

Kapittel 10

Lysmåling, dispersjon av lys, farger



Lys og farger spiller en stor rolle i våre liv. Munch's "Solen" i Universitetes Aula boltrer seg i lys og farger.

I dette kapitlet gir vi diverse måleenheter for lys. Det er faktisk ganske komplisert når det kommer til stykket. Vi skiller mellom rent fysiske (radiometriske) mål og mål knyttet til følsomhetskurvene til et menneskeøye (fotometriske mål). I tillegg er det et vell av detaljer alt etter om vi måler lys fra en kilde eller lys som faller inn på et objekt.

Det er store forskjeller mellom hørselsansen og synssansen, noe som blant annet henger sammen med frekvensforskjellen mellom hørbar lyd og lys. Men det er også andre forskjeller. Vi kan ikke se flere farger samme sted til samme tid, mens vi kan høre lyd med flere frekvenser samtidig. Den mest sentrale delen av kapitlet er knyttet opp til fargesyn. Mange kjenner ikke sammenhengen mellom spektralfarger og fargeopplevelser når mange spektralfarger finnes samtidig. Digitale bilder utnytter disse sammenhengene maksimalt. Vi diskuterer også begrepene fargetemperatur og synssansens evne til adaptasjon

¹Copyright 2014 for tekst og figurer: Arnt Inge Vistnes.

Versjon 16032014.

10.1 Lysmåling

Da vi omtalte lyd, kom vi inn på dB-skalaene som brukes for å angi lydintensitet og lignende. Den gang så vi at vi kunne angi lydstyrke i et rent fysisk mål, f.eks. som amplituden i den gjennomsnittlige romlige oscillasjoner til luftmolekylene, eller som lokal trykkamplitude mens lydbølgen passerer. Et slikt mål har en begrenset verdi siden svingninger med frekvens lavere enn ca 20 Hz eller høyere enn ca 20 kHz hører vi ikke uansett hvor kraftig en slik lyd er. Vi måtte derfor innføre et eget lydstyrkemål som var knyttet opp til hvor følsomt menneskeøret er for lyd med ulike frekvenser.

På tilsvarende måte finnes det to helt parallelle målesystemer når vi skal angi lysmengder/lysintensiteter. Et “radiometrisk” målesystem er basert på fysiske energimål hvor enheter er knyttet til watt på en eller annen måte. På den annen side finnes et “fotometrisk” målesystem som er bygget på synsinntrykk, det vil si menneskeøyets følsomhetskurve. Her er den grunnleggende måleenheten lumen (som igjen er basert på SI-enheten candela).

La oss først se på radiometri. Det er først og fremst fire ulike mål som da er aktuelle:

- Energi eller effekt som forlater en kilde totalt.
- Effekt som forlater kilden i en begrenset romvinkel.
- Effekt per flate som faller inn mot en overflate.
- Effekt per flate som stråler ut fra en overflate.

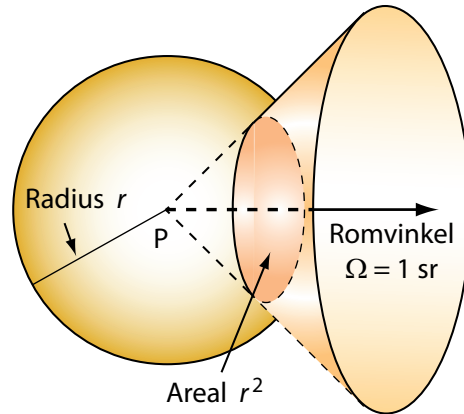
Det kan også være aktuelt å angi effekt per bølgelengde (eller frekvens) for mer eller mindre alle størrelsene ovenfor. Vi får da såkalte spektrale varianter av grunnenhetene.

I flere enheter inngår størrelsen “romvinkel”. SI-enheten for romvinkel er en *steradian* (forkortes *sr*). En romvinkel med toppunkt P er 1 sr dersom romvinkelens kjegleflate, som vist i figur 10.1, kutter av en flate med areal r^2 av et kuleskall sentrert i P med radius r .

Målinger basert på romvinkel er som oftest bare interessante når målingene foregår langt fra kilden sammenlignet med kildens utstrekning.

De mest vanlige størrelser som brukes innen radiometri er som følger:

- *Strålingsenergi* (radiant energy, eng), måles i J. Karakteriserer kilden.
- *Strålingseffekt / strålingsfluks* (radiant flux), måles i W. Karakteriserer kilden.
- *Strålingsintensitet* (radiant intensity), måles i W/sr. Karakteriserer stråling per romvinkel i en gitt retning.
- *Radians* (radiance), måles i W/(sr m²). Karakteriserer utstrålt effekt per kvadratmeter projisert flate per steradian romvinkel i en gitt retning.
- *Irradians / innstrålingstetthet* (irradiance), måles i W/m². Karakteriserer strålingsintensiteten inn mot en overflate.
- *Utstrålingstetthet / strålingseksitans* (radiant exitance), måles i W/m². Karakteriserer strålingsintensiteten ut fra en overflate.



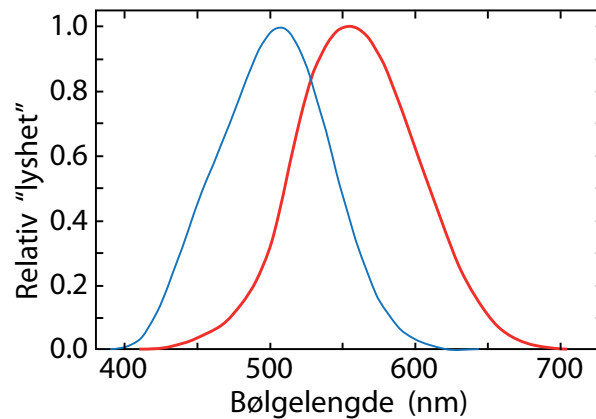
Figur 10.1: En romvinkel på 1 steradian (sr) kutter av et areal r^2 fra en kuleflate med radius r . Toppunktet til romvinkelen og sentrum for kuleskallet må sammenfalle.

Erfaringsmessig er det vanskelig å forstå forskjellen mellom strålingsintensitet og radians. Vi vil derfor forsøke å konkretisere. Strålingsintensiteten forteller hvor stor intensitet vi har fra en lyskilde i en viss retning gjerne sammenlignet med andre retninger. En spot-lyspære vil gi betydelig høyere intensitet i den retningen spoten er rettet enn i en retning som ligger utenfor den lyskjeglen hvor spoten gir mest lys. Vi kan beskrive denne fordelingen ved f.eks. en graf som viser strålingsintensiteten som funksjon av vinkel fra lyskjeglens akse. Intensiteten (målt f.eks. som irradians) i ulike avstander fra spoten vil variere med avstanden, men strålingsintensiteten, som er effekt per romvinkel, vil være uavhengig av avstand fra kilden.

Radians er en størrelse som ligner mye på strålingsintensitet, men brukes i de tilfellene der lyskilden er utstrakt slik at det er meningsfylt å angi hvor stor strålingsintensitet som kommer fra ulike deler av lyskilden. Hvor stor strålingsintensitet er det f.eks. fra områder omtrent midt på Sola (sett fra Jorda), og hvor stor strålingsintensitet får vi fra områder lenger ut mot kanten av Sola (sett fra oss)? Vi normerer strålingsintensiteten ut fra *projisert* flate og ender opp med radians. Områder nær kanten på Sola (sett fra Jorda) ligger på skrå i forhold til synsretningen fra Jorda. Da dividerer vi strålingsintensiteten med et tilsynelatende areal sett fra oss, dvs et tenkt areal som står vinkelrett på synsretningen fra oss som dekker det området vi beregner strålingsintensiteten fra. For områder ved sentrum av solskiva, behøver vi ikke gjøre en slik korrigerende siden soloverflaten midt på solskiva står vinkelrett på synsretningen til oss. Da vil projisert flate være identisk med virkelig flate, noe som forenkler beregningen av radians (strålingsintensitet per (projisert) flate på lyskilden).

Legg merke til at det ikke er noen enkel proporsjonalitet mellom radiometriske verdier og lysstyrke slik øyet oppfatter det. En rent infrarød kilde kan ha en høy strålingsfluks, likevel vil ikke øyet oppfatte nærmest noe som helst lys fra en slik kilde. Det er derfor et klart behov også for måleenheter som er knyttet til menneskets oppfatning av lysmengder.

Figur 10.2 viser øyets følsomhetskurve, både for fargesyn (tappene) og nattsyn (stavene). Det er bare kurvens form som er vist, ikke absolutt sensitivitet (toppunktene er normert til 1.0).



Figur 10.2: Kurver som viser hvor “lys” menneskeøyet oppfatter ulike spektralfarger når radiansen inn mot øyet holdes konstant. Den røde kurven (til høyre) gir “lyshetskurven” for fargesyn (tapper), mens den blå kurven gir tilsvarende kurve for mørkesyn (staver). Den første har toppunkt ved 555 nm (grønt), mens den andre har toppunkt ved ca 505 nm. Kurver av denne typen varierer noe fra person til person, slik at en standardkurve må lages ut fra mange målinger. Figuren er basert på Wikipedia (eng) med oppslagsordene “scotopic vision” og “photopic vision” per 22. 3. 2013, hvor CIE’s luminosity function er inkludert blant flere. Om CIE: Se referanselisten.

Overgangen mellom radiometri og fotometri er helt analog til overgangen mellom lydintensitet i W/m^2 eller $\text{dB}(\text{SPL})$ på den ene siden og $\text{dB}(\text{A})$ (eller $\text{dB}(\text{C})$) på den andre (se kapittel 6 om lyd og hørsel). Vi må også for synssansen integrere opp fysiske mål i W/m^2 og vekte bidragene for ulike bølgelengder med øyets lyshetsfølsomhet (figur 10.2) for samme bølgelengde. Det betyr for eksempel for fargesyn at det må dobbelt så kraftig radians i $\text{W}/(\text{sr m}^2)$ for lys ved 510 nm (eller 620 nm) for at det skal bidra like mye til lyshetsopplevelsen som lys ved 555 nm (se figur 10.2).

Absolutt skala i fotometrisammenheng bestemmes ved å angi en sammenheng mellom radiometri og fotometri for toppunktet i kurven. Sammenhengen finnes i definisjonen for grunnenheten for fotometri i SI-systemet, nemlig *candela* (forkortet *cd*):

Monokromatisk lys med frekvens $540 \cdot 10^{12}$ (bølgelengde ca 555 nm) og strålingsintensitet (radiant intensity) $1/683 \text{ W}/\text{sr}$ har per definisjon en lysstyrke på 1.0 candela (cd).

Tallet $1/683$ virker merkelig, men har sammenheng med at måleenheten tidligere var “normallys”, som svarte omtrent til lyset fra et stearinlys. Candela er valgt slik at den omtrent svarer til den gamle enheten.

Det kan bemerkes at i SI-systemet er det bare syv grunnenheter, slik at candela virkelig

har en sentral rolle. Det er i grunnen nokså pussig når vi vet at enheten er så nøye knyttet opp til menneskets synssans. På den annen side er definisjonen av candela i SI-systemet gitt omtrent på samme måte som om det var en radiometrisk størrelse siden lyskilden bare har én bølgelengde.

Lumen (lm) er en avledet enhet, lik candela multiplisert med romvinkelen. Lumen angir hvor stor synlig lysstyrke en kilde gir fra seg (integrert over alle retninger). En kilde som gir mange lumen vil gi kraftigere synlig lys enn en kilde med få lumen (se figur 10.4).

Her følger da størrelser som brukes innen fotometri:

- *Lysmengde* (luminous energy, eng), måles i $\text{cd sr s} = \text{lm s}$ (candela steradian sekund = lumen sekund). Karakteriserer kilden.
- *Lysfluks / lysstrøm* (luminous flux), måles i lumen: $\text{lm} \equiv \text{cd sr}$. Karakteriserer strøm av synlig lys som kommer fra kilden.
- *Lysstyrke / lysintensitet* (luminous intensity), måles i candela: $\text{cd} = \text{lm/sr}$. Karakteriserer synlig lysintensitet fra en lyskilde (per romvinkel) i en gitt retning.
- *Luminans* (luminance), måles i cd/m^2 . Karakteriserer utstrålt lysintensitet fra hver (projisert) kvadratmeter av kilden.
- *Illuminans / belysningstetthet* (illuminance), måles i $\text{lm/m}^2 \equiv \text{lux}$. Karakteriserer lysfluks inn mot en overflate.
- *Lyseksitans / lysutstrålingstetthet* (luminous emittance), måles også i $\text{lm/m}^2 \equiv \text{lux}$. Karakteriserer lysfluks som stråler ut fra en overflate.
- *Lysutbytte* (luminous efficacy), måles i lm/W . Karakteriserer hvor effektiv en lyskilde er å omsette fysisk effekt til synlig lysstyrke.

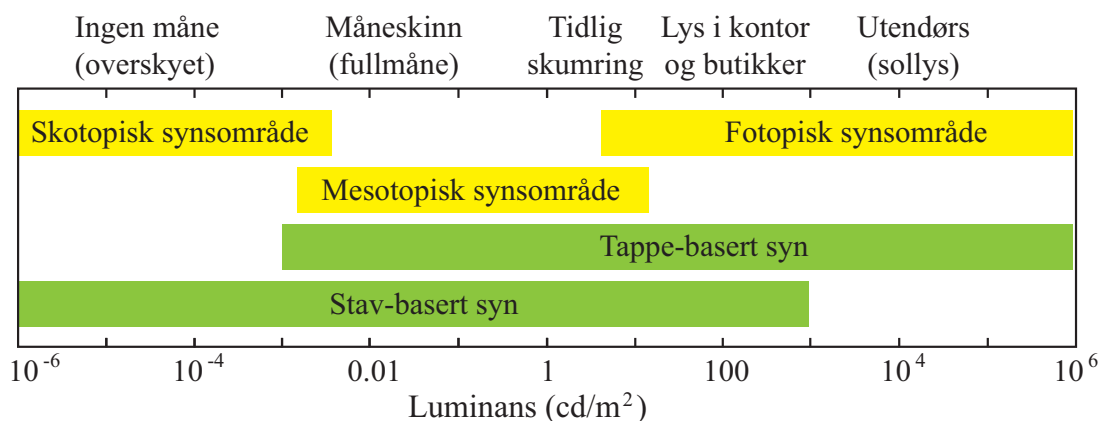
La oss forsøke å sette noen av størrelsene i sammenheng:

Anta at vi har en punkt-lyskilde som har en lysfluks/lysstrøm på 4π lumen totalt. Dette er en oppintegrert lysstyrke for kilden (tar med alle retninger.)

Lysintensiteten fra denne kilden er 1 candela i alle retninger (antar en punktformig lyskilde). Lysstyrken er 1 candela uansett hvor langt unna lyskilden vi er, for lysstyrken karakteriserer kilden og ikke lyset på et gitt sted.

Setter vi imidlertid opp en skjerm på tvers av lysretningen, vil belysningstettheten/illuminansen på skjermen avta med avstanden fra kilden. Vår punktlyskilde med lysfluks 4π lumen vil ha en illuminans på 1 lux på innsiden av et kuleskall med radius 1 m sentrert i lyskilden. Øker vi radien i kuleskallet til det doble, avtar illuminansen til $1/4$ lux.

Øyet vårt kan tilpasse seg et enormt spenn med lysintensiteter. Figur 10.3 viser en oversikt over luminans i omgivelsene våre under ulike forhold. I mange år har det vært hevdet at det svakeste lyset menneskeøyet kan oppfatte er noen få fotoner per akkumuleringstid i stav-synscellene (det vil si fem til ti fotoner per sekund innenfor et bitte lite område på netthinnen). Dette er imidlertid en oppfatning som bygger på fotoner som udelelige partikler, og mer moderne forskning stiller spørsmålsteget med om dette er en god beskrivelse



Figur 10.3: Omtrentlig lysnivå (luminans) i omgivelsene hvor synssansen vår fungerer. Figuren er basert på www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/Sample-Chapter.pdf per 22. mars 2013.

eller ikke (se referanselisten til slutt i kapitlet). Uansett er det en utrolig lav lysintensitet sammenlignet med fullt sollys.

10.1.1 Lumen vs watt

Det har de siste årene vært mye oppmerksomhet på lyskilders effektivitet. En lyspære av Edison-typen, for å si det slik, omsetter om lag 80 % av energien til utstrålt energi. Resten blir til varme i ledninger, sokkel osv. Av den utstrålte energien går det meste til infrarød stråling som ikke er synlig lys. Når slike lamper brukes i omgivelser hvor vi har bruk for oppvarming, er den lave effektiviteten i å lage synlig lys ikke noe problem. I omgivelser der vi tvert om har bruk for å fjerne varme (i varme strøk), er slike lamper ugunstige.

I figur 10.4 er det vist fire ulike lyspærer. Den klassiske 40 W pæra gir 300 lumen, dvs 7.5 lm/W. For halogenpæra er lysutbyttet $130 \text{ lm}/10 \text{ W} = 13 \text{ lm/W}$. Fra lysstoffrøret får vi $600 \text{ lm}/9 \text{ W} = 67 \text{ lm/W}$, og endelig, for sparepæra er utbyttet $650 \text{ lm}/11 \text{ W} = 59 \text{ lm/W}$. Det er med andre ord om lag en faktor 9 mer lysutbytte for lysstoffrør sammenlignet med den tradisjonelle lyspæra.

I dag er det stor interesse for neste generasjons lyskilder. Mest kjent er hvitlys LED (Light Emitting Diode). I lommelykter ol. har slike lysdioder vært i bruk i flere år allerede, og det gir mye lengre levetid for batteriene. Det er imidlertid bare en moderat forbedring i lysutbyttet for lysdioder sammenlignet med lysstoffrør og sparepærer foreløpig. Vi oppnår om lag 80 - 90 lm/W. Fordelen med lysdioder er imidlertid at de er små i utstrekning, at de kan kjøres med lavere spenning enn sparepærer, og at levetiden hevdes å være om lag ti ganger lenger (estimert 20 000 - 100 000 timer, dvs flere år avhengig av bruk).

En nyere og mindre kjent teknologi er såkalte organisk lysemitterende dioder (oled). De lages gjerne som lysende flater, se høyre del av figur 10.4. Hittil er maksimalt oppnådd



Figur 10.4: Eksempler på dagens lyspærer (til venstre). Effekt, lysstrøm, levetid i timer og spenning er angitt: 10 W halogenpærer (130 lumen, 3000 t, 12 V), 40 W Classic (300 lumen, 2500 t, 240 V), 11 W sparepære (“= 60 W”) (650 lumen, 10000 t, 240 V), og 9 W lysstoffrør (“= 60W”) (600 lumen, ukjent levetid, 240 V anlegg). Til høyre: Bilde av organisk lys-emitterende dioder (oled-panel) sammen med noen vanligere lyskilder. Bildet er hentet fra en artikkel om oled skrevet av Gary Boas i Photonics spectra februar 2010.

lysutbytte på oled på vel 100 lm/W, men målet er å nå 150 lm/W i 2015.

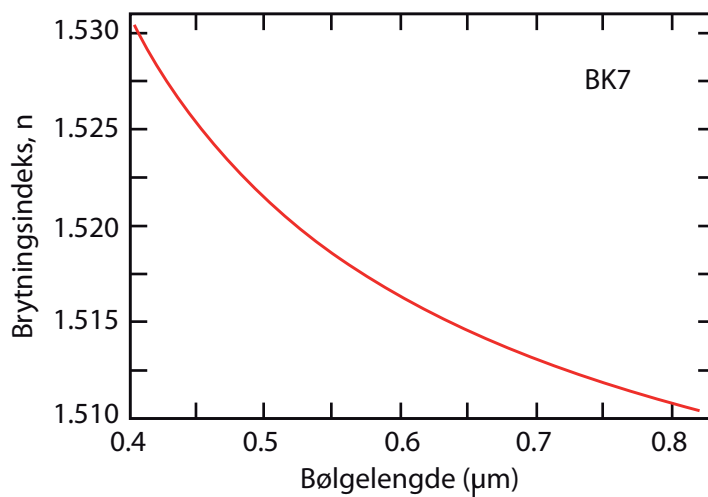
Det foregår for tiden intens forskning og utvikling på nye former for lyskilder. Det er mange penger i sikte for dem som får patent på lyskilder som vil dominere markedet i årene som kommer. Det blir i alle fall ikke dagens sparepærer!

10.2 Dispersjon

Vi har tidligere sett at dispersjon fører til at elektromagnetiske bølger med forskjellig bølgelengde har ulik hastighet gjennom glass. Det er ensbetydende med at brytningsindeksen varierer med bølgelengden.

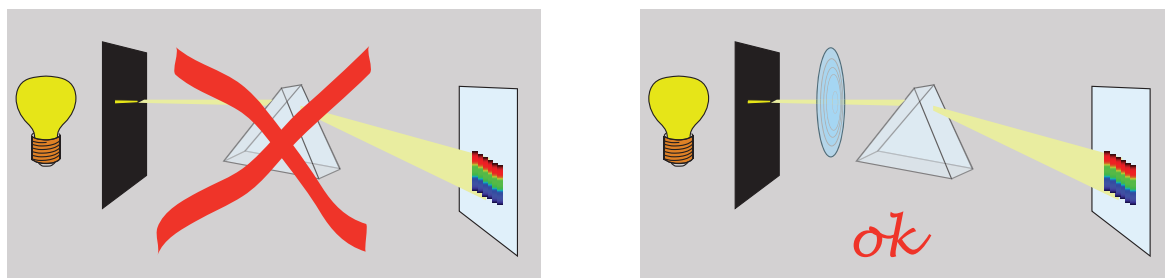
I figur 10.5 gjengis et diagram som viser hvordan brytningsindeksen til lys endrer seg med bølgelengden for en vanlig type optisk glass (Schott BK7). Kurven varierer til dels betydelig for ulike typer glass, så dersom vi ønsker å demonstrere de ulike farge-fenomenene som tas opp i dette kapitlet, bør det brukes en type glass som gir stor dispersjon (ofte knyttet til høy brytningsindeks). I kikkerter søker vi helst materialer med minst mulig dispersjon for at det såkalte kromatiske avviket skal bli så lite som mulig (mer om kromatisk avvik i kapittel 11). Dette gjelder først og fremst for bølgelengder i det synlige området.

Newtons klassiske farge-eksperiment blir vanligvis beskrevet omtrent slik: “Når lys sendes



Figur 10.5: Eksempel på dispersjon for en type optisk glass (BK7). Figuren er basert på en figur fra <http://mintaka.sdsu.edu/GF/explain/optics/disp.html> 22. mars 2013.

gjennom et glassprisme, får vi et spekter”. I praksis er det mer som skal til for at spekteret skal ha den kvaliteten vi forventer, og figur 10.6 indikerer dette. Vi må sende lys gjennom en *smal* spalt, og når lyset gjennom spalten treffer en skjerm bakenfor, *må* vi ha en avbildning av spalten. Med det mener vi at vi må se spalten som en relativt vel avgrenset lysende, smal flate på skjermen. Dette kan vi oppnå ved å bruke f.eks. sollys (fjern lyskilde) gjennom en egnet spalt (ganske smal). Enda bedre er det å bruke en linse for å få en skarp avbildning av spalten på skjermen.



Figur 10.6: Newton fikk et fargespekter da han avbildet en spalt på en skjerm og lot lyset underveis passere et glassprisme. Geometrien i oppsettet er avgjørende for resultatet.

Først når disse forholdene er tilfredsstillt, kan vi sette inn prismet i lysveien med en sidekant parallell med spalten. Lysbunten vil da avbøyes, men vil danne et forskjøvet bilde av spalten på skjermen. Vi må eventuelt etterjustere linsens plassering slik at avbildningen av spalten på skjermen blir skarpest mulig.

Det resulterende spekteret kan beskrives som *mange* avbildninger av spalten, litt forskjøvet i forhold til hverandre. Dersom lyskilden inneholdt et kontinuerlig spekter med bølgelengdekomponenter i hele det synlige området, vil f.eks. det røde lyset avbildes på ett sted, det grønne et annet sted, og det blå på et tredje. Summen av alle disse avbildningene gir et

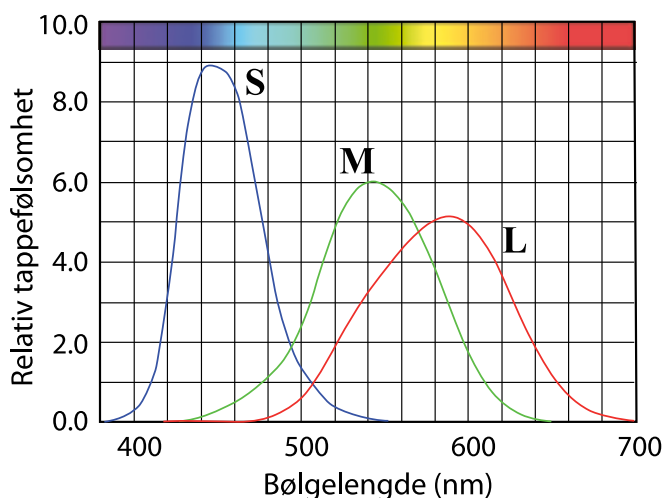
synlig “spekter” på skjermen.

10.3 “Farge” hva er det?

En rekke detaljer kommer ikke fram i en så enkel beskrivelse av Newtons spekter som den vi ga ovenfor. For det første: Hva mener vi med “farge”? Mange har et svært mangelfullt bilde av farger.

Farge er noe vi *opplever*, et sanseinntrykk. Fargeførmelsen har en komplisert sammenheng med de fysiske stimuli som kommer inn i øyet vårt. Lyset blir delvis absorbert i spesielle proteiner i netthinnens staver og tapper, celler som går under betegnelsen “fotoreseptorer”. Stavene er de mest lysfølsomme reseptorene og er ansvarlig for syn i mørke. Stavene kan ikke gi fargeinformasjon, så vi ser bort fra deres funksjon her.

Tappene derimot gir fargeinformasjon. Det finnes tre typer tapper som i første omgang kan kalles blå-følsomme, grønn-følsomme og rød-følsomme. Disse betegnes også som S, M og L-tapper der bokstavene står for “short”, “medium” og “long” bølgelengde for toppen i følsomhetskurvene deres.



Figur 10.7: *Relative følsomhetskurver for de tre typer tapper i øyet vårt. Figuren er en litt omarbeidet versjon av en figur på www.fho-emden.de/~hoffmann/ciexyz29082000.pdf per 22. mars 2013. Se forøvrig Wikipedia ved oppslagsordet CIE 1931 color space.*

Kort fortalt er følsomhetsområdet og det mest følsomme området for de tre tappene som følger:

- S-tapper, 380 - 560 nm, topp 440 nm
- M-tapper, 420 - 660 nm, topp 540 nm
- L-tapper, 460 - 700 nm, topp 580 nm

Det finnes til dels ganske ulike tall i ulike kilder fordi det er individuelle forskjeller fra person til person og delvis fordi måling av følsomhetskurver ikke er en triviell oppgave slik at verdiene er noe avhengig av målemetoden som brukes. CIE (se referanselisten) har vedtatt en standard som gir gjennomsnittsverdien for hvert av toppunktene.

Figur 10.7 viser følsomhetskurvene for de tre tappetyper. Figuren må forstås slik at dersom vi sender inn *monokromatisk lys* (lys med bare én bølgelengde), viser kurvene følsomheten til hver av de tre typer tapper. Ved ca 444 nm er de “blå-følsomme” tappene (S-tappene i figuren) omtrent dobbelt så følsomme som ved ca 480 nm (hhv 0.88 og 0.42 i y-retning i diagrammet). Det betyr at det må dobbelt så intenst lys til ved 480 nm for å gi samme respons fra denne tappen som lys ved 444 nm. Sagt på en annen måte: Dersom en person er født med defekte grønnfølsomme (M) og rødfølsomme (L) tapper, vil vedkommende ha nøyaktig samme synsopplevelse for monokromatisk lys ved 480 nm som for monokromatisk lys ved 444 nm, men med halve intensiteten. For monokromatisk lys med bølgelengde mindre enn 380 nm og større enn 560 nm gir ikke denne type tapper noen nevneverdig respons.

Merk altså at de blåfølsomme tappene gir samme type signal fra seg uansett hvilket lysstimuli som eksiterer tappene. Signalet er et tog av nervepulser. Den eneste variasjonen i signalet er intensitet (antall nervepulser per sekund). På samme måte er det for de to øvrige typer tapper.

♠ ⇒ En liten digresjon:

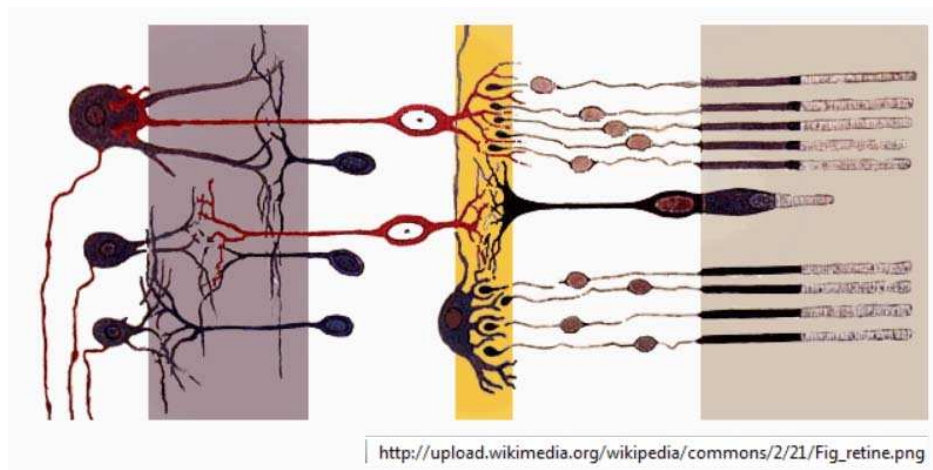
Når du ser kurver som i figur 10.7 får du forhåpentligvis assosiasjoner til et grunnleggende fenomen fra bokas første kapitler. Du møtte kurver som lignet svært mye på hver enkelt av kurvene i figur 10.7 da vi diskuterte tvungne svingninger og resonans. Resonanskurvene tegnet vi riktignok med frekvens langs x-aksen og et eller annet utslag langs y-aksen, mens vi i figur 10.7 har bølgelengde langs x-aksen. Imidlertid, siden frekvens og bølgelengde er knyttet sammen via $f\lambda = c$, kan bølgelengdeaksen lett gjøres om til en frekvensakse.

Ifølge semiklassisk teori er det en nøye sammenheng mellom tvungne svingninger og absorpsjon i synsreseptorene. Proteinene som endrer form og som i neste omgang endrer på ionetransport og sørger for at synscellene sender en elektrisk puls inn i syns-nerve-banene, har elektrisk ladde partier som vil vibrere i takt med det elektriske feltet i lysbølgene. Vi har da en situasjon helt analogt med tvungne svingninger av et lodd som henger i en fjær, bare at tidsskalaen er helt forskjellig siden både masser og avstander er totalt forskjellig for et protein sammenlignet med et lodd i en fjær.

Kvantemekanisk anses lyset som en strøm av partikler (fotoner), hvor størrelsen/utstrekningen av partiklene ikke er definert. En slik beskrivelse gir ikke den samme mekanistisk forklaring på bredden på absorpsjonskurvene. Mange tror at kvantemekanikken er DEN ultimate teori som alltid må brukes for å beskrive mikroskopiske fenomen. Jeg selv mener at semiklassiske betraktningsmåter ofte er langt bedre egnet enn kvantefysikk for å få “visuelle bilder i sitt eget sinn” for de prosessene som foregår. Og ut fra slike bilder kan vi bruke analogier fra andre deler av fysikken for å forutsi nye aspekter ved et fenomen. Jeg selv har derfor stor glede av semiklassiske forklaringer ved siden av kvantemekaniske beregninger når vi forsøker å finne ut hvordan lys og mikroskopiske system vekselvirker med hverandre. – Men nå tilbake til forklaringen av fargesyn hos mennesker! ⇐ ♠]

Det spesielle er at de tre kurvene i figur 10.7 overlapper hverandre, til dels meget sterkt! Det betyr at monokromatisk lys med bølglengde ca 570 nm vil stimulere (eksitere) både de rød-følsomme og de grønn-følsomme tappene omtrent like mye! Vi skjønner da at uttrykkene “rød-følsom” og “grønn-følsom” egentlig er nokså villedende, og vi går derfor heretter over til bare å omtale tapper etter type S, M og L (forkortinger for “short”, “medium” og “long” mhp bølglengde).

Hvordan kan vi få fargeinformasjon når monokromatisk lys kan eksitere både M og L-tappene like mye?



Figur 10.8: *Signalene fra tappene (helt til høyre) blir prosessert av mange typer celler i øyet vårt og på vei til og i selve hjernen. Synsprosessen er derfor svært komplisert. (Venstre del av figuren svarer til den siden av netthinnen der lyset kommer inn. Figuren er hentet fra Wikipedia, oppslagsord “Rod cell” 22. mars 2013.)*

Signalene fra tappene blir kraftig bearbeidet. Allerede i netthinnen har vi fire typer celler som bearbeider responsen fra fotoreseptorene. Disse er såkalte horisontalceller, bipolare celler, amakrinceller og ganglionceller. De ulike cellene har hver sin funksjon, blant annet å forsterke kontraster eller å reagere spesielt på tidsmessige endringer i lysstyrke. Cellene er også involvert i signalbehandlingen relatert til opplevelsen av farger. Det er også en utstrakt bearbeiding av signalene fra netthinnen i visse relé-knutepunkt i synsbanen, og enda mer i hjernens synssenter. Det er et imponerende maskineri som ligger bak våre synsinntrykk!

Vi skal nøye oss med noen av de enkleste prinsippene for fargeopplevelse, og *hovedregelen* i den sammenheng er at fargen bestemmes av det innbyrdes forholdet mellom hvor mye lys som absorberes i de tre tappetyperne.

10.3.1 Fargemetri

Holder vi oss bare til *monokromatiske* bølger i det synlige området, ser vi at lysabsorpsjonen i de tre tappetyperne vil endres entydig når bølglengden varieres. Monokromatisk lys gir

synsfornevelser vi kaller “spektralfarger”. Disse fargene er i en særstilling, og de oppleves som “mettede” farger. Vi kan ikke gjøre en spektral rød mer rød enn den allerede er (i alle fall ikke med den fargevaløren den representerer).

Dersom vi slipper til lys med *flere* bølgelengder, vil responsen fra tappene være temmelig lik *summen* av responsen fra de monokromatiske bidragene hver for seg. Dette er en summasjonsregel som svarer til superposisjonsprinsippet. Selvfølgelig gjelder denne summasjonen bare innenfor et begrenset intensitetsområde, men vi holder oss til det enkle bildet her.

Tappe-energiabsorpsjonen i M-tapper kan angis matematisk som følger:

$$M = \int \phi(\lambda)M(\lambda)d\lambda \quad (10.1)$$

der $\phi(\lambda)$ er den spektrale intensitetsfordelingen i innkommende lys (formelt kalt fargestimulus-funksjonen). $M(\lambda)$ er den spektrale energifølsomheten for M-tappene svarende til den midterste kurven i figur 10.7.

Tappe-energiabsorpsjonen i de andre to tappene kan angis på tilsvarende vis. De tre uttrykkene vi ender opp med gir bare relativ absorpsjon (det er ingen absolutt kalibrering involvert i uttrykkene).

Det er relativt enkelt å innse at monokromatisk lys ved ca 570 nm pluss monokromatisk lys ved ca 420 nm vil gi omtrent samme stimulering av de tre tappetyperne som en blanding av monokromatisk lys ved 660, 500 og 410 nm. Det eneste som må sørges for er at:

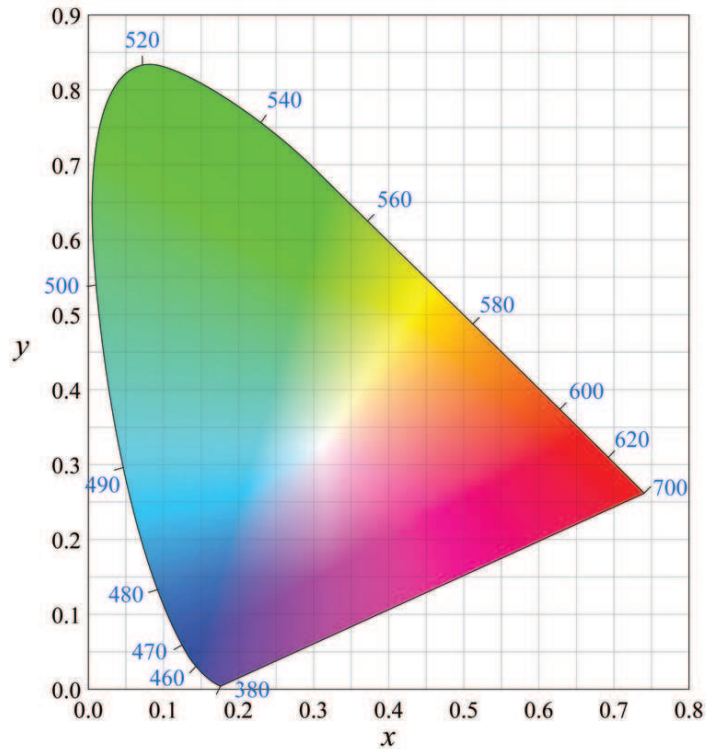
$$M = \phi_1(570)M(570) + \phi_1(420)M(420) =$$

$$\phi_2(660)M(660) + \phi_2(500)M(500) + \phi_2(410)M(410)$$

og tilsvarende for L og S . Vi får tre ligninger med tre ukjente (når vi antar at de to ϕ_1 -verdiene er kjent).

Poenget med denne analysen er å påpeke at *vi kan få samme fargefornevelse fra temmelig vidt forskjellige fysiske stimuli*. Med “stimuli” mener vi da spesifikke fordelinger av intensitet mhp bølgelengde, det vil si lysets spektralfordeling. Spektralfordelingen for lys som vi mener har en spesiell grønnfarge kan altså være svært forskjellig fra spektralfordelingen til en annen lyskilde selv om vi vil si den har nøyaktig samme grønnfarge som den første (betegnes “metomeri”). Det er altså *ikke* slik at “farge” er ekvivalent med spektralfarge, definert ovenfor!

Det er faktisk ganske heldig for oss at det er slik! Vi benytter oss av dette i stort monn i dag, ikke minst når vi har med fotografering og farger på en TV-skjerm eller dataskjerm å gjøre. I alle disse tilfellene starter vi vanligvis ut med tre farger og blander dem med hverandre i ulike mengdeforhold for å danne “alle andre farger”. Men det er noen begrensinger ...:



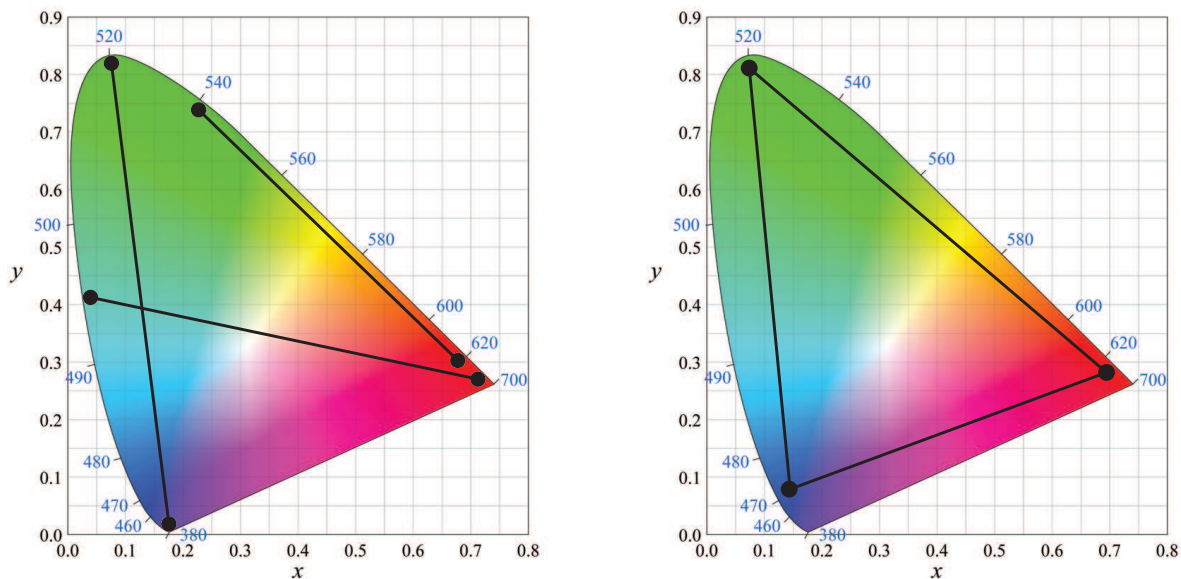
Figur 10.9: “Fargehesteskoen” definert av CIE i 1931. Nærmere omtale i teksten. Figuren er hentet fra Wikipedia, oppslagsord “CIE 1931 color space” 22. mars 2013.

Figur 10.9 viser en såkalt “fargehestesko” som er konstruert på en spesiell måte. Langs den krumme randen ligger spektralfargene fra rødt til fiolett. På den rette linjen mellom rødt og fiolett ligger de såkalte “purpurfargene” (purpurlinjen). Midt i hesteskoen er “hvitpunktet”.

Langs aksene er det angitt såkalte x og y -koordinater. Hvordan kan det ha seg at et fargestimulus bestemmes av tre parametre: (S, M, L) mens fargehesteskoen gjengir farger i et todimensjonalt plot?

De tre stimuliene angir *både* informasjon om farge og om lysintensitet. For en gitt lysintensitet (eller rettere sagt *luminans*) vil de tre parametrene ikke være uavhengig av hverandre. Bare to kan velges fritt. Ved å anvende en passende transformasjon av tappeabsorpsjonene kan vi transformere til to nær uavhengige parametre x og y som angir fargen uavhengig av lysintensiteten (luminansen). Den omvendte transformasjonen er *ikke* entydig! Fargehesteskoen angir i prinsippet alle farger vi kan oppleve ved en gitt luminans, og kan derfor betraktes som et generelt “fargekart”. Den kalles derfor for et *kromatisitetsdiagram*.

Matematikken bak de aktuelle transformasjonene er utviklet over mange år. Fargehesteskoen ble vedtatt allerede i 1931 som en standard for fagemåling av CIE (Commission Internationale de l’Eclairage på fransk, The International Commission on Illumination på engelsk). Transformasjonene som brukes diskuteres fortsatt, og flere norske fysikere (for eksempel Arne Valberg, Knut Kvaal og Jan Henrik Wold) har arbeidet med denne problemstillingen i mange år.



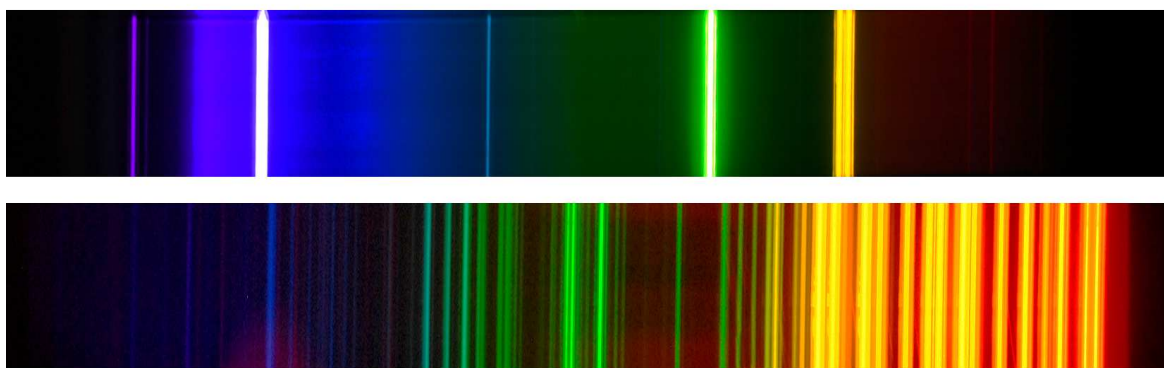
Figur 10.10: Å finne fargen etter additiv fargeblanding svarer til å finne “tyngdepunktet” for de fargekoordinatene som inngår i blandingen. Til venstre er det gitt tre eksempler på fargene som kan oppnås ved blanding av to farger, markert med rette linjer. Nærmere omtale i teksten. Høyre del: Fargeområdet for en dataskjerm som benytter tre typer fargede pixler ligger innenfor trekanten utspent av fargekoordinatene til pixelene. Fargeområdet innen den resulterende trekanten er betydelig mindre enn fargeområdet som hele fargehesteskoen representerer.

Fargehesteskoen er nyttig på mange måter. Starter vi med to farger (to koordinatpunkter inne i fargehesteskoen) og blander disse i samme intensitetsforhold (definert på en god måte), vil fargeoppfatningen vår svare til punktet i fargehesteskoen som er midt mellom de to punktene vi startet ut med. Dette er indikert i venstre del av figur 10.10. Starter vi med like mengder av nær-spektrale stimuli ved hhv 540 nm og 620 nm, vil fargen vi oppfatter være temmelig lik fargen til et spektralstimulus med bølgelengde 572 nm (de fleste ville betegne den som gul). Blander vi derimot i omtrent lik mengde nær-spektralt stimuli ved 495 nm med nær-spektralt stimuli ved 680 nm, vil vi oppfatte fargeblandingens som tilnærmet “hvit” (en lys gråfarge uten kulør).

Når vi betrakter en dataskjerm, en mobiltelefonsskjerm, en iPad, en TV-skjerm, eller lignende, er det tre typer lys som bygger opp bildet: “Rødt”, “grønt” og “blått”. Disse stimuliene har hver sine koordinatpunkter (kromatisitetspunkter) (x,y) i fargehesteskoen. Fargene vi kan danne med disse tre primærfargene ligger innenfor trekanten som de tre koordinatpunktene danner i fargehesteskoen. Mengden av alle farger vi kan danne med de tre primærfargene kalles fargeområdet til f.eks. dataskjermen.

Vi kan forsøke å velge tre punkter og trekke linjer mellom dem for å få fram hvilke farger som kan fremstilles ved tre primærfarger, og vi vil da oppdage at en rekke farger ligger

utenfor trekanten som punktene utspenner. Et eksempel på en slik trekant er angitt i høyre del av figur 10.10. Siden en innvendig trekant aldri kan dekke hele fargehesteskoen, betyr det at fargene vi kan få fram på en dataskjerm osv er en ganske blek avbildning av det fargeomfanget vi kan oppleve i naturen. En rekke farger på blomster for eksempel, er langt mer mettede når du ser blomsten i virkeligheten enn det vi kan gjengi på en dataskjerm (eller foto for den saks skyld).



Figur 10.11: *Spektrallinjer viser vakre, mettede farger når de betraktes direkte i laboratoriet. Etter fotografering og reproduksjon (som her) blir fargeomfanget langt mindre.*

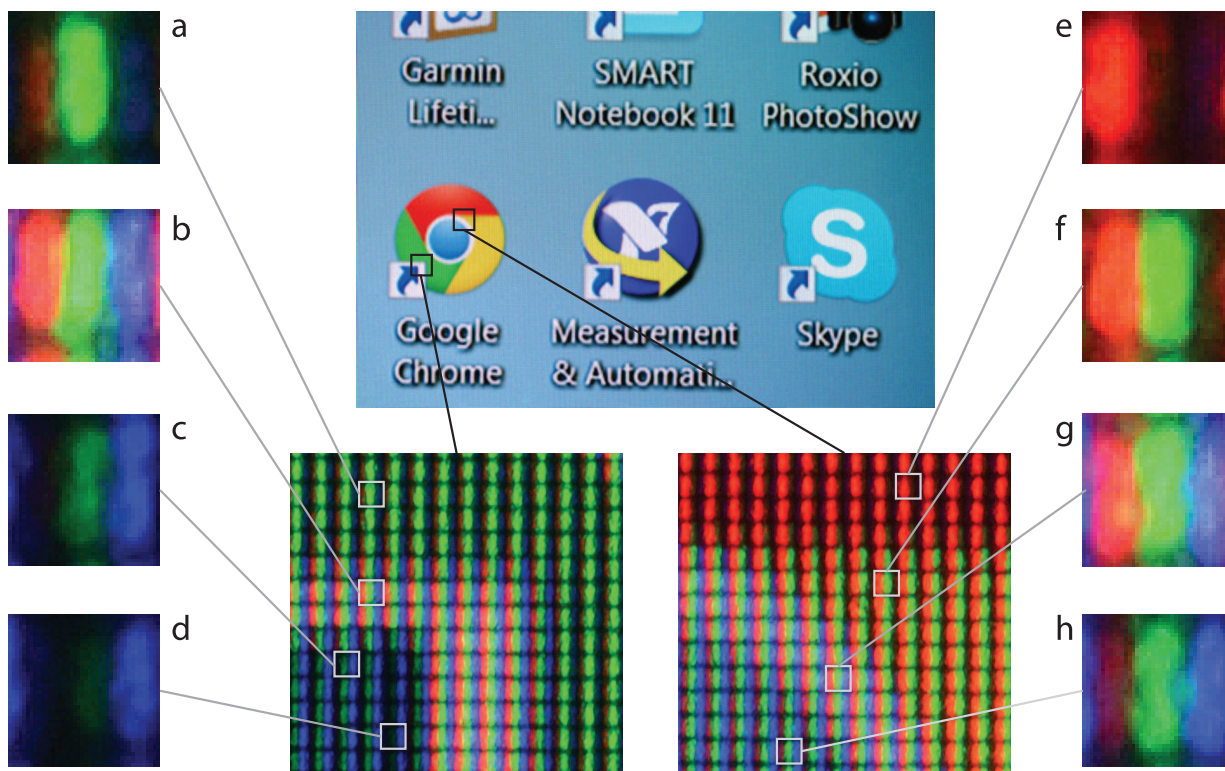
Et eksempel på det manglende fargeomfanget som er oppnåelig med tre-fargers reproduksjon er vist i figur 10.11. I figuren er det gjengitt to spektre av gasser, et med få spektrallinjer og et med en god del flere. Spektrallinjene er i virkeligheten de mest mettede fargene vi kan få, og når linjene betraktes direkte i et laboratorium, innser vi dette. De samme spektrallinjene gjengitt i et fotografi er bare en blek kopi av virkeligheten (slik figuren viser).

I industriell sammenheng er det utviklet andre fargesystemer enn CIE. Farger inngår i langt flere deler av et moderne samfunn enn det vi vanligvis tenker over. For eksempel bedømmes matkvalitet ved hjelp av farger. To fargesystemer som brukes i industriell sammenheng er NCS og Munsell.

10.3.2 Farger på en mobiltelefon- eller dataskjerm

La oss nå sjekke i praksis hvordan farger genereres på en TV, en mobiltelefon eller en dataskjerm. Figur 10.12 viser i midten øverst en liten del av en dataskjerm med Windows-ikoner. Vi har tatt et bilde tettere innpå skjermen for å se detaljer. Et utsnitt fra Google ikonet har fargene grønt, hvitt og mørk blå. Et annet utsnitt har fargene rød, gul, hvitt og lys blå.

Helt til høyre og helt til venstre er det plukket ut representative “piksler” som bildet er bygget opp med. Hvert piksel på denne skjermen har tre loddrette felt. Disse feltene kan gi henholdsvis fargene rødt, grønt og blått, og kun disse. Disse tre fargene svarer til punktene



Figur 10.12: Fotografier av en dataskjerm. Et utsnitt av ikoner på “skrivebordet” på en Windows-maskin er vist øverst i midten. To små utsnitt fra Google-ikonet er vist nedenfor. Piksler fra ulike fargede områder er vist ytterst til venstre og høyre i figuren. Ethvert piksel kan bare gi fra seg rødt, grønt eller blått lys (i hvert sitt område av pikselen). Farger pikslene gir oss er: a) grønt, b) hvitt, c) mørk blå (blå-grønn), d) blåsvart, e) rød, f) gul, g) hvitt, og h) lys blå (blågrønn).

vist i høyre del av figur 10.10. Vi ser her ganske tydelig at f.eks. fargen gul på dataskjermen egentlig genereres bare ved hjelp av rødt og grønt lys. Pikslene er så små at lyset fra det røde og det grønne feltet i en piksel, treffer de samme synscellene i øyet.

Legg forøvrig merke til at mørk blå eller blåsvart genereres praktisk talt ved å bruke null rødt og grønt lys, og bare svakt blått lys. Lys blå (litt lyst blågrønn) genereres imidlertid med nær maksimalt med blått, en del grønt og litt rødt. Hvitt genereres med kraftig rødt, kraftig grønt og kraftig blått samtidig. Det er fascinerende at vi kan generere så mange farger som vi faktisk kan ved hjelp av bare tre primærfarger!

10.3.3 Additiv versus subtraktiv fargeblanding

I kunstplakater brukes f.eks. syv-fargestrykk, ni-fargestrykk, 13-fargestrykk osv. En av grunnene til dette er at fargeomfanget i det endelige bildet skal bli så stort som mulig. Det er naturlig å trekke paralleller til trekanten til høyre i figur 10.10 i denne sammenheng. Imidlertid må vi huske at når farger blandes ved hjelp av pigmenter som belyses av en

ytre lyskilde, er all fargeblanding langt mer komplisert enn den vi har gjengitt ovenfor. Vi har hittil bare omtalt *additiv* fargeblanding som oppstår ved blanding (overlagring) av lys. I en kunstplakat (eller i et maleri eller fotografi) har vi med *subtraktiv* fargeblanding å gjøre. Pigmenter absorberer noe av det lyset som faller inn på dem, og lyset som sendes tilbake til oss vil gjøre at den pigmenterte overflaten fremstår med en bestemt farge når den belyses f.eks. med sollys. Legger vi flere pigmenter sammen, f.eks. blander gule og blå pigmenter, vil flaten se grønn ut. I alle fall ofte. Men dersom pigmentene belyses av lys med bare noen få bølgelengder (f.eks. lys fra enkelte diodelys (LED) eller lysstoffrør), er det slett ikke sikker at blandingen av gule og blå pigmenter vil se grønn ut!

Best fargegjengivelse oppnås med lyskilder som har en kontinuerlig spektralfordeling, dvs vanlige gammeldagse lyspærer eller halogenpærer. I kunstutstillinger og liknende er det derfor viktig å bruke slik belysning i stedet for lysstoffrør, sparepærer eller LED-lamper.

Ordet subtraktiv fargeblanding er forresten litt misvisende. For å finne tappeabsorpsjonen når stimulus svarer til lys reflektert fra en blanding av to pigmenter, må pigmentenes spektrale refleksjonskoeffisienter *multipliseres* med hverandre.

Det var forresten Helmholtz som første gang beskrev forskjellen mellom additiv og subtraktiv fargeblanding. Dette skjedde om lag 200 år etter Newtons fargeblandingsmodell basert på overlagring av lys (additiv fargeblanding).

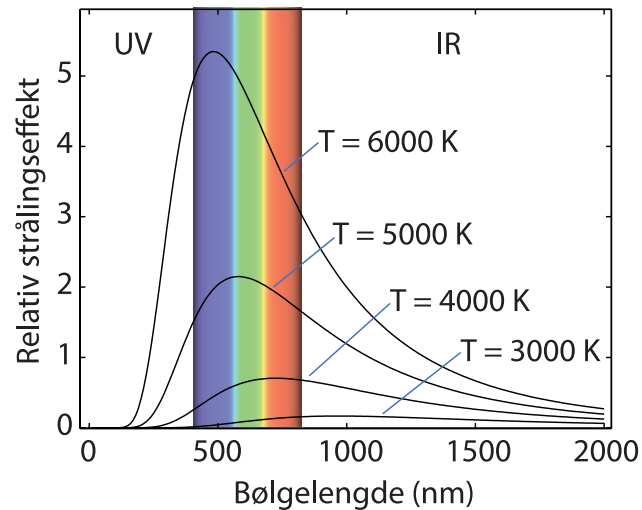
[♠ ⇒ Det er ikke trivielt å lage fargepigmenter fra scratch. Ofte brukes pigmenter fra naturen, f.eks. fra planter eller mineraler. Det er et begrenset antall pigmenter tilgjengelig, og når vi skal trykke en kunstplakat kan det iblant være nyttig å bruke mer enn tre “farger” (pigmenter) for å gjengi et bilde best mulig, selv om originalen bare finnes som RGB (tre måltall) fra et digitalt kamera. Vi kan ikke utvide fargeområdet i forhold til bildeopptaket (fargeområdet utspent av RGB-verdiene), men vi kan *reprodusere på papir* fargeområdet bedre enn om vi hadde brukt færre pigmenter.

Skal vi oppnå et større fargeomfang, må vi allerede i dataopptaket starte ut med flere enn tre stimuli. Det hjelper lite å starte med et digitalt kamera med kun tre detektorer per pixel og tro at hvis vi bare har en god printer, så skal totalresultatet bli bortimot perfekt! Dette har analogier til lydopptak: Skal vi behandle lyd med en samplingsfrekvens flere ganger den vi bruker i CD-lyd, så nytter det ikke å begynne med denne oppløsningen i behandlingen av lyd og siden utvide. Vi må ha den høyeste samplingsfrekvensen allerede ved den aller første digitaliseringen av lyd. I studioopptak av lyd er det nå temmelig vanlig å bruke høyere samplingsfrekvens enn CD-standarden. For opptak av bilder er det såvidt begynt å eksperimenteres med kameraer med flere enn tre detektorer per pixel, og likeså er det såvidt begynt å produseres skjermer med flere enn røde, grønne og blå lysende punkter. Det er slett ikke utenkelig at fremtidens fotografiapparat og dataskjermer vil bygge på teknologi med flere enn tre basisstimuli. ⇐ ♠]

10.4 Fargetemperatur, adaptasjon

Formalismen gitt i ligning (10.1) og omtalen av matematiske transformasjonene videre til CIE-diagrammet kan etterlate et inntrykk at en viss spektralfordeling på lys alltid vil gi

oss samme synsinntrykk (farge). Det er feil. Menneskets synssans er svært avansert og har innebygget en form for adaptasjon som er særdeles nyttig. Kort fortalt vil fargene i et Norsk flagg bli bedømt til å være rødt, hvitt og blått, enten vi betrakter flagget i lampelys om kvelden eller i sollys med knall blå himmel på dagtid. Dette skjer til tross for at spektralfordelingen fra flagget er ganske forskjellig i de to tilfellene. Adaptasjonen antar vi har med genetisk seleksjon å gjøre: Det var nyttig også for neandertalerne å kunne vurdere farger i lyset fra bålet om kvelden på liknende måte som de vurderte farger i sollys.



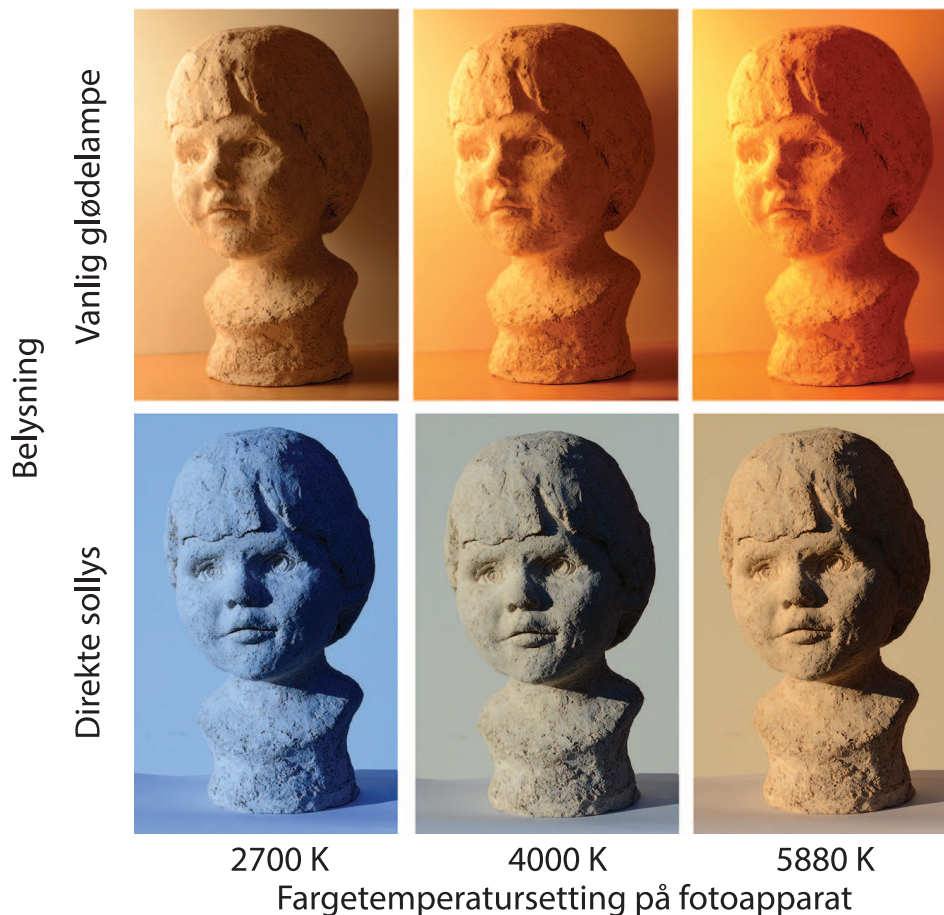
Figur 10.13: *Spektralfordelingen for elektromagnetiske bølger sendt ut fra varme legemer (blackbody radiation). Kurvene er beregnede verdier fra Planck's stålingslov for ulike temperatur på legemet..*

Den store forskjellen i spektralfordeling i disse eksemplene kommer fint fram i Planck's beskrivelse av "sort stråling", eller kanskje bedre kalt stråling fra varme legemer. I en glødelampe er temperaturen på glødetråden i størrelsesorden 2300 - 2700 K. Overflaten på Sola har en temperatur på om lag 5500 K. Det fører til at det kontinuerlige spekteret fra disse lyskildene er temmelig forskjellig, som vist i figur 10.13. I lampelyset er intensiteten fra de blå spektralfargene svært mye mindre enn for de røde, mens i spekteret fra Sola har blå spektralfarger en mye større betydning enn de røde.

Figur 10.14 anskueliggjør hvor stor betydning ulik belysning har dersom vi registrerer utseende til en gjenstand uten adaptasjon. Et digitalt fotoapparat er brukt for å ta bilder av en og samme gjenstand i lampebelysning og i sollys. Det er tatt bilder ved tre ulike innstillinger på fotoapparatet for hver av lyskildene. Innstillingene er: "Fargetemperatur 2700 K, 4000 K og 5880 K".

Indirekte forteller dette at moderne digitale kamera har innebygget en form for adaptasjon liknende den menneskets synssans har. Ved opptak av bildene i figur 10.14 ble det valgt bestemte innstillinger for korrigerende ut fra lysets spektralfordeling. Vi kunne også satt fotoapparatet i en innstilling der apparatet foretok en automatisk korreksjon mhp fargetemperatur. I så fall etterligner vi menneskets adaptasjon.

I figur 10.14 ser vi at når vi tar bilder av gjenstander i lampelys og har innstilt fotoapparatet på om lag 2700 K, ser bildene ut slik vi forventer dem, mens bildet ser fryktelig rødt ut dersom fargetemperaturinnstillingen var 5880 K. Tilsvarende gir bilder i sollys ofte korrekte farger i bildene dersom fotoapparatet er innstilt til om lag 5880 K, mens bildet ser svært blått ut dersom vi valgte en fargetemperaturinnstilling på 2700 K.



Figur 10.14: Fotografier av ett og samme hode-skulptur i gips i to ulike belysninger og tre ulike fargetemperatur-innstillinger på fotoapparatet. Figuren indikerer hvor stor forskjell det faktisk er i spektralfargefordeling fra gjenstanden i lampelys og i sollys. Likevel oppfatter vi med synssansen vår at hodet ser nær hvitt ut uansett om vi betrakter hodet i lampelys eller sollys. Dette skyldes synssansens adaptasjons-egenskap.

Vi har nå sett at menneskets synssans (øyet pluss all videre prosessering til og med i hjernen) har en fabelaktig evne til å adaptere for ulik spektralfordeling på den dominerende lyskilden. Hva vi kaller en rød, grønn og blå flate avhenger ikke bare av tappeabsorpsjonene (S, M, L) av lyset fra flaten, men også i høy grad av omgivelsene. Det har noen viktige implikasjoner: Dersom vi driver fargekorreksjon av digitale bilder, f.eks. i Photoshop eller tilsvarende programvare, er det viktig å ha en grå flate sammen med bildet der fargene skal vurderes. Sjekker vi stadig at den grå flaten ser grå ut, har vi en rimelig god garanti for at øynene våre ikke har adaptert seg til selve bildet som skal korrigeres. Dersom vi ikke sjekker øyets adaptasjonstilstand i forhold til en grå flate, kan vi komme til å lure oss selv

slik at det endelige resultatet blir uheldig.

10.4.1 Andre kommentarer.

Det finnes også andre former for adaptasjon i vår synssans. Øyet adapterer også med hensyn til intensitet. I sollys reflekterer en “grå” flate mye mer lys enn en “hvit” flate vil gjøre i skumringen. Likevel kaller vi den første for grå og den andre for hvit. Hva vi kaller hvitt, grått og sort flate er altså ikke så mye avhengig av lysintensiteten fra flaten som den relative intensiteten fra flaten i forhold til omgivelsene. Det er mange andre finurligheter knyttet til øyet og de øvrige deler av synssystemet, ikke minst knyttet til kontraster (les f.eks. om Mach-bånd på Wikipedia), men vi kan ikke ta oss tid til å gå mer inn i denne materien enn vi allerede har gjort.

En liten kommentar til slutt om fargehesteskoen: Dersom vi betrakter figur 10.9 på flere ulike datamaskiner, vil vi oppdage at fargene ser nokså forskjellig ut fra skjerm til skjerm. Delvis skyldes dette at de tre pixelfargene er noe forskjellige fra skjermtype til skjermtype. Grafikere utfører ofte en kalibrering av skjerm og transformerer fargeinformasjon ved hjelp av matriser før de betrakter bilder på skjerm eller før bildene trykkes. En slik transformasjon kalles gjerne en “fargeprofil”. I arbeidet med å komme fram til en god fargeprofil, benyttes ofte en standard-plate (bilde) som legges inn f.eks. i motivet ved fotografering. Fargeprofilen kan da utformes slik at sluttresultatet blir så nær opp til den opprinnelige standardplaten som mulig. Gretag Macbeth platen er et eksempel på en slik plate. Den kan bl.a. skaffes fra Edmund Optics (se referanselisten).

Fargehåndtering er et av problemene vi har å hanskles med når vi skal forholde oss til dagens teknologi. Fargekorrigering er en profesjon!

10.5 Spekter fra et prisme

Nå når vi vet litt mer om hvordan vi oppfatter farger, er vi klar til å gå tilbake til Newtons fargespekter fra et prisme. Mange tenker på spektralfarger som de fargene vi ser i regnbuen: ROGBIF: rødt, orange, gult, grønt, blått, indigo og fiolett. Men hva ser vi egentlig når vi betrakter et Newton-spekter fra en smal spalt? Jo, spekteret ser da omtrent ut som øverst i figur 10.15. Det spesielle er at vi faktisk stort sett bare ser rødt, grønt, blått og til dels fiolett. Det er svært lite gult og orange! Og det er klart mindre gult enn i regnbuen! Hvordan kan det forklares?

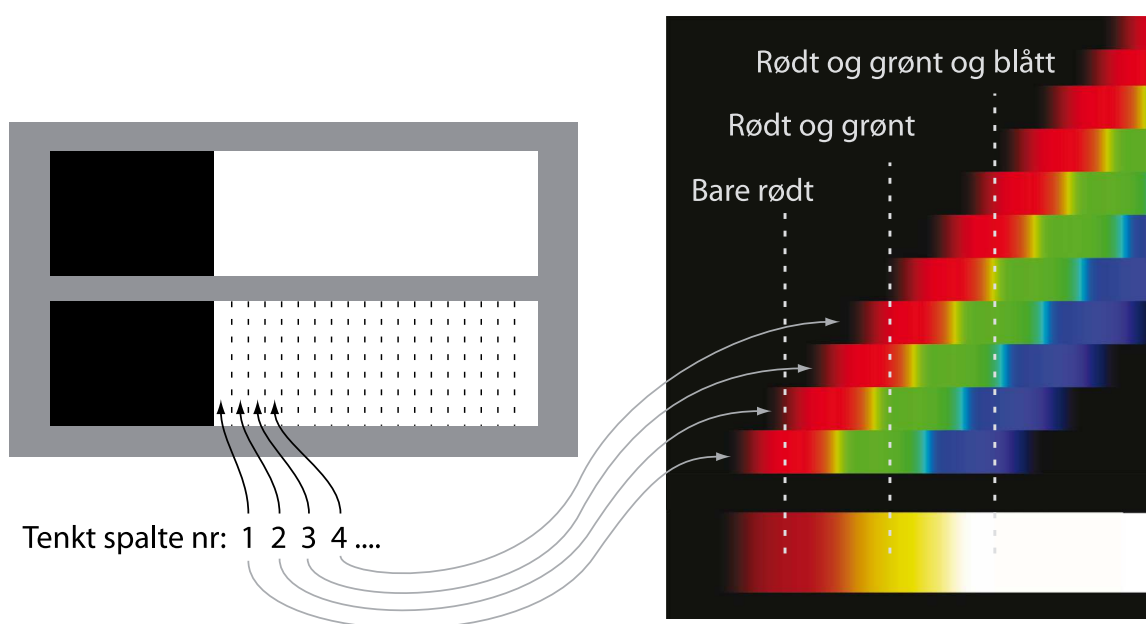
Forklaringen finner vi ved å øke spaltebredden noe. I de neste to eksemplene i figur 10.15 har vi simulert spektre fra spalter med økende bredde. *Nå* får vi inn gult! Hva skyldes det?

Det skyldes at når vi betrakter spektralfarger, er det bare et meget snevert bølgelengdeområde som gir oss fargeinntrykket “gult”. Det meste gule vi oppfatter skyldes blanding



Figur 10.15: *Spekter fra en smal spalt (øverst) og fra økende spaltbredde nedenfor.*

av røde og grønne spektralfarger (additiv fargeblanding). Vi får da et koordinatpunkt i fargehesteskoen som ligger litt innenfor randen.



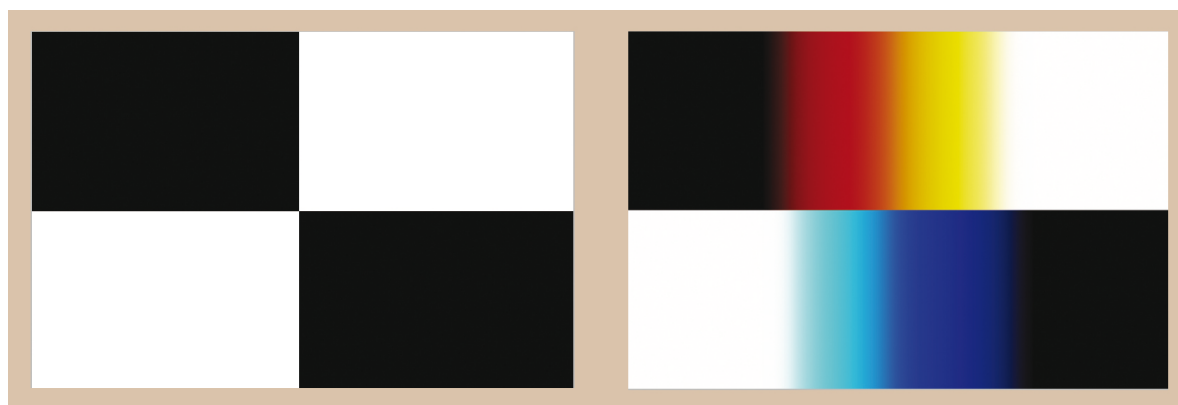
Figur 10.16: *Avbildning av en kant kan betraktes som sum av avbildninger av mange spalter ved siden av hverandre. Se teksten.*

For å forstå hvordan vi tenker oss fargeblanding henviser vi til figur 10.16 som viser hvordan bildet ville se ut dersom vi ikke avbildet en spalt på skjermen, men i stedet en “kant” mellom en flate uten lys og en flate med homogent “hvitt” lys. Lyset passerer også her et glassprisme. Vi kan da tenke oss at det lyse området er en sum av mange enkeltspalter som ligger tett i tett (inntil hverandre). Hver av spaltene (dersom de er smale) vil gi et spekter som ser rødt, grønt og blått ut. Hver spalte er litt forskjøvet i forhold til hverandre, slik at spektrene også blir litt forskjøvet i forhold til hverandre.

Summerer vi lys som kommer inn i forskjellige posisjoner på skjermen, ser vi at helt yttert

til venstre kommer det bare rødt lys inn. Summen er da rød. Like til høyre for denne posisjonen får vi blanding av rødt og grønt lys, men ikke blått. Denne summen vil vi oppfatte som gul. Like til høyre for dette feltet igjen, vil vi få en blanding av rødt, grønt og blått. Summen oppfatter vi som hvit. Slik fortsetter det utover, og resultatet blir som nederst i figuren.

Vi ser da at når vi avbilder en kant på en skjerm, men lar lyset gå gjennom et prisme, vil kanten bli farget med en rød og gul stripe.



Figur 10.17: Det finnes to typer randfarger, avhengig av hvilken side som er sort og hvilken er hvit i forhold til prismets orientering. Venstre del av figuren viser sort-hvitt-fordelingen av lys vi starter ut med. Høyre del viser hvordan avbildningen av den opprinnelige lysfordelingen ville se ut dersom lyset gikk gjennom et prisme. Fargeeffekten er en simulering tilpasset synsinntrykk fra en dataskjerm. Virkelige randfarger ser penere ut, men de må oppleves *in vivo*!

Avbilder vi en kant hvor det lyse og mørke har byttet plass, vil det fiolette / blå området ikke blandes med andre farger. Ved siden av dette får vi et område med cyan (blanding mellom grønt og fiolett for å si det litt omtrentlig). Ved siden av dette får vi igjen blanding av alle farger, og vi opplever dette som hvitt.

En kant av denne typen vil ha to fargede striper i overgangen mellom hvitt og sort: Blå-fiolett og cyan. De rød-gule og de fiolett-cyan stripene kaller vi *randspektre* (iblant også kalt randfarger). Et eksempel på randfargene er vist i figur 10.17. Når du ser randfarger i praksis, er stripene ganske mye smalere enn vi kan få inntrykk av i denne figuren, men det avhenger selvfølgelig av avstander og mange andre detaljer.

Dersom du ser gjennom en kikkert og velger å betrakte en hvit-sort overgang ute i periferien av synsfeltet, vil du nesten bestandig se randfarger i overgangen. På gode kikkerter, hvor det er forsøkt korrigert for dispersjonen til lys gjennom glass (ved å bruke kombinasjoner av ulike glasstyper i linsene), er randfargene ikke særlig tydelige. I billigere kikkerter er randfargene betydelige og ødelegger kontrasten og skarpheten til bildet vi kan se.

Så tilbake til regnbuen: Hvorfor ser vi gult mye tydeligere i regnbuen enn i et Newtonspekter hvor vi bruker en smal spalt? I regnbuen er “spalten” i praksis regndråper, og vinkelutstrekningen av hver enkelt regndråpe er kompatibelt med en smal spalt. MEN sola har selv en utstrekning på om lag en halv grad (vinkeldiameter) på himmelen! Regnbuen blir derfor i praksis en summasjon av mange regnbuer som ligger litt utenfor hverandre (som stammer fra ulike soner på soloverflaten). Det er *denne* summasjonen (svarende til at vi bruker en bred spalt) som gir oss tydelig gult i regnbuen!

10.5.1 En digresjon: Goethes fargelære

I Newtons spekter har vi en svært spesialisert geometri som gir oss det vanlige spekteret. Historisk sett reagerte Goethe på Newtons forklaring, ikke minst fordi Newton ikke klart betonte at hans spekter bare fremkom ved avbildning av en spalt (gjennom et prisme). Goethe viste at andre geometrier ga helt andre farger. Blant annet har “spekteret” fra den omvendte geometrien til Newton, nemlig en smal sort stripe på hvit bakgrunn, et totalt annet fargeforløp enn Newton-spekteret (som indikert i figur 10.18. Goethe mente at Newtons forklaring var alt for enkel, og at vi må trekke inn de kromatiske randbetingelsene for å kunne forstå de fargene som oppleves i ulike geometrier.



Figur 10.18: *Fargespekteret vi får fra en Newtonsk spalt og fargespekteret vi får fra en “omvendt spalt”, det vil si en sort smal stripe på lys bakgrunn. Også dette bildet er resultat av en simulering. Virkelige spektre (uten å gå via fotografi eller dataskjermer) er langt vakrere å betrakte!*

Goethe utforsket mange ulike geometrier og fant mange symmetrier i fenomenene og innførte visse “fargeharmonier”, men vi skal ikke gå i detalj.

Her i landet var dikteren André Bjerke en viktig disippel av Goethe. Han ledet en diskusjonsgruppe over en del år, der blant annet fysikerne Torger Holtsmark og Sven Oluf Sørensen var ivrige deltakere. En bok om emnet er: “Goethes fargelære. Utvalg og kommentarer ved Torger Holtsmark”, utkommet på Ad Notam Gyldendals forlag (1994).

Personlig har jeg ikke oppdaget at Goethes fargelære har en større forklaringsevne enn vår vanlige fysikk-modell (basert på lys som bølger) når det gjelder fargefenomener. Figur

10.16 viser etter min mening hovedprinsippet for hvordan vi kan gå fram for å bygge opp hvordan fargene vil komme ut ved en rekke ulike geometrier.

På den annen side har Goethes fargelære hatt en viktig historisk funksjon fordi den fokuserte på at Newtons spekter ikke bare var “lys som gikk gjennom et prisme”. Den fokuserte på symmetrier og geometrier på en flott måte som inntil da ikke var så velkjent som nå. I min språkdrakt vil jeg si at Goethe-tilhengernes poenger minner oss om at beregninger basert på Maxwells ligninger avhenger i høy grad av randbetingelsene! Iblant er vi fysikere alt for slumsete når vi beskriver fenomener og når vi gir forklaringer. Da mister vi fort verdifulle detaljer, og kan komme til å sitte igjen med oppfatninger som ikke duger i andre sammenhenger enn dem som det opprinnelige eksemplet er hentet fra.

10.6 Referanser

I Norge er det kanskje Høgskolen i Gjøvik som har best kompetanse om farger lokalisert på ett sted. De er samlet under paraplyen Det Norske fargeforskningslaboratorium (<http://www.colorlab.no>).

Norsk Lysteknisk Komite er det nasjonale organ for den globale belyningsorganisasjonen CIE. Mer informasjon på websidene til “Lykskultur, Norsk kunnskapssenter for lys” på www.lyskultur.no.

Her er et par andre lenker som kan være av interesse dersom du er interessert i å lese mer om farger:

<http://www.brucelindbloom.com/> og <http://www.efg2.com/>

International Commission of Illumination, Commission Internationale de L’Eclairage (CIE) er en organisasjon som tar seg av belysning og synsoppfatning av lys. Deres hjemmeside er <http://www.cie.co.at/>. Spesielt gis det detaljer angående overgang mellom fysikk og persepsjon i rapporten Photometry - The CIE System of Physical Photometry ISO 23539:2005(E)/CIE S 010/E:2004 beskrevet delvis på http://cms.cie.co.at/Publications/index.php?i_ca_id=475.

Gretag Macbeth fargeplate for å lette fargekorrigering kan kjøpes bl.a. hos Edmund Optics: <http://www.edmundoptics.com/test-targets7color-grey-level-test-targets/x-rite-colorchecker/18> (per. 22. mars 2013).

En bok om emnet er: Richard J.D. Tilley: Colour and optical properties of materials. John Wiley 2000.

Om øyets absolutte sensitivitetsgrense:

Se G.D.Field, A.P.Sampath, F.Rieke. Annu.Rev.Physiol. 67 (2005) 491-514.

Tilgjengelig på web fra www.cns.nyu.edu/~david/perceptionGrad/Readings/FieldRieke-AnnuRevPhysiol2005.pdf per 24. 2. 2012.

10.6.1 Takk!

Jeg vil gjerne rette en hjertelig takk til Jan Henrik Wold (nå Høgskolen i Buskerud, Drammen), og Knut Kvaal (nå Universitetet for molekyllær og biovitenskap, Ås) for nyttige kommentarer til dette kapitlet. Eventuelle feil og mangler i denne utgaven av kapitlet er likevel helt og holdent mitt ansvar (AIV), og ikke deres.

10.7 Læringsmål

Etter å ha jobbet deg gjennom dette kapitlet bør du kunne:

- Forklare behov for ulike størrelser som eksempelvis strålingseffekt, strålingsintensitet, radians, irradians, lysstyrke, lysutbytte m.fl. innen radiometri og fotometri, og kunne gjøre beregninger der du går fra én slik størrelse til en annen.
- Gjøre rede for sammenhengen mellom fargeoppfatning (kulør) og fysisk spektralfordeling (som vi kan få ut fra et spektroskop f.eks. ved å sende lys mot et optisk gitter eller sende lys gjennom et prisme). Eksempelvis skal du kunne forklare at “gult lys” faktisk ikke behøver ha noe spektralt gult i seg overhodet, og likevel bli oppfattet som “gult”.
- Gjøre rede for CIE fargehesteskoen og teori for additiv fargeblanding, og forklare hvilke farger vi kan og ikke kan gjengi fullt ut ved hjelp av f.eks. digitale bilder på en TV- eller dataskjerm.
- Gjøre rede for begrepet fargetemperatur og hva den har å si for menneskets fargeopplevelse og for fotografering.
- Gi relativt detaljerte kvalitative forklaringer på hvordan vi kan oppnå et “Newton”-spekter, randfarger og omvendt spekter, og peke på randbetingelsenes betydning.
- Reflektere litt over at en detektor, f.eks. øyets synsreseptor (tappe-celler i netthinnen) bare har et begrenset følsomhetsområde, og gjerne knytte dette opp mot såkalte tvungne svingninger tidligere i boka.

10.8 Oppgaver

Forståelses- / diskusjonsspørsmål

1. Fra figur 10.7 kan du finne et par spektralområder der bare én av tappene absorberer lys. Hva betyr det for fargeopplevelsen vi kan ha for ulike spektralfarger innenfor hvert av disse intervallene?
2. Betrakt fargehesteskoen i figur 10.9, og spesielt bølgelengdetallene som står langs randen av hesteskoen. Forsøk å estimere hvor lang rand som svarer til spektralfarger hhv i intervallet 400 – 500 nm, 500 – 600 nm, og 600 – 700 nm. Grunnen har noe med hvor lett vi kan oppdage *endringer* i kulør når vi vurderer farger. Hvordan vil du tro sammenhengen er (grovt regnet)?
3. Finner du holdepunkter i figur 10.7 for sammenhengen du fant i forrige oppgave? Forsøk å skrive ned ditt argument på en så presis og lett forståelig måte som mulig! (Dette er en øvelse i å kunne argumentere klart innen fysikk.)
4. Hvorfor er det ikke oppført bølgelengder langs den rette randen av fargehesteskoen?
5. Forsøk å se randfarger ved å betrakte en skarp kant mellom et lyst og et mørkt område gjennom en kikkert eller en linse. Lag en skisse som viser omtrentlig det du ser. Påpek hvordan kanten må ligge for at du skal se henholdsvis rød-gul og fiolett-cyan randfarger. Alternativt kan du påpeke randfarger i figur 10.19



Figur 10.19: *Fotografi av diverse strukturer sett gjennom Fresnell-linser i glass (gjenstandene er ut av fokus). Randfarger er synlige.*

6. Digitaliseringskretser som f.eks. brukes ved digitalisering av lyd, har vanligvis 12 - 24 bits oppløsning. Hvor mange dekadere lydintensitet samtidig kan vi dekke med

slikt utstyr? For fotoapparater er det vanlig med 8-16 bits oppløsning for å angi lysintensitet. Hvor mange dekadere lysintensitet kan vi dekke samtidig med et slikt kamera? Sammenlign med det intensitetsspennet som gjelder for menneskets hørsel og syn. Hvorfor fungerer lydopptak og fotografier likevel tilfredsstillende til tross for begrenset antall bits oppløsning?

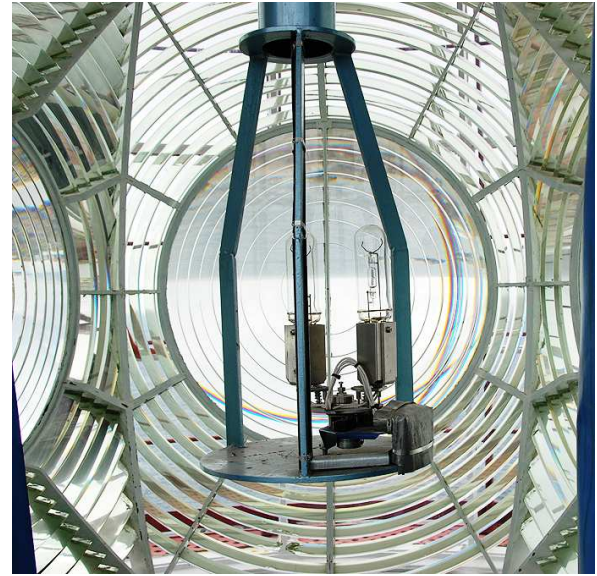
7. Hvor mange ti-er-potensers variasjon i intensiteter fungerer vår hørselsans og vår synssans (se figur 10.3)? Begrunn at sanser som har så stort “dynamisk område” faktisk må være basert på å gi en logaritmisk respons (i alle fall ikke en lineær respons).
8. I forsøk hvor vi ønsker å bestemme hvor følsomt øyet er for lys (absolutt terskelverdi), har det vist seg at responsen fra mange synsceller innenfor et område på netthinnen summeres. Disse synscellene anta å være koblet til samme nervefiber (“område for romlig summasjon”). Et slikt summasjonsområde svarer til at lyskilden har en utstrekning på om lag 10 bueminutter ($1/6$ grad) sett fra øyets posisjon. Drøft hvilke(n) av de fotometriske størrelsene som er relevant å ha kontroll over i denne type forsøk. Drøft også hvorfor en del av de andre størrelsene ikke er relevante.
9. Hvite glasskupper blir ofte brukt i lamper for å få en jevn og fin belysning uten markante skygger. Til tross for at lampekuppelen er kuleformet, synes lysintensiteten fra randen av kuppelen å være omtrent lik med lysintensiteten fra de sentrale områdene (se figur 10.20). Drøft hva grunnen til dette er, og drøft hvilket radiometrisk mål som er aktuelt å bruke for å få fram denne egenskapen. Kan du se for deg andre lampekuppelkonstruksjoner som *ikke* ville gitt samme resultat?



Figur 10.20: *Fotografi av lyset fra en kuleformet lampekuppel av hvitt glass.*

Regneoppgaver

10. Anta at vi for enkelhets skyld kan tenke oss at lys kan beskrives som fotoner med en energi lik $E = hf$, der h er Plancks konstant og f er frekvensen til fotonene. En vanlig laserpeker har gjerne en effekt på noen få milliwatt. Hvor mye må vi dempe en slik laserstråle for å komme ned på et nivå som svarer til grensen for hva øyet vårt kan oppfatte (anta grensen svarer til ca “500 fotoner per sekund”) når laseren har bølgelengden 532 nm?
11. I en tabell på Wikipedia med fysiske data om Sola står det at solas “Luminosity” er $3.846e26$ W.
- a) “Luminosity” (innen astronomi) kan ut fra navnet virke som en fotopisk enhet. Hvilken størrelse er det *egentlig* snakk om ut fra tabellene over radiometriske og fotometriske størrelser gitt i teksten?
- b) I samme tabell finnes følgende opplysninger: “Mean intensity” = $2.009e7$ W m⁻² sr⁻¹. Sola har en diameter $1.392e9$ m. Skriv med ord hva “mean intensity” forteller oss og hvilken norsk betegnelse vi har for denne størrelsen. Vis ved utregning at det faktisk er den forventede sammenhengen mellom verdiene for “mean intensity” og “luminosity” gitt her i oppgaveteksten.
- c) Vi skal beregne hvor stor effekt som teoretisk sett kan fanges opp fra sollys ved bakken på Jorden, f.eks. i en solfanger eller solcellepanel. Hvilken radiometrisk eller fotometriske størrelse er vi da interessert i å bestemme? Finn verdien av denne størrelsen når det er oppgitt at avstanden mellom Jorda og Sola er $1.496e11$ m og at om lag 30 % av solstrålene som kommer inn mot den ytre atmosfæren blir reflektert eller absorbert der.
12. Eigerøy fyr er et av kystens stolteste fyr (se figur 10.21). Fyret ble bygget i 1854 og var det første fyr med støpjernskall. Fyret er 33 m høyt, og lyset kommer ut 46.5 m over havet. I høyre del av figur 10.21 er det vist en bit av det imponerende linsesystemet sammen med lyspæra (pluss en reservepære). Fyret gir fra seg lys med lysstyrke $3.9e6$ cd i tre lysstråler 90 grader på hverandre (tre linsesett som står 90 grader på hverandre, og hele linsesettet roterer rundt lyspæra med omløpstid 4 s). Fyret er et av de sterkeste langs vår kyst og når 18.8 nautiske mil utover havet.
- a) Hvordan kan det ha seg at en lyspære med effekt noen få hundre watt kan sees 18.8 nautiske mil unna?
- b) Ville lyset fra fyret kunne sees på enda lengre avstand enn 18.8 nautiske mil dersom vi f.eks. økte pæras effekt til det dobbelte? (Hint: Sjekk om 18.8 nautiske mil har noe jordkrumningen å gjøre.)
- c) Anta at pæren er på 500 W og har et lysutbytte om lag som for glødelamper flest. Estimer romvinkelen til strålene.
13. Vi skal i denne oppgaven sammenligne to svært forskjellige lyskilder: 1) En vanlig, gammeldags 60 W lyspære (glødelampe) som lyser fritt ut i rommet (ingen skjerm), og 2) En 4 mW grønn laserpeker, bølgelengde 532 nm. Laserstrålen er sirkulær og har en diameter på 9.0 mm i en avstand 10.38 m fra pekeren (strålen er i virkeligheten



Figur 10.21: *Eigerøy fyr er et mektig monument fra en tid før GPS gjorde sitt inntog. Til høyre: Linsesystemet som omkranser lyspæra er imponerende. Det er tre ekvivalente linsesystem som er plassert 90 grader på hverandre. Siste “veggen” er åpen slik at vi slipper inn til pæra. Linsesystemene er over to meter høye.*

mest intens i midten, men vi kan bruke en tilnærming at lysintensiteten er like stor innenfor hele den angitte diameteren på strålen). Husk at “60 W” for glødelampen er effekt som lampen trekker fra strømmettet vårt, mens “4 mW” angir effekt på selve lyset som kommer ut av laserpekeren.

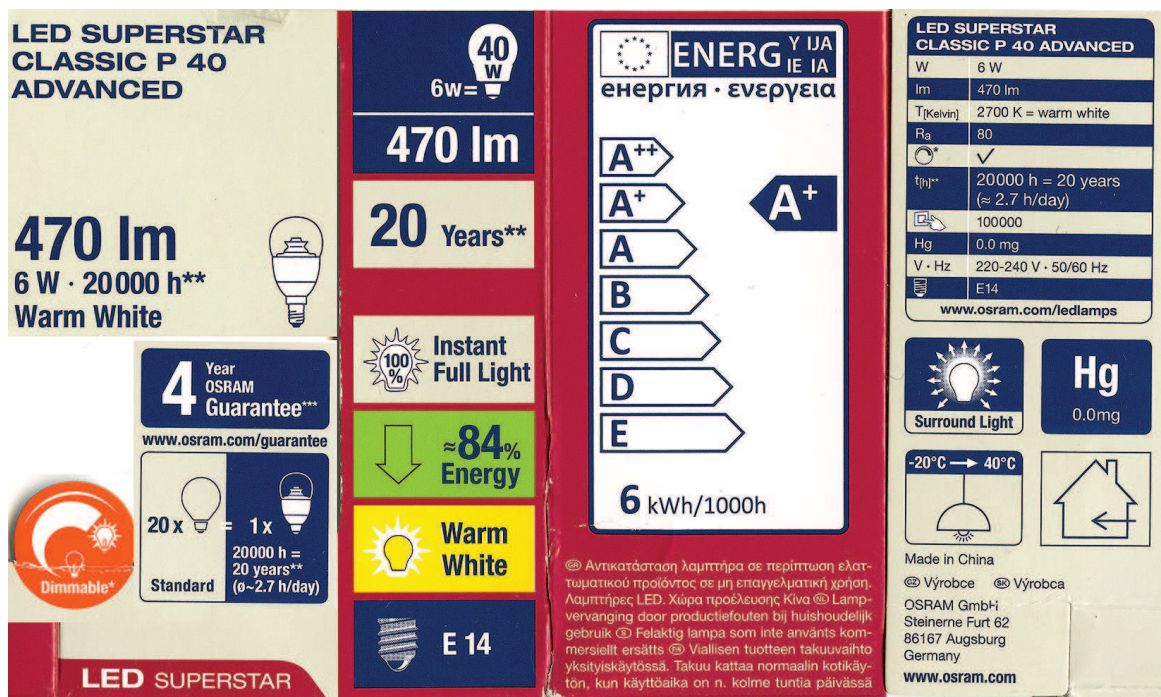
- a) Angi både strålingseffekt (strålingsfluks) og strålingsintensitet for begge lyskildene.
 - b) Estimer lysfluks (lysstrøm) og lysstyrke (lysintensitet) for begge lyskildene for den retningen lyset er kraftigst. (Hint: Bruk figur 10.2 og info gitt i teksten i underkapittel “Lumen vs watt”.)
 - c) Sammenlign lysstyrken til lysbunten fra Eigerøy fyr (forrige oppgave) med lysstyrken fra laserpekeren i denne oppgaven. Tror du det kunne være aktuelt å erstatte de gamle lyskildene i kystens fyr med en roterende laser i stedet?
14. Finn ut omtrent hvor bred regnbuen er (vinkelbredde fra rødt til fiolett). Sammenlign dette med vinkeldiameteren til Sola. Synes det å være hold i påstanden om at Solas utstrekning kan ha noe med fargene vi observerer i regnbuen (sammenlignet med et vanlig Newton-spekter når vi bruker en meget smal spalt)?
 15. Plukk med deg et par fargeprøver fra en malerbutikk, og forsøk å finne ut hvilket fargesystem fargene er angitt i.
 16. Forsøk å analysere hvordan lyset går gjennom en kuleformet vanddråpe. Definer de vinklene du trenger og benytt deg av symmetrier. Finn ut hvilke parametere som er viktige for å forutsi hvor regnbuen viser seg (les gjerne artikkelen som er omtalt helt

til slutt i dette kapitlet). Skarpheten og fargene i regnbuen kan anses som et resultat av Fermats prinsipp i moderne form. Forsøk uten å gjennomføre regningen å vise hvorfor dette prinsippet kommer inn i bildet. (Ikke bruk mer enn ca 15-20 min på oppgaven.)

♠ ⇒ En morsom fortelling i denne sammenheng:

En gruppe studenter gjorde numeriske beregninger av regnbuen som en prosjektoppgave i FYS2130 (UiO) i 2008. Arbeidet ble så vellykket at de fikk inn en artikkel i tidsskriftet American Journal of Physics: David S. Amundsen, Camilla N. Kirkemo, Andreas Nakkerud, Jørgen Trømborg og Arnt Inge Vistnes: *The rainbow as a student project involving numerical calculations*. Am.J.Phys. 77 (2009) 795-798. Du finner artikkelen selv ved å gå inn på <http://scitation.ajp.aapt.org/ajp/> og søke f.eks. på “Amundsen”. For å hente opp artikkelen i pdf-format, må du benytte deg av en PC knyttet til universitetets nett. ← ♠

17. Figur 10.22 viser deler av innpakningen til en LED lyspære. Sjekk at du forstår alle opplysningene som er gitt på pakken, og svar spesielt på følgende spørsmål:
- Hvor stor lysfluks og omtrent hvor stor lysmengde kan denne lyspæra gi.
 - Bestem omtrentlig lysstyrke fra pæra, og omtrentlig illuminans vi kan forvente på et hvitt A4 ark holdt i en avstand 1 m fra lyspæra. Hvilke antakelser gjør du for å komme fram til de tallene du angir.
 - Hvor stort er lysutbyttet av denne LED lyspæren?



Figur 10.22: Deler av innpakningen til en LED lyspære. Se oppgaveteksten for detaljer.