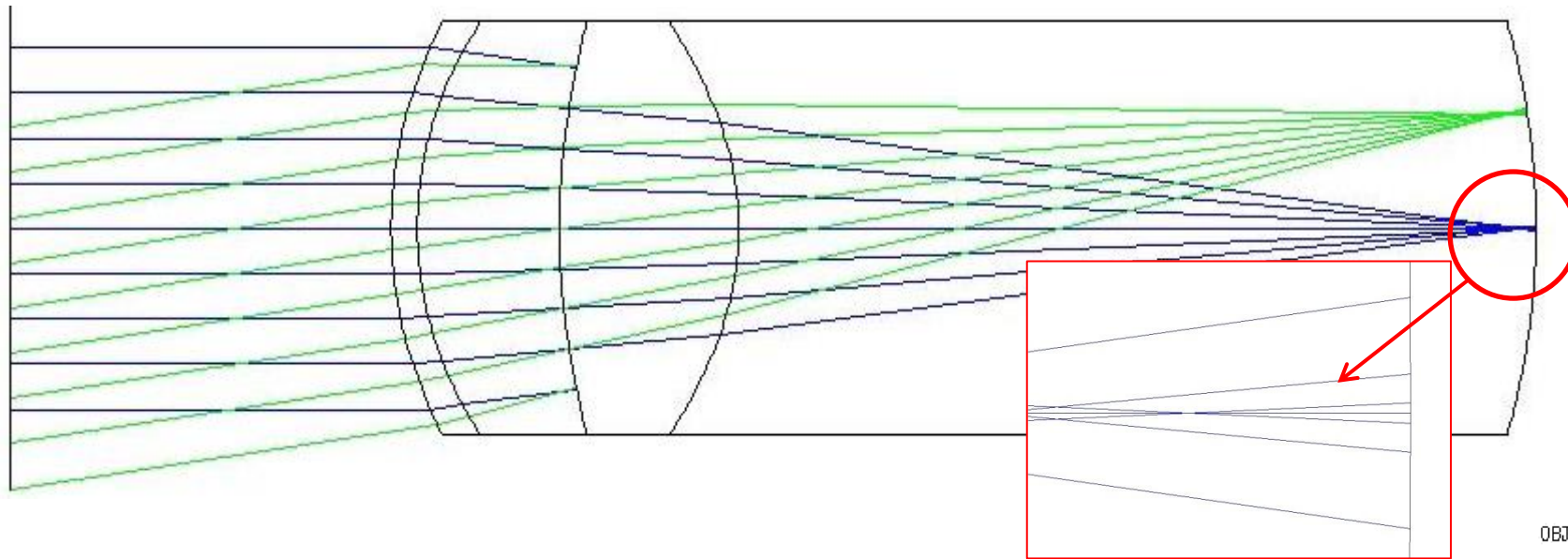
$$z = \frac{r^2 / R}{1 + \sqrt{1 - (K + 1) \frac{r^2}{R^2}}}$$

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)

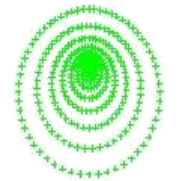
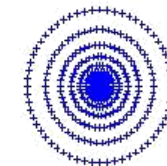


| Plocha | Rádus (mm) | Tloušťka (mm) | Conic (-) | Index lomu nD (-) | Abbeovo číslo (-) |
|--------|------------|---------------|-----------|-------------------|-------------------|
| Objekt | nekonečno | nekonečno | 0 | 1,0000 | |
| 2 | 7,800 | 0,550 | -0,2500 | 1,3771 | 57,1 |
| 3 | 6,500 | 2,970 | -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

RMS RADIUS

27.476

44.604

GEO RADIUS

63.276

Advanced Human Eye Model (AHEM)

