
INF 2310 – Digital bildebehandling

Forelesere våren 2010:

Anne Schistad Solberg
Are Jensen

Temaer i dag

- Praktisk informasjon
- Kursopplegg
- Motivasjon for kurset
- Hva er bildebehandling?
- Aktiviteter i bildebehandling på IFI
- Videre studietilbud
- Start pensum
 - Kapittel 1 + 2.1-2.2 i læreboka.

Kontakter

- Anne Schistad Solberg
 - Rom 4420 (4.etg.)
 - Email: anne@ifi.uio.no
 - Tlf: 22852435



- Are Jensen
 - Email: arej@ifi.uio.no
 - Tlf: 22852492



- Kontakt oss pr. mail eller ring fra telefon ved sofaen i 4. etg

Gruppelærer: Martin Ertsås (martiert@student.matnat.uio.no)

Lærebok

- **R.C. Gonzalez and R.E. Woods**
 - “Digital Image Processing”, Third Edition
Pearson/Prentice Hall, 2008.
- Noe tilleggsstoff kan bli lagt ut (pdf-filer)
- Pensumliste: Legges ut på fil – oppdateres.
- Pensum i INF4300 hentes fra samme bok!
- Ukeoppgaver: Vi kommer til å bruke MATLAB
 - “Digital Image Processing using MATLAB”
kan komme til å bli nyttig.
 - Kjøp ikke bare denne.

WEB-sider

<http://www.uio.no/studier/emner/matnat/ifi/INF2310/>

- Forelesningsplan/forelesningsfoiler (pdf - 4:1)
- Kursopplegg
- Ukeoppgaver
- Obliger
- Pensum-liste fra lærebok pluss tilleggsstoff
- Eksamensinformasjon
- Beskjeder

Kursopplegg

- Forelesninger tirsdager 12.15-14, Store Aud.
 - Merk: Onsdagstimer 9.15-10 blir ikke brukt
 - Unntak: Noen onsdagstimer brukes til grundig gjennomgang av teori, eksempler og eksamensoppgaver. Men da gir vi beskjed.
- Gruppeundervisning:
 - Regneoppgaver
 - Programmeringsoppgaver
- Obligatoriske oppgaver:
 - To obliger må være godkjent innen gitte frister

Gruppeundervisning

- Gruppe 1, Fredag kl. 10:15 -12:00, Rom 107 Vilhelm Bjerknes
- Første gruppe 1: onsdag 21. januar
- Aktiviteter i gruppetimene:
 - Løse programmeringsoppgaver
 - Få hjelp til å løse regneoppgaver
- Løsningsforslag/hint til løsning gis fortløpende ...
 - Bruk dem med vett! Løs oppgavene sjøl først!
- Obligene ligner på ukeoppgaver.....
- Eksamen ligner på obliger som ligner på ...
- "How to succeed by really trying":
GJØR OPPGAVENE!

Vurdering og eksamen

- To obliger må være godkjent
 - Kombinasjon av programmering og regneoppgaver
- Skriftlig midtveiseksamen (23.03.2010)
 - Teller ca. 30% av karakteren
- 3t skriftlig avsluttende eksamen (02.06.2010)
 - Teller ca. 70% av karakteren
 - Ingen hjelpemidler tillatt til avsluttende eksamen.
 - Bokstavkarakterer (A-F)
 - Karakteren fastsettes på bakgrunn av total score og helhetsvurdering i etterkant av avsluttende eksamen.

Hva lærer du i INF2310?

- Hva gjør egentlig *gimp* eller *Photoshop* med bildene?
- Hva kan jeg gjøre med bildene fra mitt digitalkamera?
- Bakgrunn for multimedia
 - TIFF, GIF, PNG, PBM, JPEG?
 - Bilderepresentasjon, kompresjon, formater, fargerom
 - Bildeforbedring - hvordan "redde" dårlige foto
- Grunnlag for videre studier i bildebehandling
 - Filtrering av bilder
 - Kantdeteksjon
 - Geometriske operasjoner
 - Segmentering – hva inneholder bildet?
- Programmering i MATLAB
 - "Læring ved programmering"

Temaer i INF 2310 våren 2010

- Avbildning
- Sampling, kvantisering og lagring
- Geometriske operasjoner
- Gråtone-mapping
- Histogrammer og histogrambaserte operasjoner
- Naboskapsoperasjoner
- Konvolusjon, lineær og ikke-lineær filtrering i bildet
- Fourier-transform, filtrering i frekvensdomenet
- Kompresjon og koding av bilder (I og II)
- Segmentering
- Morfologiske operasjoner
- Fargerom, fargebilder og bildebehandling i farger

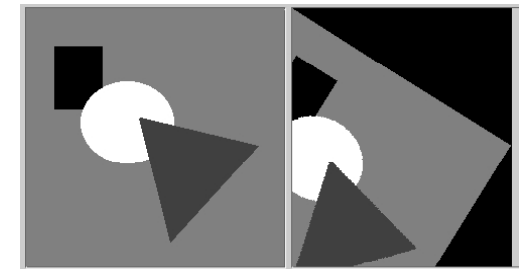
Hvordan lære bildebehandling?

1. Studer algoritmen for den operasjonen som skal utføres. Tenk deg hva som skjer på et enkelt eksempel.
2. Se på eksemplene brukt i boka og på forelesning. Finn ut hvorfor resultatene blir som de blir.
3. Skaff deg forståelse for hvordan et nytt bilde vil se ut etter at algoritmen er kjørt.
4. Prøv algoritmen og se om dette stemmer.

Eksempel på algoritme

Rotasjon av inputbildet $f(x,y)$ med dimensjon $M \times N$:
Lag nytt bilde, $g(x,y)$, med dimensjon $M \times N$

```
a0 = cos θ  
a1 = sin θ  
b0 = -a1  
b1 = a0  
for alle x',y' do  
  x = round(a0x' + a1y')  
  y = round(b0x' + b1y')  
  if (x,y) inside f then  
    g(x',y') = f(x,y)  
  else  
    g(x',y') = 0
```



Original

Rotert bilde

Merk størrelse og svart kant
Vi må skjønne hvilke effekter
algoritmen kan ha

Undervisning denne og neste uke

- I dag: Introduksjon, kap 1 + kap. 2.1 – 2.2
- Tirsdag 26.1: Sampling, kvantisering, lagring. Introduksjon til MATLAB.
- Merk: Første gruppe fredag 29.01.2010

Bildebehandling vs. bildeanalyse

- **BILDEBEHANDLING**
 - gir et *forbedret* eller *komprimert* bilde som resultat.
 - produserer et bilde som er "bedre" å se på,
 - eller mer egnet for videre, automatisert bildeanalyse
 - Eller en komprimert representasjon av bildet.
- **BILDEANALYSE**
 - Hva inneholder bildene – *objektgjenkjenning*
 - trekker ut informasjon som er viktig for å ta en beslutning eller styre en prosess i en eller annen anvendelse.
 - *informasjonen* er mye mindre enn mengden av *data* som finnes i et bilde eller i en bildeserie.
- **DETTE KURSET GIR EN GRUNDIG INNFORING I BILDEBEHANDLING**

Videre studier i bildeanalyse ved IFI

- **INF 4300 : Digital bildeanalyse – (H)**
 - Hvordan lage algoritmer som gjenkjenner objekter i bilder?
 - Prosjektoppgave: løs en praktisk oppgave i bildeanalyse
 - Krever litt mere matematikk enn INF 2310
 - Lineær algebra/matriser
 - Statistikk / klassifikasjon
- **INF 5300 : Utvalgte emner i bildeanalyse – (V)**
 - Konkrete temaer relatert til anvendelser
 - Ofte koblet til hovedoppgaver / doktorgradsprojekter
 - Undervises annet hvert år (men ikke før 2011 pga. sabbat)!

Hva brukes bildeanalyse til?

- Medisinske applikasjoner, bl.a. ultralyd, MR, celleprøver
- Industriell inspeksjon
- Trafikkovervåkning
- Tekstgjenkjenning, dokumentbehandling og kart
- Koding og kompresjon
- Biometri
 - identifikasjon ved ansiktsgjenkjenning, fingeravtrykk eller iris
- Jordobservasjon fra satellittbilder
- Havbunnskartlegging
- Kartlegging av oljereservoarer (seismikk)

Eksempler på hovedoppgaver

- Gjenkjenning av noter
- Egenskapsuttrekking for hyperspektrale bilder
- Distribuert segmentering av cellebilder
- Segmentering og parametrisering av lever-svulster
- Gjenfinning av et gitt ansikt i en videosekvens
- Segmentering av oljesøl i satellittbilder
- Kombinasjon av bilder fra ulike medisinske sensorer
- Overflateanalyse av trevirke
- Estimering av snødekning i radarbilder
- Bil-deteksjon i høyoppløselige bilder (radar og optisk)
- Bildeanalyse for testing av websider

EKSEMPEL: DITT NYE PASS

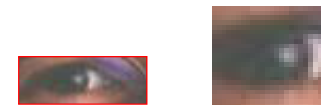
- Norske pass vil snart inneholde biometriske data, f.eks.
 - Fingeravtrykk
 - Iris
 - Ansiktsgjenkjenning
 - Stemmeidentifikasjon
- USA krever at nye pass må ha biometriske data med ansikt og fingeravtrykk.
IRIS-scanning og fingeravtrykk-scanning på flere flyplasser.

EKSEMPEL: ANSIKTSGJENKJENNING

- Vi gjenkjenner ansikter lett
 - Dette er noe av det første vi lærer
- Spesialisert oppgave
- Vi bruker både helheten og delene
 - grove trekk bestemmer kjønn
 - øvre del av ansiktet viktigst
 - analyserer ansiktsuttrykk samtidig
- Lettest å gjenkjenne pene ansikter
- Greit å kjenne igjen ansikter som er opp-ned, men vanskelig hvis delene er på feil sted.

EKSEMPEL: IRIS-IDENTIFIKASJON

- Iris er unik (til orden 1 av 10^{35})



- Finn øyne i (et nær-infrarødt) bilde
- Finn iris
- Trekk ut egenskaper fra iris
- Matche egenskaper med database
- Krever høy oppløsning i bildene
 - Minst 200 piksler på iris-diameteren
 - Minst 90 nivåer mellom iris og "sclera"
 - Minst 50 nivåer mellom iris og pupillen

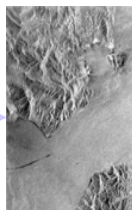
EKSEMPEL: OVERVÅKNING AV OLJEUTSLIPP



Tankbåt som slipper ut olje



Radarbilde av oljesølet



F1 19.01.10

INF 2310

21

EKSEMPEL: SKOGKÅRTLEGGING

Fra bildene kan vi avgjøre:

- Treslag/alder
- Klart til å hugges?
- Tømmervolum



Endring over tid:

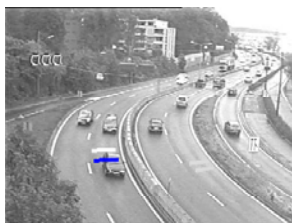
- Skogens helsetilstand – er det tørke eller insektskader
- Blir det mindre skog i Europa?
- Bevares regnskogen i Brasil?

F1 19.01.10

INF 2310

22

EKSEMPEL: VIDEOANALYSE/OVERVÅKNING



Trafikktelling: hvor mange biler passerer et punkt?



Overvåkning av bevegelser innendørs

F1 19.01.10

INF 2310

23

EKSEMPEL: RETUR AV FLÅSKER / BOKSER



Bilde fra Tomras kasseautomat.

Hvor mange flasketuter er det?

Hvor stor blir panten?



Pant av amerikanske bokser.

Hva står på boksen?

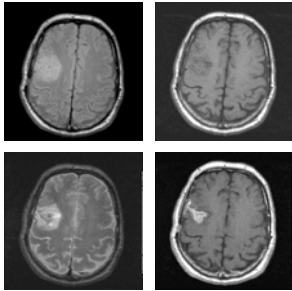
Hvor stor blir panten?

F1 19.01.10

INF 2310

24

EKSEMPEL: VEVSKLASSIFIKASJON I MR-BILDER



MR-bilder av hjernen



Klassifisert i vevstyper, svulst markert i rødt

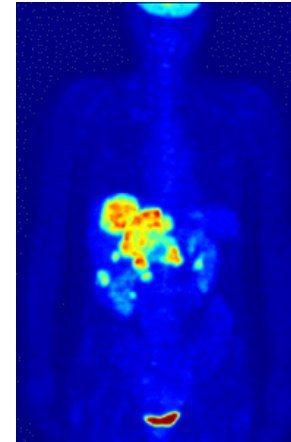
F1 19.01.10

INF 2310

25

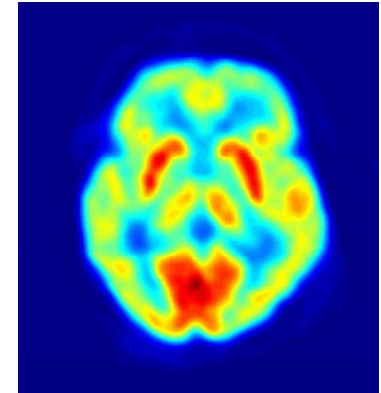
EKSEMPEL: PET-BILDER

Maximum intensity projection of typical full body ^{18}F FDG



F1 19.01.10

PET scan of human brain

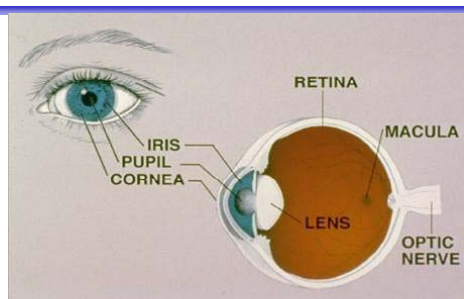


INF 2310

26

Øyet og synssystemet vårt

- Mest sensorisk input via synssansen.
- **Fleksibel optikk:**
 - Deformerbar linse
- **Adaptiv detektor:**
 - Variabel geometrisk oppløsning, logaritmisk respons
 - Pre-prosessering i netthinna
 - Separate systemer for høylys- og lavlyssyn
- **Enorm prosesserings- og lagringskapasitet**



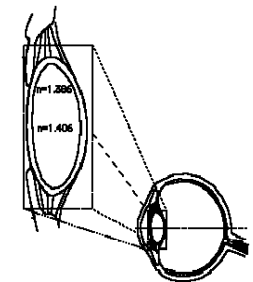
F1 19.01.10

INF 2310

27

Øyets linsesystem

- Øyets linsesystem fokuserer lyset.
- Fokallengde, $f \approx 1.5$ cm.
- Angis ofte i "dioptre",
 - $d=1/f$, der f er gitt i meter.
- Øyelinsen er vanligvis 67 d, hvorav hornhinna står for 45 d.
- Øyelinsen er veldig spesiell: den kan endre fokallengde.
- Evnen til å skifte fokus raskt (*akkomodasjon*) svekkes med alderen.



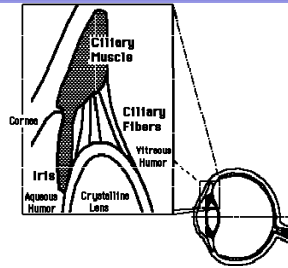
F1 19.01.10

INF 2310

28

Iris og pupillen

- Iris:
 - den fargede delen av øyet.
 - fungerer som en blender:
 - Kraftig lys: diameter ≈ 2 mm
 - Svakt lys: diameter ≈ 8 mm
 - mønstret brukes til verifikasjon.
- Pupillen
 - den svarte åpningen i iris
 - slipper lys inn på netthinna
 - lyset kommer ikke ut igjen



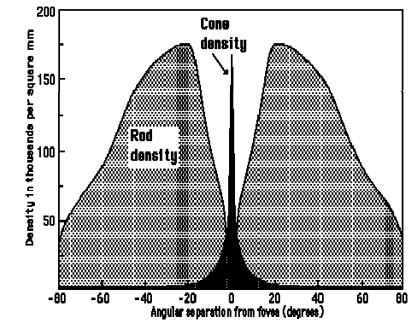
F1 19.01.10

INF 2310

29

Netthinna (retina)

- Netthinna er det lysfølsomme laget bak i øyet.
- Dekker omtrent 65% av den indre flaten.
- Omtrent 130 millioner detektorer.
- To typer detektorer:
 - staver ("rods")
 - tapper ("cones").
- Detektorene vender bort fra lyset!



F1 19.01.10

INF 2310

30

Staver og tapper

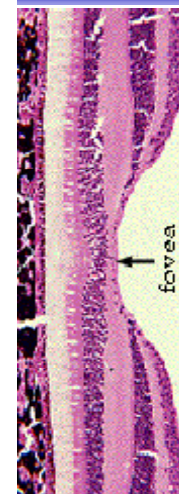
- Ca 120 millioner **staver** ("rods"), over hele netthinna.
 - Flere koblet til hver nerve-ende
 - => lav geometrisk oppløsning
 - Scotopisk (lav-lys) syn: dekker nedre 5-6 dekader av bølgelengde til synlig lys
 - Gir bare gråtoner
 - $\frac{1}{2}$ time mørke => 10 000 ganger høyere følsomhet
 - Er ikke følsomme for rødt lys
- Ca 7 millioner **tapper** ("cones"), konsentrert i fovea
 - Koblet til hver sin nerve-ende
 - => høy geometrisk oppløsning
 - Fotopisk (høy-lys) syn: dekker øvre 5-6 dekader
 - Farge-følsomme: 3 typer (RGB)

F1 19.01.10

INF 2310

31

Fovea



- **Fovea centralis** er ca 0.3 mm i diameter.
 - Overliggende cellelag borte
 - Mer lys til detektorene
 - Bare tapper (høylys, fargesyn)
 - Veldig høy tetthet
 - => høy geometrisk oppløsning.
 - Hver tapp er koblet til en nerve-ende.
- Når vi ser direkte på et objekt, øker oppløsningen, fordi øyet **foveerer** – flytter bildet til fovea.

F1 19.01.10

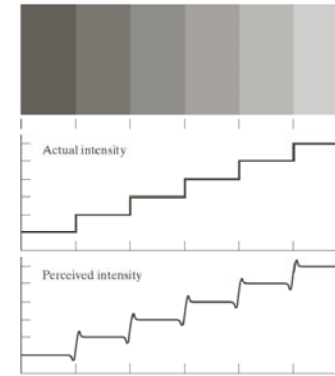
INF 2310

32

Egenskaper ved synet

- Vi kan se lysintensiteter over et stort intervall:
 - "Blendings-intensiteten" er 10^{10} ganger så høy som den svakeste intensitet vi kan oppfatte.
- Vi ser bare et visst antall nivåer samtidig :
 - den minste gråtone-forskjellen vi oppfatter: 2%
 - => ca 50 forskjellige gråtoner, men mange flere farger.
- Når øyet skifter fokus til et annet sted i bildet med et annet bakgrunnsintensitetsnivå, tilpasser øyet seg dette og ser fint lokale intensitets-forskjeller.

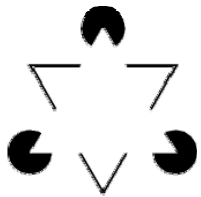
Nevrale prosessorer i netthinna



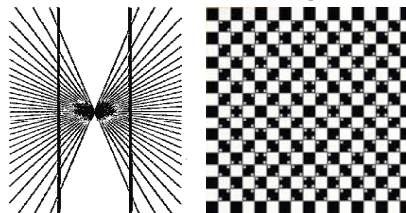
- Forsterker kanter.
- Stimulering av én del undertrykker stimulering av en annen del.
- Øker kontrasten ved overgang mellom uniforme regioner.
- Kalles "Mach-bånd"

Noen optiske illusjoner

- Illusoriske konturer



- Rette og buete linjer



- Multistabile bilder

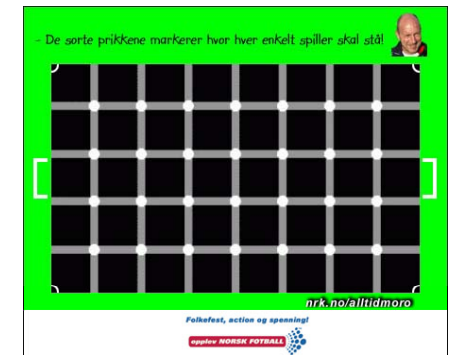
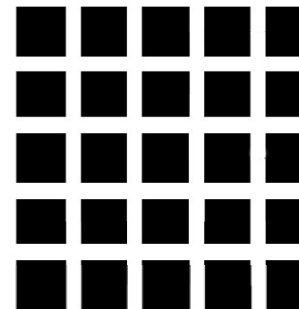


- Simultan kontrast



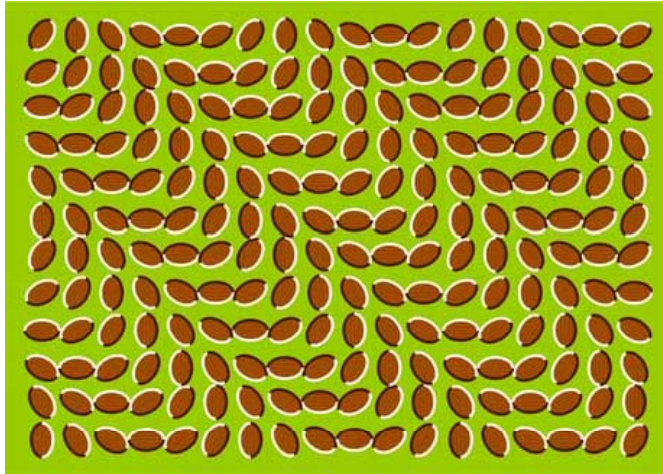
"Hermann-grid"

- Hva er årsaken til denne effekten?



- Svaret kommer i en senere forelesning!

Optiske illusjoner – "bevegelse"

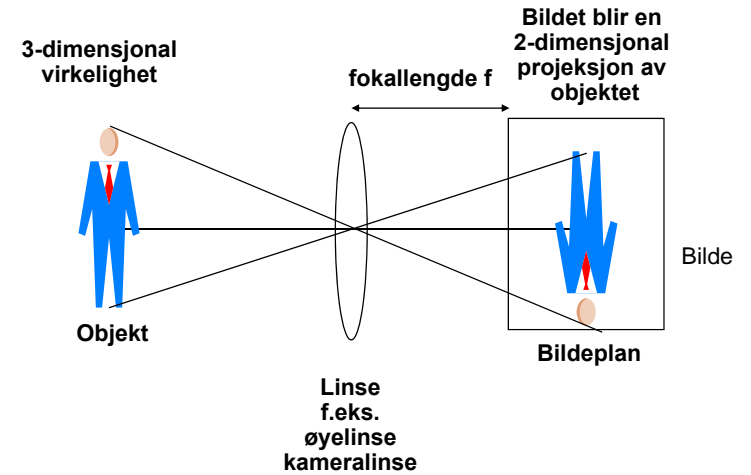


F1 19.01.10

INF 2310

37

Kamera og optikk

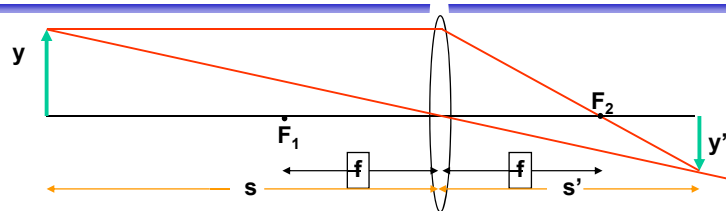


F1 19.01.10

INF 2310

38

Objekt-bilde relasjonen



- I figuren har vi to par av likedannede trekkanter:

$$\frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} \quad \text{og} \quad \frac{y'}{y} = \frac{s'-f}{f} \quad \text{gir} \quad \frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f}$$

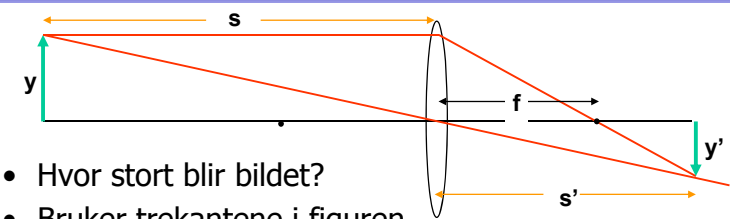
- Dette som er kjent som "objekt-bilde relasjoner".
 - Uttrykket gjelder både for fokuserende linser og speil

F1 19.01.10

INF 2310

39

Forstørrelse



- Hvor stort blir bildet?
- Bruker trekantene i figuren
- Finder uttrykket til høyre
- Forstørrelsen er $m = y'/y$
- Er objektet langt unna

$$s \gg f \Rightarrow m \ll 1$$

$$\frac{y'}{y} = \frac{s'}{s} \Rightarrow y' = \frac{y s'}{s}$$

$$\frac{1}{s} + \frac{1}{s'} = \frac{1}{f} \Rightarrow s' = \frac{s f}{(s - f)}$$

$$\Rightarrow y' = \frac{y f}{(s - f)}$$

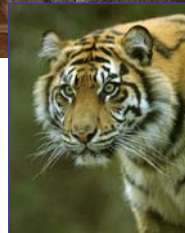
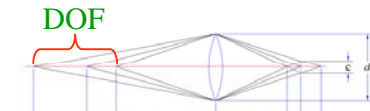
F1 19.01.10

INF 2310

40

Dybdeskarpheit (Depth of field)

- DOF = avstand foran og bak fokusert objekt som synes å være i fokus.



- Stor dybdeskarpheit gir et skarpt bilde av både forgrunn og bakgrunn.

- Liten dybdeskarpheit gjør at vi kan fokusere på en interessant del av objektet, mens en distraherende bakgrunn blir uskarp.

F1 19.01.10

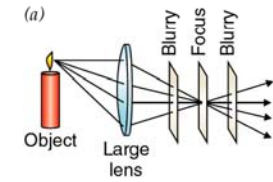
INF 2310

41

Blenderåpning og dybdeskarpheit

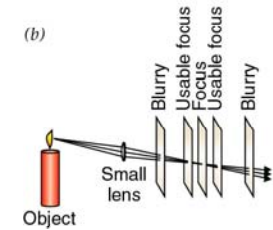
- Stor blenderdiameter D , lav f/D - verdi:

- Slipper inn mer lys, kortere eksponeringstid
- Fokus mer kritisk



- Liten blenderdiameter D , høy f/D -verdi:

- Slipper inn mindre lys, lengre eksponeringstid
- Fokus mindre kritisk



(fra howthingswork.virginia.edu)

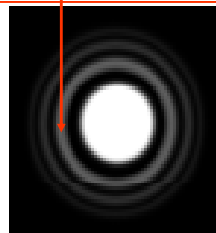
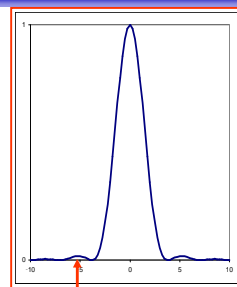
F1 19.01.10

INF 2310

42

Punktspredningsprofil (PSF)

- På grunn av diffraksjon vil en sirkulær linse avbilde en punktkilde som en lys flekk med mørke og lyse ringer rundt, der intensiteten til ringene avtar ganske raskt utover (Airy-disc).



- PSF for en gitt aperture kan beregnes ved hjelp av enkle ligninger.

F1 19.01.10

INF 2310

43

Vinkeloppløsnings-kriterier

- Anta at lensens diameter er D , og at lysets bølgelengde er λ .
- To punkter i et objekt kan akkurat adskilles i bildet hvis vinkelen mellom dem er gitt ved

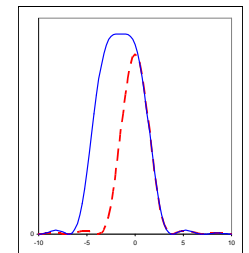
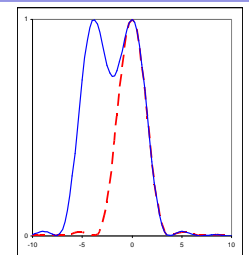
$$\sin \theta = 1.22 \lambda / D \text{ radianer.}$$

- Dette er "Rayleigh-kriteriet".

- "Dip"-en i profilen forsvinner når

$$\sin \theta = 0.952 \lambda / D \text{ radianer.}$$

- Dette er "Sparrow-kriteriet".



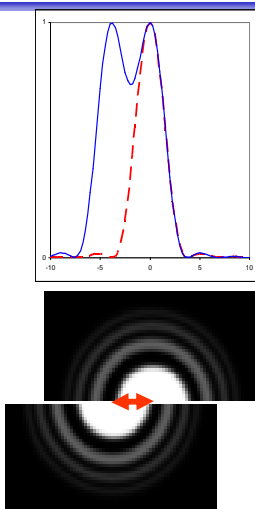
F1 19.01.10

INF 2310

44

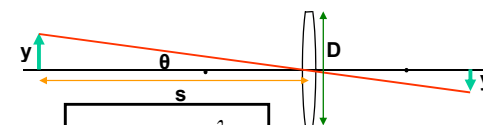
Rayleigh-kriteriet

- To punkt-kilder kan adskilles hvis de ligger slik at sentrum i det ene diffraksjonsmønstret faller sammen med den første mørke ringen i det andre.
 - Vinkelen mellom dem er da gitt ved $\sin \theta = 1.22 \lambda / D$ radianer.
 - Dette er "Rayleigh-kriteriet".
 - Vi kan ikke se detaljer mindre enn dette.



Hvor små detaljer kan en linse oppløse?

- Vinkeloppløsningen er gitt ved $\sin \theta = 1.22 \frac{\lambda}{D}$
- Tangens til vinkelen θ er gitt ved $\text{tg}(\theta) = \frac{y}{s}$
- For små vinkler er $\sin(\theta) = \text{tg}(\theta) = \theta$, når vinkelen θ er gitt i radianer.
- => Den minste detaljen vi kan oppløse:



$$\frac{y}{s} = 1.22 \frac{\lambda}{D} \Rightarrow y = 1.22 \frac{s\lambda}{D}$$

Synsfelt og perspektiv

- For et gitt bildeutsnitt vil fokallengden bestemme synsfeltet vi får.
- Hvis bildeutsnittet i fokalplanet er 24 x 36 mm, så gir
 - fokallengde 50 mm et synsfeltet på 47° (målt langs diagonalen),
 - fokallengde 28 mm et vidvinklet synsfelt (75°),
 - mens fokallengde 300 mm zoomer inn synsfeltet til bare 8°.
- Fokallengden kan forvrengt perspektivet.
 - En face portrett med kort brennvidde (vidvinkel) forstørres nesen.
 - Telelinser vil tilsynelatende komprimere dybden i bildet.
- "Normalobjektiver" gir omtrent samme perspektiv som øyet vårt.
 - Fokallengden må være omtrent lik lengden av diagonalen i bildeplanet.
 - 24 x 36 mm film gir diagonal = 43 mm: 45 – 50 mm = "normal".
 - En liten detektor-brikke i et digitalkamera kan gi normalt perspektiv med liten linse og kort brennvidde, men oppløsningen vil bli dårligere.

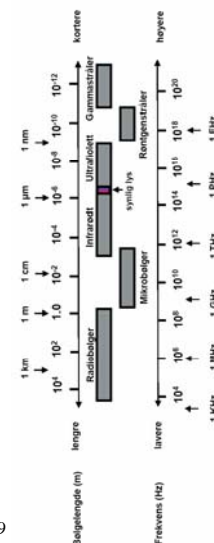
Samme scene, forskjellige fokallengder



Andre sensorer enn øyet

- **Aktivt eller passivt: "belyse og se" eller bare "se".**
- Optisk satellittbilde: Landsat P
- Radarbilde fra satellitt: SAR A
- Infrarødt satellittbilde P
- Medisinsk ultralyd A
- Røntgen og CT A
- NMR – magnetisk resonnans A
- Sonar, seismikk – lyd A
- Mikroskopi A
- Laser avstand scanner A

Bølgelengde og frekvens



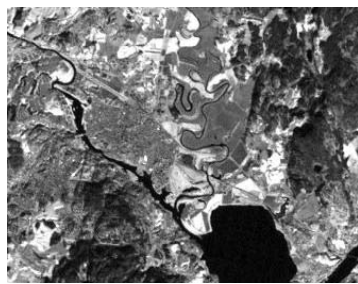
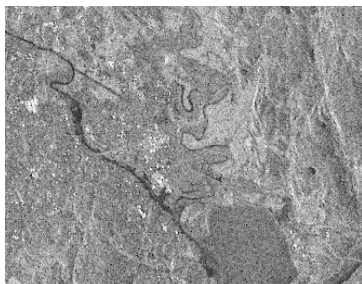
Fiolett:	0.4-0.446 μm
Blå:	0.446-0.500 μm
Grønn:	0.500-0.578 μm
Gul:	0.578-0.592 μm
Oransje:	0.592-0.620 μm
Rød:	0.620-0.7 μm

Sammenheng mellom bølgelengde og frekvens:

$$c = f \lambda \quad (\text{bølgeligningen})$$

$c =$ lysets hastighet (3×10^8 m/s)
 $\lambda =$ bølgelengde (m)
 $f =$ frekvens (Hz)

Eksempel: radar vs. optisk



Bilde fra ERS-1 SAR-satellitten Landsat-bilde fra samme område
 Radaren viser røffheten på overflater

Satellittbilder med lav og høy oppløsning

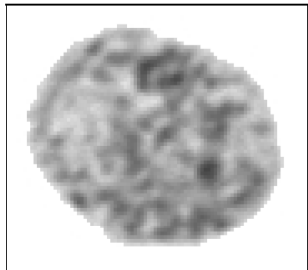
- Lavoppløsningsbilder gir oversikt, f.eks innen meteorologi.



- Høyoppløselige bilder er nyttige til kartlegging, detaljert arealplanlegging, overvåking, spionasje, ...

Medisinsk mikroskopi

- Eksemplet viser mikroskopi-bilder av cellekjerne fra kreftsvulst i eggstokkene (ovarie) for en pasient med god prognose (venstre) og en pasient med dårlig prognose (høyre).
- Visuelt kan man ikke se forskjell, men med matematisk analyse av teksturen kan man klassifisere dem riktig.



F1 19.01.10

INF 2310

53

CT og MR

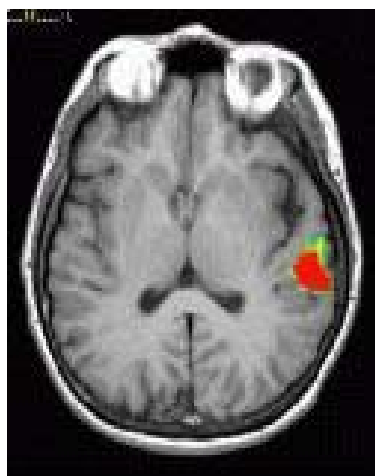
- Plasser røntgenkilden foran en pasient, og en detektor-matrise bak.
 - Roter oppsettet sakte rundt pasienten – ta flere bilder.
 - Etterpå kan vi regne ut absorpsjonen i hvert punkt i pasienten.
 - Vi får altså et 3-D røntgenbilde.
 - Kan ta snitt-bilder av dette volumet i plan og retninger vi ønsker.
 - Dette kalles "Computed Tomography", forkortet CT.
- Magnetisk resonans (MR) avbilder protonene i kroppen.
 - Dette gjøres ved å eksitere hydrogen-atomene,
 - Registrerer hvordan atomene de-eksiteres.
 - Tiden dette tar er avhengig av vevstype og av sykdomstilstand.

F1 19.01.10

INF 2310

54

Funksjonell MR (fMRI)



- Avbilder oksygenforbruket mens man gjør opptaket.
- Kan f.eks avbilde de delene av hjernen som er i aktivitet når man utfører en spesiell oppgave.
- Eksempel: aksialt snitt fra lyttende person.
- Tilsvarende verbal aktivitet ligger nær dette området (ved venstre tinning).

F1 19.01.10

INF 2310

55

Flerdimensjonale bilder

- Et 2-D bilde er en projeksjon av et 3-D objekt.
 - For å gjenskape objektet i 3-D må vi ha flere 2-D projeksjoner.
 - Vi må løse "korrespondanseproblemet", hvilke punkter i bildene svarer til samme punkt i virkeligheten.
 - I stereo-syn kombineres høyre og venstre bilde.
- Laser avstandsmåler gir 2-D bilde av tredje dimensjon.
- CT og MR gir 3-D bilder av organer inne i kroppen vår.
- Mikroskopi
 - konfokal mikroskopi belyser og avbilder på flere dyp i vevet,
 - serielle tynne snitt av celler gir 3D bilder med meget høy oppløsning.
- Tidssekvens av 2-D bilder kan sees som et 3-D datasett.
- Tidssekvens av 3-D bilder kan betraktes som et 4-D bilde.
- Flere bølgelengder for hvert tidspunkt gir et 5-D bilde.

F1 19.01.10

INF 2310

56