

Fargerom

Kap. 6: Digital Image Processing (Gonzales and Woods)

Aasan og Tan

November 22, 2023

Table of contents

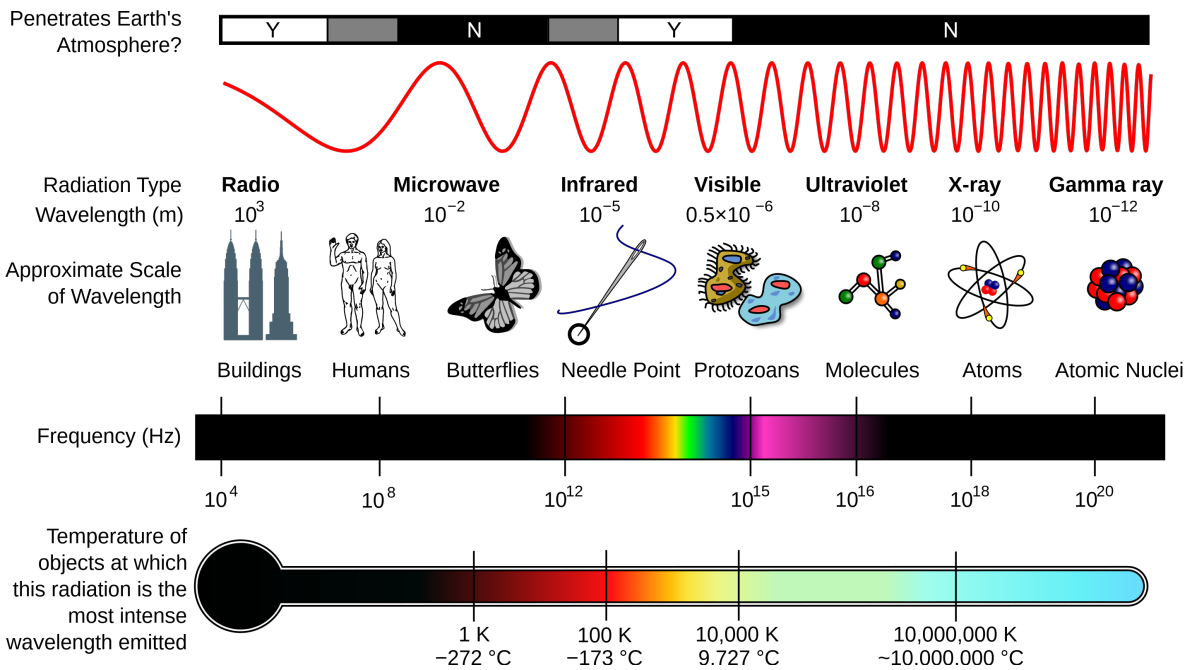
1 Repetisjon: Spektrum og Lys

2 Fargerom

3 Fargebilder i Praksis

Repetisjon: Spektrum og Lys

Elektromagnetisk Stråling

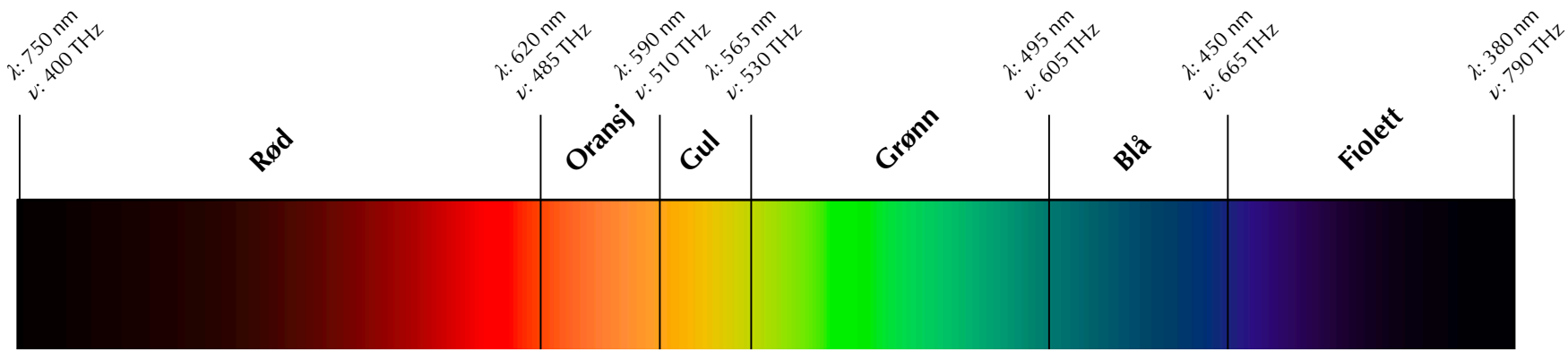


- Elektromagnetisk (EM) stråling omfavner alt fra lavfrekvente radiosignaler til lys, røntgen, og radioaktiv stråling.
- Inndeles i spektrum av bølgelengde (λ) / frekvens (ν) med forholdet $\lambda = c/\nu$[1].
- Stråling med lavere frekvens har lavere energinivå.
- Objekters farge bestemmes av refleksjonegenskaper under lys.

[1] Lysets hastighet: $c \approx 3 \times 10^{8}$ meter/sekund.

Synlig Lys

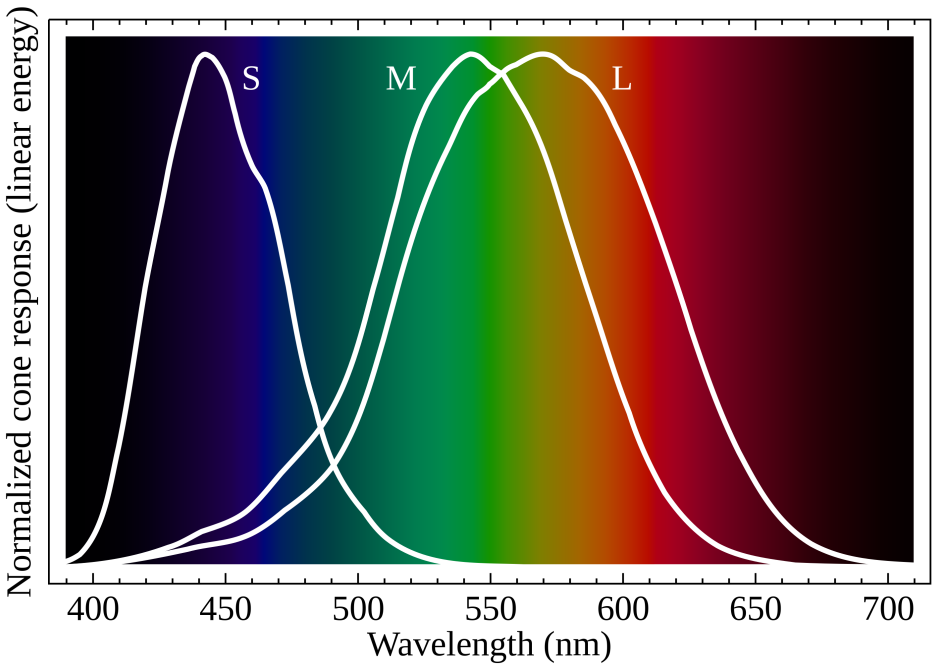
- **Synlig lys**: EM stråling med $\lambda \in [380\text{nm}, 750\text{nm}]$.
- Gråtoner fanges med ca. 120 mill. staver (rods, R).
- Farger fanges med ca. 7 mill. tapper (cones) av tre typer:
  - S-tapper: rundt 420 nm (2%).
  - M-tapper: rundt 534 nm (33%).
  - L-tapper: rundt 564 nm (65%).
- **Sensitivitet**: $\text{L} < \text{M} < \text{S}$.
- Hvilke farger samsvarer tappene til?



Tristimulus

Modell for hvordan farger oppfattes av mennesker.

- Farge reduseres til tre verdier - **tristimulus verdier**.
- Alle slike mulige verdier = perseptuelt fargerom.
- Noen kombinasjoner er ikke mulige: Overlapp mellom tapper.
- **Fargeblindhet**: nedsatt respons for M eller L.



Lyskilder, Intensitet, og Kromatisitet

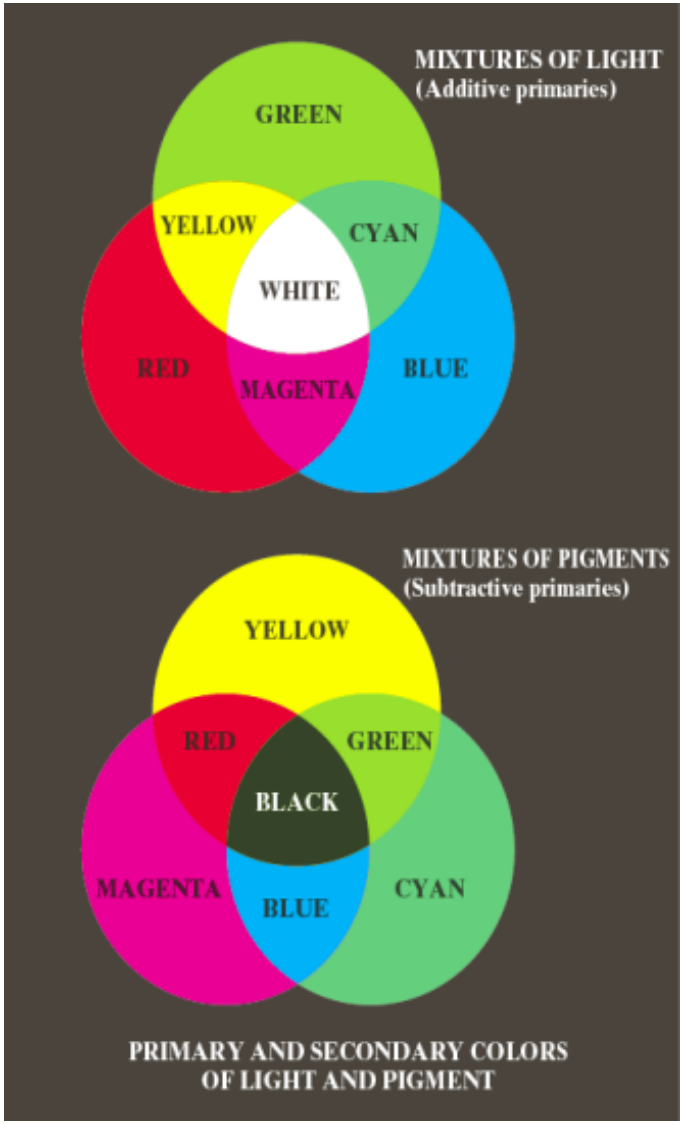
- Vi tenker gjerne på farger i form av **lyskilder** med en bestemt bølgelengde eller frekvens.
- Lyskilder er oftest *en blanding av flere forskjellige bølgelengder*.
- Dekomponerer lyskilder i tre komponenter:
  - **Intensitet**: Hovedkomponent i gråtonebilder.
  - **Kromatisitet**: Objektiv fargebeskrivelse ved
    - **Kulør**: Dominerende bølgelengde, oppfattet farge.
    - **Fargemetning**: Hvor sterkt kuløren fremstår i lyskilden.
- Farger som **lyskilder** = **additiv fargeteori**.
- Farger som **refleksjoner av pigmenter** = **subtraktiv fargeteori**.



Additive og subtraktive fargesystemer

- Additive systemer (lys):
  - "Mikses" *additivt*
  - Start med svart, legg til farger
  - Primærfarger: Rød, Grønn, Blå
  - Eksempler: Øyet, kameraer, TV, monitorer

- Subtraktive systemer (pigmenter):
  - "Mikses" *subtraktivt*
    $\Rightarrow$ lys absorberes
  - Start med hvit, trekk fra farger
  - Primærfarger: Cyan, Magenta, Gul



Grassmann's Lover

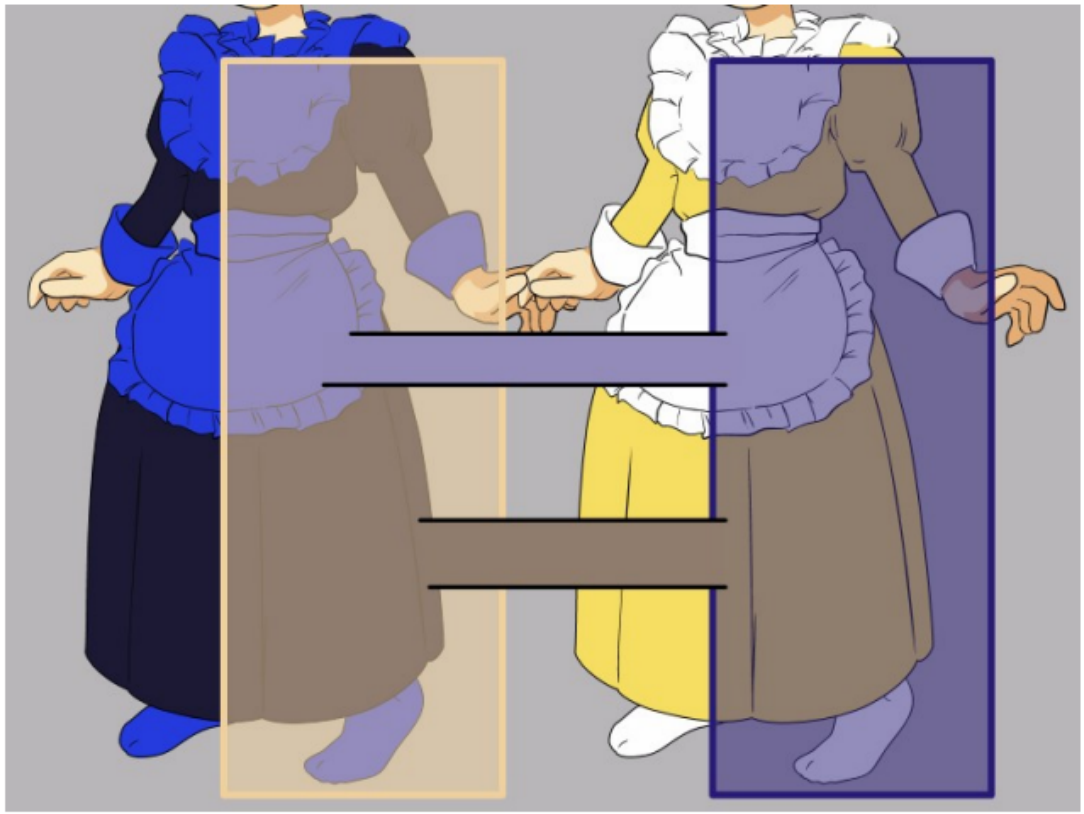
Et sett med *lover* for relasjoner mellom farger.

1. To fargede lyskilder virker forskjellige dersom de er forskjellige i dominant *bølgelengde*, *luminans*, eller *renhet*.
   - **Korrelar**: Enhver lyskilde har en komplementærfarget lyskilde, slik at blandingen av begge gir et ufarget lys (hvitt).
2. Utseendet til en blanding av lys fra to komponenter endres hvis én av komponentene endres.
   - **Korrelar**: En blanding av to lyskilder resulterer i en nyanse som varierer med de relative intensitetene. Metningen varierer avhengig av nyansene til hvert lys.
3. Det finnes lyskilder med forskjellige spektrale fordelinger som oppfattes identisk.
   - **Korrelar**: Identiske lys må ha identiske effekter når de legges til eller trekkes fra en lysfordeling.
4. *Abney's lov*: Intensiteten til en blanding av lyskilder er lik summen av intensiteten til komponentene.

Optiske Illusjoner

Eksempel: “The dress”. Er kjolen blå og svart eller hvit og gul?





Fargerom

Fargerom og Representasjon

Commision Internationale de l'Eclairage (CIE): Internasjonal autoritet for lys, farger, og illuminasjon. Hovedkvarter i Wien i Østerrike.

Tre primærfarger: Blå (436 nm), grønn (546 nm), rød (700 nm).

Basis for RGB fargerommet (addativt, mest vanlig).

Andre fargerom vi skal se på:

- α**-kanal**: Utvidelse med gjennomsiktighetskanal (gjerne RGBA).
- **Fargetabell**: Mye brukt i tidlig digital grafikk.
- **CMY(K)**: Fargerom for trykk, subtraktivt.
- **HSV** / **HSL**: Beskrivende fargerom.
- **YCbCr** / **YUV**: Luminans / Kromatisk fargerom.
- **XYZ** / **LAB**: Stardiserte trikromatiske fargerom.

Forskjellige fargerom har forskjellige egenskaper, viktig å vite om disse!

RGB

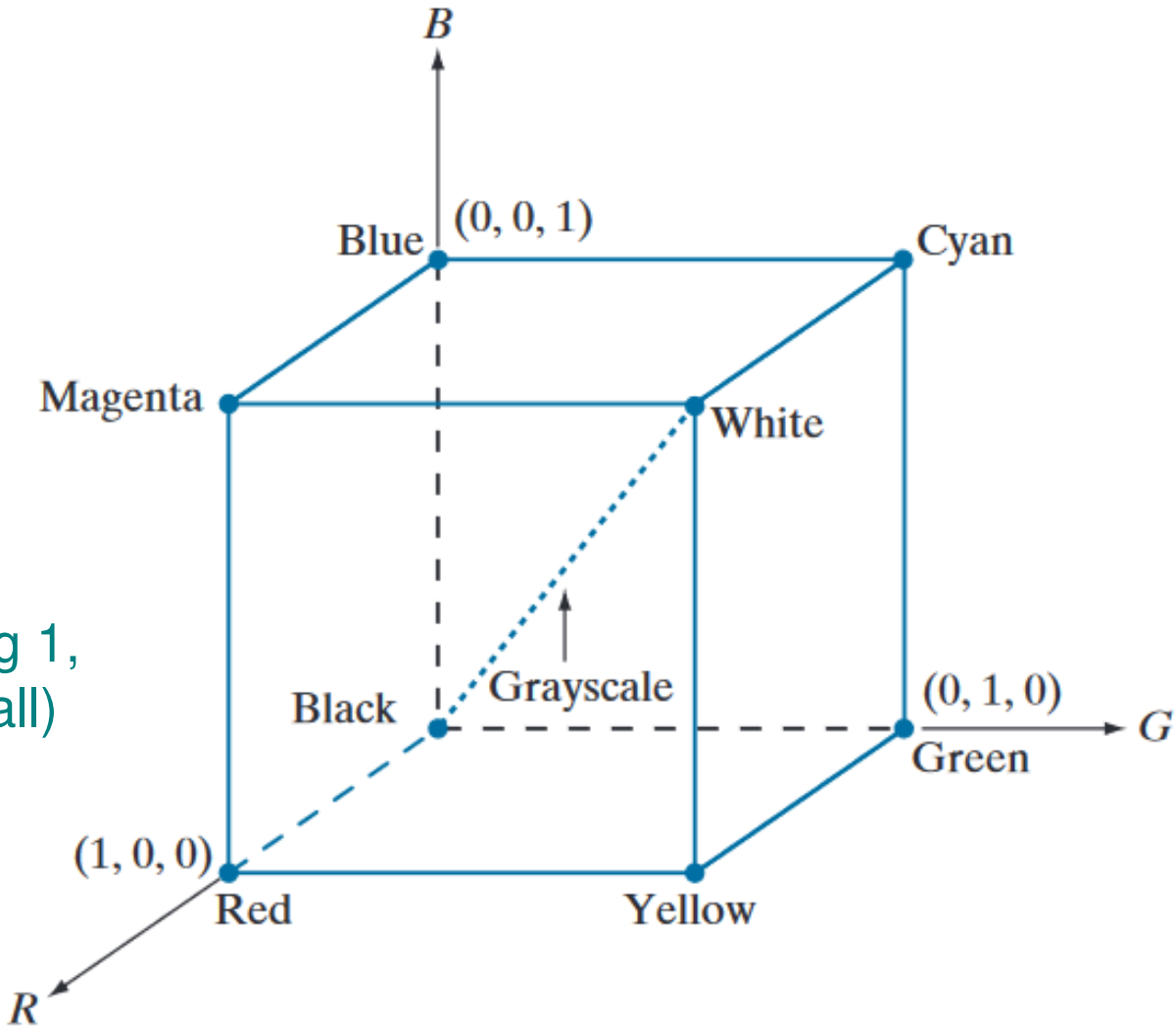
RGB er additivt.

Primærfarger:
Rød, Grønn, Blå

Sekundærfarger:
Cyan, Magenta, Gul

RGB-verdiene kan representeres mellom 0 og 1, eller 0 og 255 (hvis 8-bit tall)

For gråtonebilder er R=G=B



RGB Eksempel



Eksempel: Fullt fargebilde, og R-, G-, og B-komponentene vist hver for seg.

RGBA (α-kanal)

RGB med ekstra α-kanal (A)

α spesifiserer transparens:

- $\alpha = 0$: helt transparent
- $\alpha = 255$: helt opakt

Så-kalt "alpha-blending" brukes til

- legge to bilder over hverandre
- vise tekst over grafikk
- finnes i de fleste bildebehandlingsprogram



Legge bilde f over bakgrunn g:

$$\frac{f(x,y) \cdot \alpha + g(x,y) \cdot (255 - \alpha)}{255}$$

CMY(K)

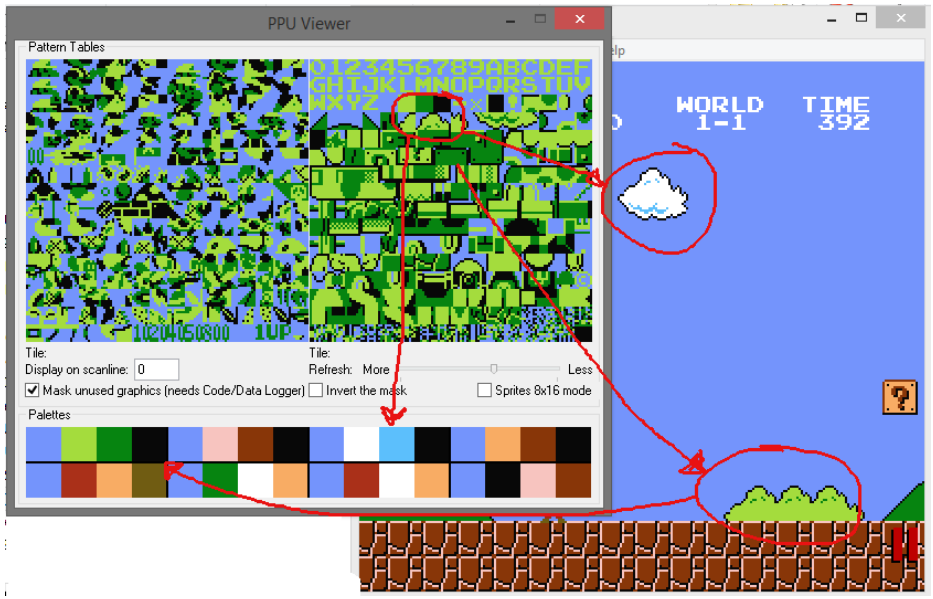
- CMY er subtraktivt
- “Primærfarger”: Cyan, Magenta, Gul
- “Sekundærfarger”: Rød, Grønn, Blå
- Transform fra RGB til CMY (verdier mellom 0 og 1):

$$\begin{bmatrix} C \\ M \\ Y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$

- I praksis blir svart i CMY mer mørk brun
  $\Rightarrow$ Legg til en verdi K for ekte svart. Dette gir CMYK.
- CMYK brukes i fargeprintere

Fargetabell (Color Look up Table)

- RGB kodes gjerne med 24-biter (8 + 8 + 8); 16 mill. farger.
- Ofte brukes kun en liten del av fargerommet (redudans).
- Kvantisering med lavere bitdybde gir ofte *dårligere resultater*, fordi scener har ofte mange nyanser av enkeltfarger.
- **Bedre tilnærming**: Adaptiv fargetabell (CLUT) for enkeltbilder med de viktigste fargenyansene.



CLUT i Praksis

- Fargetabellen enkodes direkte i bildefilen.
- Representerer hver farge med indeks i fargetabellen.
- Tidlig datagrafikk brukte nesten alltid CLUT.
- For fargeendringer (fotometrisk) endres kun tabellen, ikke bildet.
- **Annen filtrering**: Mer vanskelig å gjennomføre, må som regel konvertere til annet fargerom.

Kan vi lage et negativt bilde fra et positivt bilde med denne modellen?



Median Cut

Metode for CLUT kvantisering.

1. Finn den minste rektangulære partisjonen B som omslutter alle fargene i bildet.
2. Sortér fargene langs dimensjonen med størst utstrekning, d_{max}.
3. Splitt B i to ved medianen til d_{max}.
4. Gjenta steg 2-3 (rekursivt) for alle boksene som dannes helt til man har oppnådd et gitt antall farger
5. Hver boks tilegnes dets gjennomsnittsfarge.

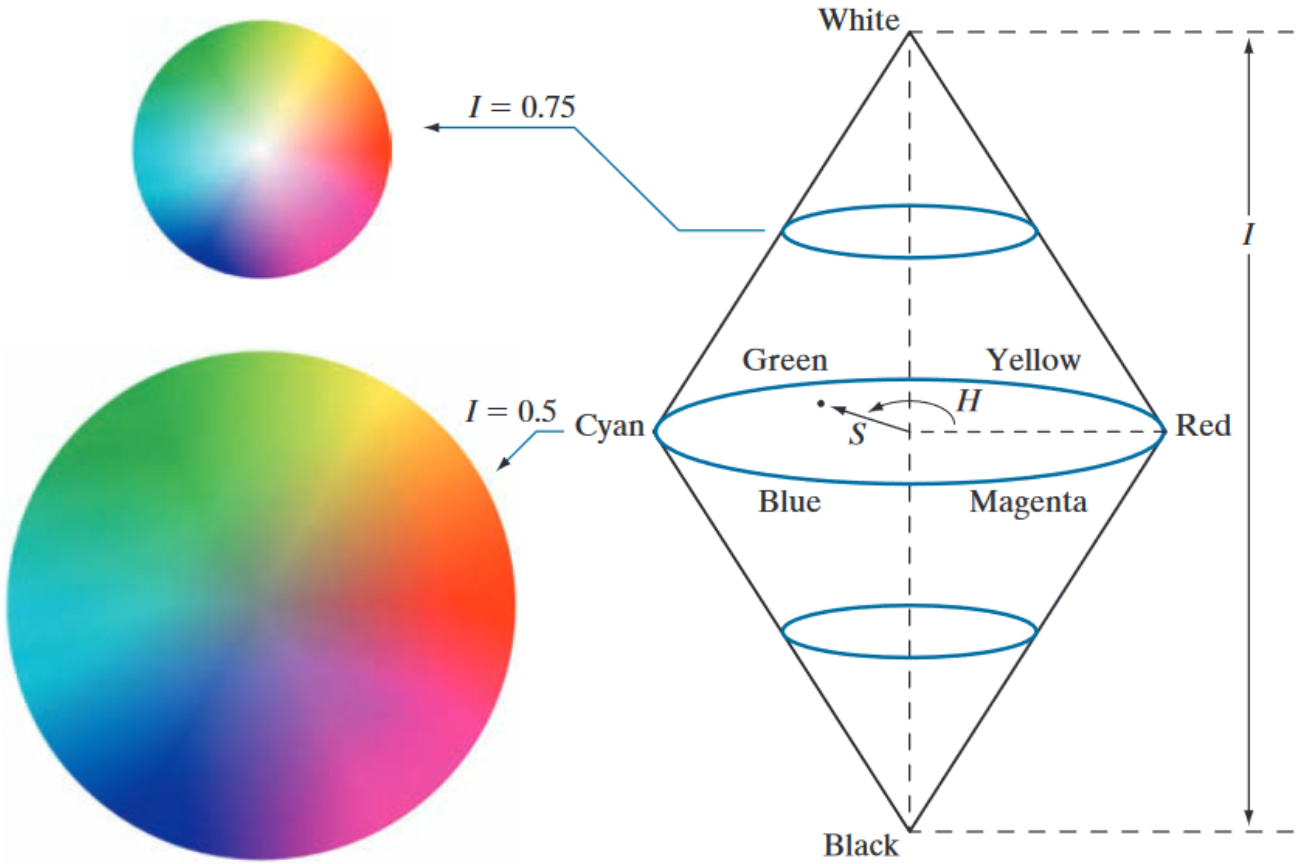
Median Cut er et eksempel på en trepartisjoneringsalgoritme.

Andre kjente metoder:

- Kvadraturtrær (quadtrees) for segmentering.
- KD-trær for generell rompartisjonering.

HSI

Alternativ representasjon av RGB som er mer intuitiv.



Hue: Farge

- Vinkel mellom 0° og 360°

Saturation: Metning

- Mellom 0 og 1
- S=0 $\Rightarrow$ Gråtone

Intensity: Intensitet

- Mellom 0 og 1
- svart $\longleftrightarrow$ hvit

Alle verdier kan konverteres til 8-bit tall mellom 0 og 255.

HSI og RGB

Fra RGB til HSI: Gitt RGB verdier normalisert mellom 0 og 1

$$H = \begin{cases} \theta & B \leq G \\ 360 - \theta & B > G \end{cases}, \quad \theta = \cos^{-1}\left\{ \frac{\frac{1}{2}\left[(R-G)+(R-B)\right]}{\left[(R-G)^2+(R-B)(G-B)\right]^{1/2}} \right\}$$

$$I = \frac{1}{3}(R+G+B), \quad S = \begin{cases} 0 & \text{hvis } I = 0 \\ 1 - m/I & \text{ellers} \end{cases}$$

Fra HSI til RGB: Litt mer innviklet, sjekk kap. 6.2 i pensumboka.

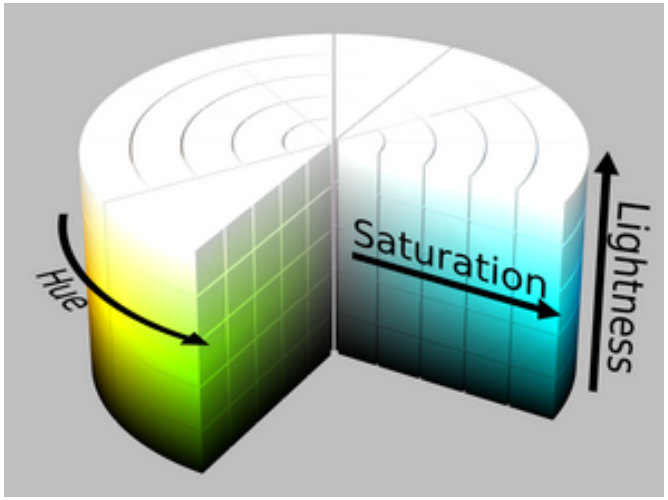
HSL/HSV

$M = \max\{R, G, B\}$, $m = \min\{R, G, B\}$

Minner om HSI.

Forskjellig definisjon på Intensitet/Lightness/Value:

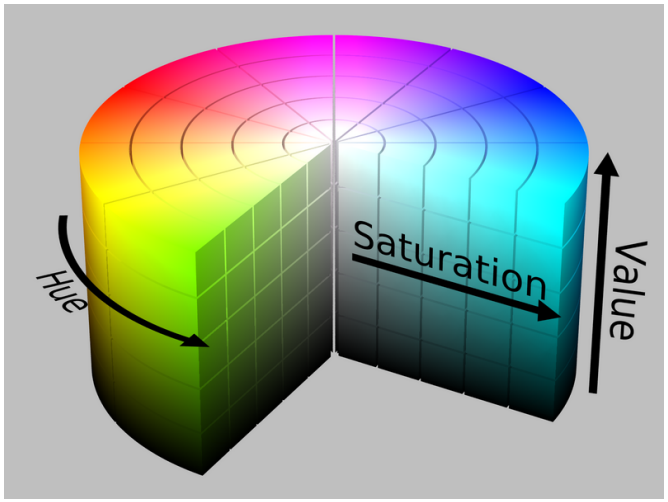
$$I = \frac{1}{3}(R + G + B)$$
$$L = \frac{1}{2}(M + m)$$
$$V = \max\{R, G, B\} = M$$



Litt forskjellig definisjon på saturation også:

$$S_L = \begin{cases} 0 & \text{hvis } L = 0 \text{ eller } L = 1 \\ \frac{M-m}{1-|2L-1|} & \text{ellers} \end{cases}$$

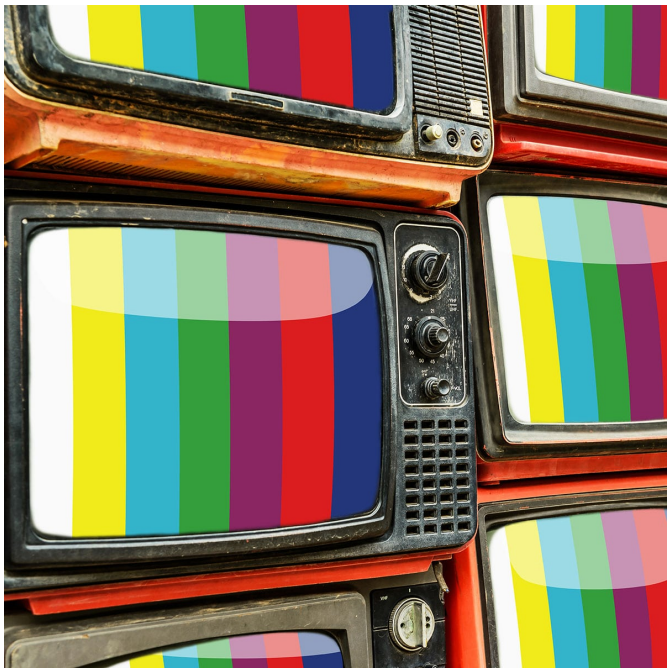
$$S_V = \begin{cases} 0 & \text{hvis } V = 0 \\ (M-m)/V & \text{ellers} \end{cases}$$



$S_I = S$ er som definert på forrige slide.

HSV brukes mest!

Fra Gråtone til Fargesignaler



Historisk perspektiv: Gråtonebilder i fjernsyn var lenge normen. Etterhvert ble teknologi utviklet for *fargefjernsyn*.

Problem:
Utvikle nye signaler til fargefjernsyn som beholder kompatibilitet med gråtonesignal.

Idé: Send gråtonesignaler som vanlig, men legg til fargesignaler modulert med en høyere frekvens.

For analoge signaler: YUV (Europa) og YIQ (USA / Japan).

For digitale signaler: Videreført til YCbCr.

YUV / YCbCr

Flere standarder for YCbCr. Den mest vanlige bruker samme koeffisienter som YUV.

$$W_r = 0.299, \quad W_g = 0.587, \quad W_b = 0.114$$

Konvertering fra RGB til YCbCr gitt ved lineærtransformasjonen

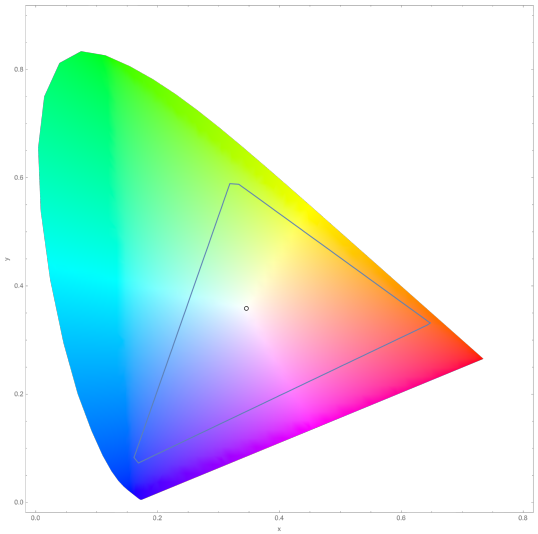
$$\begin{bmatrix} Y \\ Cb \\ Cr \end{bmatrix} = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 2W_r & 2W_g & 2W_b \\ -\frac{W_r}{1-W_b} & -\frac{W_g}{1-W_b} & 1 \\ 1 & -\frac{W_g}{1-W_r} & -\frac{W_b}{1-W_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix}$$



Figur: Originalbilde, Y kanal, Cb kanal og Cr kanal.

CIE: XYZ og LAB

I 1931 bestemte CIE seg for å utvikle **XYZ**;
en fargeromsmodell som knytter menneskelig syn og de fysiske egenskapene til synlig lys.



Y kanalen representerer lysintensitet,
imens **Z** er én-til-én med blåkulør (S tapper).

X kanalen velges m.h.p. Grassmann's lover

$$x = \frac{X}{X+Y+Z}, \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z}, \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Dette gjør at alle farger med samme intensitet kan gjengis i et 2D kromatisitetsdiagram.

Videreutviklet til **LAB**: et *perseptuelt uniformt fargerom*.
Mål: Endringene i fargerommet skal være lik "opplevd fargedifferanse".

XYZ og LAB er standard for å kvantifisere perseptuelle fargeforskjeller.

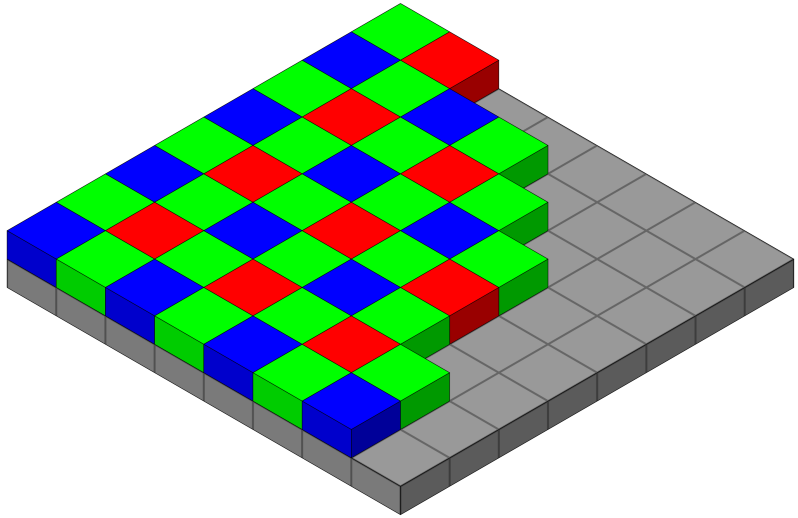
Fargebilder i Praksis

Bayer Filter

I digitale kameraer fanges farger med et filter knyttet til hver lyssensitive diode.

Vanligst er **Bayer-filteret**, der halvparten av diodene fanger grønt lys. Rødt og blått lys fanges henholdsvis med en fjerdedel.

Inspirert av tristimulus persepsjon i øyet.



For å rekonstruere bildet må bildet *demosaeres* (demosaicing).

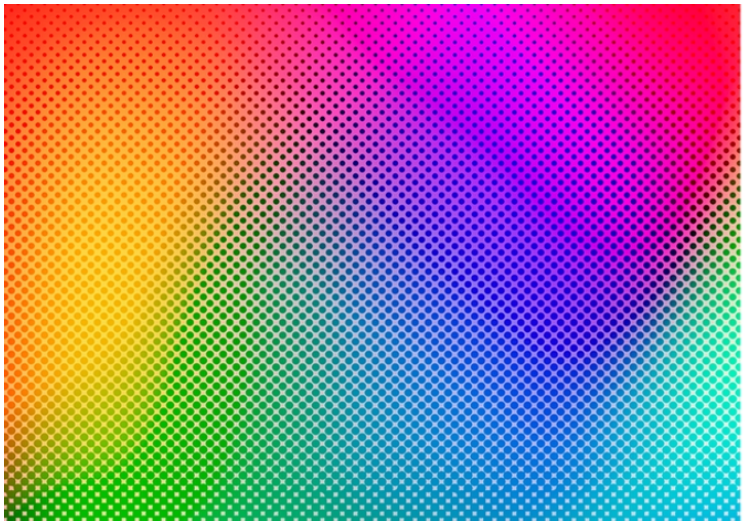
I de fleste digitalkameraer gjøres dette direkte i enheten selv, og bilder lagres med standardformater (JPEG, TIFF). Avanserte kameraer lagrer i stedet rådata (RAW) slik at demosaering kan gjøres med bedre algoritmer på datamaskin.

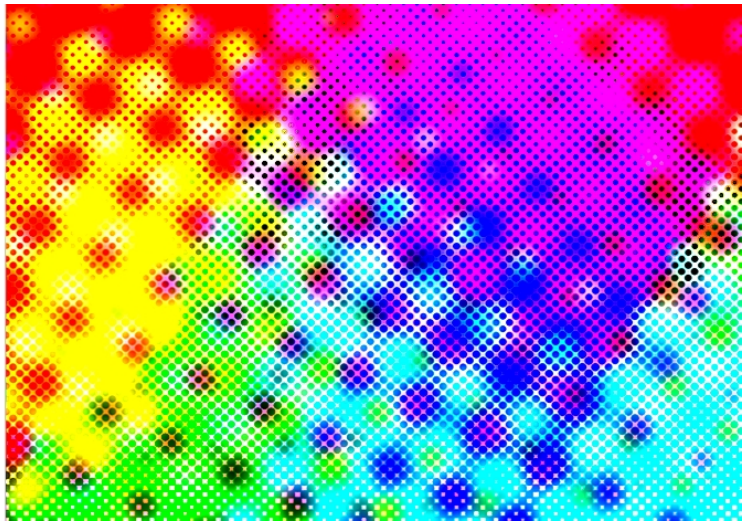
Skjermer og Standardisering

- Utseendet til bilder i RGB fargerommet avhenger av skjermen.
  - Samme bilde kan opptre forskjellig på forskjellige skjermer!
- Utseendet til utskrevne bilder avhenger av skriveren.
  - Samme bilde opptrer VELDIG forskjellig på forskjellige skrivere!
  - Forskjell i enda større grad enn på skjerm; avhenger av pigmenter i blekk, papir, dyser, og generell skriverteknologi.
- **Generelt**: Skjermer kan vise flere farger enn en skriver kan representere, men utskrevne bilder kan også representere en del farger som ikke kan vises på en skjerm.
- RGB (skjerm) og CMYK (utskrift) er *enhetsavhengige fargerom*.
- XYZ og LAB er *enhetsuavhengige* fargerom.

Utskrift av Gråtonebilder

- Mange skrivere skriver som regel binært, enten skriver vi eller så skriver vi ikke.
- Moderne blekkskrivere har justerbar dyseteknologi som kan justere dette med mer kontroll.
- Problem: Binær skriving antar binære bildesignaler!
- Løsning: Bruker istedet halvtoner; fingranulære punkter med variabel størrelse.





Dithering

Alternativ kvantiseringsmetode som tilnærmer halvtoneteknikk. Brukes også med CLUT i tidlig datagrafikk.
For binære bilder defineres en $2^n \times 2^n$ dithermatrise M rekursivt

$$M_{2n} = \frac{1}{(2n)^2} \times \begin{bmatrix} (2n)^2 \cdot M_n & (2n)^2 \cdot M_n + 2 \\ (2n)^2 \cdot M_n + 3 & (2n)^2 \cdot M_n + 1 \end{bmatrix},$$

der n velges mhp. antall ønskede kvantiseringsnivåer.

Dithermatrise plasseres ikke-overlappende over bildet, og pikselverdiene terskles med verdiene i M. For fargebilder terkles verdiene for hver kanal.

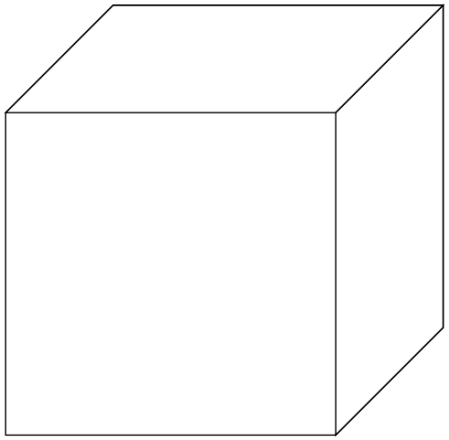
Brukes gjerne i pikselkunst for estetiske formål.



Histogrammer av fargebilder

3 fargekanaler $\Rightarrow$ 3-dimensjonalt histogram

Med 8-bit RGB får histogrammet
$256 \cdot 256 \cdot 256 = 16777216$ søyler (bins)



Et 1024×1024 bilde fyller maks 1/16 av søylene
$\Rightarrow$ 3-D histogrammet er mest tomt

Projeserer derfor histogrammet til 1-D eller 2-D:

- Projeksjon ned på R-, G-, eller B-aksen
  $\Rightarrow$ Et 1-D histogram for hver kanal
- Projeksjon ned på RG-, RB-, eller GB-planet
  $\Rightarrow$ Et 2-D histogram for hvert par

Histogramutjevning av RGB-bilder

Problem: Histogramutjevning på hver komponent (R, G, B) er uavhengig av hverandre. $\Rightarrow$ Gir ofte dårlig resultat!

Løsning: Transformer fra RGB til HSI/HSV og gjør histogramutjevningen på *I*-komponenten. Transformer resultatet tilbake til RGB.



Originalbilde



Histogramutjevning på RGB

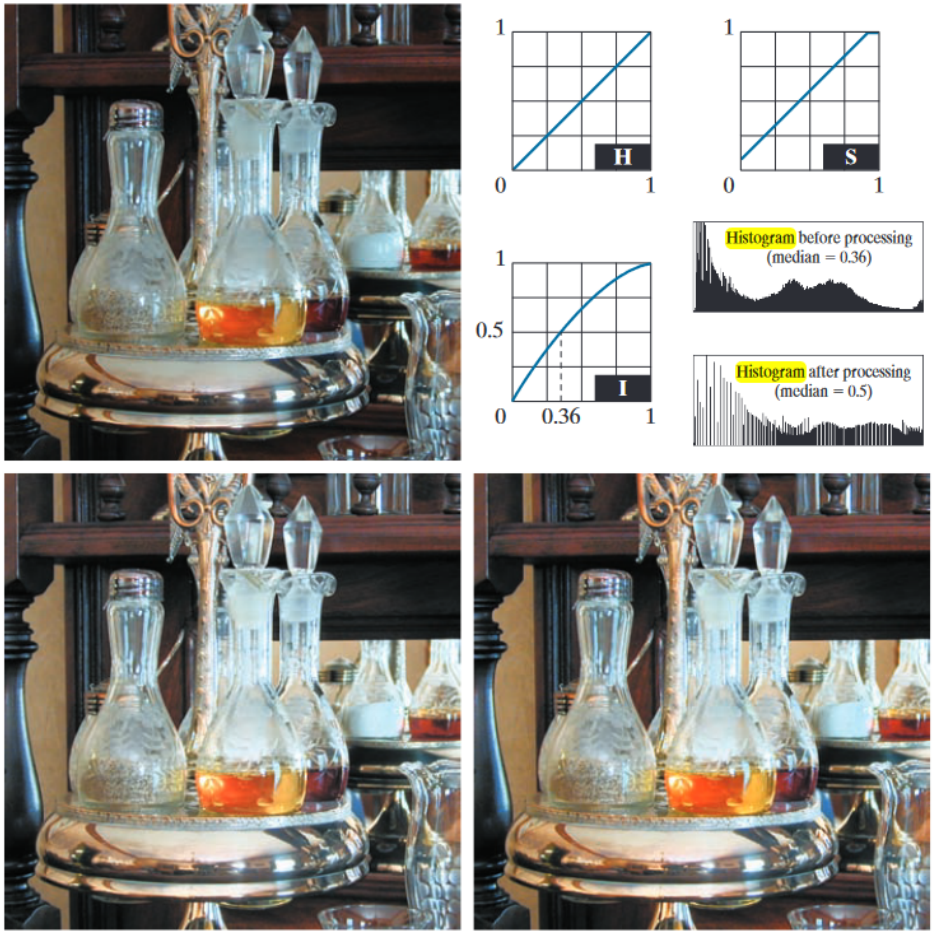


Histogramutjevning i intensitet i HSI

Histogramutjevning av RGB-bilder

Steg:

1. Transformer fra RGB til HSI/HSV
2. Bruk kumulativt I-histogram til histogramutjevning
3. Transformer tilbake til RGB



H og S er uforandret. Vi påvirker fargepersepsjonen kun ved å forandre I (eller V).

Hvis metningen S skal også justeres, gjør dette *før* transformen fra RGB til HSI/HSV.

Filtrering av Fargebilder

- Filtre for fargerom har gjerne flere komponenter; én for hver fargekanal.
- Dersom man ønsker å bruke enkeltkanalsfiltre for gråtoner over hele bildet, er en naiv metode å duplisere filteret over alle kanaler.
- Problem: Lavpassfiltre gir ofte *fargeblødning* mellom piksler.
- Løsning: Bruk HSI (HSV) og filtrer over intensitet.
- Samme gjelder for høypassfiltre; anvend filtre over intensitetskanal, men skarping av bilde er *mindre sensitivt for fargeblødning*.

JPEG Kompresjon

Fra forelesning om kompresjon snakket vi om JPEG kompresjon, og vi hoppet elegant over stegene som gjaldt for fargekomponentet.

Tar opp tråden nå:

1. **YCbCr fargerom**: Konverterer til YCbCr.
   - Utnytter et fargerom der kromatisitet er seperat fra intensitet.
   - I tillegg: Kromatisitet i YCbCr er en slags differansetransform, mer redudant.
2. **Kromatisk subsampling**: Subsampler i CbCr kanaler.
   - Utnytter at menneskeøyet er mindre sensitivt for lokale fargeforskjeller.
   - Nedsampler disse kanalene med 2:1 forhold.
   - Reduserer antall verdier med 50%!

Videre brukes samme strategi over de alle tre kanaler for de resterende stegene.

Aasan og Tan

Fargerom

Kap. 6: Digital Image Processing
(Gonzales and Woods)

