

# Kapittel 9

## Dispersjon av lys, farger

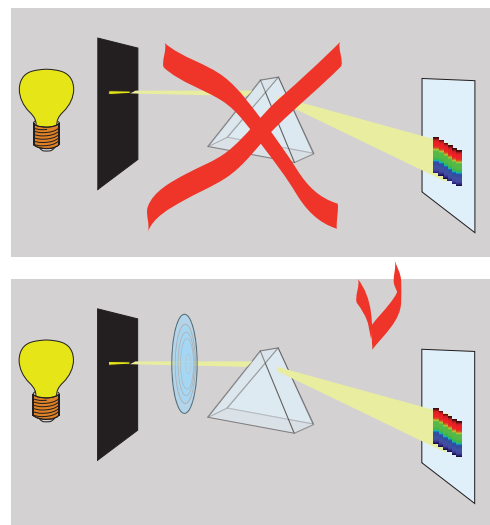
[Copyright 2009: A.I.Vistnes.]

### 9.1 Innledning\*

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. Dette gjelder først og fremst for bølgelengder i det synlige området.

Det klassiske eksperimentet som viser dette, er Newtons lysstråle gjennom et glassprisme. Vanligvis blir dette eksperimentet gjen-gitt som om man sender lys gjennom et pris-me, og vips har man et spekter. I praksis er det litt mer som skal til, og figur 9.1 indikerer dette. Vi må sende lys gjennom en *smal* spalt, og når lyset gjennom spalten treffer en skjerm bakenfor, *må* man ha en avbildning av spalten. Med det mener vi at vi må se spalten som en relativt vel avgrenset ly-sende, smal flate på skjermen. Dette kan vi oppnå ved å bruke f.eks. sollyk (fjern lyskilde) gjennom en egnet spalt (ganske smal). Enda bedre er å bruke en linse slik at vi faktisk får en skarp avbildning av spalten på skjermen.

Først når vi har disse forholdene tilfredsstillt



Figur 9.1: *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.*

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. Man må evt. etterjustere på lensens 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

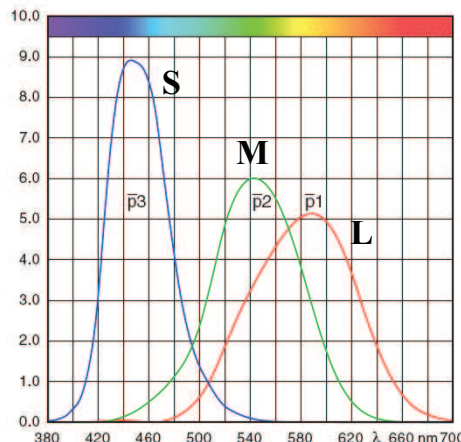
med bølgelengdekomponenter i hele det synlige området, vil f.eks. det røde lyset avbildes på ett sted, det grønne på et annet, og det blå på et tredje. Summen av alle disse avbildningene gir et synlig “spekter” på skjermen.

## 9.2 Hva menes med “farge”?\*

Det er en rekke detaljer som ikke kommer fram i en så enkel beskrivelse av Newtons spekter som den vi ga ovenfor. For det første: Hva mener vi med “farge”? Mange fysikere har et totalt feilaktig bilde av dette.

Farge er noe vi *opplever*, et sanseintrykk. Fargefølelsen har en komplisert sammenheng med de fysiske stimuli som kommer inn i øyet vårt. Lyset blir delvis absorbert i spesielle proteiner i synscellene våre, i “synspigmenter” i de såkalte staver og tapper. Stavene er mest lysfølsomme 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 vi i første omgang kan kalle rød-følsomme, grønn-følsomme og blå-følsomme.

Figur 9.3 viser følsomhetskurvene for de tre typer tapper. Figuren må forstås slik at dersom man 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) 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 kraftig lys til ved 480 nm for å gi samme respons fra denne tappen som lys ved 444 nm. For monokromatisk lys med bølgeleng-



Figur 9.2: *Relative følsomhetskurver for de tre typer tapper i øyet vårt. Figuren er hentet fra web april 2009, men nøyaktig kilde ikke notert...*

de mindre enn 380 nm og større enn 560 nm gir ikke denne type tapper noe nevneverdig respons overhodet.

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

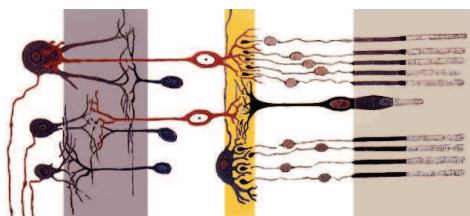
- S-tapper, 380 - 560 nm, topp 435-460
- M-tapper, 420 - 660 nm, topp 535-555
- L-tapper, 460 - 700 nm, topp 580-600

Du vil finne til dels ganske ulike tall i ulike kilder. En annen kilde gir f.eks. følgende toppunkter for følsomhetskurvene: 420, 534 og 564 nm. Forskjellene skyldes delvis at 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.

Det spesielle er at de tre kurvene i figur 9.3 overlapper hverandre, til dels meget sterkt! Det betyr at monokromatisk lys med bøl-

gelengde 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 bølgelengde).

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



Figur 9.3: *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” april 2009.)*

Signalene fra tappene blir kraftig bearbeidet før de når hjernen. Allerede i netthinnen har vi fire typer celler som bearbeider impulsene fra synscellene. Disse er såkalte horisontalceller, bipolare celler, amakrinceller og ganglionceller. Disse cellene har hver sin funksjon, blant annet for å forsterke kontraster eller reagere spesielt på tidsmessige endringer i lysstyrke. Cellene er også involvert i signalbehandlingen som fører til at vi får et fargeinntrykk. Det er også en utstrakt bearbeiding av signalene fra netthinnen i visse relé-knutepunkt på vei til hjernen, og enda mer i selve hjernen. 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 strykeinnholdet i responsen fra de tre typer tapper.

Holder vi oss bare til *monokromatiske* bølger i det synlige området, ser vi at styrkeinnholdet i responsen fra de tre type tapper vil endres på en entydig måte når bølgelengden 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 tappene for hver av 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.

Stimulus i M-tapper kan angis matematisk som følger:

$$M_{respons} = \int I(\lambda)M(\lambda)d\lambda$$

der  $I(\lambda)$  er intensiteten (pr  $d\lambda$ ) i innkommende lys for bølgelengden  $\lambda$ .  $M(\lambda)$  er følsomheten for M-tappene ved bølgelengden  $\lambda$ .

Stimulus i de andre to tappene kan angis på tilsvarende vis. De tre uttrykkene vi da får gir bare relative respons (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 samtlige tapper som en blanding av monokromatisk lys ved 660, 500 og 410 nm. Det eneste som man må sørge for er at:

$$M_{respons} = I_1(570)M(570) + I_1(420)M(420) = I_2(660)M(660) + I_2(500)M(500) + I_2(410)M(410)$$

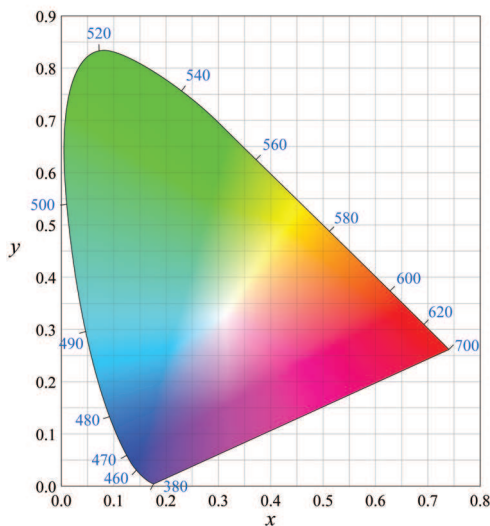
og tilsvarende for L og S-responsene. Vi får tre ligninger med tre ukjente (når vi antar at de to  $I_1$ -verdiene er kjent).

Poenget med denne analysen er å påpeke at *man kan få samme fargefølelse fra temmelig vidt forskjellige fysiske stimuli*. Med “stimuli” mener vi da en spesifikk fordeling av intensitet for ulike bølgelengder, 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. 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 fotografier og farger på en TV-skjerm eller data-skjerm å gjøre. I alle disse tilfellene starter vi ut med stort sett tre farger og blander dem med hverandre i ulike mengdeforhold for å danne “alle andre farger”. Men det er noen begrensinger ...

Figur 9.4 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 det “hvitt”.

Langs aksene er det angitt såkalte x og y-koordinater. Hvordan kan det ha seg at et



Figur 9.4: “Fargehesteskoen” definert av CIE i 1931. Nærmere omtale i teksten. Figuren er hentet fra Wikipedia, oppslagsord “Color vision” april 2009.

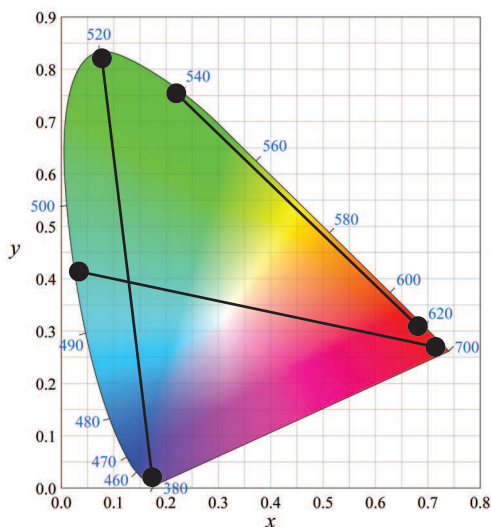
fargestimulus til øyet bestemmes av tre parametre:  $(S_{respons}, M_{respons}, L_{respons})$  mens fargehesteskoen gjengir farger i et todimensjonalt plot?

De tre stimuliene angir *både* informasjon om farge og om lysintensitet. For en gitt lysintensitet (eller rettere sagt *luminans* som bestemmes på en nærmere spesifisert måte som vi ikke kommer inn på her) vil de tre parametrene ikke være uavhengig av hverandre. Bare to kan velges fritt. Ved å anvende en passende transformasjon på tapperesponsene (de tre stimuliene) kan man transformere til to nær uavhengige parametre x og y som angir alle fargene ved den gitte lysintensiteten (luminansen) på en entydig måte. Den omvendte transformen er *ikke* entydig! Fargehesteskoen angir i prinsippet alle farger man kan oppleve ved en gitt luminans, og kan derfor betraktes som et generelt “fargekart”.

Man kan lage en fargehestesko for hver en-

kelt luminans, og kan da tilsammen danne et tredimensjonalt fargelegeme, men vi går ikke inn på detaljer her.

Matematikken bak de aktuelle transformasjonene er utviklet over mange år. Fargehesteskoen ble vedtatt allerede i 1930 som en form for fargemålestokk av CIE (Commission Internationale de l'Éclairage på fransk, The International Commission on Illumination på engelsk). Transformasjonene som brukes diskuteres fortsatt, og flere forskere som har jobbet ved vårt institutt (for eksempel Arne Valberg, Knut Kvaal og Jan Henrik Wold) har arbeidet med denne problemstillingen i mange år.



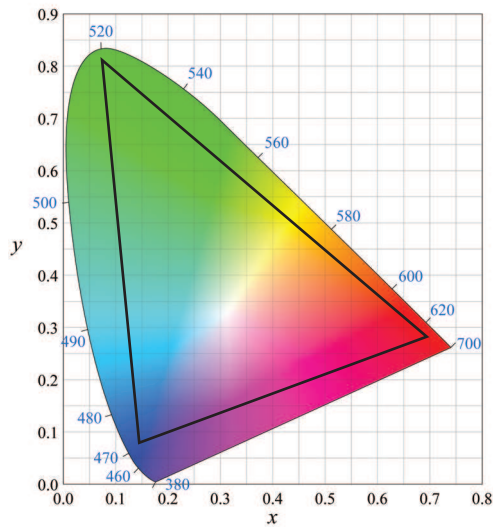
Figur 9.5: Å finne fargen etter additiv fargeblanding svarer til å finne “tyngdepunktet” for de fargekoordinatene som inngår i blandingen. Her er tre eksempler på farger man kan oppnå ved blanding av to farger, markert med rette linjer. Nærmere omtale i teksten.

Fargehesteskoen er nyttig på mange måter. Starter man med to farger (to koordinater innen fargehesteskoen) og blander disse med samme intensitet (definert på egnet vis), vil fargeoppfatningen vår svare til punk-

tet i fargehesteskoen som er midt mellom de to punktene vi startet ut med. Dette er indikert i figur 9.5. Starter vi med like mye av nær spektral stimuli ved 540 nm og ved 620 nm, vil fargen vi oppfatter ligge temmelig nær spektralt 572 nm, og blandingen vil se gul ut. Blander vi derimot i omtrent lik mengde nær spektralt stimuli ved 495 nm med nær spektralt stimuli ved 680 nm, vil vi oppfatte fargeblanding som temmelig “hvit” (en lys gråfarge uten synlig fargeinnhold).

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

Du kan forsøke å velge tre punkter og trekke linjer mellom dem for å få fram hvilke farger som kan fremstilles ved tre primærfarger, og du vil da oppdage at en rekke farger ligger utenfor trekanten som punktene utspenner. Et eksempel på en slik trekant er angitt i figur 9.6. 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 fargeområdet vi kan oppleve i naturen. En rekke farger på blomster for eksempel, er langt mer intense når du ser blomsten i virkeligheten enn det vi kan gjengi på en dataskjerm (eller foto for den saks skyld).



Figur 9.6: Fargeområdet til en dataskjerm som benytter tre typer fargede pixler ligger innenfor trekanten utspent av fargekoordinatene til pixelene. Fargeområdet innen den resulterende trekanten er langt dårligere enn fargeområdet som hele fargehesteskoen representerer.

### 9.2.1 Additiv versus subtraktiv fargeblanding

I kunstplakater bruker man f.eks. syvfargetrykk, ni-fargetrykk, 13-fargetrykk osv. En av grunnene til dette er at man skal kunne utvide fargeområdet i det endelige bildet. Det er naturlig å trekke paralleller til trekanten i figur 9.6 i denne sammenheng. Imidlertid må man huske at når man blander farger 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, hvor lys med ulike farger blandes. 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 spres til-

bake til oss fra pigmentene vil da synes å ha en farge når de belyses f.eks. i sollys. Legger vi flere pigmenter sammen, f.eks. blander vi 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 lysstoffrør), er det slett ikke sikkert at blandingen av gule og blå pigmenter vil se grønn ut!

Ordet subtraktiv fargeblanding er forresten litt misvisende. For å finne responsen fra flere pigmenter samtidig, er spektralresponsen (intensitet vs bølgelengde) av lys fra en blanding av to pigmenter karakterisert ved *produktet av spektralresponsene* for hvert av de to pigmentene.

Det var forresten Helmholtz og til dels Maxwell som fikk beskrevet forskjellen mellom additiv og subtraktiv fargeblanding første gang. Det skjedde om lag 200 år etter Newtons fargeblandingsmodell basert på hans fargespekter (additiv fargeblanding).

Det er ikke trivielt å lage fargepigmenter fra scratch. Ofte brukes pigmenter som man henter 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 stimuli) fra et digitalt kamera. Man kan ikke utvide fargeområdet i forhold til bildeopptaket (fargeområdet utspent av RGB-verdiene), men man kan *reprodusere på papir* fargeområdet bedre enn om vi hadde brukt færre pigmenter.

Skal man oppnå et større fargeomfang enn hva vi har tilgjengelig i dag, må man allerede i dataopptaket starte ut med flere enn tre stimuli. Det nytter ikke mye å starte med et digitalt kamera med kun tre detektorer per

pixel og tro at bare man har en god printer, så skal totalresultatet bli bortimot perfekt! Dette har analogier til lydopptak: Skal man behandle lyd med en samplingsfrekvens flere ganger den vi bruker i CD-lyd, så nytter det ikke å begynne med denne oppløsningen underveis i behandlingen av lyd og siden utvide. Man 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-standard. 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 stimuli.

## 9.2.2 Andre kommentarer.

Opplevelse av fargene på en blomst avhenger ikke bare av responsene i de tre type tapper på det stedet blomsten danner et bilde på retina. Fargeopplevelsen avhenger også av en slags integrert fargerrespons for *samtlig*e tapper på netthinnen. Vi sier at øyet “adapterer”. Vi vet at øyet adapterer når det gjelder intensitet. I sollys sender en “grå” flate ut mye mer lysintensitet enn en “hvit” flate vil gjøre i skumringen. Likevel kaller vi den første for grå og den andre for hvit. Hva vi kaller hvit, gråt og sort flate er altså ikke så mye avhengig av lysintensiteten fra flaten som den relative intensiteten fra flaten i forhold til omgivelsene. Slik er det også til en viss grad for farger. Hva vi kaller en rød, grønn og blå flate avhenger ikke bare av responsene ( $S_{respons}$ ,  $M_{respons}$ ,  $L_{respons}$ ) fra flaten, men også i høy grad av omgivelsene.

Fotograferer vi i lampelys vil ofte bildet se ganske rød-gult ut sammenlignet med et bilde tatt i sollys (såfremt ikke kameraet selv korrigerer på en lignende måte som øyet vårt gjør). Når vi er til stede i lampelyset, adapterer øyet slik at vi oppfatter fargene nesten omtrent som om vi hadde sollys til stede.

Dersom du driver fargekorreksjon av digitale bilder, f.eks. i Photoshop eller tilsvarende programvare, er det viktig at du har en grå flate sammen med bildet du skal vurdere fargene i. Sjekker du stadig at du oppfatter den grå flaten som grå, har du en rimelig god garanti for at øynene dine ikke adapterer til selve bildet du skal korrigere. Dersom du ikke sjekker øynene dine mot en grå flate, kan du komme til å lure deg selv slik at det endelige resultatet kan bli helt feil.

Det er mange andre finurligheter knyttet til øyet og signalgangen videre til og i hjernen, ikke minst knyttet til kontraster, men vi kan ikke ta oss tid til å gå inn i denne materien mer enn vi allerede har gjort.

En liten kommentar til slutt om fargehestetoesen: Dersom du betrakter figuren vår på flere ulike datamaskiner, vil du oppdage at fargene i figur 9.4 ser nokså forskjellig ut fra skjerm til skjerm. Delvis skyldes dette at primærfargene er noe forskjellige fra skjermtype til skjermtype. Delvis skyldes dette ulike fargeprofiler som brukes ved konfigurering av grafikkortet i datamaskinen. Grafikere utfører ofte en kalibrering av skjermen og transformerer fargeinformasjon ved hjelp av matriser før man betrakter bilder på skjerm eller før man trykker fargene. Disse detaljene viser litt av problemene vi har å hanske med i dagens samfunn. Fargekorrigering er en profesjon!

### 9.3 Spekter fra et prisme

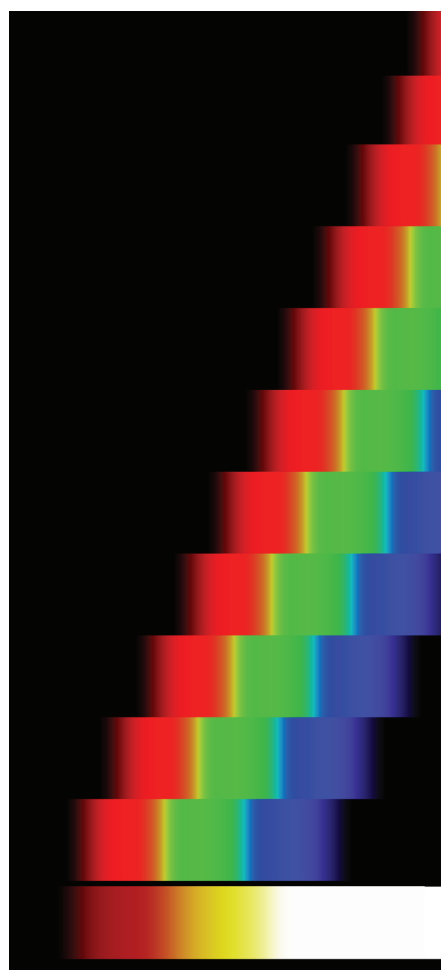
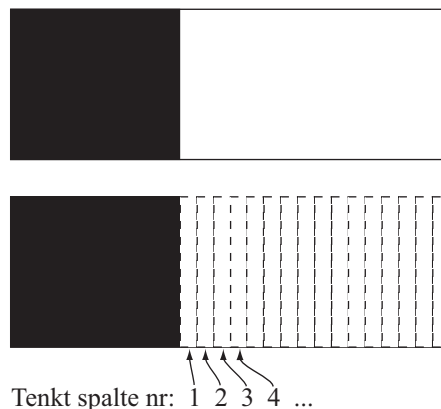
Nå når vi vet litt mer om hvordan vi oppfatter farger, er vi klar til å gå tilbake til Newtons fargespekter fra et prisme. Mange tenker på spektralfarger som de fargene vi ser i regnbuen: ROGBIF: rødt, orange, gult, grønt, blått, indigo og fiolett. Men hva ser vi egentlig når vi betrakter et Newton spekter fra en smal spalt? Jo, spekteret ser da omtrent ut som øverst i figur 9.7. 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?



Figur 9.7: *Spekter fra en smal spalt (øverst) og fra økende spaltbredde nedenfor.*

Forklaringen finner vi ved å øke spaltebredden noe. I de neste to eksemplene i figur 9.7 har vi simulert spektre fra spalter med økende bredde. *Nå* får vi inn gult! Hva skyldes det?

Det skyldes at øyets respons på spektralfargene bare i liten grad gir oss fargeinntrykket “gult”. Gult får man først og fremst når man blander rødt og grønt (additiv fargeblanding). Vi får da en koordinat i fargehesteskoen som ligger litt innenfor randen.



Figur 9.8: *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 9.8 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 enkeltpalter 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 ytterst 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. Denne oppfatningen vil være ved utover og vi ser summen 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.

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: Blåfiolett og cyan. De rød-gule og de fiolett/blå-cyan stripene kaller vi *kantfarger*. Et eksempel på randfargene er vist i figur 9.9. Når du

ser randfarger i praksis, er stripene ganske mye smalere enn man kan få inntrykk av i denne figuren.



Figur 9.9: *Det finnes to typer randfarger, avhengig av hvilken side som er sort og hvilken er hvit i forhold til prismets orientering. Øverst i figuren er vist fordelingen av lys vi starter ut med, og nederst 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!*

Dersom du ser gjennom en kikkert og velger å betrakte en hvit-sort overgang ute i periferien av synsfeltet, vil du nesten bestandig se kantfarger i overgangen. På gode kikkerter, hvor man har forsøkt å korrigere for dispersjonen til lys gjennom glass (ved å bruke kombinasjoner av ulike glasstyper i linsene), er kantfargene ikke særlig tydelige. På

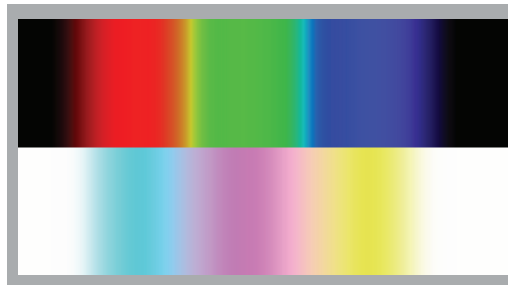
billigere kikkerter er kantfargene betydelige og ødelegger kontraksten og skarpheten til bildet vi kan se.

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 kompatibel 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 som gir oss tydelig gult i regnbuen!

### 9.3.1 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 når vi hadde en 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, en totalt annen fargeopplevelse enn Newton-spekteret (som indikert i figur 9.10. Goethe mente at Newtons forklaring var alt for enkel og at man måtte trekke inn omgivelsene og forhistorien til hvordan lyset var behandlet for å kunne forstå de fargene man kan oppleve i ulike geometrier.

Det kan blant annet vises at dersom man setter inn et nytt prisme etter det første (på en spesiell måte), vil selv en spalt ikke bli av-



Figur 9.10: *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!*

bildet som et spekter, men som en lys stripe uten farger. Man kan altså sende hvitt lys gjennom et prisme, og likevel ikke få farge-separasjon i form av et spekter!

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 det dikteren Alf Bjerke som ble en viktig disippel av Goethes fargelære. Han ledet en diskusjonsgruppe over en del år, der blant annet to av instituttets lærere (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 gir oss noen forklaringer som ikke vi ikke kan håndtere like godt innenfor vår vanlige fysikk-modell for lys og for hva som skjer når vi sender lys gjennom et prisme (dog lys som bølger!). Figur 9.8 viser etter min mening hovedprinsippet for hvordan vi kan gå fram for å bygge opp hvordan fargene

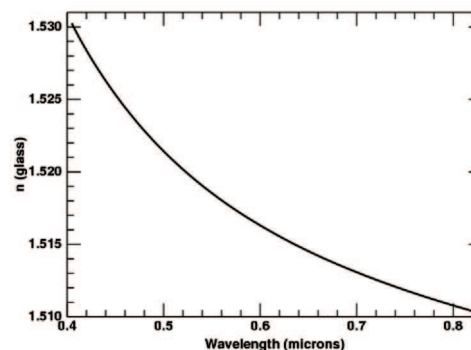
vil komme ut.

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”, men at det er snakk om en ganske spesiell geometri for å få det resultatet vi får. Sagt med andre ord: Resultatene avhenger av randbetingelsene for hvordan vi anvender Maxwells ligninger! 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 en videre sammenheng enn der eksemplet opprinnelig kom fra.

Du har forhåpentligvis sett at jeg i FYS2130 har lagt mye vekt på å påpeke også i mange andre sammenhenger at vi har lett for å tro at spesielle løsninger kan brukes også i andre sammenhenger enn de ble utledet for. Det er en farlig sport å slumse slik, og det gagnar ikke fysikkfaget!

### 9.3.2 Vedlegg

Helt til slutt 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 man ønsker å demonstrere Newton-spektre eller noen av de andre eksemplene vist i dette kapitlet, bør man bruke en type glass som har stor dispersjon. I kikkerter søker man helst materialer med minst mulig dispersjon for at det kromatiske avviket skal bli så lite som mulig.



Figur 9.11: Eksempel på dispersjon for en typisk optisk glass (BK7). Figuren er hentet fra <http://mintaka.sdsu.edu/GF/explain/optics/disp.html> april 2009.

## 9.4 Referanser

I Norge er det kanskje Høgskolen i Gjøvik som har mest kompetanse om farger på ett sted. De er samlet under paraplyen Det Norske fargeforskningslaboratorium (<http://www.colorlab.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/>