

# Számítógépes Grafika

Bán Róbert

[robert.ban102+cg@gmail.com](mailto:robert.ban102+cg@gmail.com)

Eötvös Loránd Tudományegyetem  
Informatikai Kar

2022-2023. tavaszi félév

## Tartalom

### Adminisztráció

#### Számítógépes grafika

Motiváció

Áttekintés

#### Az emberi látás

Motiváció

A fény

A látás fisiológiája

Színek a számítógépen

#### Megjelenítők, eszközök

Megjelenítők

Raszter- és vektorgrafika

## Bemutatkozás és elérhetőségek

- ▶ Előadó: Bán Róbert
- ▶ E-mail: [robert.ban102+cg@gmail.com](mailto:robert.ban102+cg@gmail.com)
  - ▶ A levél tárgyában szerepeljen a [BScGraf]
- ▶ Szoba: D 2.706
- ▶ Konzultáció: emailes egyeztetés után
- ▶ Információk a tárgy oldalán: <http://cg.elte.hu>

## Előadás

- ▶ IP-18KVISZGE, IPM-18[E]sztkVSZGE
- ▶ Szükséges előismeret: lineáris algebra (IP-18[e]MATAG, korábban IP-08LA)
- ▶ Jegyszerzés: Két írásbeli részvizsga alapján
  1. Első az anyag felénél, második a félév végén
  2. Kb. 50%-50% elméleti és gyakorlati feladatok
- ▶ Vizsgaidőszakban: csak pót-részvizsga és UV-k
- ▶ Honlap: [cg.elte.hu](http://cg.elte.hu)
- ▶ Katalógus: [catalog.inf.elte.hu](http://catalog.inf.elte.hu)

## Előadás tananyag

- ▶ A kivetített diák a <http://cg.elte.hu/index.php/grafika-bsc-eloadas-anyagok/> címen lesznek elérhetőek (a korábbi félévek diasorai most is fent vannak)
- ▶ A félév közben a szükséges információk Neptun-üzenetben lesznek kiküldve, valamint Canvas-ra kerülnek fel

## Ajánlott irodalom

Magyar nyelvű irodalom:

1. *Szirmay-Kalos László, Antal György, Csonka Ferenc: Háromdimenziós grafika, animáció és játékfejlesztés, ComputerBooks, 2003.* (Már elfogyott, de a szerző honlapjáról elérhető:  
<https://cg.iit.bme.hu/~szirmay/3Dgraf.pdf>)
  - ▶ A gyakorlat során már újabb OpenGL-t használunk! (És nem is fogadunk el deprecated kódot)
  - ▶ Apróbb, formális különbségek is vannak (sorvektorok, transzponált mátrixok stb.)

## Ajánlott irodalom

Angol nyelvű irodalom:

1. *Andrew Glassner* (most már) ingyenesen elérhető könyvét ajánlom az érdeklődőknek:  
[http://realtimerendering.com/Principles\\_of\\_Digital\\_Image\\_Synthesis\\_v1.0.1.pdf](http://realtimerendering.com/Principles_of_Digital_Image_Synthesis_v1.0.1.pdf)
2. Aki később is komolyabban akar grafikával foglalkozni pedig ezeket is ismerje meg mindenképpen:
  - ▶ *Akenine-Möller, Haines, Hoffman: Real-Time Rendering* (3rd edition)
  - ▶ *Pharr, Humphreys, Hanrahan: Physically Based Rendering (From Theory to Implementation)*

## Gyakorlatok

- ▶ IP-18KVISZGG, IPM-18[E]sztKVSZGG
- ▶ Az előadás és a gyakorlat nem előfeltételei egymásnak
- ▶ Előfeltétel: lineáris algebra (IP-18[e]MATAG, korábban IP-08LA), C++ (IP-18OEPROGEG / IP-18KVPNY1EG)
- ▶ Koordinátor: Bán Róbert
  - ▶ Email: [robert.ban102+cg@gmail.com](mailto:robert.ban102+cg@gmail.com) (tárgy: [BScGraf]...)
  - ▶ De elsősorban a saját gyakorlatvezetőjének írjon mindenki
- ▶ Jegyszerzés: géptermi zárhelyi vagy megfelelő évközi teljesítmény esetén választható nagybeadandó program
  - ▶ Félév közben két kis beadandó program

## Tananyag

- ▶ A gyakorlatokhoz a kiinduló projekteken túl elérhetőek
- ▶ Írásos és videós segédanyagok is
- ▶ Ezek a <http://cg.elte.hu/index.php/grafika-bsc-gyakorlat-anyagok/> oldalról érhetőek el

## Mi a számítógépes grafika?

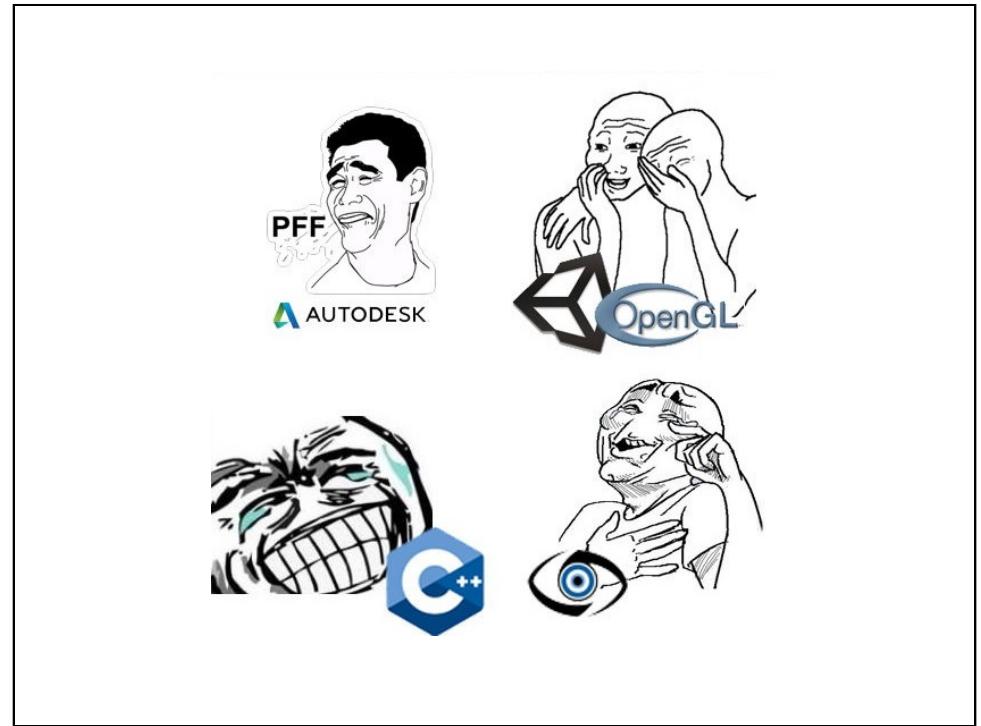
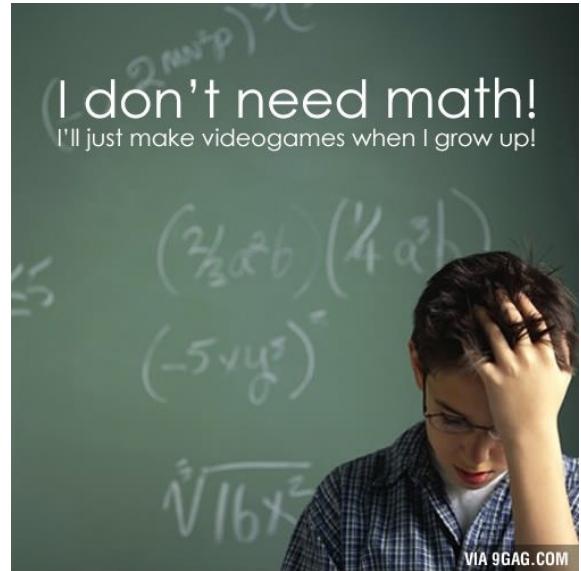
- ▶ Alkalmazott tudományterület, ahol kézzel (vagy legalább szemmel) fogható eredményt *kell* produkálni

## Mi a számítógépes grafika?

- ▶ Alkalmazott **tudományterület**, ahol kézzel (vagy legalább szemmel) fogható eredményt *kell* produkálni
- ▶ Ezzel jár, hogy erős elméleti háttér szükséges a megoldandó probléma leírásának megértéséhez

## Mi a számítógépes grafika?

- ▶ **Alkalmazott** tudományterület, ahol kézzel (vagy legalább szemmel) fogható eredményt *kell* produkálni
- ▶ De ezt az elméleti (javarészt matematikai) apparátust *használni* is kell
- ▶ Nem elég a képleteket ismerni



$$L_o(\mathbf{x}, \omega) = L_e(\mathbf{x}, \omega) + \int_{\Omega} f_r(\mathbf{x}, \omega', \omega) L_i(\mathbf{x}, \omega') (\omega' \cdot \mathbf{n}) d\omega$$

## Számítógépes Grafika

- ▶ A **számítógépes grafika** az informatika tudomány egy ága.
- ▶ Feladata: vizuális anyagok
  - ▶ előállítása
  - ▶ elemzése
  - ▶ feldolgozása

## Képmanipulálás



Brandon Christopher Warren, flickr

## Képfeldolgozás és képelemzés

### ► Képfeldolgozás



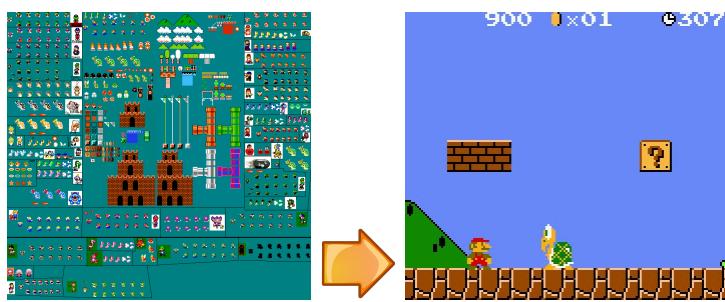
### ► Képelemzés



Bertrand March and OpenCV



## 2D: Modell → Kép



## 3D: Modell → Kép



Marc-Antoine Senécal



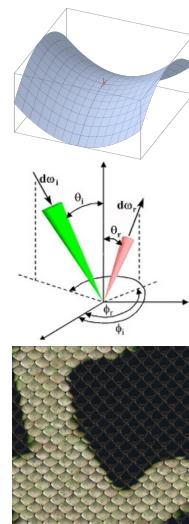
ASSASSIN'S  
CREED  
BROTHERHOOD

## A számítógépes grafika eszközei

- ▶ Ezen az előadáson a képek előállításával foglalkozunk
- ▶ Ehhez szükségünk van arra, hogy
  - ▶ el tudjuk tárolni a számítógépen a megjeleníteni kívánt virtuális világot (**reprezentáció**),
  - ▶ a reprezentációt meg tudjuk jeleníteni (**képszintézis**),
  - ▶ a megjelenítést pedig megfelelő eszközökön kell elvégezni (**megjelenítők**).

## Modellezés

- ▶ Geometriai modellek
- ▶ Optikai paraméterek
- ▶ Textúrák
- ▶ *mind lehet generált, mért, fényképezett stb.*



## Képszintézis

### Kérdések:

- ▶ Hogyan írjuk le a világot? – Modellezés
  - ▶ Ebben a félévben: geometriai modellek, fény-felület kölcsönhatás – matematikai és fizikai modellek
  - ▶ MSc: A számítógépes grafika matematikai alapjai
  - ▶ MSc: Felület- és testmodellezés
  - ▶ Szab.vál.: 3D modellezés Maya-val
- ▶ Hogyan számítjuk ki a képet? – Algoritmusok
  - ▶ Ebben a félévben: sugárkövetés és inkrementális képszintézis
  - ▶ Szab.vál., MSc: Haladó grafika EA+GY
- ▶ Hogyan jelenítjük meg azt? – Eszközök
  - ▶ Ezen az órán egy rövid áttekintő

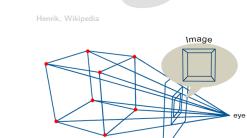
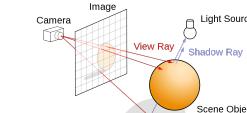
## Algoritmusok

### Megközelítési módok

- ▶ Sugárkövetés
- ▶ Inkrementális képszintézis

### Fényjelenségek

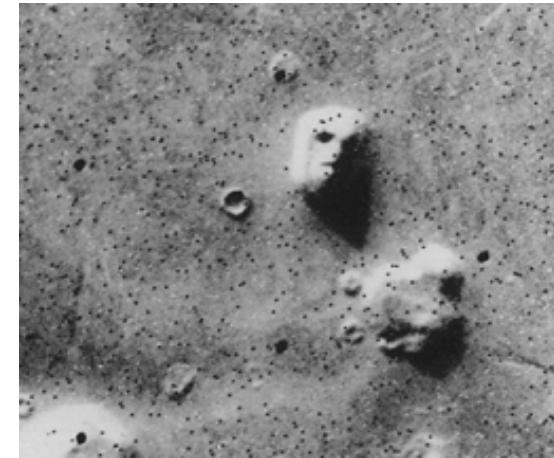
- ▶ Tükörözés, fénytörés
- ▶ Vetett árnyékok
- ▶ Globális illumináció
- ▶ Tér fogati jelenségek



## Motiváció

- ▶ Képet leggyakrabban két fő céllal szintetizálunk:
  - ▶ Kép készítése a számítógép számára: ilyenkor a tényleges megjelenítéssel nem kell foglalkozni, egy leírást kell csak átadni (hol, milyen szín van)
  - ▶ Kép készítése ember számára: meg kell jeleníteni a képet → ehhez tisztában kell lenni az emberi látás bizonyos alap tulajdonságaival, hogy minél kevesebb torzuláson essen át az átadni kívánt információ
- ▶ Mi az utóbbival fogunk foglalkozni; az emberi látás pedig sok tényezőtől függ, már maguk a fények, árnyékok aktuális állapota is befolyásoló tényezők

## Cydonia – 1978



## Cydonia – 2001 VS 1978

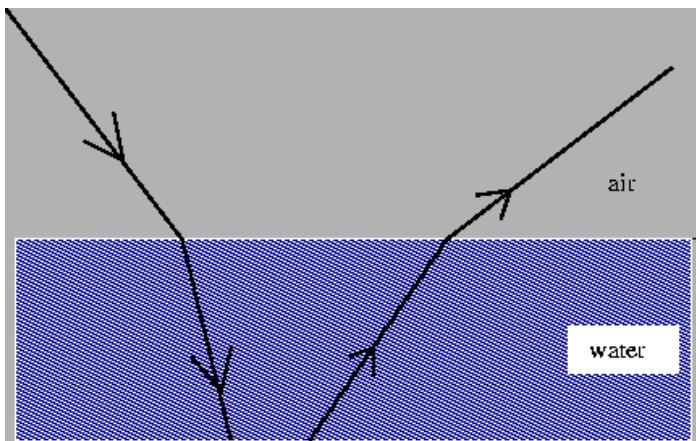


[Link a Mars-arc történetéhez](#)

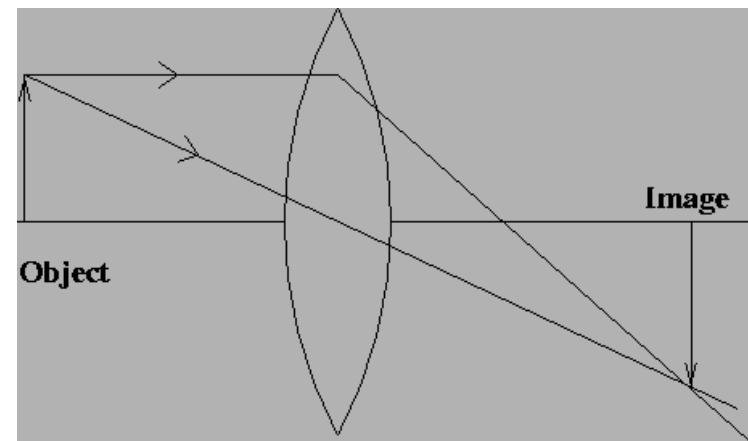
## Célunk

- ▶ A képszintézessel a célunk megmondani, hogy adott helyen milyen színt kell, hogy megjelenítsen a kijelző
- ▶ Fontos ezért, hogy absztrakt és konkrét leírást is tudjunk adni

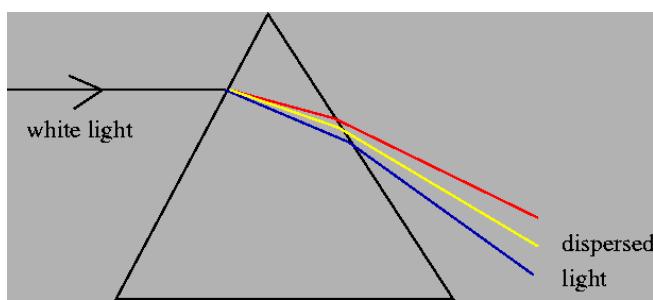
## A fény tulajdonságai – fénytörés



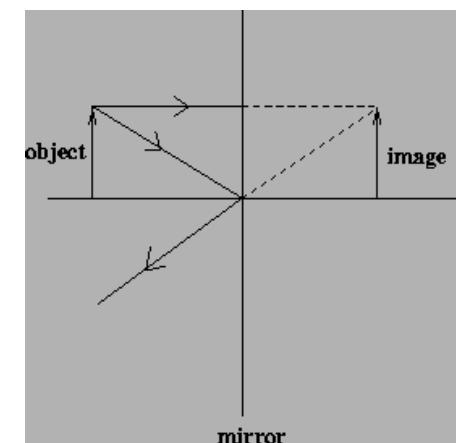
## A fény tulajdonságai – fénytörés



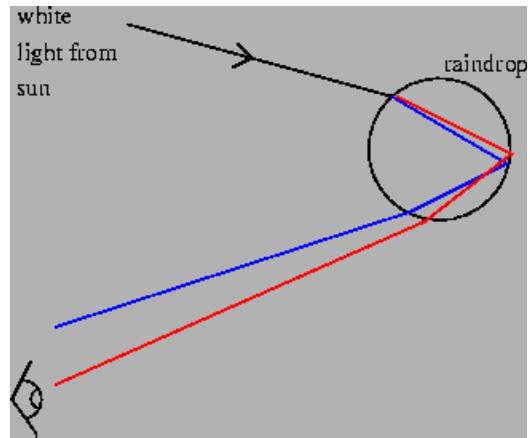
## A fény tulajdonságai – fénytörés prizmával



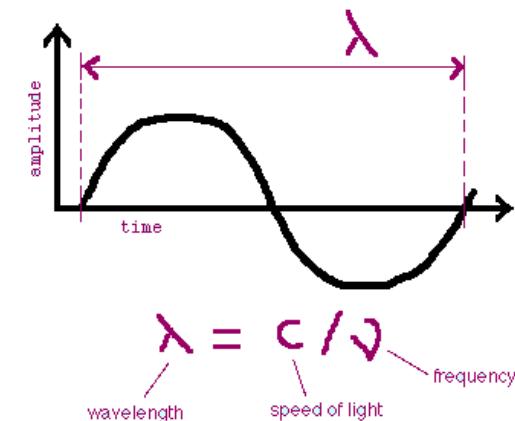
## A fény tulajdonságai – visszaverődés



## A fény tulajdonságai – szivárvány



## A fény tulajdonságai – hullám?



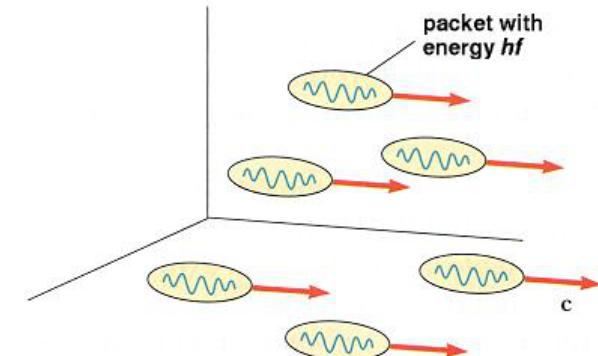
## A fény tulajdonságai – részecske?

$$E = hf$$

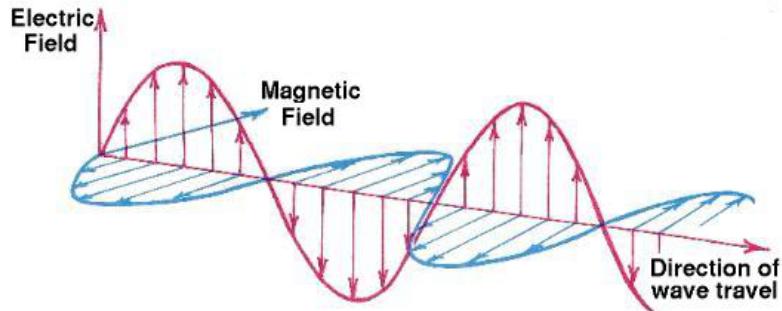
A diagram showing an electron represented by a blue sphere with a yellow glow, moving to the right. Three horizontal lines extend from the left side of the electron, representing the emission of radiation.

$$h = 6.63 \times 10^{-34} \text{ Joules}\cdot\text{sec}$$

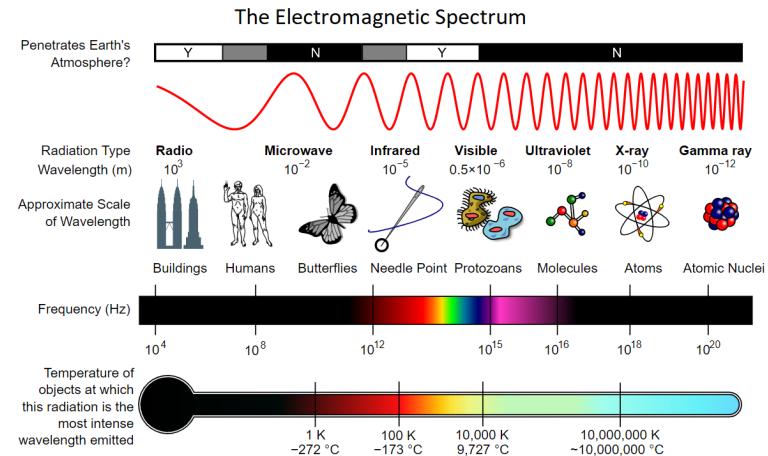
## A fény tulajdonságai – fotonok



## A fény tulajdonságai – a fény elektromágneses sugárzás



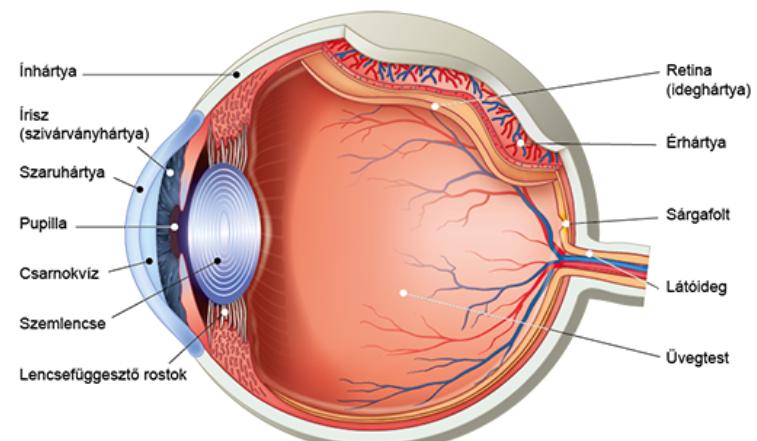
## Elektromágneses sugárzás



## A látás

- ▶ Fiziológiai és pszichológiai aspektusai is vannak
- ▶ A szem és az agy vesz részt benne

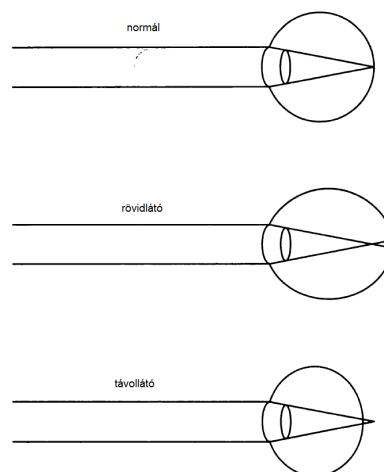
## Az emberi szem felépítése



## A fény útja a szemben

- ▶ A fény a szaruhártyán megtörve jut a szembe – ez lényegében egy fény-gyűjtőlencse
- ▶ A szivárványhártya (írisz) csökkenti a szembe jutó fény mennyiségét (szűri), a pupilla pedig fényreteszként funkcionál
- ▶ A szemlencse a második gyűjtőlencse; a belépő fénysugarakat a recehártyára (retinára) fókusztálja (az „egészséges” szemben)

## A fény útja a szemben



## A szem ereje

- ▶ A szem különböző részeit összesítve kb. +60, +80D erejű – ez 16-12.5mm fókusztávolságot jelent
- ▶ Az átlagos emberi szem 24mm hosszú a szaruhártyától a retináig – a sárgafoltra fókusztáláshoz így kb. 42D-t kell
- ▶ A szemben maradó optikai erő a szem alakjának tökéletlenségeinek kompenzálsára kellenek illetve a nagyon közeli és nagyon távoli objektumokra való fókusztálnál

## Fényreceptorok

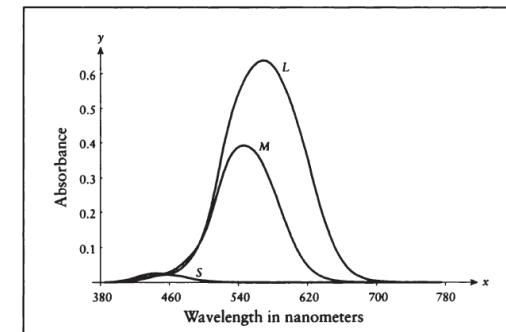
- ▶ A retinában kétféle fény érzékelésére szolgáló idegsejt található:
  - ▶ *Pálcikák (rod):* alacsonyabb intenzitású fényre érzékenyek, a sötét-világos megkülönböztetésére alkalmas, alacsonyabb felbontásúak
  - ▶ *Csapok (cone):* erősebb fényingert igénylő idegsejtek, a színlátást és éleslátást szolgálják, tizedannyira érzékenyek a fényre, mint a pálcikák
- ▶ Az elektromágneses energia egy bizonyos sávjára érzékenyek csak a fenti sejtek
- ▶ Gyakorlati számításokban ennek a 380-780 nanométer (1 nanométer = 1 nm =  $10^{-9}$  m) közötti hullámhosszú részével fogalkozunk, ez a *visual band*

## Fotoreceptorok

- ▶ Amikor fény ér egy fotoreceptort egy kémiai reakció indul el, aminek eredményeképp egy neurális jelet küldenek az agy felé, úgynevezett *photopigmentet*
- ▶ Az egyes fotoreceptorok más-más mértékben reagálnak (érzékenyek) a különböző hullámhosszú fényekre:
  - ▶ *Pálcikák*: hullámhossztól függően az ugyanolyan erős fényre adott reakció nagysága harang-görbe jellegű görbével írható le – az ember éjszakai látásának nagyjából megfelelő módon
  - ▶ *Csapok*: háromféle van belőlük (S, M, L jelűek); mindenki különböző hullámhosszú fényre ad maximális reakciót, azuktól fokozatosan eltérőre egyre kisebbet
- ▶ A photopigmentek csak az érzékelés tényét rögzítik: pontos hullámhossz nem továbbítódik az agy felé! (Térbeli és frekvenciabeli felbontás „trade-off”)

## Fotoreceptorok – csapok

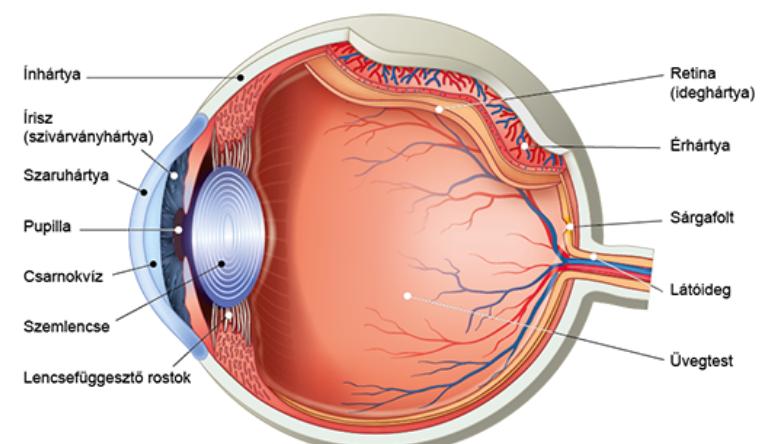
- ▶ Hárromféle csap található a szemben:
  - ▶ S csap: 420nm körüli fényre a legérzékenyebb (kék)
  - ▶ M csap: 530nm körüli fényre a legérzékenyebb (zöld)
  - ▶ L csap: 560nm körüli fényre a legérzékenyebb (vörös)



## Fotoreceptorok – csapok

- ▶ Ha egy csap egy adott hullámhosszra 30%-ban érzékeny azt jelenti, hogy 10-ből 3-szor fogja abszorbeálni az olyan hullámhosszú fénykomponensem és küld jelet az agy felé
- ▶ A fényreceptorok észleléseit a látóideg továbbítja az agy felé
- ▶ A látóideg csatlakozási pontja a szemgolyóhoz a vakfolt, itt nincsenek sem csapok, sem pálcikák
- ▶ A látógödör, ami a vakfolttól oldalra található az éleslátás helye, a közepe a foveola, ahol kizárolag csapok találhatóak (150000 csap per mm, de: sólyomnál 1 millió a legsűrűbb rész)
- ▶ A foveolától kifelé haladva a csapok egyre ritkábbak és a pálcikák váltják fel őket

## Az emberi szem felépítése



## A vakfolt kimutatása



## A fotoreceptor jele

- ▶ Az egyetlen fotonra adott neurális jel néhány ms-ig tart
- ▶ minden egyes újabb beérkező foton hatása hozzáadódik az előzőhöz
- ▶ → A receptor által leadott jel lényegében egy időbeli átlag, egy alul-áteresztő szűrő, aminek vágási frekvenciája függ a megvilágítási körülményektől

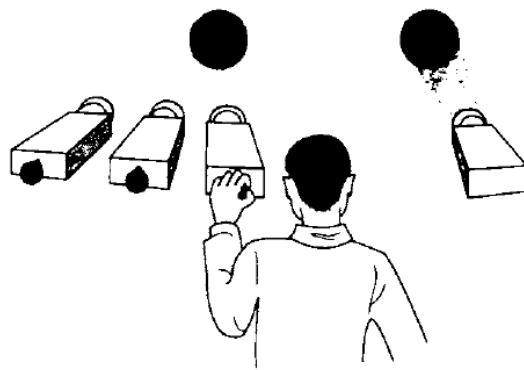
## A fotoreceptor jele

- ▶ Egy lassan villogó fényt külön-külön felvillanásokként észlelünk
- ▶ Azonban ha a felvillanások között eltelt idő egyre kisebb, akkor a fotoreceptorok által leadott jelek „összetorlódnak” (eléri a *Critical flicker frequency-t*) → folyamatos fény pontként érzékeljük a látottakat
- ▶ A fenti képsorozatokra is igaz: CFF alatt a felvillanó képeket különálló elemekként kezeljük, azt átlépve folytonos képfolyamnak. Ezen alapul az animáció
- ▶ A flicker rate sok tényezőtől függ (háttérmegvilágítás, a megjelenített kép nagysága stb.)
- ▶ Ideális körülmények között nagyjából 60Hz (méheknél ugyanez 300Hz)

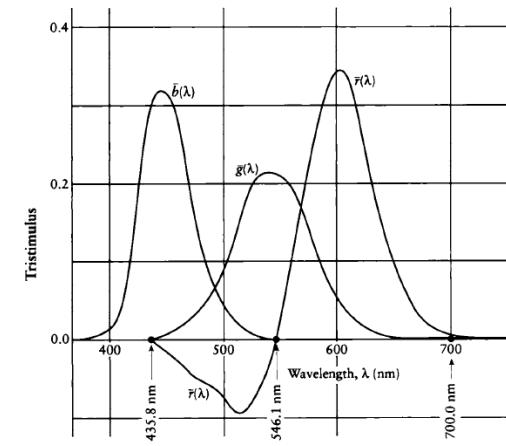
## CIE

- ▶ International Commission on Illumination, 1931.: hogyan lehetne egy „standard” leírást adni arra, hogy egy ember miképp érzékeli a színeket
- ▶ A kísérletek egyik eredménye volt, hogy bármely szín előállítható három, megfelelő szín keverékeként (itt: színes fények egymásra vetítésével) (ugyanaz a szín többféleképpen is előállhat különböző színek kombinációjaként! Ezek a metamerek.)
- ▶ → Bármely színérzet kódolható egy számhármasal, *tristimulus* értékkel

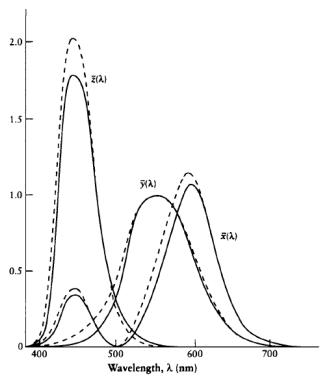
CIE



CIE



CIE



CIE

$$C(\lambda) = X \bar{x}(\lambda) + Y \bar{y}(\lambda) + Z \bar{z}(\lambda)$$



$$X = \int_{\lambda \in \mathcal{R}_V} C(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda$$

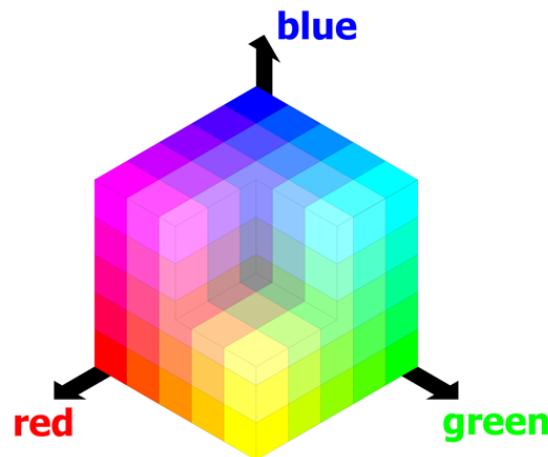
$$Y = \int_{\lambda \in \mathcal{R}_V} C(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda$$

$$Z = \int_{\lambda \in \mathcal{R}_V} C(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda$$

## Tristimulus értékek

- ▶ Színérzet → színtér
- ▶ Itt kijelölhető egy koordináta rendszer három „független” bázis-vektorral.
- ▶ Válasszunk három kellően távoli hullámhoszt, majd minden színérzetre adjuk meg, hogy három ilyen *monokromatikus* (csak az adott hullámhosszt tartalmazó) fénynyaláb milyen keverékéből áll össze.
- ▶ Ezek lesznek az adott színérzet *tristimulus koordinátái*

## RGB színkocka



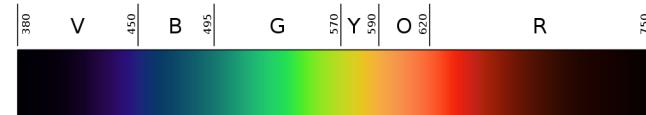
Ethan Hein, flickr

## RGB színtér

- ▶ Egy additív színmodell. Legyen a három kiválasztott hullámhossz:

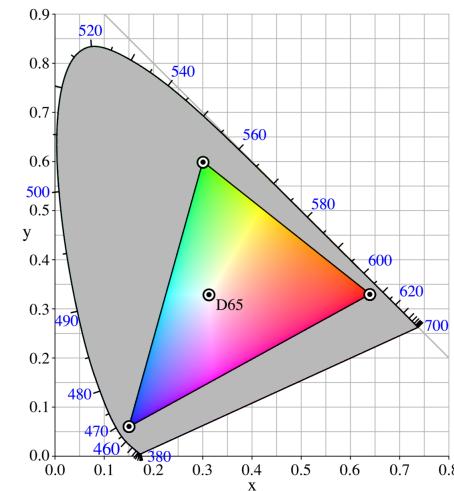
$$\lambda_{red} = 700\text{nm}, \lambda_{green} = 561\text{nm}, \lambda_{blue} = 436\text{nm}$$

- ▶ Legyen  $\lambda$  egy monokromatikus fénnyaláb.



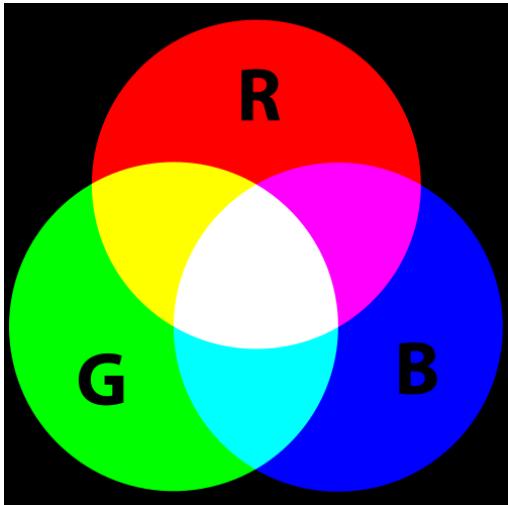
- ▶ Ekkor a hozzátarozó RGB értékeket megadására használjuk az  $r(\lambda)$ ,  $g(\lambda)$ ,  $b(\lambda)$  színillesztő függvényeket.
- ▶ A spektrum minden színe megadható így? Nem.
- ▶ Az ember által érzékelhető minden szín megadható így? Nem.
- ▶ További színérzékeléssel kapcsolatos furcsaságok:  
<https://www.youtube.com/watch?v=uYbdx4I7STg>

## RGB-ben leírható színek

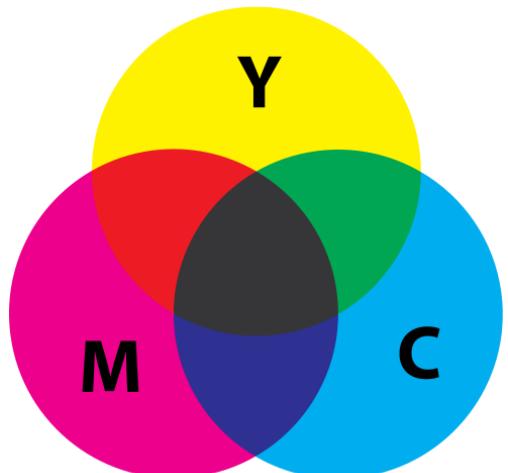


Dicklyon, Wikipedia

## Additív színkeverés



## Szubsztraktív színkeverés



## CMY(K)

- ▶ Nézzük az RGB kockában az eredeti tengelyekkel „szemközti” tengelyeket!
- ▶ Ezek a ciánkék (C), bíbor (M) és sárga (Y).
- ▶ Ez a három „tengely” ugyanúgy kifeszíti a színteret.
- ▶ Ezt használják a színes nyomtatáshoz (ott: CMYK – K a fekete, hogy ne kelljen a fekete nyomtatásához a másik három patronját egyszerre használni)

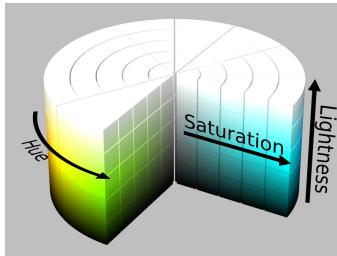
## HSL és HSV – motiváció

- ▶ Amikor színekről beszélünk gyakran használunk olyan fogalmakat, hogy *telítettség*, *élénkség*, *világosság* vagy *sötétség*. Hogyan használhatjuk ezeket RGB színtérben?
- ▶ Vegyük RGB-ben egy színt. Keressük egy kevésbé élénk árnyalatát! Mi az összefüggés a komponensek és az élénkség között?

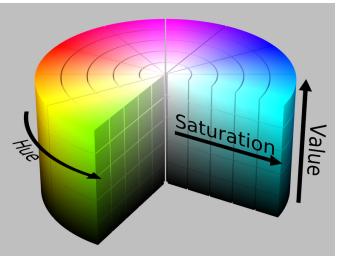


## HSL és HSV

- ▶ A színeket egy hengerrel adjuk meg, egy színérték (*Hue*), egy telítettség (*Saturation*) és egy fényesség (*Lightness*) vagy világosság (*Value*) segítségével.



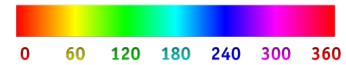
SharkD, Wikipedia



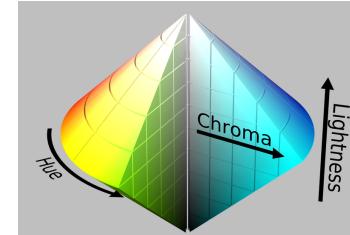
SharkD, Wikipedia

## HSL és HSV

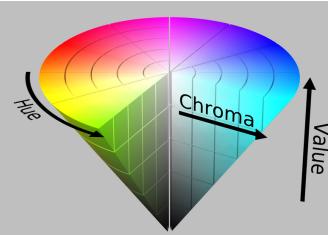
- ▶ *Hue* (színérték) skála:



- ▶ Azonos színek:

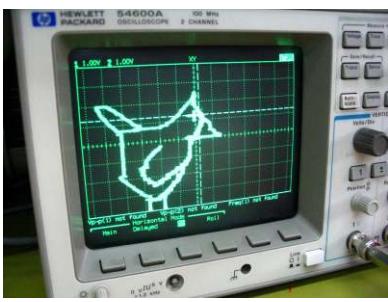


SharkD, Wikipedia

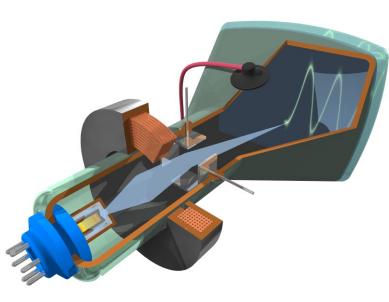


SharkD, Wikipedia

## Eszközök – Oszilloszkóp



Felix E. Guerrero, Flickr

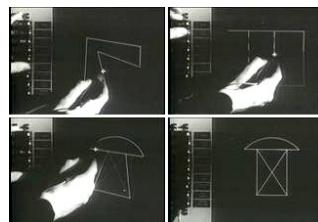


Søren Pou-Pedersen, Wikipedia

- ▶ Az eszköz hátuljában található elektronagyú elektronokat bocsát ki.
- ▶ Az elektronnyaláb útját elektromágnesekkel tériti el a vizsgált jel alapján.
- ▶ Az eszköz elején lévő foszforrétegbe csapódó elektronok bocsátják ki a fényt.

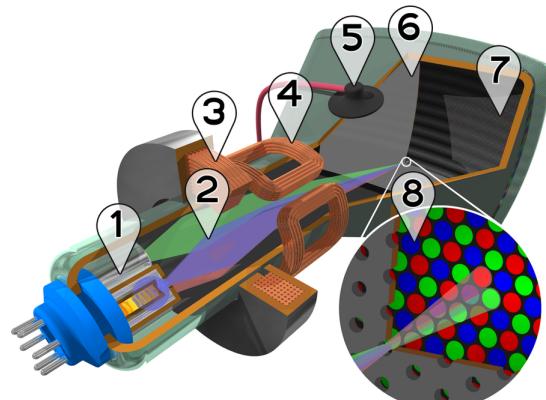
## Eszközök – Sketchpad

Sutherland – Sketchpad, 1963



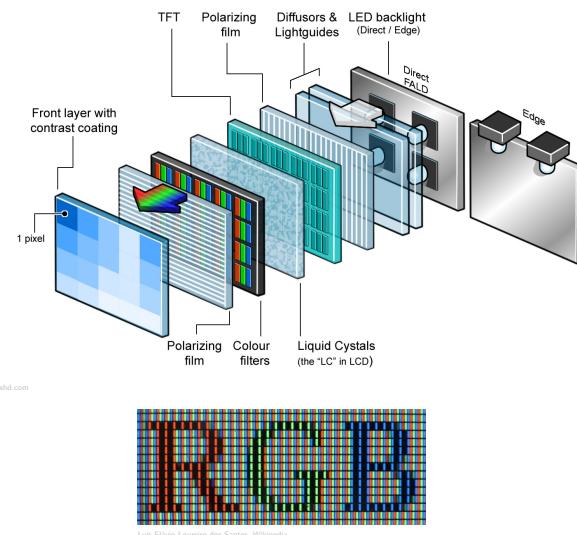
- ▶ a CAD alkalmazások őse
- ▶ 1024x1024-es kijelző
- ▶ fényceruzával + 40 nyomógombbal volt vezérelhető
- ▶ bevezette a kényszer alapú rajzolást: párhuzamos, merőleges stb.

## Eszközök – CRT monitor

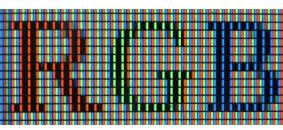


Søren Poulsen, Wikipedia

## Eszközök – LCD monitor



flatpanelshd.com



Luis Filipe Loureiro dos Santos, Wikipedia

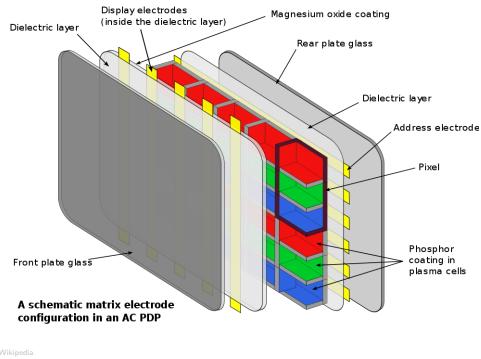
## Eszközök – CRT monitor

- ▶ Őse az oszcilloszkóp – azonos működési elv.
- ▶ Az elektronnyaláb sorról sorra végigpásztázza a képernyőt másodpercenként többször is.
- ▶ A sugár ereje határozza meg fényerőt – a pásztázás során folyamatosan változik.
- ▶ Színek: három elektronagyú, a beesési szögkülönbségből adódóan érik a megfelelő színszűrővel rendelkező területet.
- ▶ Lassított videó

## Eszközök – LCD monitor

- ▶ Fehér háttérvilágítás
- ▶ Először egy polárszűrőn megy keresztül a fény
- ▶ Ezután következik a névadó folyadékkristály-reteg, melynek tulajdonsága, hogy elektromos feszültség hatására különböző mértékben forgatja el a fény polarizáltságát.
- ▶ Színek: minden színszűrőre különböző polarizáltságú fény jut.
- ▶ Végül a korábbira merőleges polárszűrőn jut át a fény, így szabályozva a kijutó fény mennyiségét.

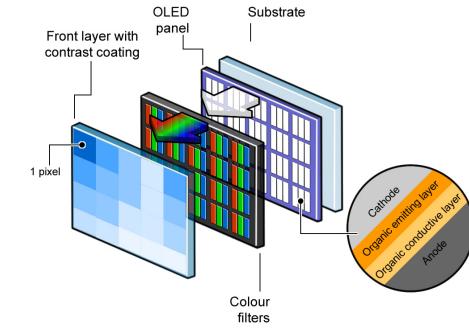
## Eszközök – PDP kijelző (Plasma Display)



Wikipedia

- ▶ minden képpont maga bocsát ki fényt.
- ▶ a pixelekben nemesgáz van, ami feszültség hatására világít, a neoncsőhöz hasonló elven.

## Eszközök – OLED kijelző



flatpanelshd.com

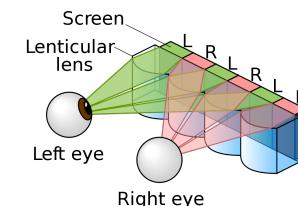
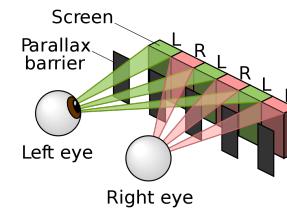
- ▶ minden pixel maga is fényforrás.

## Eszközök – 3D megjelenítők

- ▶ **Stereoscopy**  
Mást lát a két szem, nincs mozgás parallaxis
  - ▶ Head Mounted Display
  - ▶ Shutter glasses
  - ▶ Polarizált lencséjű szemüveg
- ▶ **Autostereoscopy**  
Nem kell hozzá külön eszköz a felhasználó részéről
  - ▶ Parallax barrier
  - ▶ Lenticular lens

## Eszközök – 3D megjelenítők

### Parallax és Lenticular



Marvin Raaijmakers, Wikipedia

és még...

- ▶ Nyomtatók
- ▶ 3D nyomtatók
- ▶ Plotterek
- ▶ Mini LED kijelzők
- ▶ Projektorok
- ▶ ...

## Rasztergrafika



Doinik, vecteezy.com

## Rasztergrafika

- ▶ Az ábra legkisebb egysége a pixel, ami egy színt reprezentál.
- ▶ A pixeleket valamelyen  $N \times M$ -es tömbben tároljuk.
- ▶ Nagyításkor és kicsinyítéskor csak a pixelek látható méretét módosítjuk.

## Vektorgrafika



Doinik, vecteezy.com

## Vektorgrafika

- ▶ A kép matematikailag leírható elemekből épül fel: görbék, síkidomok.
- ▶ Ezekhez vannak rendelve különböző tulajdonságok: szín, kitöltés, vonalvastagság.
- ▶ Az egyenes tényleg egyenes, a görbék bármilyen nagyítás alatt ívesek maradnak.