

## Leképezési hibák

- A képképzés leírásánál eddig **paraxiális közelítést** alkalmaztunk, azaz az optikai tengelyhez közeli, azzal kis szöget bezáró sugarakra korlátoztuk a vizsgálatot
- A gyakorlatban szükség van ferdén beeső, nagy nyílásszögű fénynyalábok leképezésére (pl. nagyméretű tárgy, megfelelő fényerő biztosítása miatt, stb.).
- A paraxiális közelítés egy ideális határeset, **valójában** a paraxiális közelítésben vizsgált **ideális** leképezéstől **eltérések** mutatkoznak: u.n. **leképezési hibák** (*aberrációk*) lépnek fel.

Ez azt jelenti, hogy egy adott pontszerű tárgyból kiinduló sugarak a képképző eszközből úgy lépnek ki, hogy a kilépő sugarak (vagy ezek meghosszabbításai) nem szigorúan egy ponton, hanem – az aberráció mértékétől függő kisebb-nagyobb méretű – tartományon haladnak keresztül.

Azaz, a kilépő sugarak a **paraxiális képpont** körül kisebb-nagyobb mértékben **szóródnak**, csökkentve ezzel a kép élességét és az intenzitását.

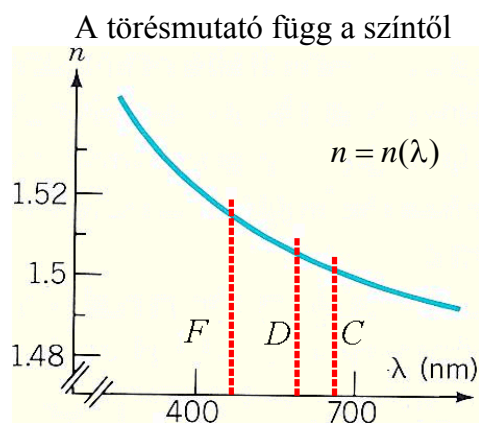
- Egy **jó minőségű** képképző eszköznél (pl. mikroszkóp, távcső, fényképezőgép, vetítő, stb.) a képhibákat bizonyos mértékig **korrigálni** kell, ehhez viszont szükséges az kialakulásuknak és természetüknek az ismerete.

### Leképezési hibák típusai

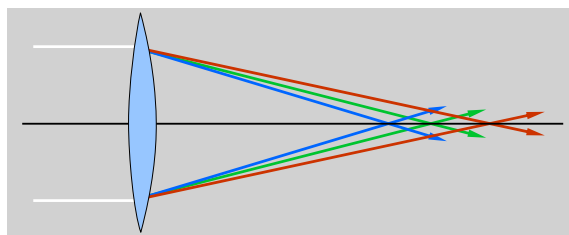
- Színi eltérés (kromatikus aberráció).
- Monokromatikus képhibák.
- Főtengelyhez közeli pontok leképezésénél is fellépő hibák.
- Főtengelytől távoli pontok leképezésénél fellépő hibák.

### Főtengelyhez közeli pontok leképezésénél is fellépő hibák

#### Kromatikus aberráció

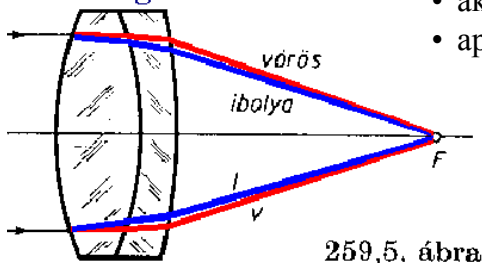


$$\frac{1}{f} = (n - 1) \cdot \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \rightarrow f = f(\lambda)$$



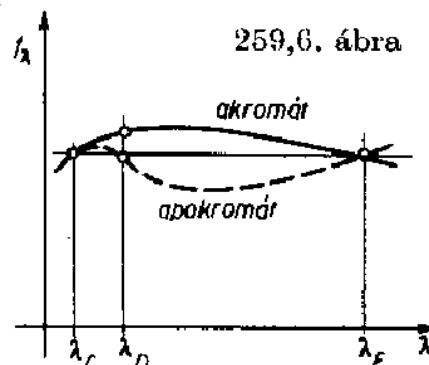
- Fehér fényel kivilágított tárgy különböző színű képei különböző helyen és nagyságban keletkeznek.
- **Tükröknél ez a jelenség nem lép fel!**

#### korona-, flint üveg



#### Kiküszöbölése és csökkentése

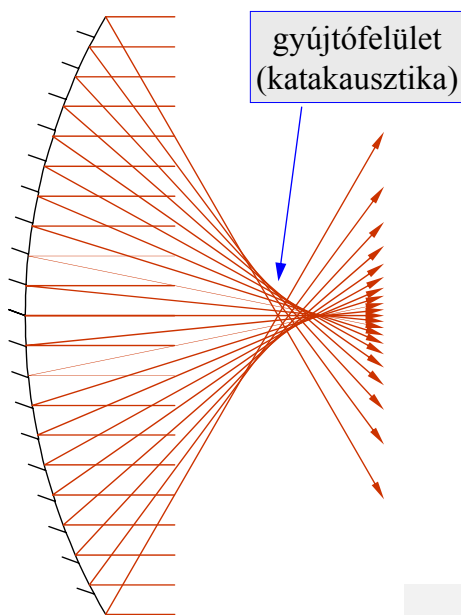
- tükrök alkalmazása
- akromát alkalmazása
- apokromát alkalmazása



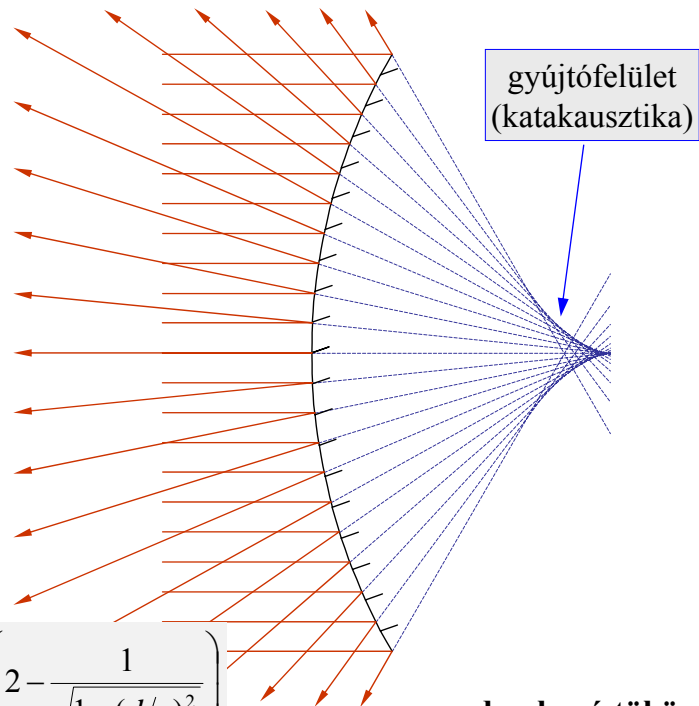
## Szférikus aberráció

- Törésen és visszaverődésen alapuló leképező eszközöknél felléphet!
- A centrált (hengerszimmetrikus) képalkotó eszköz különböző sugarú zónái más helyen hozzák létre a képet.

### Gömbtükrök szférikus aberrációja



homorú tükör

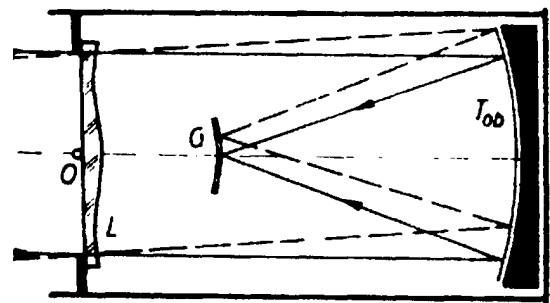


domború tükör

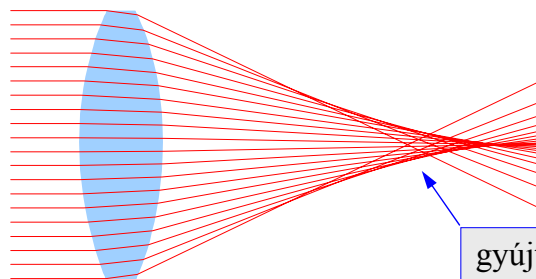
$$f = \frac{r}{2} \cdot \left( 2 - \frac{1}{\sqrt{1 - (d/r)^2}} \right)$$

### Kiküszöbölése és csökkentése tükrök esetén

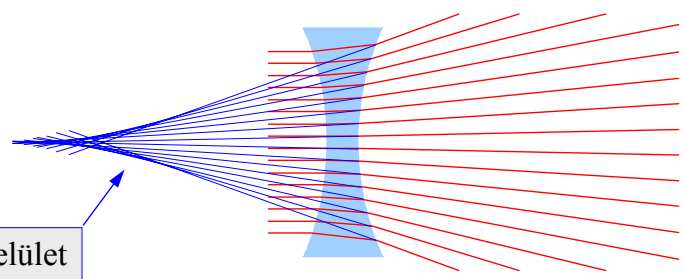
- diafragmával a szélső sugarak távoltartásával
- távoli tárgyak esetén parabola tükör használata
- Schmidt-féle korrektoreszköz alkalmazása
- adaptív optika alkalmazása (drága!)



### Gömbi lencsék szférikus aberrációja



gyűjtőlencse



szórólencse

### Kiküszöbölése és csökkentése lencsék esetén

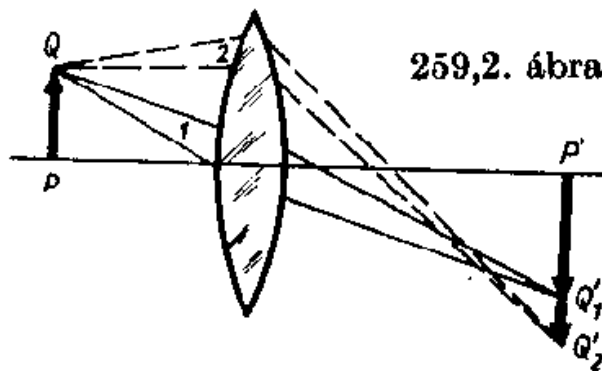
- A hiba mértéke függ a lencse alakjától. A domború-homorú lencsére a legnagyobb.
- A lencsét célszerű úgy beállítani, hogy a törés a két felületen lehetőleg azonos mértékű legyen (minimális eltérés).
- diafragmával a szélső sugarak távoltartásával.
- lencserendszer alkalmazásával

- A szférikus aberráció az optikai tengelytől távoli pontok leképezésénél is fellép.
- Ha a tengelyen lévő  $P$  pontra megszüntettük a gömbi hibát,  $Q$  képe még nem feltétlenül éles!
- **Abbe-féle szinuszfeltétel**

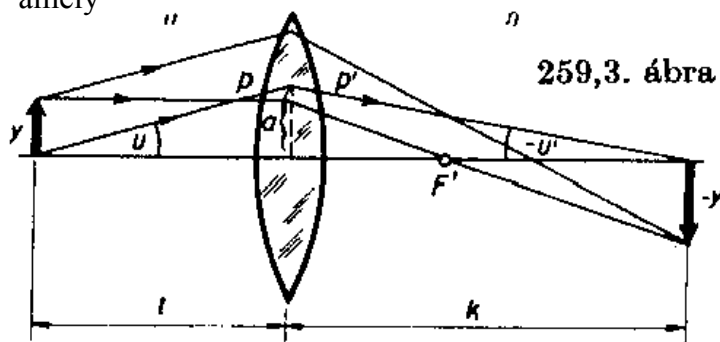
A részletes vizsgálat azt mutatja, hogy a kicsiny  $PQ$  felület nagy nyílásszögű nyalábbal való éles leképezése például olyan képalkotó rendszerrel lehetséges, amely teljesíti az

$$y \cdot n \cdot \sin u = y' \cdot n' \cdot \sin u'$$

feltételt, ahol  $y$  a tárgy,  $y'$  a kép mérete,  $n$  és  $u$ , valamint  $n'$  és  $u'$  rendre a tárgy- és a képoldali törésmutatók és a leképező nyalábok nyílásszögei.



259,2. ábra



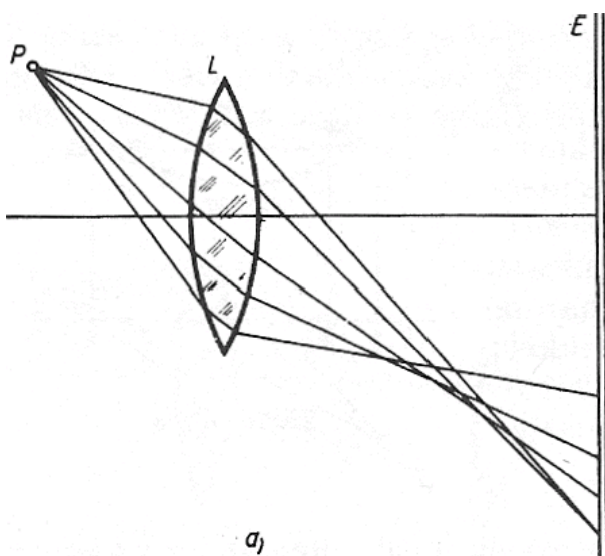
259,3. ábra

- A szinuszfeltételnek eleget tevő leképező rendszer lencserendszerek megvalósítható, de csak korlátozott mértékben.
- Csak a tervezésnél figyelembe vett kép- és tárgytávolságokra teljesíthető.

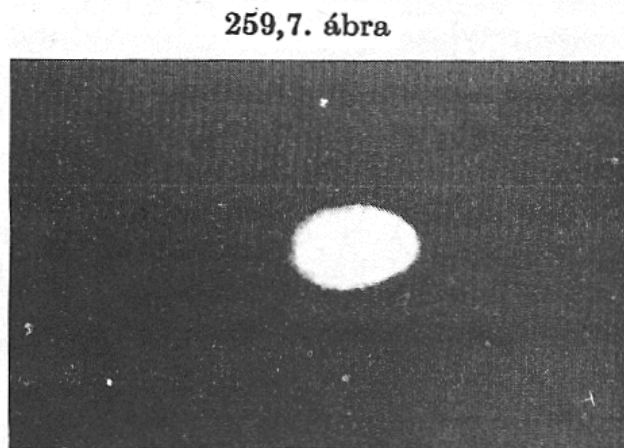
## Főtengelytől távoli pontok leképezésénél fellépő hibák

### Kóma (üstököshiba)

- Ha leképező rendszerre erősen ferde és nagy nyílásszögű nyaláb esik, az ernyőn pontszerű kép helyett üstököscsóvához hasonló fényfoltot látunk.
- Lencsék és tükrök esetén is fellép.



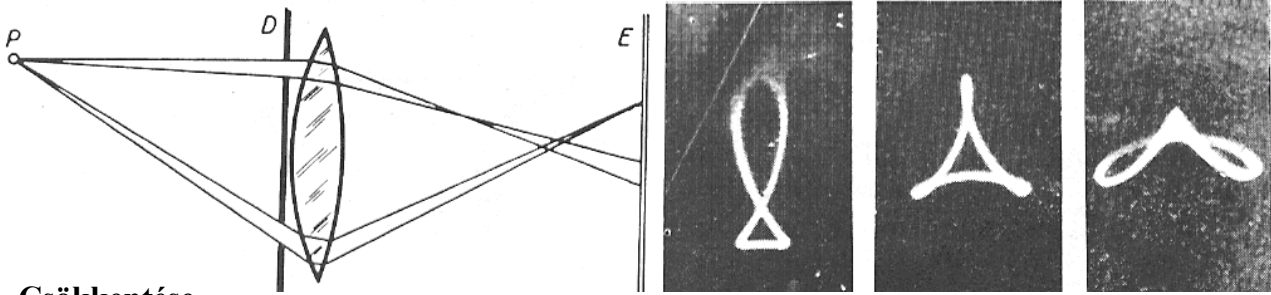
a)



b)

259,7. ábra

- Ha gyűrű alakú nyílással (diafragmával) csak a szélső sugarakat, kúppalástszerű sugarakat engedjük a lencsére, az ernyőn még közelítőleg sem kapunk jól definiált képet.
- Az ernyő helyzetétől függően a következő görbék jelennek meg.

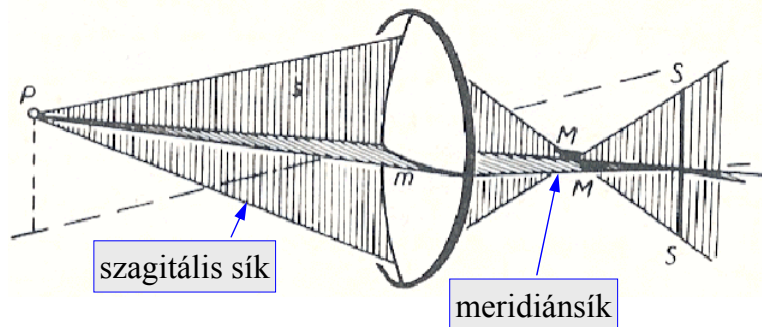


### Csökkentése

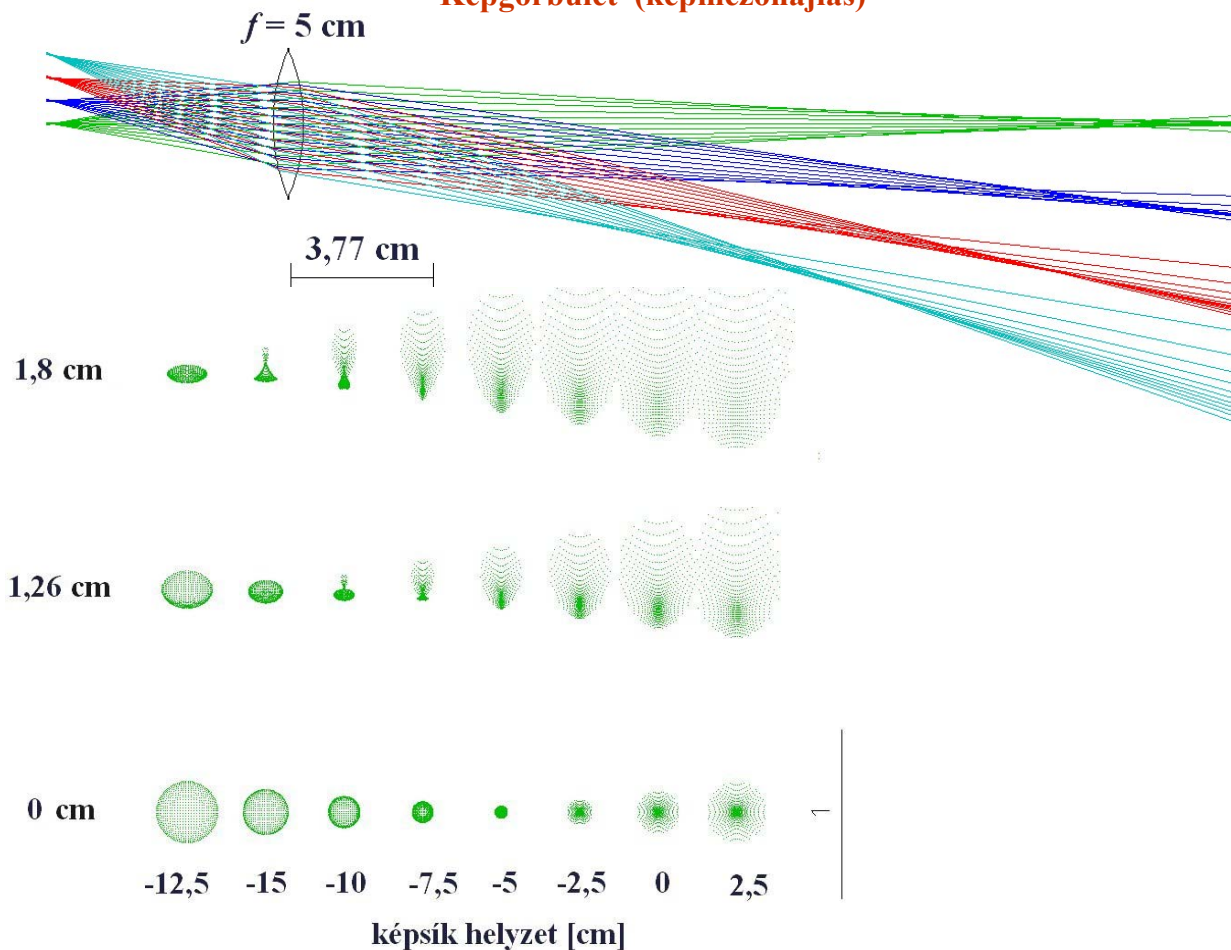
- A szélső sugarak visszatartásával, nem túlságosan ferde nyalábok alkalmazásával.
- Az Abbe-féle szinuszfeltételnek eleget tevő lencserendszerrel.
- Schmidt-féle korrektorlemez alkalmazásával.

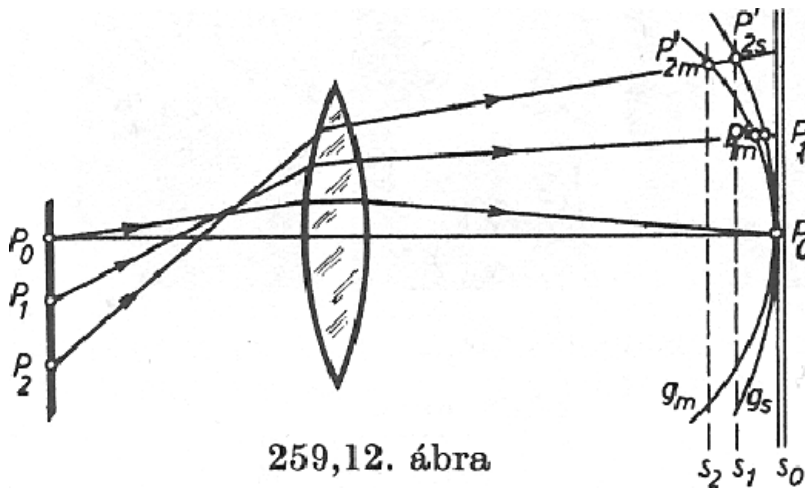
### Asztigmatizmus

- Pontszerű tárgynak két egymásra merőleges vonal a képe.
- Ferdén beeső akármilyen keskeny fénynyaláb esetén is fellép.
- A képhiba megjelenését a henger-szimmetria megszűnése okozza.
- A két vonal távolsága az u.n. asztigmias különbség.



### Képgörbület (képmezőhajlás)





259,12. ábra

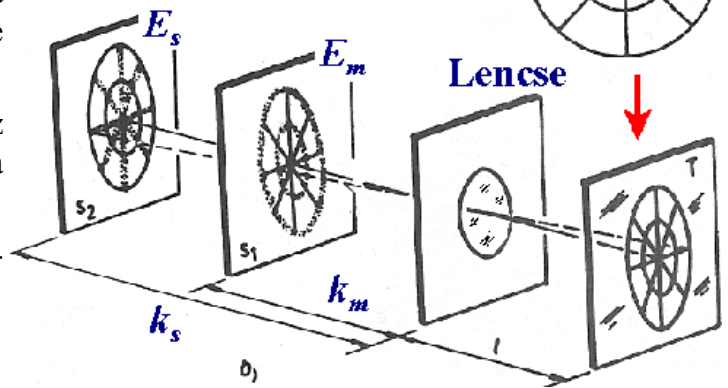
- Az asztigmatizmussal szorosan összefüggő hiba.
- A meridionális és a szagitális képvonalak más-más (közelítőleg gömb-) felületen vannak.

**Kísérleti szemléltetése**



259,13. ábra

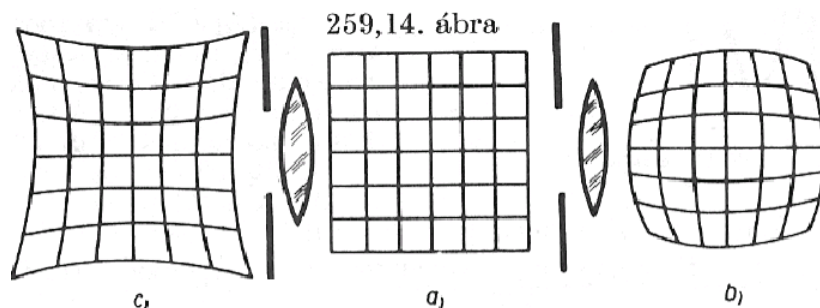
- A képgörbület miatt az ernyőt mozgatva a kép belseje, közepe vagy a széle élesebb.
- Az asztigmatizmus miatt az  $E_s$  és az  $E_m$  helyzetek egyikében a sugarak, a másikában a körök az élesek.
- **Csökkentése** lencserendszer alkalmazásával lehetséges.



- Petzval-féle feltétel: 
$$\sum_i \frac{1}{n_i \cdot f_i} = 0$$

**Torzítás**

- Az oldalnagyítás a kép különböző részein eltérő.

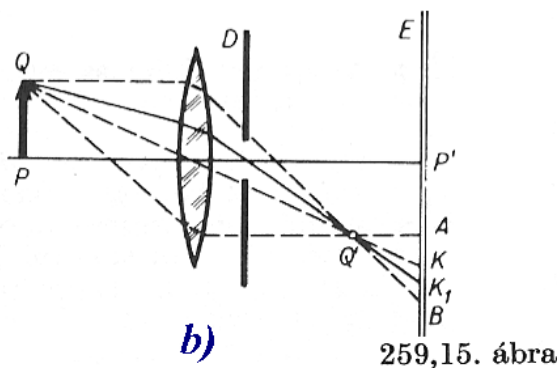


259,14. ábra

**Párna alakú torzítás**

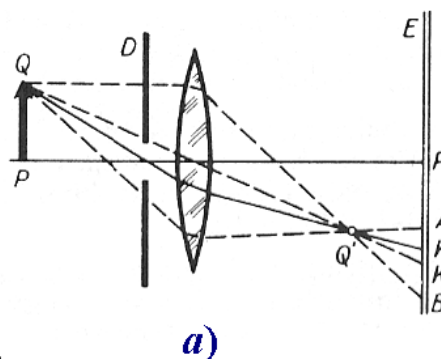
**Hordó alakú torzítás**

- Függ a lencse alakjától, és a – kép élességét általában javító – nyílások helyzetétől.



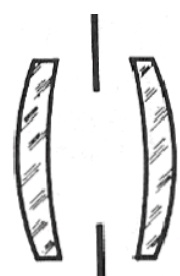
b)

259,15. ábra



a)

**Megszüntetése: Ortoszkopikus objektív**



259,16. ábra

## Vizuális optikai eszközök. Fényképezőgép

### Vizuális optikai eszközök nagyítása

#### Mitől függ a látott tárgyak látszólagos nagysága?

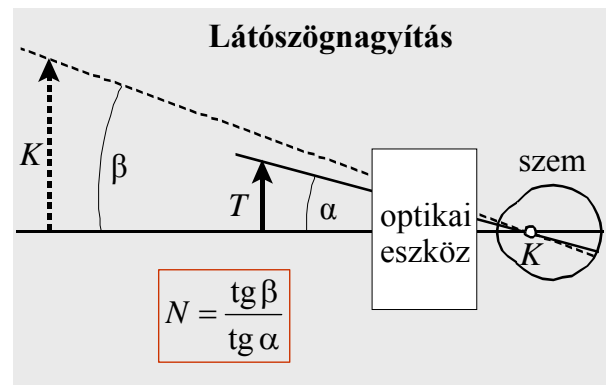
- A látszólagos nagyság nyilván attól függ, hogy a retinán mekkora kép keletkezik.
- Ezt pedig a **látószög**, vagyis az a szög határozza meg, amekkora szög alatt látjuk a tárgyat.
- Vagyis, **a tárgyak látszólagos nagyságát a látószögük határozza meg!**

#### Mikor bontja fel a szemünk egy tárgy részletét?

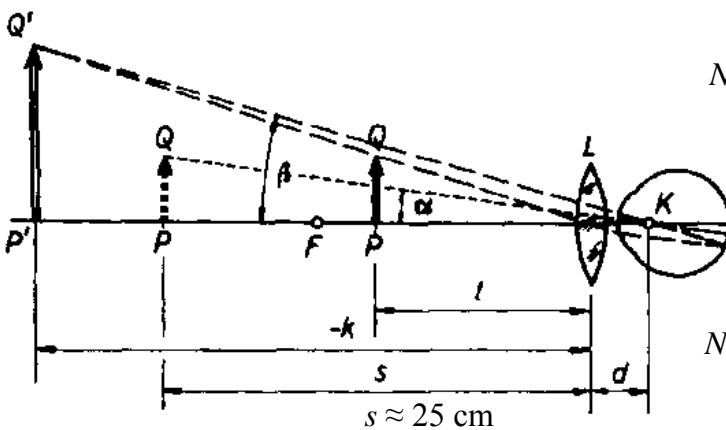
- Szemünk akkor képes két pontot még **megkülönböztetni**, azaz **feloldani**, ha a látószögük nagyobb, mint 1 ívperc (0,3 mrad).
- A vizuális optikai eszközök feladata a tárgy szabad szemmel nem felbontott részleteinek a láthatóvá (felismerhetővé) tétele.

#### Hogyan növelhetjük meg a látószöget?

- Közelebb megyünk. A tisztalátás távolságánál (kb. 25 cm-nél) nem érdemes közelebb menni!
- Ha ez nem lehetséges **távcsövet** használunk.
- Ha megközelíthetjük a tárgyat, akkor is gyakran előfordul, hogy a látószög a tisztalátás távolságában is a felbontás határa alatt marad.
- Ekkor **nagyító** és **mikroszkópot** alkalmazhatunk a látószög növelésére.



### Nagyító



$$N = \frac{\text{tg } \beta}{\text{tg } \alpha} = \frac{\overline{P'Q'}}{-k+d} \bigg/ \frac{\overline{PQ}}{s+d} = \frac{\overline{P'Q'}}{\overline{PQ}} \cdot \frac{s+d}{-k+d}$$

szokásos használatánál  $d = 0$

$$N = \frac{\overline{P'Q'}}{\overline{PQ}} \cdot \frac{s}{-k} = \frac{-k}{t} \cdot \frac{s}{-k} = \frac{s}{t} = s \cdot \left( \frac{1}{f} - \frac{1}{k} \right)$$

**A szem akkomodációjának megfelelően a nagyító és a tárgy elhelyezésének módjai:**

- A kép a tiszta látás távolságában keletkezik:  $-k = s$ .
- A kép végtelenben keletkezik:  $k = \infty$ .

(a)  $N = \frac{s}{f} + 1$

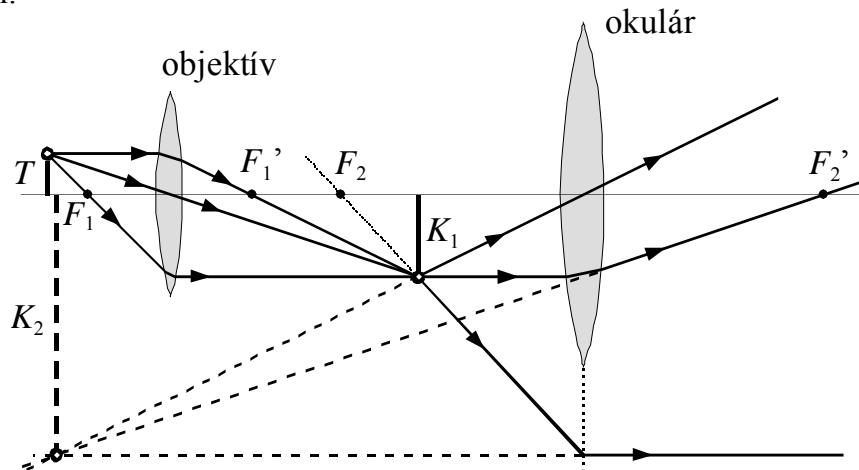
(b)  $N = \frac{s}{f}$

20-30 szorosnál nagyobb látószög nagyításhoz már célszerű a nagyítást több lépésben végezni. Ezt valósítja meg a **mikroszkóp!**

## Mikroszkóp

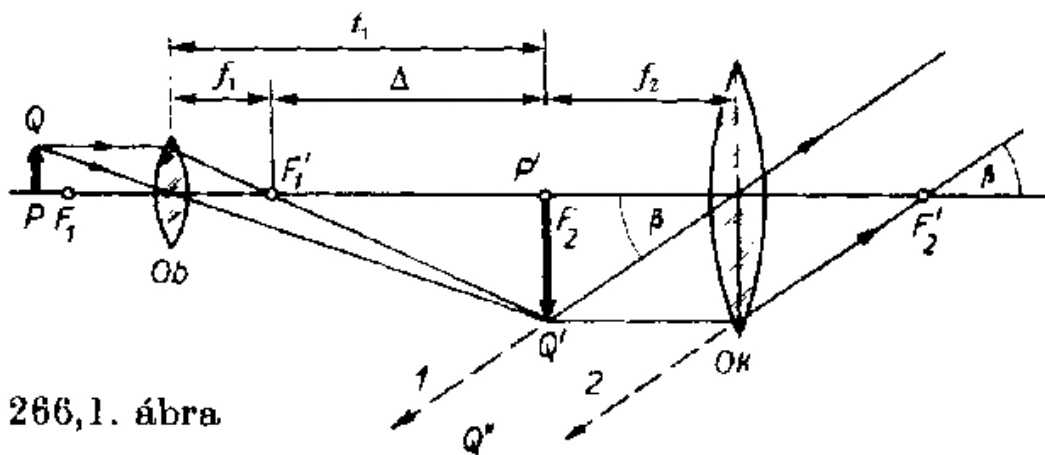
### Elvi felépítés és képképzés

- Két – a leképezési hibákra korrigált – gyűjtőlencse-rendszerből, az **objektív**ből és **okulár**ből áll.



- A tárgyat úgy helyezik el, hogy az objektív a tárgyról fordított állású nagyított képet állít elő. Ehhez a tárgyat a fókuszpont közelében az objektívtől kissé távolabb kell tenni, azaz tárgy-távolság kissé nagyobb a fókusz-távolságnál.
- Az objektív által előállított képet az okulárral, mint nagyítóval szemléljük. Ehhez az okulárt úgy kell beállítani, hogy az objektív képe az okulár fókusz-síkjában, vagy annál az okulárhoz közelebb álljon elő.

### A mikroszkóp látószög nagyítása



266,1. ábra

$$N = \frac{\text{tg} \beta}{\text{tg} \alpha} = \frac{\overline{P'Q'}/f_2}{\overline{PQ}/s} = \frac{\overline{P'Q'}}{\overline{PQ}} \cdot \frac{s}{f_2} = |N_{ob}| \cdot \frac{s}{f_2}, \text{ ahol } s \text{ a tiszta látás távolsága, } N_{ob} \text{ az objektív oldalnagyítása.}$$

$$\left. \begin{aligned} k_1 &= f_1 + \Delta \\ \frac{1}{f_1} &= \frac{1}{k_1} + \frac{1}{t_1} \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{k_1}{t_1} = \frac{k_1}{f_1} - 1 = \frac{k_1 - f_1}{f_1} = \frac{\Delta}{f_1} \rightarrow N_{ob} = -\frac{k_1}{t_1} = -\frac{\Delta}{f_1}$$

$$N = \frac{\Delta \cdot s}{f_1 \cdot f_2}$$

## Távcsövek

- Lencsés távcsövek (refraktorok)
- Tükrös távcsövek (reflektorok)

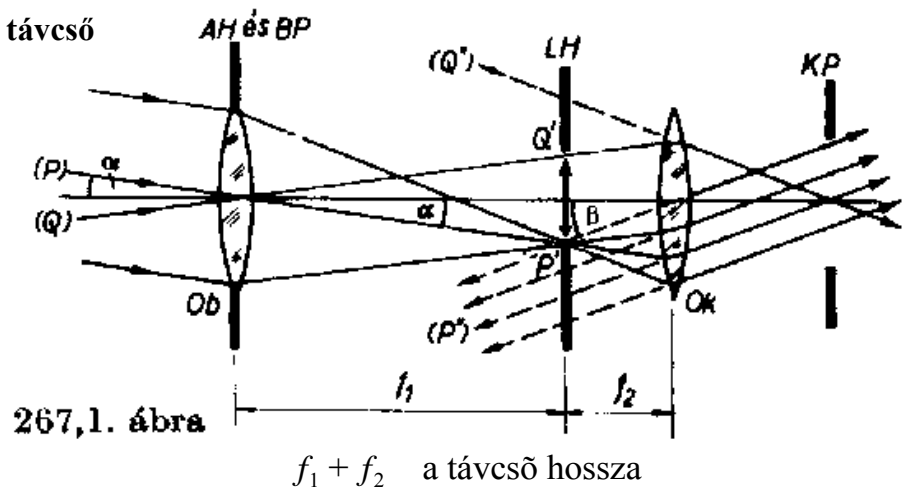
### Lencsés távcsövek

Kepler, 1611.

#### Kepler-féle (csillagászati) távcső

$$N = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha} = \frac{P'Q'/2}{f_2} \bigg/ \frac{P'Q'/2}{f_1} = \frac{f_1}{f_2}$$

$$N = \frac{f_1}{f_2}$$

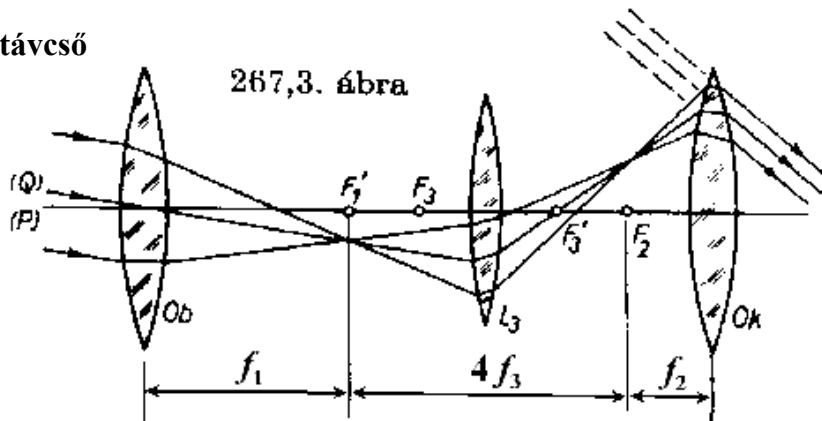


Belátható, hogy a távcső

- kiterjedt tárgy megfigyelésénél csökkenti a tárgy fényességét,
- pontszerű tárgy esetén viszont közel  $N^2$  szeresére növekszik a megfigyelt fényesség!

A csillagászati távcső fordított képet ad, így földi használatra csak képfordítással alkalmas!

#### Földi távcső

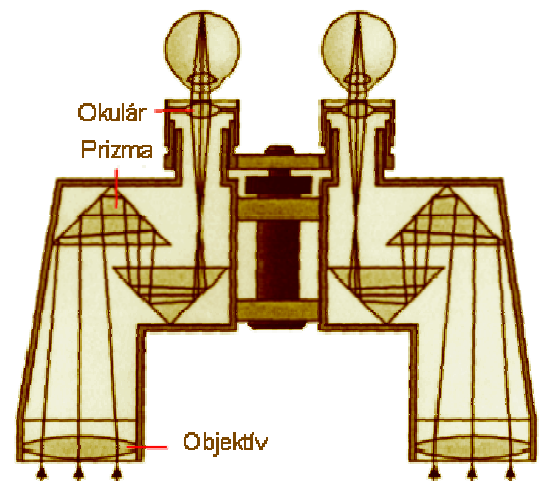
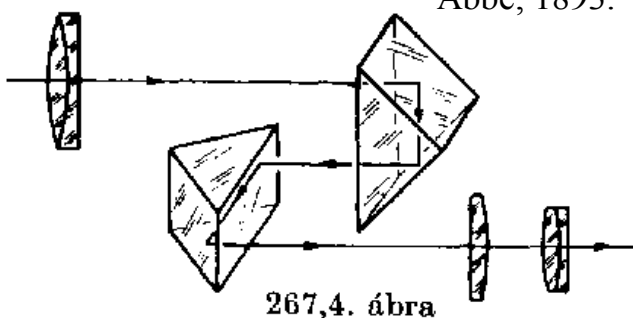


Kepler, 1611.

$$N = \frac{f_1}{f_2}$$

#### Prizmás távcső

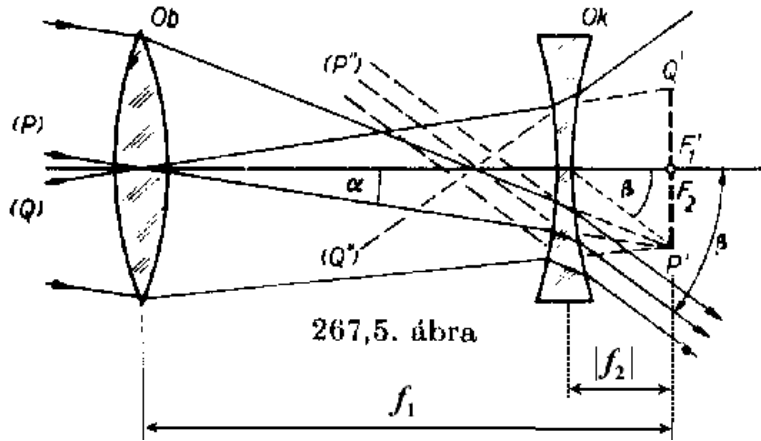
Porro, 1850.  
Abbe, 1893.





**Galilei-féle (hollandi) távcső**

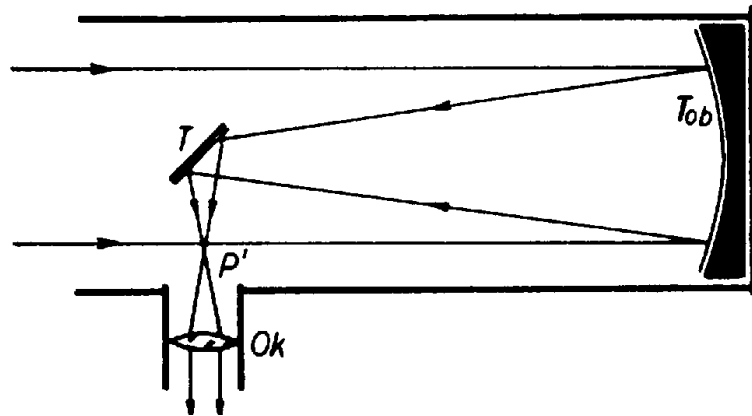
Lipperhey, 1608.  
Galilei, 1609.



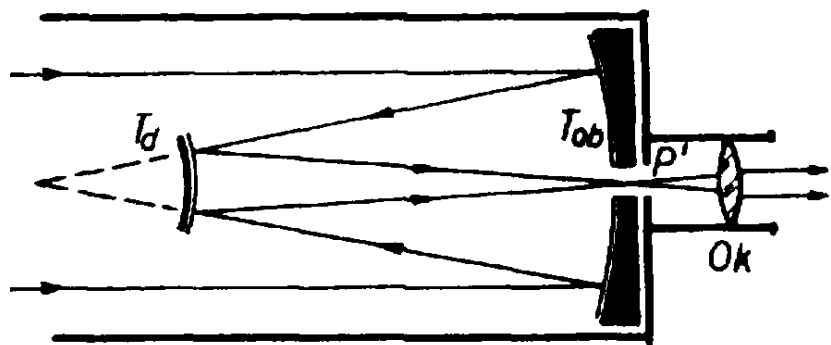
$$N = \frac{f_1}{|f_2|}$$

**Tükrös távcsövek**

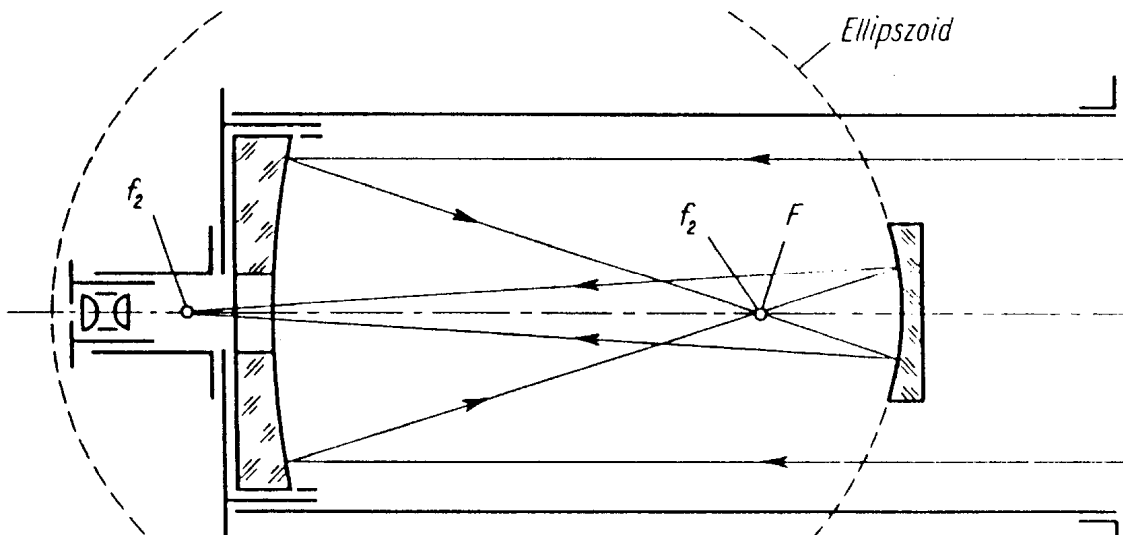
**Newton-féle távcső (1671)**

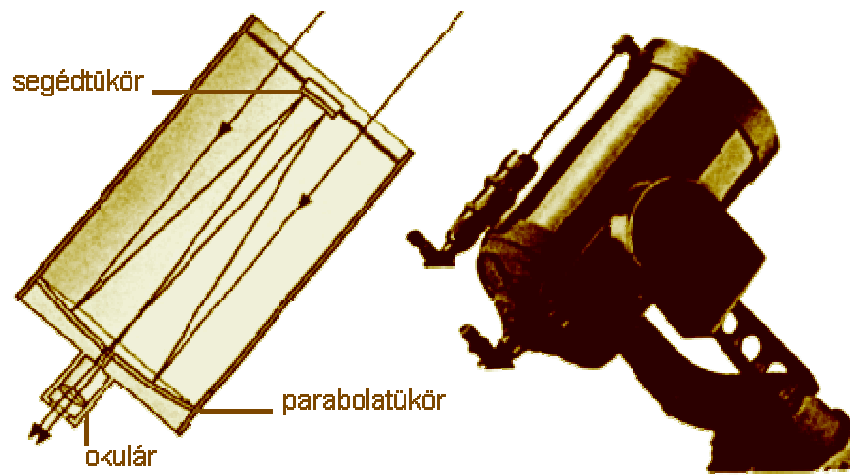


**Cassegrain-féle elrendezés (1671)**



**Gregory-féle elrendezés**





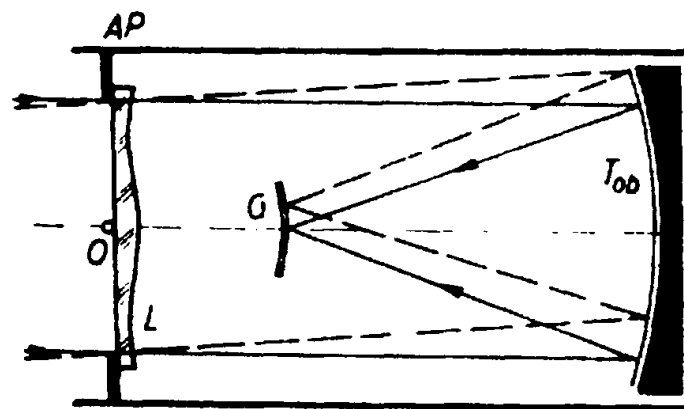
**A tükrös távcsövek előnyei:**

- mentes színi hibától.
- parabolikus tükörnél mentes a gömbi hibától (távoli tárgyakra).
- nagy átmérőnél is megfelelő minőségű tükör készíthető.

**A tükrös távcsövek hátrányai:**

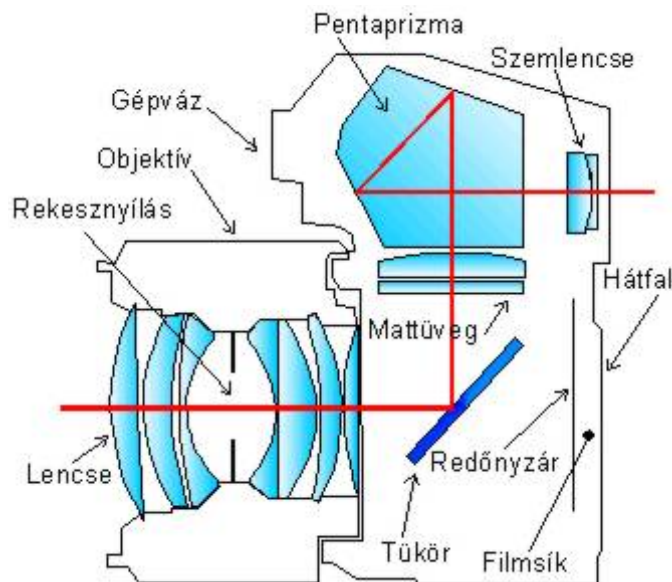
- a főtengelytől távoli tárgyakra nagy az üstökös hiba és az asztigmatizmus, így éles képet csak a főtengely néhány ívperces környezetében kapunk.

**A leképezési hibák csökkentésére korrekciós lemezt alkalmaznak.**



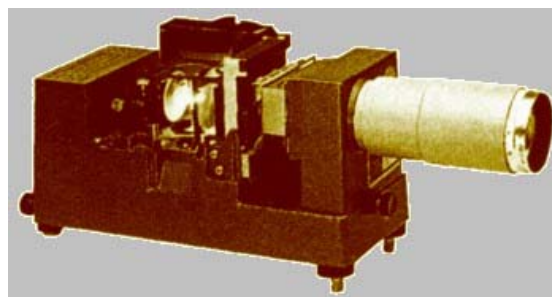
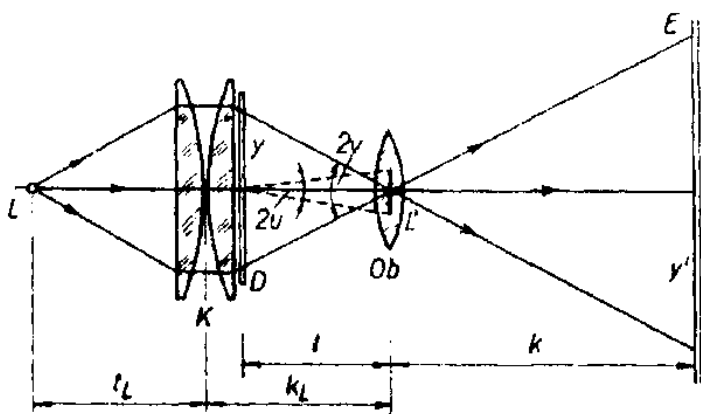
## Fényképezőgép

- Objektív **fényereje** (nyílászó):  $d/f$
- $1: x$  alakban szokás megadni, ahol  $x$  a **rekeszszám**.
- A kép **megvilágítása** a fényerő négyzetével arányos:
- Ezért az **expozíciós idő** hozzávetőlegesen a fényerő négyzetével fordítva arányos.
- A **mélységélesség** a rekesz szűkítésével nő.



Egy modern digitális változat

## Diavetítő



A kép az ernyőn akkor a legvilágosabb, amikor a filmet megvilágító összes fénysugár részt vesz a leképezésben:

$$\frac{1}{t_L} + \frac{1}{k_L} = \frac{1}{f_K}$$

A kép élességének feltétele:

$$\frac{1}{t} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f}$$

# Írásvetítő

