

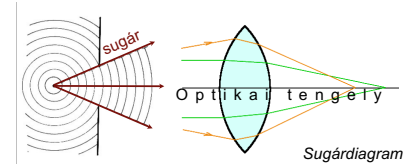
HULLÁMOPTIKA

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.

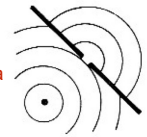


- Optikai nyaláb ("fényszugár"): absztrakció, matematikai egyenes.
- A nyílak az energiaterjedés irányát jelölik.
- Optikai tengely: az optikai elemek (pl. lencsék) középpontján áthaladó egyenes.
- Reverzibilitás elve: az energiaterjedés (nyílak) iránya megfordítható.

Hullámoptika

Ha a fény a hullámhossznál kisebb vagy azzal összemérhető résen halad át, a hullámtermészetét 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 (λ): 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:
Mechanikai rezgés



- 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.

Magyarázat:
Kármán örvények
"rángatják" a
tárgyak



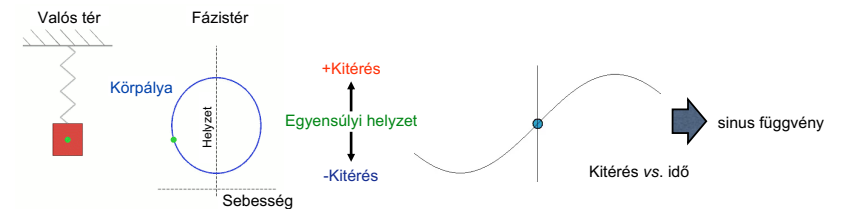
Kármán-féle örvények
(Szélben, a híd élén keletkeznek. Ha nem válnak le a felületről, rezgés lép fel.)



Kármán Tódor
(Theodore von Kármán)
1881-1963

Harmonikus rezgőmozgás

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



$$y = R \sin \phi$$

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

Ha a kiindulási fáziszög (ϕ_0) nem zérus: $y = R \sin(\omega t + \phi_0)$

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

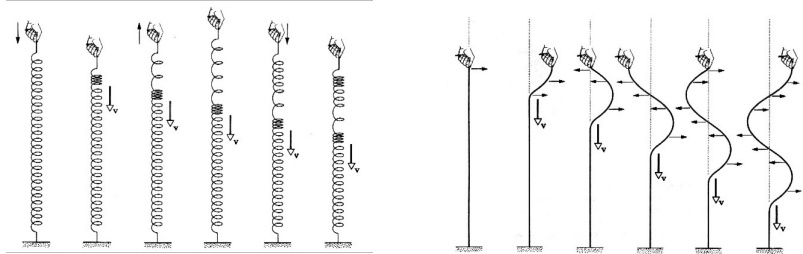
A tovaterjedő hullámmozgás fontos paraméterei:

- Periódusidő (T)
- Frekvencia ($f=1/T$)
- Terjedési sebesség (v, c)
- Hullámhossz (λ): 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)

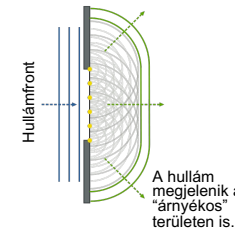
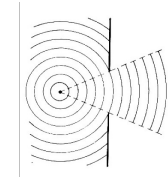


Hullámjelenségek I. Diffrakció, hullámelhajlás

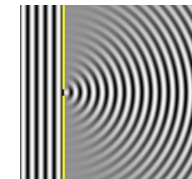
Huygens-Fresnel elv:
egy hullámfront minden pontja további hullámok forrása



Hullámhossznál sokkal nagyobb rés

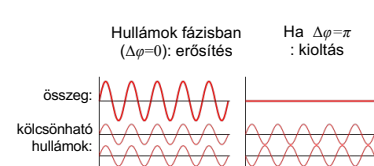


Hullámhossznál kisebb rés

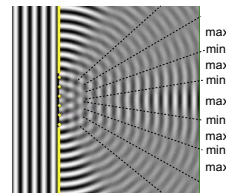


Hullámjelenségek II. Interferencia

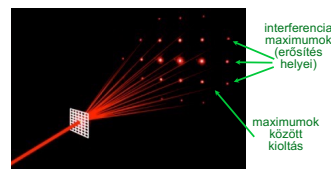
Alapja: szuperpozíció elve



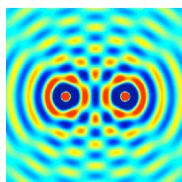
Több (>1), hullámhosszal összemérhető nagyságú rés
(=d távolságra levő pontszerű rések, ahol d ~ λ)



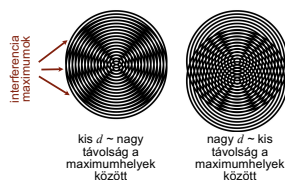
2D optikai rács elhajlási (diffrakciós) interferencia képe



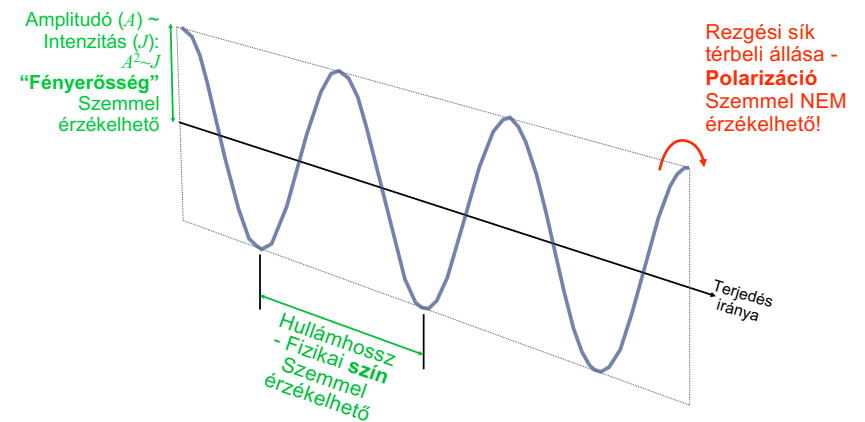
Két, pontszerű forrásból származó hullámok interferenciája



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



A fény mint hullám közvetlenül érzékelhető paraméterei



Hullámjelenségek III.

Polarizáció

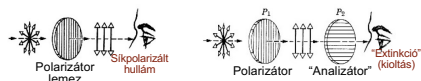
Polarizáció: kitüntetett irányú rezgés
Kettős törés: anizotróp terjedési sebesség
 Csak a **tranzverzális** hullámok polarizálhatók.



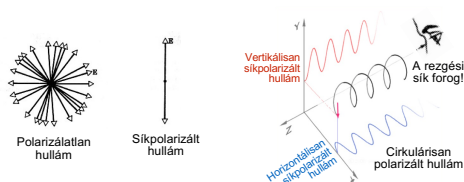
Mechanikai
 hullámok
 polarizálása



Elektromágneses
 hullámok polarizálása



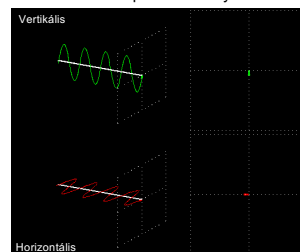
Polarizáció illusztrálása a terjedési irányból nézve:



Polarizált fény és kölcsönhatásai

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

1. Síkpolárizált fény

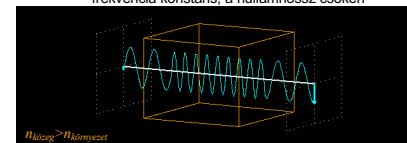


2. Körülkísán polárizált fény:

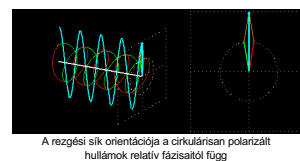
Vertikálisan és horizontálisan síkpolárizált, azonos hullámhosszú, $\lambda/4$ fáziskülönbségű hullámok szuperpozíciója



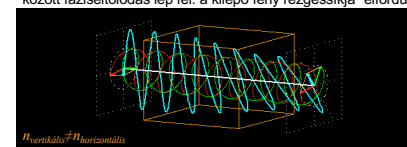
4. Optikailag sűrű közegben a fény lelassul; mivel a frekvencia konstans, a hullámhossz csökken



3. Jobbra és balra körülkísán polárizált fény szuperpozíciója síkpolárizált fény eredményez:



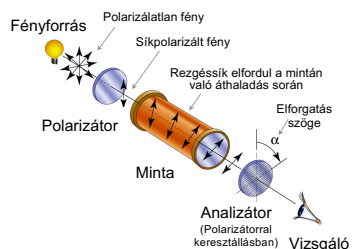
5. Anizotróp* közegben a körülkísán polárizált komponensek között fáziseltolódás lép fel: a kilépő fény rezgéssíkja "elfordul"



*Anizotrópia (kettőtörés): a törésmutató (~fény terjedési sebessége) irányfüggést mutat a mintában (különböző irányokban más értékeket vesz fel).
 Videó - http://codemo.szialab.org/index_hu.html

Polarizáció alkalmazásai

Polarimetria



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

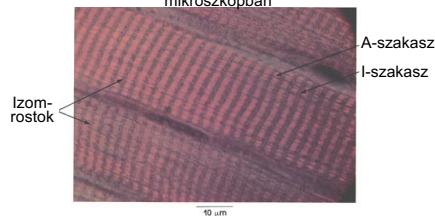
$$\alpha = [\alpha]_D^{20} \cdot c \cdot l$$

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

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

Polarizációs mikroszkópia

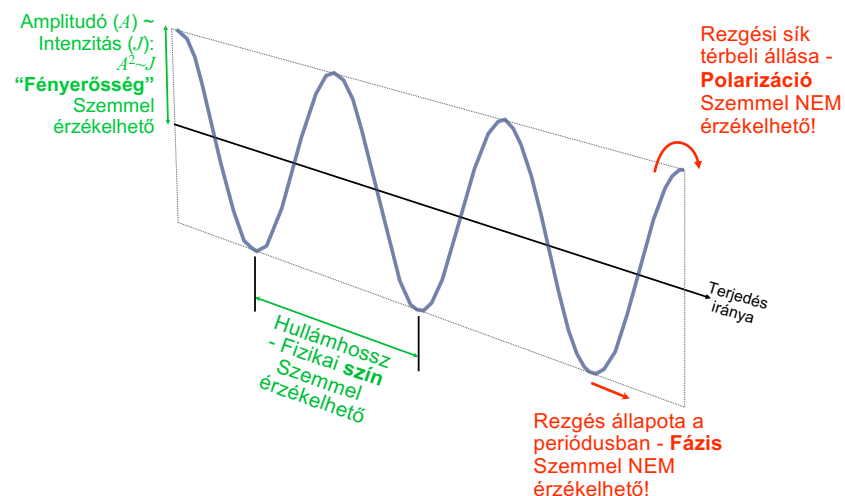
Harántsíkolt izomrost polarizációs mikroszkópban



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



A fény mint hullám közvetlenül érzékelhető paraméterei

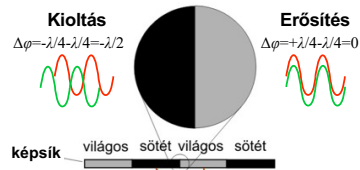


Fáziskontraszt mikroszkópia

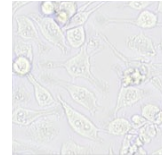
A mintában fellépő fáziseltolódásbeli különbségeket amplitudó kontraszttá alakítja



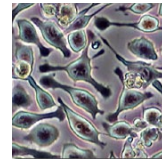
Frits Zernike (1888-1966)
Nobel-díj



Élő (festetlen) sejtek mikroszkópos képe



Világos látóterű mikroszkóp



Fáziskontraszt mikroszkóp

• Fázis: azt mutatja meg, hogy a teljes hullámmozgási periódus (2π) mely részén tart a rezgés.

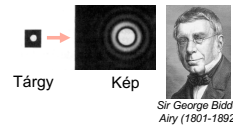
• Fázisszöggel (φ) fejezzük ki.

• Hullámok egymáshoz viszonyított fáziskülönbsége ($\Delta\varphi$): fáziseltolódás (késés v. sietés)

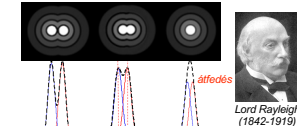
A szem feloldóképesége I.

Hullámoptikai korlát

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



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



Legkisebb feloldott távolság behatárolt (Abbe-képlet):

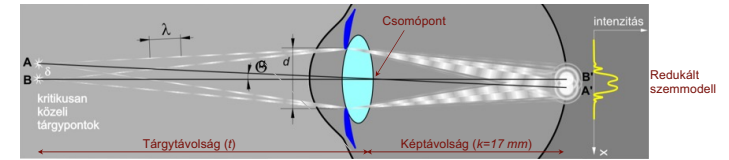
$$d = \frac{0.61\lambda}{n \sin \alpha}$$

λ = hullámhossz
 n = közeg törésmutatója
 α = optikai tengely és legszélső nyaláb által bezárt szög (fénynyílásszög)



Ernst Abbe (1840-1905)

Az emberi szem hullámoptikai feloldóképesége:



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

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

A szem feloldóképesége II.

Biológiai korlát: receptorsejt-sűrűség

Tárgy	Receptorokra eső kép	Látásérzet
• •		•
• •		•
• •		• •

• Feloldás feltétele: legalább egy inaktív receptorsejt legyen két aktív receptorsejt között. Ekkor a legkisebb látószöghatár a redukált szemmodell alapján ($\alpha_B \approx 0.8'$).

• Az emberi szemben a hullámoptikai és biológiai feloldóképeség értékei nagyjából egybeesnek.

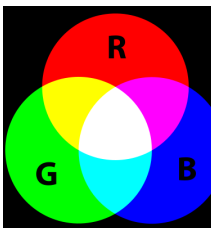
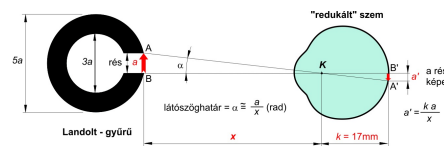
Látásélesség (visus, "Visual Acuity", VA):

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

α = kísérleti (mért) látószöghatár

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

Látásélesség mérése



Additív színkódolás

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

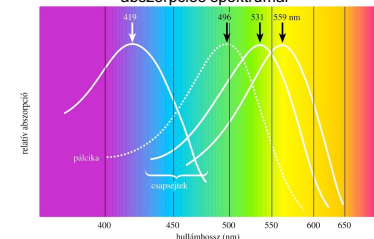
$$X = rR + gG + bB$$

Emberi szemben:

• 3 különböző színérzékeny receptor.

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

Emberi szem színérzékeny receptorainak (csapok) abszorpciós spektruma



OMHV



<https://feedback.semmelweis.hu/feedback/index.php?feedback-qr=6AJ6C3MSOLYKGMHD>