

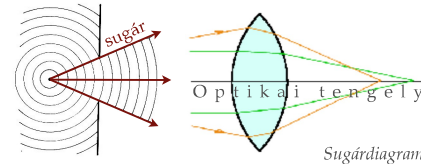
# HULLÁMOPTIKA

KELLERMAYER MIKLÓS

## GEOMETRIAI ÉS HULLÁMOPTIKA

### Geometriai optika

Ha a fény a hullámhossznál sokkal nagyobb résen halad át, a hullámfront (fázis) terjedése egy egyenessé ("sugár") egyszerűsíthető.

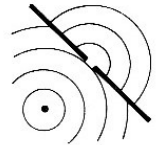


- Optikai nyaláb ("fényszugár"): absztrakció, matematikai egyenes.
- A nyílak az energiaterjedés irányát jelölik.
- Optikai tengely: az optikai elemek (pl. lencsék) középpontján áthaladó egyenes.
- Reverzibilitás elve: az energiaterjedés (nyílak) iránya megfordítható.

### Hullámoptika

Ha a fény a hullámhossznál kisebb vagy azzal összemérhető résen halad át, a hullámtermészetet figyelembe kell venni.

Bizonyos jelenségek nem magyarázhatók a geometriai optikával!



A fény mint hullám fontos paraméterei:

- Periódusidő ( $T$ )
- Frekvencia ( $f=1/T$ )
- Terjedési sebesség ( $v, c$ )
- Hullámhossz ( $\lambda$ ): egy  $T$  alatt megtett távolság:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}$$

A fény terjedési sebessége vákuumban:  $c=2,99792458 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$

Optikailag sűrűbb közegben a fény terjedési sebessége csökken ( $c_1$ ). Ez kifejezhető az abszolút törésmutatóval ( $n_1$ ):

$$n_1 = \frac{c}{c_1}$$

## A hullámok forrása: rezgőmozgás

Példa:  
Tacoma Narrows Bridge



Tacoma Narrows Bridge ("Galopin' Gertie")  
("Gertie the Dinosaur") (1914), rajzfilm, Winsor McCay)  
Átadás: 1940. július 1.  
Szélben (50-70 km/h): órákon át tartó rezgés.  
Rezgés amplitúdó eleinte 0,5 m, majd egy tartókábel elszakadása után akár 9 m!  
Összeomlás: 1940. november 7.

(A jelenség magyarázata)



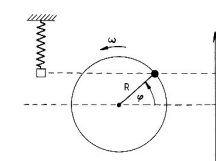
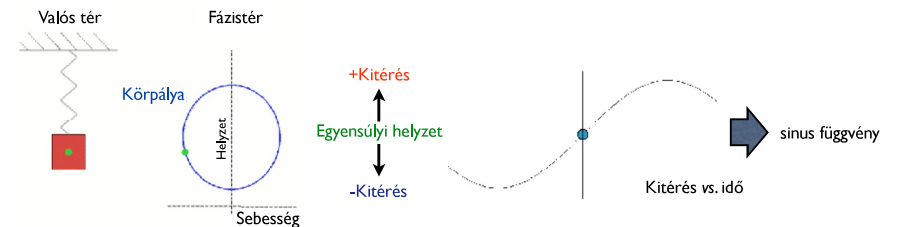
Kármán-féle örvények  
(Szélben, a híd élén keletkeznek. Ha nem válnak le a felületről, rezgés lép fel.)



Kármán Tódor  
(Theodore von Kármán)  
1881-1963

## Harmonikus rezgőmozgás

Egyensúlyi helyzetéből kitérített rendszerre visszatérítő erő hat (pl. rugóra függesztett tömeg).



$\phi$  = fázisszög  $t$  időpontban  
 $y$  = kitérés  $t$  időpontban  
 $\omega$  = szögsebesség ( $\phi/t$ )  
 $R$  = forgó egységvektor hossza  
= maximális kitérés (amplitúdó)

$$y = R \sin \phi$$

Mivel  $\phi = \omega t$ :  $y = R \sin(\omega t)$

Ha a kiindulási fáziszög ( $\phi_0$ ) nem zérus:  $y = R \sin(\omega t + \phi_0)$

Mivel a szögsebesség ( $\omega$ ) a periódusidő ( $T$ ) alatt megtett teljes kör ( $2\pi$ ):  $y = R \sin\left(\frac{2\pi}{T}t + \phi_0\right)$

A tovaterjedő hullámmozgás fontos paraméterei:

- Periódusidő ( $T$ )
- Frekvencia ( $f=1/T$ )
- Terjedési sebesség ( $v, c$ )
- Hullámhossz ( $\lambda$ ): egy periódusidő alatt megtett távolság:

$$\lambda = cT = \frac{c}{f}$$

# Hullámok típusai

- Keletkezés **mechanizmusa** szerint:
  1. Mechanikai: rugalmas deformáció, rugalmas közegben terjed (pl. hang)
  2. Elektromágneses: elektromos zavar, vákuumban (is) terjed (pl. fény)

- Terjedés **dimenziója** szerint:

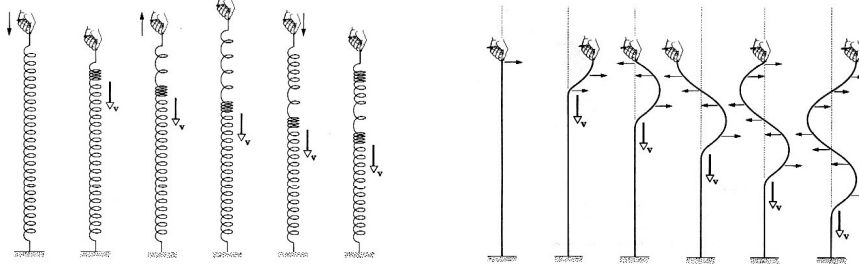
1. egydimenziós (pl. megpendített húr)
2. felületi hullámok (pl. síkhullám vízfelületen)
3. térbeli hullámok (pl. hang)



- A rezgés és terjedés relatív **irányai** szerint:

1. Longitudinális (pl. hang)

2. Transzverzális (pl. fény)



# Hullámjelenségek I. Diffrakció, hullámelhajlás

**Huygens-Fresnel elv:**  
egy hullámfront minden pontja további hullámok forrása

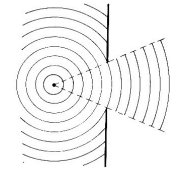


Christiaan Huygens  
(1629-1695)

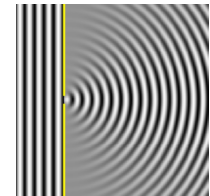


Augustin-Jean Fresnel  
(1788-1827)

Hullámhossznál sokkal nagyobb rés



Hullámhossznál kisebb rés



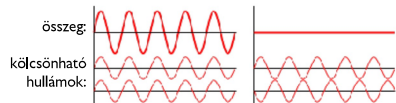
A hullám megjelenik az "árnyékos" területen is.

# Hullámjelenségek II. Interferencia

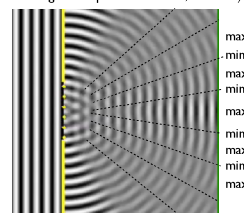
Alapja: szuperpozíció elve

Hullámok fázisban ( $\varphi=0$ ): erősítés

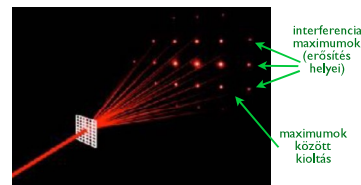
Ha  $\varphi=\pi$ : kioltás



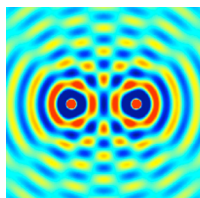
Több ( $>1$ ), hullámhosszal összemérhető nagyságú rés  
( $=d$  távolságra levő pontszerű részek, ahol  $d \sim \lambda$ )



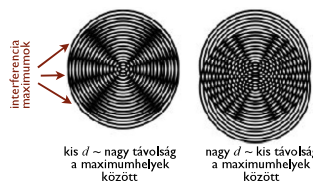
2D optikai rács elhajlása (diffrakció) interferencia képe



Két, pontszerű forrásból származó hullámok interferenciája



Kialakuló **interferencia mintázat** a pontszerű részek közötti távolságtól ( $d$ ) függ



# Hullámjelenségek III. Polarizáció

**Polarizáció:** kitüntetett irányú rezgés

**Kettős törés:** anizotrop terjedési sebesség

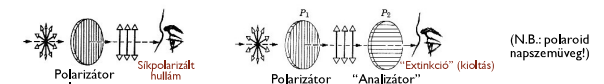
Csak a **transzverzális** hullámok polarizálhatók.



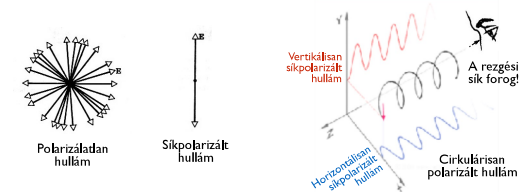
**Mechanikai** hullámok polarizálása



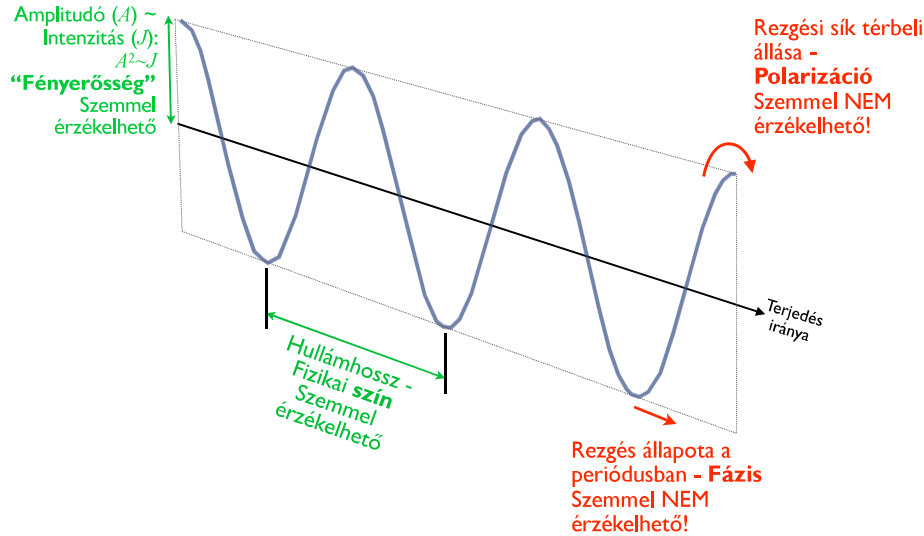
**Elektromágneses** hullámok polarizálása



Polarizáció illusztrálása a terjedési irányból nézve:



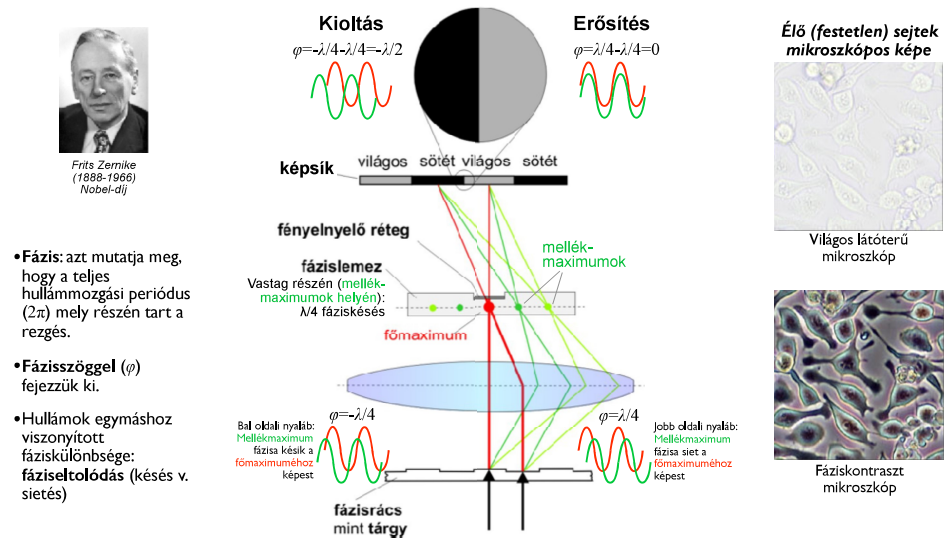
# A fény mint hullám érzékelhető paraméterei



A hullám eredete és természete: jövő hét!

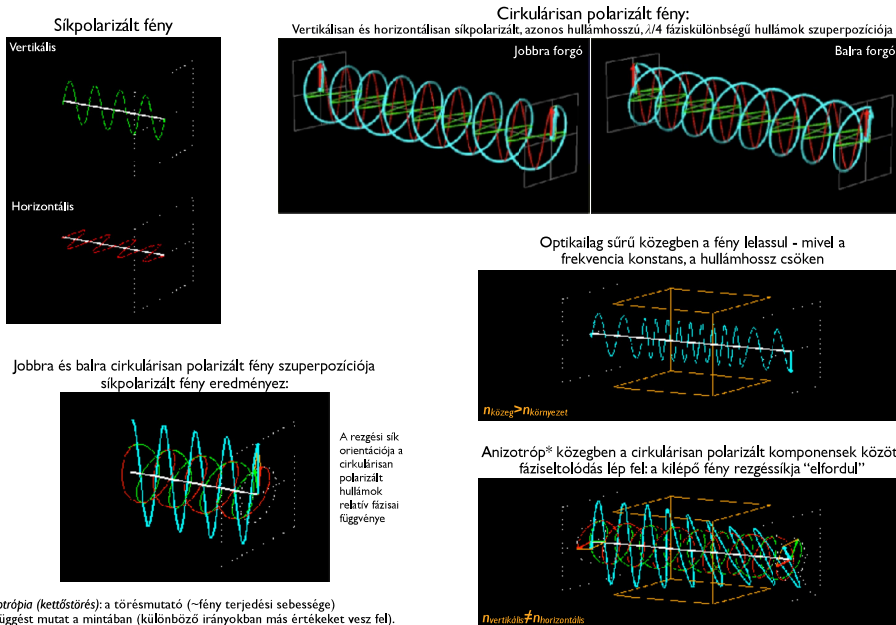
# Fázis, fáziskontraszt mikroszkópia

A mintában fellépő fáziseltolódásbeli különbségeket amplitudó kontraszttá alakítja



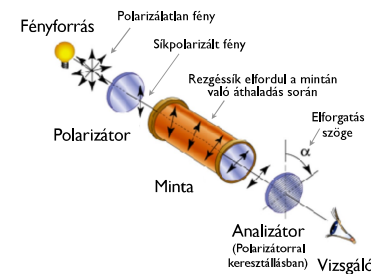
# Polarizált fény és kölcsönhatásai

Rezgés (elektromos v. mágneses tér) kitüntetett irányú - rezgési sík kitüntetett állású



# Polarizáció alkalmazásai

## Polarimetria



Elforgatás szöge az optikailag aktív\* anyag koncentrációjától ( $c$ ) függ:

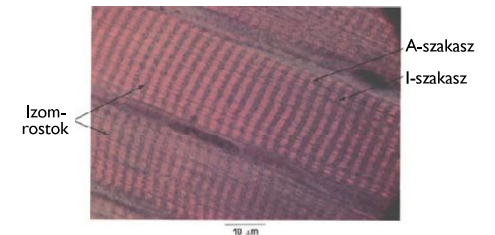
$$\alpha = [\alpha]_D^{20} \cdot c \cdot l$$

$[\alpha]$  = fajlagos forgatóképesség ("20": szobahő; "D": Na spektrális vonala  $\lambda = 589$  nm)  
 $l$  = rétegvastagság (mintatartó hossza)

\*Optikailag aktív anyag: kiralikus molekulákat tartalmazó minta, amely a síkpolárizált fény rezgéssíkját elforgatja.

## Polarizációs mikroszkópia

Harántcsikolt izomrost polarizációs mikroszkópban



- **A-szakasz**: anizotróp (kettőstörő) szakasz (helikális filamentumokba rendezett miozinmolekulákat tartalmaz)
- **I-szakasz**: izotróp szakasz



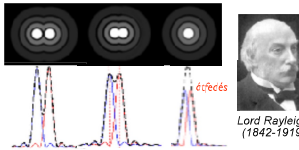
A fény hullámtermészete behatárolja a szem működését!

# A szem feloldóképessége I. Hullámoptikai korlát

Diffrakció miatt: pontszerű tárgy képe elhajlási korong (Airy korong)



Rayleigh feltétel: a tárgypontok feloldhatók, ha nincs túl nagy átfedés a képek között



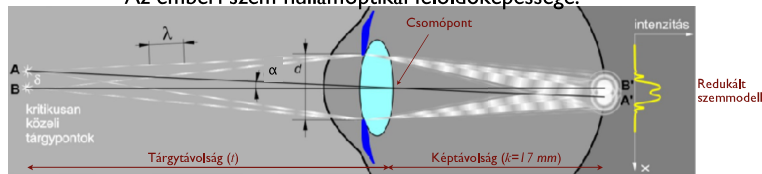
Legkisebb feloldott távolság behatárolt (Abbe-keplet):

$$d = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha}$$

$\lambda$  = hullámhossz  
 $n$  = közeg törésmutatója  
 $\alpha$  = optikai tengely és legszélső nyakból áthaladó szög (fényhálásszög)



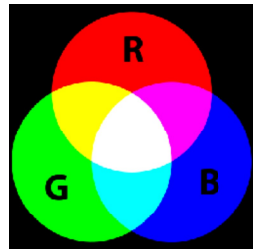
Az emberi szem hullámoptikai feloldóképessége:



Látószöghatár:  $\alpha_H = 1.22 \frac{\lambda}{d}$

Az a legkisebb látószög, amelynél két különálló pontot meg tudunk különböztetni egymástól.  
Közepes hullámhossz (550 nm) és pupilla átmérő (4 mm) értékekre: 0.6'

## Színkódolás, színlátás



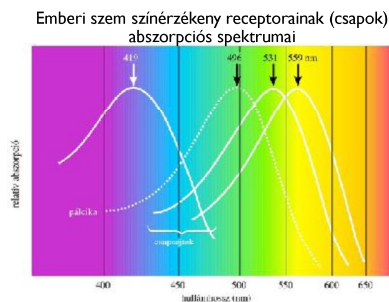
### Additív színkódolás

Bármely szín kifejezhető a három alapszín (R=vörös, G=zöld, B=kék) megfelelő súlyozású összekeverésével

$$X = rR + gG + bB$$

Emberi szemben:

- 3 különböző színérzékeny receptor.
- Mindegyik receptor más-más színtartományban érzékeny, azaz más színeket nyel el ( $R=64\%$ ,  $G=32\%$ ,  $B=2\%$ ).



# A szem feloldóképessége II.

Biológiai korlát: receptorsejt-sűrűség

Tárgy	Receptorokra eső kép	Látásérzet

- Feloldás feltétele: legalább egy inaktívált receptorsejt legyen két aktivált receptorsejt között. Ekkor a legkisebb látószöghatár a redukált szemmodell alapján ( $\alpha_B$ )  $\approx 0.8'$ .
- Az emberi szemben a hullámoptikai és biológiai feloldóképesség értékei nagyjából **egybeesnek**.

Látásélesség (visus, "Visual Acuity", VA):

$$\text{látásélesség} = \frac{1'}{\alpha} 100\%$$

$\alpha$  = kísérleti (mért) látószöghatár

Normál látószöghatár egészséges emberben:  
1' (=100% visus)

Látásélesség mérése

