



Norsk Forskningslaboratorium for universell
utforming, NTNU

Jakten på kontrastene. En litteraturstudie om
visuelle kontraster.

Jonny Nersveen

August 2022

Institutt for vareproduksjon og byggteknikk, Fakultet for ingeniørvitenskap, NTNU

Forord

Kravene til visuelle kontraster innendørs kom først inn i norsk lovverk med krav til skilting relatert til helse, miljø og sikkerhet og i merking av rømningsveier. I 2010 kom krav til visuelle kontraster relatert til universell utforming, der hensikten var å ivareta svaksyntes interesser. Visuelle krav til universell utforming varierer fra land til land. Noen benytter Webers luminanskontrast, og noen stiller krav NCS sin lyshetskontrast, noen sverger til Michelsons luminanskontrast, og enkelte ISO-krav benytter luminansforholdet som kriterium. Undertegnede har arbeidet med disse spørsmålene i over 20 år, og har erfart at kompetansen på området er lav, og det fører til utfordringer ved utforming av offisielle og standardiserte ytelseskrav.

Det er et håp at denne publikasjonen, som er finansiert av Norges blindforbunds forskningsfond med kr 150.000 kroner, gir et godt bidrag til forståelsen av visuelle kontraster. Det er også et håp at publikasjonen kan bidra til å finne bedre metoder for ytelseskrav til visuelle kontraster enn det vi har i dag.

August 2022

Jonny Nersveen

Forskningsansvarlig for Norsk forskningslaboratorium
for universell utforming, NTNU

Innhold

Sammendrag	4
1 Innledning	5
2 Metode	5
3 Synssansen og strålingstekniske enheter	6
3.1 Generelt	6
3.2 Strålingstekniske enheter	10
3.3 Kontrastdefinisjoner	15
3.3.1 Generelt	15
3.3.2 Webers luminanskontrast	15
3.3.3 Michelsons luminanskontrast	16
3.3.4 Root means square	17
3.3.5 Luminansforholdet	17
3.3.6 Acutance	18
3.3.7 Lyshetskontrast (NCS)	18
3.4 Ulike måter å beregne kontrast	20
3.5 Farger og fargeforvrengninger	22
4 Kontrastsensibilitet	32
4.1 Fysiologiske kontrastfenomener	32
4.2 Perseptuell lyshet, positiv og negativ kontrast	39
4.3 Perseptuell kontrast	51
4.4 Tap av kontrast	54
5 Oppsummering	64
6 Referanser	67

Sammendrag

Synskunnskap er en tverrfaglig disiplin som spenner over svært mange fagområder med sine tilhørende forskningsmiljøer og tradisjoner. Dette kommer godt til syne i utformingen av nasjonale og internasjonale ytelseskrav i forskrifter og standarder. I denne publikasjonen er det samlet relevant litteratur på tvers av fagområdene, med hovedvekt på synlighet av visuelle kontraster.

Det finnes mange metoder for beregning av visuelle kontraster; Webers luminanskontrast, Michelsons luminanskontrast, Root Mean Square, luminansforholdet og lyshetskontrasten i NCS og RAL. Norge benytter Webers luminanskontrast.

Webers luminanskontrast er den kontrastmetoden som har mest forskningsresultater å vise til, men har store utfordringer ved at den ikke skiller mellom negativ og positiv kontrast, selv om den beviselig ikke hensyntar forskjellen i følsomheten for kontrastens polaritet. Webers luminanskontrast løper fra -1 til uendelig, noe som gir en ikke-lineær skala.

Michelsons luminanskontrast bygger på modulasjon, basert på sinusgitter. Formelen derimot har vist seg å kunne brukes for perseptuell oppfattelse av visuell kontrast uavhengig av polariteten. Skalaen er normalisert til 0 – 1, men er ikke lineær i forhold til perseptuell oppfattelse av lyshet.

Root Mean Square er en metode som kan håndtere flere kontraster samtidig, men vil være for komplisert å bruke i prosjektering av omgivende miljøer. Den brukes først hovedsakelig innen skjermteknologi.

Luminansforholdet mellom maksimum og minimum luminans er kun en egendokumentasjon for fysiske objekter i form av skilter, markeringslys i rømningsveier, osv., og dokumenterer ikke produktene egenskaper i bruk.

NCS og RAL har sitt opphav i designermiljøene, er laget for å ha perseptuell lineær tilnærming til lyshet og kontraster, samtidig som at de er koplet opp mot synsfysiologi og strålingsfysikk. Det er store fordeler ved å ha lineær skala, fordi sprangene mellom hver stapp er lik. Ulempene med disse to metodene er at de tar utgangspunkt i fargepigmentene i flatene som sammenliknes, uten å ta hensyn til belysningen. Under normale belysningsnivåer er ikke det kritisk, men kontraster kan også skapes av lys i seg selv, og det fanger ikke disse to metodene opp. Det vi hadde trengt er en kombinasjon av egenskapene til Michelsons formel og lyshetskontrasten, men den er ikke enkel å skape.

Et forhold som er lite påaktet er hvor skarp luminansovergangen er mellom to flater, dvs. acutance. Graden av acutance påvirker terskelverdiene for synlighet.

Valgene av ytelseskrav må også ivareta normale kontrasttap.

Publikasjonen har ikke noe svar på en opplagt vei å gå for hvilken metode som bør brukes, men man bør se nærmere på Michelsons formel og NCS sin lyshetskontrast.

1 Innledning

Har du opplevd å kjøre med ski rett inn i en snøfonn, uten å ha oppdaget den på forhånd? Det er faktisk ikke uvanlig, i gråvær. Konturene viskes ut, og blendet av den hvite snøen kan vi også bli. Konturen som skulle varslet oss, var ikke synlig. Enkelt sagt, det var ingen synlig kontrast. Ser vi ikke kontraster, ser vi faktisk ikke. Visuelle kontraster er helt fundamentalt for synssansen.

Fagområdet lys og syn består av mange fagretninger, som strålingsfysikk, lysteknikk, kolorimetri, synsfysiologi, synsnevrologi, biologi, optometri, oftalmologi, persepsjonspsykologi, arkitektur, design, mm. Mange av disse fagområdene har lite kontakt med hverandre, selv om hvert fagområde har tverrgående betydning.

Dette arbeidets mål er å øke kunnskapsnivået på tvers av fagområdene, og særlig i tilknytning til svaksyntes behov relatert til universell utforming. Byggteknisk forskrift og også nasjonale standarder stiller krav til kontraster, men under utviklingen av disse var mangel på både kunnskap og litteratur en utfordring. Det er et håp at denne publikasjonen kan avhjelpe kunnskapsbehovet.

Fordi publikasjonen er beregnet på ulike fagbransjer, vil en del terminologi være ukjent for noen av dem. Derfor vil publikasjonen inneholde en gjennomgang av relevant strålingsfysikk og synsfysiologi, slik at forskningsresultatene lettere skal bli tilgjengelig for leseren uavhengig av bakgrunn.

Fargesyn har ingen stor plass i publikasjonen, men det er tatt med nye metoder for beregningen av fargeforvrengninger.

2 Metode

Synsforskning har vært drevet helt siden 1800-tallet, og en del av dette er i bruk den dag i dag. Derfor må litteraturgjennomgangen starte på dette tidspunktet. Det vil også bli fokusert på den type forskning som har hatt stor betydning for forståelse av visuelle kontraster, og som har dannet evidens.

Fordi studien har begrensede økonomiske rammer, må fokuset begrenses. Fokuset rettes derfor mot visuelle kontraster som har betydning for planlegging av visuelle forhold.

Litteratursøkene vil bli gjort med universitetsportalen Oria og Google Scholar. I tillegg vil allerede kjente publiseringer, spesielt de eldre, bli benyttet.

For å sette litteraturstudiene inn i en sammenheng, vil det bli gitt en generell beskrivelse av synssansen, strålingsfysikk og lysteknikk.

Innhentet litteratur blir drøftet, og det er også utført egne analyser og beregninger av forfatteren, der innhentet litteratur danner basisen.

3 Synssansen og strålingstekniske enheter

3.1 Generelt

Når et atom mottar energi slik at et elektron forflytter seg til en bane lenger ut fra atomkjernen, frigjøres energikvanter i form av fotoner, og dermed elektromagnetisk stråling. Energien til et foton følger formelen:

$$\text{Energien til et foton} = \frac{\sigma \cdot c}{\lambda} \text{ [Joule]} \quad \text{[Likning 3.1-1]}$$

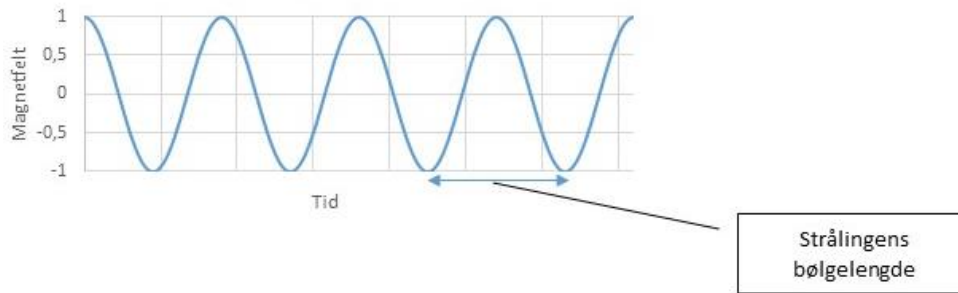
der:

σ = Plancks konstant = $6,626\ 0693 \cdot 10^{-34}$ [J·s]

C = lysets hastighet i vakuum = 299 792 458 [m/s]

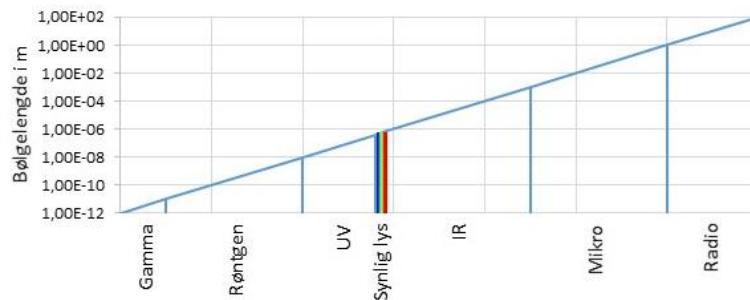
λ = bølglengden [m]

Måler vi energien til et foton per sekund, J/s, får vi fotonets effekt i form av watt. Fotoner oppfører seg både som ladede partikler og som elektromagnetisk stråling. Begge disse egenskapene utnytter faktisk synet. Det vi kaller synlig lys er elektromagnetisk stråling, justert for øynenes spektrale følsomhet. Elektromagnetisk stråling er elektromagnetiske bølger, karakterisert ved sin bølglengde. Enheten er watt. (Maxwell, 1865). Figur 3-1 viser en illustrasjon av elektromagnetisk stråling.



Figur 3.1-1: Elektromagnetiske bølger. Illustrasjon: Jonny Nersveen

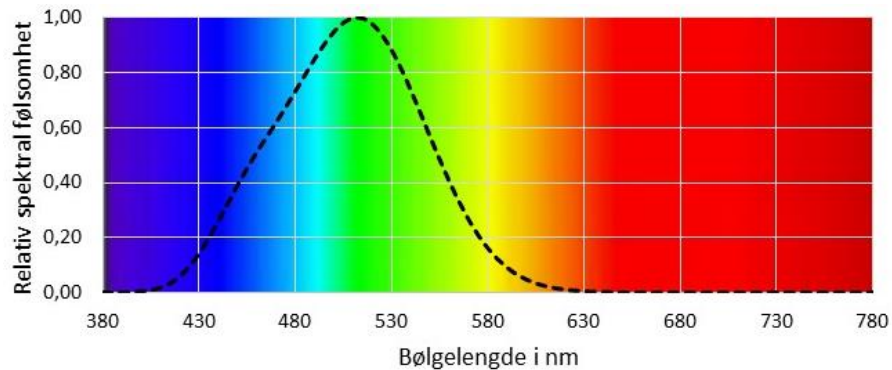
Synssansen vår er bygget opp slik at den har følsomhet som kan fange opp et visst område av elektromagnetisk strålings bølglengder, og regnes å gå fra 780 til 380 nanometer (nm). Se figur 3.1-2.



Figur 3.1-2: Elektromagnetisk stråling ulike spektrre. Illustrasjon: Jonny Nersveen.

Følsomheten til visuelt sansesystem, styres av fotopigmentene *rhodopsin*, tre varianter av fotopigmentet *fotopsin* og *melanopsin* (Provencio et al., 2000; Høvdning et al., 2016). Alle disse fotopigmentgruppene filtrerer elektromagnetisk stråling innenfor sine respektive bølgelengdespektrere.

Vi har fem forskjellige varianter av lysfølsomme celler på netthinna; *staver*, tre varianter *tapper* og *ipRGC*. Stavene er svært lysfølsomme, og utgjør nattsynet vårt, der absorpsjonsspekteret styres av fotopigmentet *rhodopsin*. Figur 3.1 viser relativ spektral følsomhet for stav-reseptorene. Bakgrunnsfargene i figuren viser sammenhengen mellom farger og deres bølgelengder.

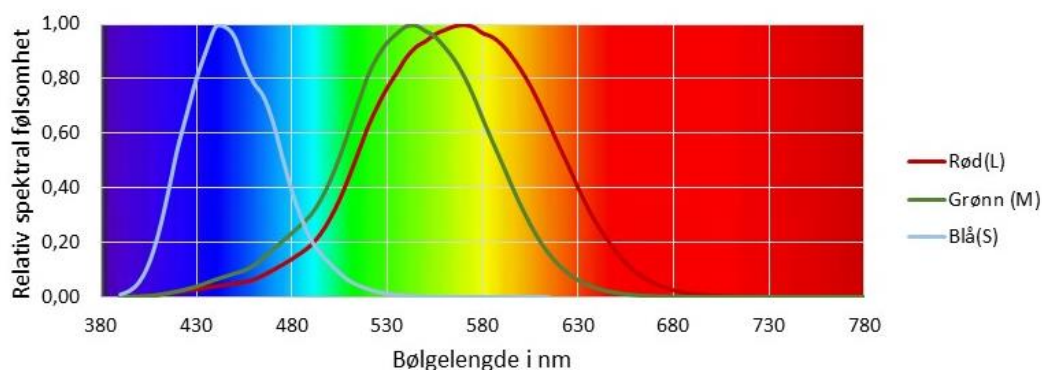


Figur 3.1-3: Relativ spektral følsomhet for stav-reseptorene. (CVRL, 2018). Illustrasjon: Jonny Nersveen

Stav-reseptorene skiller ikke på farger, kun på intensiteten i lyset. Sensitiviteten er høyest ved ca 505 nm.

Rhodopsinet har en *bleke- og regenereringsfunksjon*, litt på samme måte som fotopigmentet i huden vår, bare at den går betydelig raskere. Utendørs på natt, med bare stjernene som lyskilde, vil en person med normalt syn fortsatt se. Rhodopsinet vil være i regenerert tilstand og slipper derved gjennom mye lys, og gjør synet svært lyssensitivt. Økes lysnivået, blekes rhodopsinet, og blir lysnivået høyt nok, vil rhodopsinet blokkere for lysinntrengning til stavreseptorene. (Valberg, 1998; Høvdning et al., 2016).

I motsetning til stav-reseptorene, kan tappene oppfatte farger, og fargesorteringen styres av fotopsin-pigmentene. Tappene består av tre lysfølsomme reseptortyper, kalt *L*, *M* og *S*. Bokstaven *L* står for Long wavelength, *M* for Medium wavelength og *S* for Short wavelength, og disse beskriver språklig hvor i bølgelengdespekteret hver enkelt av dem slipper gjennom lys. Figur 3.1-4 viser relativ spektral følsomhet for *L*, *M* og *S*. *S*-cellen er mest sensitiv ved ca 420 nm, *M*-cellen ca 535 nm og *R*-cellen ca 565 nm. Legg merke til at topp-punktet for *L* og *M* ligger svært nær hverandre spektralt, mens *S* har sitt topp-punkt lenger unna. Når tappene er fullt aktive, sier vi at øynene er *fotopisk tilpasset*, eller *fotopisk adaptert*. (Lucas et al., 2014; Valberg, 1998; Høvdning et al., 2016).

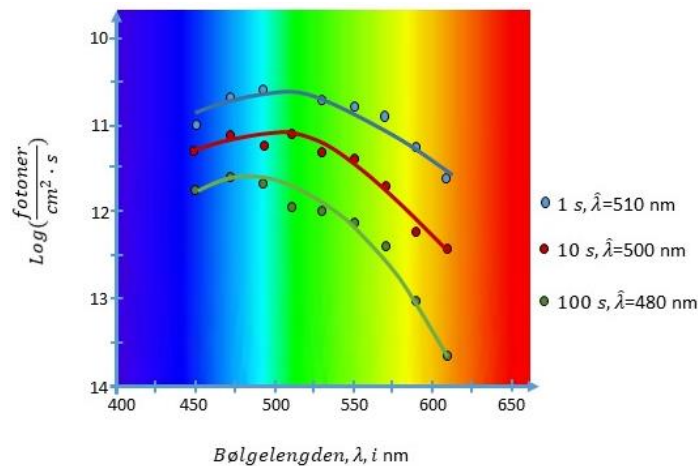


Figur 3.1-4: Relativ spektral følsomhet for tapp-reseptorene. (CVRL, 2022). Illustrasjon: Jonny Nersveen.

Tappene krever lysstimulering over et visst nivå. Er lysstimuleringen av netthinna under grenseverdien til tappene, er det kun stavene som kan oppfatte lys. I dette tilfellet er øynene skotopisk adaptert. Mellom skotopisk og fotopisk adaptasjon, har vi en mellomfase med delvis fargesyn. Denne kalles for *mesopisk tilpasset*, eller *mesopisk adaptasjon* som den også kalles.

Den siste lysfølsomme sansecellen, er ipRGC (intrinsically photosensitive Retinal Ganglion Cell). Tidligere trodde man at denne kun stimulerte reguleringen av søvnhormonet *melatonin*, men dette er tilbakevist. Man finner blant annet responser både i *amakrinecellene* og *bipolarcellene* hos dyrearter som kan sammenliknes med mennesket. Imidlertid er mye fortsatt ukjent. Måling av spektral følsomhet er betydelig mer komplisert hos mennesker, da responsen ikke kan sees i form av synsprestasjon. Derfor har vi bare nøyaktige responser fra ulike dyreforsøk, bl.a hos mus og primater. IpRGC har hovedsakelig ikke-visuelle virkninger, og disse er ikke så enkle å studere hos mennesker fordi man må gjøre fysiske målinger direkte på netthinna. Imidlertid har ipRGC betydelig innvirkning på pupillreguleringen, og pupillens størrelse kan iaktas hos mennesker. Figur 3.1-5 viser et eksperiment utført av McDougal og Gamlin, publisert i 2010 (McDougal og Gamlin, 2010). Målingene ble utført på 6 testpersoner i tre ulike forsøk. Forsøket starter med mørkeadaptasjon, hvor pupillåpningen registreres. Deretter utsettes øynene for lysstimuli i et målefelt på 41°. Forklaringsvariablene er antall fotoner per cm² per sekund, 9 spesifikke bølgelengder og 3 ulike stimulitider. Eksperimentet avsluttes med mørkeadaptasjon. Responsvariabelen er pupillens størrelse. Figuren viser netthinneestimulansen som funksjon av lysets bølgelengder, for tre ulike tidsintervaller. Netthinneestimulansen er målt som briggske logaritmen til antall fotoner/cm².

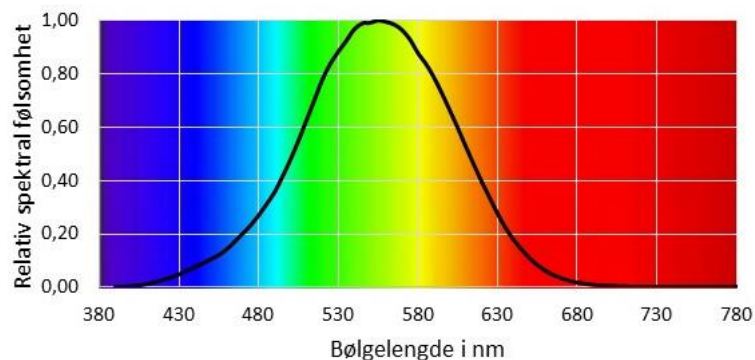
Pupillreaksjonen påvirkes av både tapper, staver og ipRGC, der ipRGC's innflytelse øker med lengden på stimuli. Når øynene er stabilt påvirket av lys, er det ipRGC som har størst innflytelse. Dette kan vi se i figur 3.1-5, der toppunktet til kurvene forskyver seg mot kortere bølgelengder, og stabiliserer seg rundt ca 480 nm. Toppunktene er registrert der pupillåpningen er redusert med 50% i forhold til mørkeadaptasjon. Fordi pupillens åpningsareal påvirker netthinneestimulansen, så betyr dette at innslag av blått lys faktisk reduserer netthinnebelysningen generelt.



Figur 3.1- 5: Spektral sensitivitet for ipRGC som funksjon av retinal stimulans, eksponeringstid og bølgelengde. (Lucas et al., 2014). Reproduksjon av kurve: Jonny Nersveen.

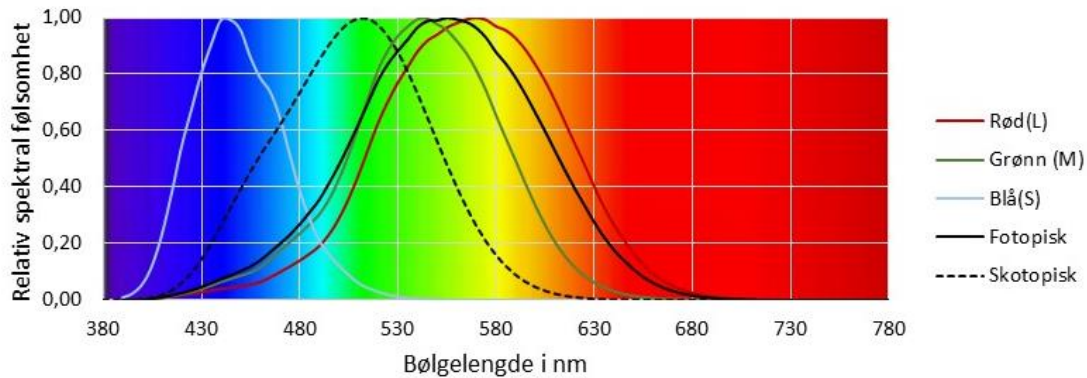
Ved å sammenlikne to farger med en liten bølgelengdeforskjell, justere intensiteten til den ene slik at vi opplever lysintensiteten til begge likt, repeterer prosessen suksessivt for alle nabofarger, kan vi finne forskjellen i hvor mye effekt så må til per bølgelengde for at nabofarger oppfattes som like. Inverterer vi denne kurven, normerer topp-punktet til 1, finner vi den klassiske følsomhetskurven som lystekniske måleinstrumenter er kalibrert til. Kurven ble laget i 1924, og ble senere vedtatt som standard i 1931 av CIE (CIE er en internasjonal standardiseringsorganisasjon for lys og syn). Følsomhetskurven, som kalles for $V_2(\lambda)$, er øyets følsomhet for lysintensitet målt i en synsvinkel av 2° . Kurven er vist i figur 3.1-6.

Sentralt i foveola (stedet med absolutt størst synsskarphet), finnes ikke S-celler. Dette forårsaker en unøyaktighet i $V_2(\lambda)$ - kurven. CIE valgte å beholde standarden for $V_2(\lambda)$, men har vedtatt en tilleggsstandard kalt $V_M(\lambda)$, basert på et arbeid Dean B. Judd publiserte i 1951 (Judd, 1951). Grunnen til korreksjonen skyldes at standard $V_2(\lambda)$ er målt innenfor en synsvinkel på 2° . I ettertid har det vist seg at denne begrensningen gir noen unøyaktigheter i blått område. $V_M(\lambda)$ måles innenfor med 10° synsvinkel.



Figur 3.1-6: Tappenes spektrale følsomhet for lysintensitet. (CVRL, 2022). Kurveframstilling: Jonny Nersveen.

Figur 3.1-7 viser sensibilitetskurvene samlet. Legg merke til at kurven for fotopisk adaptasjon, $V_2(\lambda)$, ligger tett opp til sensibilitetskurvene for L og M, mens kurven for skotopisk adaptasjon, dvs. $V'(\lambda)$, og kurven for S ligger lenger unna.



Figur 3.1-7: Relative spektrale følsomheter i samme diagram. Kurveframstilling: Jonny Nersveen.

3.2 Strålingstekniske enheter

Som omtalt i kapittel 3.1, utnytter synsfysiologien elektromagnetisk stråling. Derfor er også våre lystekniske enheter koplet til strålingsfysikk. Utgangspunktet er strålingsfluks, strålingsstyrke, strålingstrykk og strålingstetthet.

Strålingsfluksen, ϕ_e , er betegnelsen på total mengde elektromagnetisk stråling i form av watt som sendes ut fra en strålingskilde. Ved å korrigere strålingsfluksen med øyets følsomhet for lysintensitet, omformes strålingsfluksen til lysfluks, og skifter enhetsnavn til lumen:

$$\phi = K \int \phi_e(\lambda) \cdot V_2(\lambda) \cdot d\lambda = 683 \int_{380 \text{ nm}}^{780 \text{ nm}} \phi_e(\lambda) \cdot V_2(\lambda) \cdot d\lambda \quad [\text{Likning 3.2-1}]$$

der:

ϕ = lysfluks [lumen]

K = spektralt maksimalt lysutbytte [lumen/W]

$\phi_e(\lambda)$ = strålingsfluks per bølgelengde [W/nm]

$V_2(\lambda)$ = øyets relative spektrale følsomhet per bølgelengde

I mange sammenhenger er vi interessert i å vite *lysstyrken* i et hvert punkt på et objekt. Definisjonen av lysstyrken, I , er den deriverte av lysfluksen, ϕ , mhp. romvinkelen ω , dvs:

$$I = \frac{d\phi}{d\omega} \quad [\text{candela=cd}] \quad [\text{Likning 3.2-2}]$$

Hvis lysstyrken fra en infinitesimal (uendelig liten) kule er lik i alle retninger, vil lysfluksen bli:

$$\phi = I \int_0^{4\pi} d\omega = 4\pi I \quad [\text{lumen}] \quad [\text{Likning 3.2-3}]$$

Belysningsstyrken mot en flate defineres som andelen lysfluks som treffer 90° på flaten per m^2 , dvs.:

$$E = \frac{d\phi(90^\circ)}{dA} \quad [\text{Likning 3.2-4}]$$

der:

E = strålingstrykket mot flaten [lumen/ m^2 =lux]

ϕ = strålingsfluksen rettet 90° mot flaten [lumen]

A = flatens areal [m^2]

Det er flatens tilsynelatende areal sett fra lyskilden som avgjør belysningsstyrken. Derfor må likning 3.2-4 korrigeres med cosinus til lysemitteringens innfallsvinkel, hvis strålingens innfallsvinkel ikke er 90° mot flaten. Se figur 3.2-1. Belysningsstyrken avtar med cosinus til innfallsvinkelen. Dette kalles *1. cosinuslov*, og likning 3.2-3 kan omskrives til:

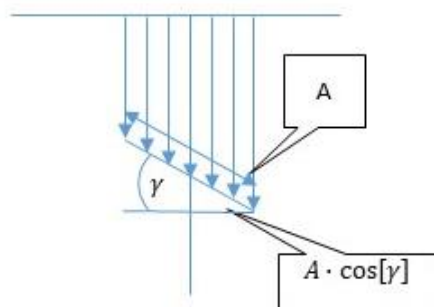
$$E = \frac{d\Phi \cdot \cos(\gamma)}{dA} \quad [\text{Likning 3.2-5}]$$

der:

E = strålingstrykket mot flaten [lux]

Φ = strålingsfluksen i vinkelen γ med flatens normal [lumen]

A = flatens areal [m^2]



Figur 3.2-1: Belysningsstyrken avtar med cosinus til lysfluksens innfallsvinkel. Illustrasjon: Jonny Nersveen.

I svært mange sammenhenger avtar lysstyrken fra en flate med cosinus til vinkelen mellom flatens normal og utstrålingsretningen. Maksimal lysstyrke er langs flatens normal, dvs.:

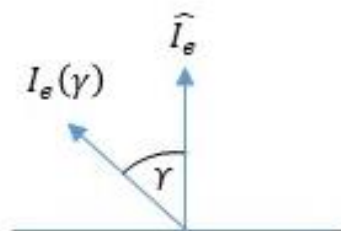
$$I(\gamma) = \hat{I} \cdot \cos(\gamma) \quad [\text{Likning 3.2-6}]$$

der:

$I(\gamma)$ = strålingsstyrken i retning γ , i hht figur 3.3-2 [cd]

\hat{I} = maksimal strålingsstyrke normalt ut av flaten [cd]

γ = vinkelen definert i figur 3.2-2 [grader eller radianer]



Figur 83.2-

Figur 3.2-2: Strålingsstyrken ut av en flate. Illustrasjon: Jonny Nersveen.

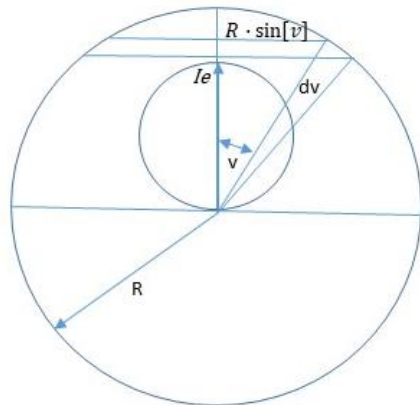
Flater som reflekterer eller emitterer lys etter likning 3.2-7, kalles *Lambert-strålere* og omtales som *Lamberts cosinuslov* eller også *2. cosinuslov*.

Har vi en flate med endelig utstrekning som sender ut elektromagnetisk stråling som følger Lamberts cosinuslov, er det mulig å regne ut total strålingsfluks. Se figur 3.2-3. Utgangspunktet er likning 3.2-7:

$$\Phi = \int I \cdot d\omega \quad [\text{W}] \quad [\text{Likning 3.2-7}]$$

Fra figur 3,2-3 blir den deriverte av romvinkelen:

$$d\omega = \frac{2\pi \cdot R \cdot \sin(v) \cdot R \cdot dv}{R^2} = 2\pi \cdot \sin(v) \cdot dv \quad [\text{Likning 3.2-8}]$$



Figur 3.2-3: Illustrasjon av beregning av emitterende eller reflekterende elektromagnetisk stråling fra en homogen flate som følger Lamberts cosinuslov. Illustrasjon: Jonny Nersveen.

Beregnet lysfluks blir:

$$\Phi = 2\pi \int_0^{\pi/2} \hat{I} \cdot \cos(v) \cdot \sin(v) \cdot dv = \pi \hat{I}_e \quad [\text{W}] \quad [\text{Likning 3.2-9}]$$

Likning 3.2-9 er kun gyldig når flaten enten reflekterer eller emitterer etter Lamberts cosinuslov, innenfor spesifikt bølgelengdespekter.

Ved å kombinere likning 3.2-5 med den generelle likningen for strålingsstyrke, likning 3.2-2, kan likning 3.2-5 omformes til:

$$E_e = \frac{d\Phi_e \cdot \cos(\gamma)}{dA} = \frac{I_e \cdot \cos(\gamma)}{dA \cdot d\omega}, \quad [\text{W/m}^2] \quad [\text{Likning 3.2-10}]$$

der:

Φ = strålingsfluksen [W]

γ = innfallsvinkelen mellom målepunktets normalt og strålingens innfallsvinkel [grader eller radianer]

A = arealet strålingen treffer [m²]

ω = romvinkelen strålingsobjektet utgjør, sett fra målepunktet [sr]

Den deriverte av romvinkelen er:

$$d\omega = \frac{dA}{R^2} \quad [\text{Likning 3.2-11}]$$

der:

ω = romvinkelen strålingsobjektet utgjør, sett fra målepunktet [sr]

A = arealet romvinkelen dekker [m²]

R = radien i romvinkelen [m]

Settes likning 3.2-11 inn i likning 3.2-10, får vi:

$$E = \frac{d\Phi \cdot \cos(\gamma)}{dA} = \frac{I \cdot \cos(\gamma)}{dA \cdot d\omega} = \frac{I \cdot \cos(\gamma)}{R^2} \quad [\text{W/m}^2] \quad [\text{Likning 3.2-12}]$$

Forutsetningen for likning 3.2-12 er at likning 3.2-11 er gyldig. Flaten A som lysfluksen treffer er en plan flate. Flaten romvinkelen refererer til er den buede overflaten i kulesegmentet som romvinkelen dekker. Denne flaten er en kuleoverflate og er ikke plan. Når vi benytter den deriverte av arealet, regnes flaten som uendelig liten, og derfor vil arealet på en flate og et kulesegment i praksis bli likt. Forutsetningen for likning 3.2-12 sin gyldighet, er at strålingskildens areal er lite i forhold til avstanden R mellom målepunkt og strålingskilden. I praksis sier vi at hvis lyskildens utstrekning er mindre enn en femtedel av avstanden mellom målepunktet og lyskilden, vil feilen være mindre enn 1%.

Vi ser at når lyskilden er liten og kuleformet, er belysningsstyrken omvendt proporsjonalt med avstanden i kvadrat. Dette kalles for *avstandsloven*.

En flate kan i seg selv være strålingsemitterende eller reflekterende. I den sammenheng defineres *luminansen* som er lysstyrken per m², dvs.:

$$L(\gamma) = \frac{I(\gamma)}{dA'} = \frac{I(\gamma)}{dA \cdot \cos(\gamma)} \quad [\text{Likning 3.2-13}]$$

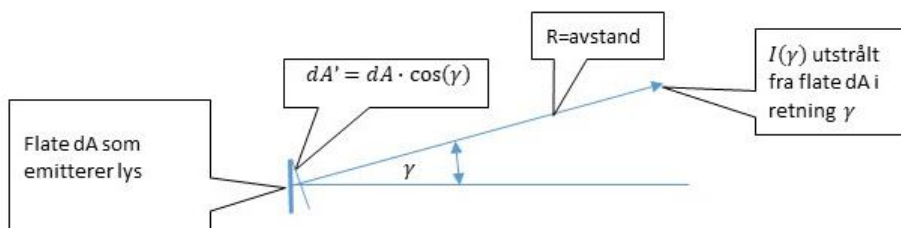
der:

$L(\gamma)$ = strålingstettheten i retning γ [cd/m²]

$I(\gamma)$ = strålingsstyrken i retning γ [cd]

$A' = A \cdot \cos(\gamma)$ = tilsynelatende areal sett fra målepunktet mot lysemitterende flate [m²]

Figur 3.2-4 viser parameterne som inngår i likning 3.2-4.



Figur 3.2-4: Illustrasjon av tilsynelatende areal parametre for definisjon av luminans. Illustrasjon: Jonny Nersveen.

I svært mange tilfeller er flaters reflekterendes egenskaper, diffus, dvs. at Lamberts cosinuslov er oppfylt. Da kan likning 3.2-13 omformes til:

$$L(\gamma) = \frac{I(\gamma)}{dA'} = \frac{I(\gamma)}{dA \cdot \cos(\gamma)} = \frac{I \cdot \cos(\gamma)}{dA \cdot \cos(\gamma)} = \frac{I}{dA} = L \quad \text{forutsatt } -90^\circ < \gamma < 90^\circ \quad [\text{Likning 3.2-14}]$$

Vi ser av likning 3.2-14 at luminansen er uavhengig av retningen når lysemitteringen ut av flaten følger Lamberts cosinuslov, og er synlig fra målepunktet.

Alle flater som ikke har absorpsjonskoeffisient=1, reflekterer lys. Andelen lys som reflekteres kalles *refleksjonsfaktoren* eller *reflektansen*. Refleksjonsfaktoren er definert som:

$$\delta = \frac{\Phi_{ut}}{\Phi_{inn}} \quad [\text{Likning 3.2-15}]$$

der:

δ =refleksjonsfaktoren

Φ_{ut} =reflektert lysfluks fra flaten [Lumen]

Φ_{inn} =innkommende lysfluks til flaten [Lumen]

Fordi lysfluksen er en integrasjon av alle visuelt synlige bølgelengder, er lysfluksen generell i forhold til bølgelengder. Ute i felt, er måling av lysfluks komplisert. Derfor er det vanlig å bruke belyningsstyrken. Likning 3.2-15 omformes da til:

$$\delta = \frac{E_r}{E} \quad [\text{Likning 3.2-16}]$$

der:

δ =refleksjonsfaktoren

E_r =reflektert belyningsstyrke fra flaten [Lux]

E =belyningsstyrken som treffer flaten [Lux]

Lysfluks er ikke retningsavhengig tilsvarende belyningsstyrken. Derfor fanger ikke forenklingen i likning 3.2-16 varianter av speiling, og skal derfor brukes med forsiktighet. Denne måten å måle på forutsetter også stor måleflate. Et luxmeter som måler belyningsstyrker, har en cosinusforsats som automatisk korrigerer for lys som ikke er normalen til måleflaten, selv om målecellen registrerer lys i området $-90^\circ < \gamma < 90^\circ$. Derfor må måleflaten vi måler mot være så stor at når vi måler, er det kun aktuell måleflate luxmeteret fanger opp lys fra. Aksepterer vi usikkerheten i likning 3.2-16, kan likningen omformes til:

$$E_r = \delta \cdot E \quad [\text{lux}] \quad [\text{Likning 3.2-17}]$$

Hvis en flate, reflekterer lys etter Lamberts cosinuslov, kan vi forenkle likning 3.2-14, for å finne reflektert belyningsstyrkes sammenheng med luminansen. Vi har:

$$L = \frac{\dot{I}}{dA} = \frac{\Phi_r}{dA \cdot \pi} = \frac{E_r}{\pi} = \frac{\delta \cdot E}{\pi} \quad [\text{Likning 3.2-18}]$$

der:

L = luminansen målt mot en diffust reflekterende flate [cd/m^2]

\hat{I} = maksimal lysstyrke ut av flaten [cd]

dA = arealpunktet det måles mot [m^2]

Φ_r = reflektert lysfluks fra flaten [lumen]

E = belyningsstyrken som treffer flaten [lux]

E_r = reflektert belyningsstyrke fra flaten [lux]

δ = flatens refleksjonsfaktor

3.3 Kontrastdefinisjoner

3.3.1 Generelt

En vesentlig faktor for muligheten til å se, er visuelle kontraster. Ordet kontrast brukes i vårt daglige språk, men brukes også spesifikt innenfor mange fagbransjer. I følge Store Norske Leksikon betyr kontrast «utpreget motsetning, motstykke eller det som skiller seg sterkt fra» (SNL, 2016). Innen belysning defineres kontrast i forhold til lys.

Det finnes en rekke ulike kontrastdefinisjoner. Noen av dem kommer fra industristandarder, mens andre har sitt opphav i synsforskningens barndom. Det er viktig at disse ikke blandes sammen, de måler ikke det samme.

3.3.2 Webers luminanskontrast

En av de første kontrastmålemetodene ble tatt i bruk av fysiologen Ernst Heinrich Weber (CIE, 1981; Valberg, 1998; Teigen, 2004). Han studerte hvor stor endring som måtte til for at et synsobjekt skulle skille seg ut fra bakgrunnen. Webers luminanskontrast, C_W , er definert som:

$$C_W = \left| \frac{\Delta L}{L_a} \right| \quad [\text{Likning 3.3.2-1}]$$

der:

C_W = Webers generelle luminanskontrast

ΔL = Differansen mellom to luminanser [cd/m^2]

L_a = adaptasjonsluminansen [cd/m^2]

Som en forenkling brukes ofte adaptasjonsluminansen som bakgrunns luminans, og endrer likning 3.3.2-1 til:

$$C_W = \left| \frac{L_o - L_b}{L_b} \right| = \left| \frac{L_o}{L_b} - 1 \right| \quad [\text{Likning 3.3.2-2}]$$

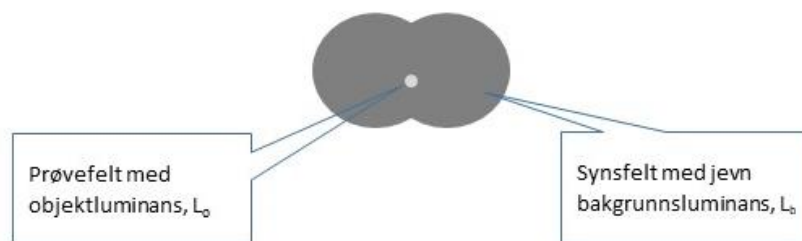
der:

C_W = Webers luminanskontrast

L_o = objektluminans [cd/m²]

L_b = bakgrunsluminans [cd/m²]

Figur 3.3.2-1 viser prøvefeltet for Webers luminanskontrast. Bakgrunsluminansen dekker normalt hele synsfeltet.



Figur 3.3.2-1: Webers prøvefelt for kontrast. Illustrasjon: Jonny Nersveen.

Både objektets størrelse og plassering i synsfeltet har betydning for Webers luminanskontrast. Derfor har også denne målemetoden blitt benyttet for å studere følsomheten i ulike deler av synsfeltet, samt innflytelsen av synsobjektets størrelse.

Når synsobjektet er lite i forhold til bakgrunnen, vil bakgrunsluminansen være tilnærmet adaptasjonsluminansen. Hvis synsobjektet utgjør en vesentlig del av synsfeltet, vil dette ikke stemme lenger. Derfor brukes av og til gjennomsnittet av bakgrunsluminansen og objektluminansen som nevner i likning 3.3.2-2.

3.3.3 Michelsons luminanskontrast

En annen målemetode ble utviklet av den tysk-amerikanske fysikeren Albert Abraham Michelson. Michelsons luminanskontrast, C_M , består av et grid med vekselvis mørke og lyse striper, hvor lysheten følger en sinuskurve (Michelson, 1927; Valberg, 1998). Michelsons kontrast er definert som:

$$C_M = \frac{L_{maks} - L_{min}}{L_{maks} + L_{min}} = \frac{L_{maks} - L_{min}}{2 \cdot L_{mid}} \quad [\text{Likning 3.3.3-1}]$$

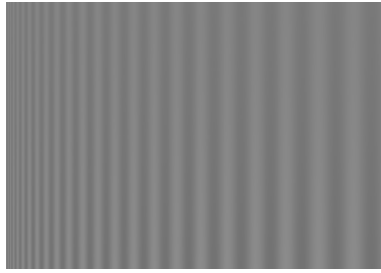
der:

C_M = Michelsons kontrast

L_{maks} = den høyeste luminansen [cd/m²]

L_{min} = den laveste luminansen [cd/m²]

L_{mid} = middelverdien av L_{maks} og L_{min}



Figur 3.3.3-1: Michelsons prøvefelt for kontrast, vist med ulike spatiale frekvenser. Illustrasjon: Jonny Nersveen.

Denne kontrastformen må ha en tilleggsparameter fordi avstanden mellom nabotopp-punktene kan variere. Derfor oppgis *spatial frekvens* som et tilleggsparameter. Spatial frekvens angir antall hele sinusperioder innenfor en synsvinkel på 1 grad. Figur 3.3.3-1 viser ulike spatiale frekvenser. Under en gitt test benyttes en definert spatial frekvens.

Michelsons kontrast benyttes for å studere følsomheten i luminansforskjeller, og for spatial frekvens. Denne måten å måle på er den samme som man bruker for å studere følsomhet for periodiske variasjoner, også kalt *modulasjon*.

Både Michelson og Weber benyttet luminansen som inngangsparameter.

3.3.4 Root means square

Synsintrykket består sjeldent av én kontrast. Derfor er det utviklet en mer kompleks måte å måle kontrast på, kalt RMS (root mean square) (Peli, 1990). Denne brukes i vurdering av kontraster på trykt tekst eller på dataskjermer, der kontrasten dannes av piksler:

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{MN} \sum_{i=0}^{N-1} \sum_{j=0}^{M-1} I_{i,j}} \quad [\text{Likning 3.3.4-1}]$$

der:

RMS = standardavviket til serien med piksler i synsobjektet basert på relativ lysintensitet normalisert innenfor området 0 og 1.

M og N = antall piksler i M - og N -retning

i og j = piksel-nummer i M - og N -retning

$I_{i,j}$ = relativ lysintensitet for pikselelement i og j

3.3.5 Luminansforholdet

En del industristandarder bruker luminansforhold som beskrivelse av kontrast. Dette er helt enkelt forholdet mellom maksimal og minimal luminans, dvs.:

$$\frac{L_{maks}}{L_{min}} \quad [\text{Likning 3.3.451}]$$

der:

L_{maks} = maksimal luminans for to tilstøtende flater [cd/m²]

L_{min} = minste luminans for to tilstøtende flater [cd/m²]

Flere ISO-standarder og også EU-standarder benytter luminansforholdet som dokumentasjon. Et eksempel på dette er krav til nødlysmaturer (Standard Norge, 2012).

3.3.6 Acutance

I fotografier, grafiske trykk og også i displayer, vil skarpheten i overgangen fra en farges lyshet til en annen lyshet ha innflytelse på kontrastoppfattelsen. Overgangens skarphet måles med en enhet kalt *acutance*. Acutance er en vektorell størrelse som beskriver endringen i lysheten i overgangen mellom to farger. Grafisk, både på papir og på skjerm, skapes farger og deres lysheter via piksler. Derfor måles overgangen pikselvis. (Maître, 2015). Likning 3.4-10 beskrives *acutance* matematisk:

$$A = (D_{maks} - D_{min}) \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N (D_n - D_{n+1})^2 \quad [\text{Likning 3.3.6-1}]$$

der:

A = Acutance

D_{maks} = maksimal lyshet

D_{min} = laveste lyshet

D_n = lyshet ved piksel n

N = antall piksler i overgangen fra maks til min

Figur 3.3.6-1 viser eksempel på høy og lav grad av *acutance*.



Figur 3.3.6-1: Acutance. På venstre side av figuren skjer lyshetsendringen fra min til maks over en piksel, og har derfor høy acutance. På høyre side skjer endringen over mange piksler og har derfor lav acutance. Illustrasjon: Jonny Nersveen.

I trykk hvor piksler ikke benyttes, kan antall piksler erstattes med et distanse mål i f.eks. 10-dels millimeter. For pikselbasert trykk eller på dataskjerm, vil opplevelsen av acutance bli påvirket av trykkets eller dataskjermens oppløsning.

3.3.7 Lyshetskontrast (NCS)

I Natural Colour System, NCS, er det utviklet et system der man har forsøkt en mer perseptuell tilnærming til kontraster (Tonquist, 1995). Lyshetskontrasten, K_{NCS} , i NCS, framkommer som forskjellen mellom lyshetsgraden mellom to flater. Sammenhengen mellom en flates refleksjonsfaktor og lyshetsgraden i NCS er ikke lineær, men er entydig, og formuleres matematisk ved:

$$\delta = (0,56 \cdot v) / ((1,56 - v)) \quad [\text{Likning 3.3.7-1}]$$

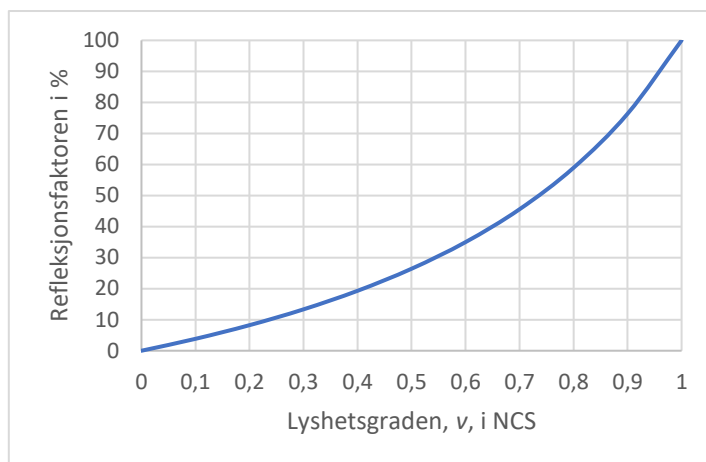
der:

δ = flatens refleksjonsfaktor, definert i likning 3.2-16

v = flatens lyshetsgrad i NCS

Lyshetsgraden er en tilnærmet perseptuell lineær skala for lyshet, normert mellom 0 og 1. 0 er helt sort, men 1 er helt hvit. Noen benytter også en skala fra 0 til 10.

Figur 3.3.7-1 viser sammenhengen mellom lyshetsgraden og refleksjonsfaktoren. Som kurven viser, er ikke sammenhengen mellom lyshetsgraden og refleksjonsfaktoren lineær.



Figur 3.3.7-1: Refleksjonsfaktoren i % som funksjon av lyshetsgraden, v, i NCS. Kurveframstilling: Jonny Nersveen.

I NCS defineres lyshetskontrasten som differansen mellom to lyshetsgrader, dvs.

$$K_{NCS} = |v_1 - v_2| \quad [\text{Likning 3.3.7-2}]$$

der:

K_{NCS} = lyshetskontrast

v_1 = lyshetsgraden til flate 1

v_2 = lyshetsgraden til flate 2

Figur 3.3.7-2 viser eksempel på lyshetskontrasten mellom to flater med ulik lyshet. Som likning 3.3.6-2 viser, skiller ikke NCS mellom positiv eller negativ kontrast, slik Webers luminanskontrast gjør. Den angir bare forskjellen i lyshetsgraden mellom to flater.



Figur 3.3.7-2: Lyshetskontrast mellom to lysheter. Illustrasjon: Jonny Nersveen.

Weber, Michelson og Peli's motiv med definisjoner av kontrast var for å studere menneskers sensoriske respons på kontraster, særlig grenseverdiene for synlighet. Lyshekskontrasten i NCS er et hjelpemiddel arkitektene bruker i sitt arkitektoniske uttrykk, og har derfor et mer praktisk perseptuelt formål.

3.4 Ulike måter å beregne kontrast

Både Webers og Michelsons kontrast er basert på luminansen. Måles luminansen med luminansmeter, kan begge disse beregnes direkte. Hvis flatene har diffus refleksjon, dvs. følger Lamberts cosinuslov, kan vi utnytte likning 3.2-18.

$$C_W = \left| \frac{L_o}{L_b} - 1 \right| = \left| \frac{E_{r,o}}{E_{r,b}} - 1 \right| = \left| \frac{\delta_o \cdot E_o}{\delta_b \cdot E_b} - 1 \right| = \left| \frac{v_o \cdot E_o}{v_b \cdot E_b} \cdot \frac{[(1,56 - v_b)]}{[(1,56 - v_o)]} - 1 \right| \quad [\text{Likning 3.4-1}]$$

der:

L_o = objektets luminans [cd/m^2]

L_b = objektets bakgrunsluminans [cd/m^2]

$E_{r,o}$ = objektets reflekterte belyningsstyrke [lux]

$E_{r,b}$ = bakgrunnens reflekterte belyningsstyrke [lux]

δ_o = objektets refleksjonsfaktor

δ_b = bakgrunnens refleksjonsfaktor

v_o = objektets lyshetsgrad

v_b = bakgrunnens lyshetsgrad

Det eneste kravet som stilles til likning 3.4-1, er at Lamberts cosinulov, gjelder.

Det er ikke uvanlig at en kontrast utelukkende er forårsaket av ulik luminans/lyshetsgrad mellom objekt og bakgrunn, der flatene er likt belyst. Likning 3.4-1 forenkles da til:

$$C_W = \left| \frac{L_o}{L_b} - 1 \right| = \left| \frac{\delta_o}{\delta_b} - 1 \right| = \left| \frac{v_o}{v_b} \cdot \frac{[(1,56 - v_b)]}{[(1,56 - v_o)]} - 1 \right| \quad [\text{Likning 3.4-5}]$$

En kontrast kan være skapt av luminansforskjeller fra belyningen alene. I det tilfellet er refleksjonsfaktorene like. Likning 3.4-1 kan da forenkles til:

$$C_W = \left| \frac{L_o}{L_b} - 1 \right| = \left| \frac{E_{r,o}}{E_{r,b}} - 1 \right| = \left| \frac{E_o}{E_b} - 1 \right| \quad [\text{Likning 3.4-6}]$$

Med samme betingelser, som for likning 3.4-1, kan Michelsons luminanskontrast, C_M , uttrykkes:

$$C_M = \frac{L_{maks} - L_{min}}{L_{maks} + L_{min}} = \frac{E_{r,maks} - E_{r,min}}{E_{r,maks} + E_{r,min}} = \frac{(\delta \cdot E)_{maks} - (\delta \cdot E)_{min}}{(\delta \cdot E)_{maks} + (\delta \cdot E)_{min}} \quad [\text{Likning 3.4-7}]$$

Er kontrasten kun skapt av luminans/lyshetsforskjeller, dvs. at belyningsstyrken er lik, kan likning 3.4-7 om forenkles til:

$$C_M = \frac{L_{maks} - L_{min}}{L_{maks} + L_{min}} = \frac{E_{r,maks} - E_{r,min}}{E_{r,maks} + E_{r,min}} = \frac{\delta_{maks} - \delta_{min}}{\delta_{maks} + \delta_{min}} = \frac{v_{maks} \cdot (1,56 - v_{min}) - v_{min} \cdot (1,56 - v_{maks})}{v_{maks} \cdot (1,56 - v_{min}) + v_{min} \cdot (1,56 - v_{maks})} \quad [\text{Likning 3.4-8}]$$

Er kontrasten utelukkende skapt av belysningen, dvs. at refleksjonsfaktorer/lyshetsgrader er like, kan likning 3.4-7 omskrives til:

$$C_M = \frac{L_{maks} - L_{min}}{L_{maks} + L_{min}} = \frac{E_{r,maks} - E_{r,min}}{E_{r,maks} + E_{r,min}} = \frac{E_{maks} - E_{min}}{E_{maks} + E_{min}} \quad [\text{Likning 3.4-9}]$$

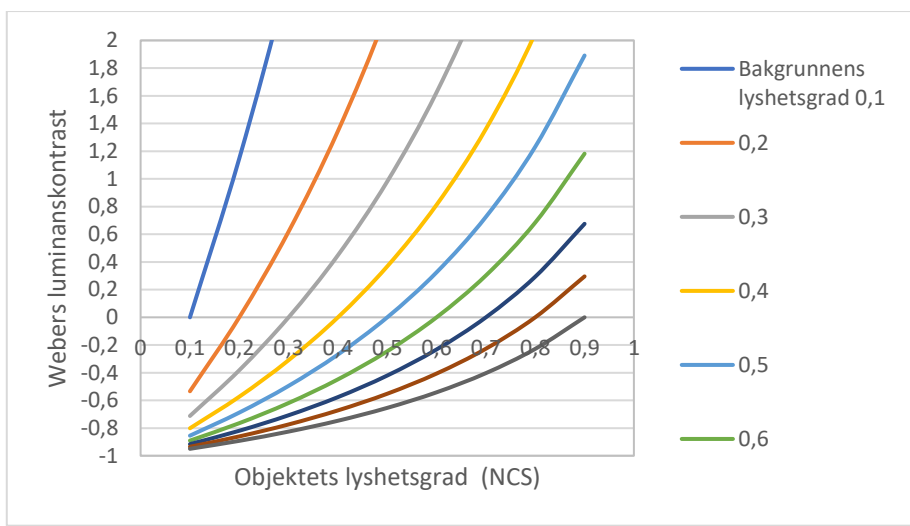
Kriteriene for oppfyllelse av likning 3.4-1 og 3.4-8, er at belyningsstyrken skal være lik på begge flatene, i tillegg til at flatene skal ha diffus refleksjon. Hvis belysningen er relativ diffus, f.eks. med innslag av indirekte belysning, eller at omgivelsesflatene er lys, vil reflektert lys bli diffust. Derfor er dette kravet sjeldent et problem for beregningene. Regneeksempelet under viser konsekvensen ved at belyningsstyrken på de to flatene ikke er lik. Eksempelet er fra en laboratorieoppgave ved instituttet vårt, der målinger gir tilnærmet samme svar som beregningen viser.

Regneeksempel: La objektet ha refleksjonsfaktor på 14%, bakgrunnens refleksjonsfaktor på 86% (eggehvitt), belyningsstyrken på objektet 600 lux, mens bakgrunnen har en belyningsstyrke på 700 lux.

Reflektert belyningsstyrke på objektet blir $0,14 \cdot 600 = 84$ lux, mens reflektert belyningsstyrke på bakgrunnen blir $0,86 \cdot 700 = 602$ lux. Kontrasten blir $C_W = \left| \frac{84 - 602}{602} \right| = 0,86$. Benytter vi kun refleksjonsfaktorene, får vi $C_W = \left| \frac{14 - 86}{86} \right| = 0,84$. Differansen i belyningsstyrken er 100 lux som utgjør 14% avvik i forhold til 700 lux, men forskjellen i kontrastberegningene er kun 2 hundredeler, som er et avvik på 2,4% i forhold til 0,86. Vi ser her at selv om belyningsstyrken ikke er lik, så gir det ikke stort utslag på resultatet.

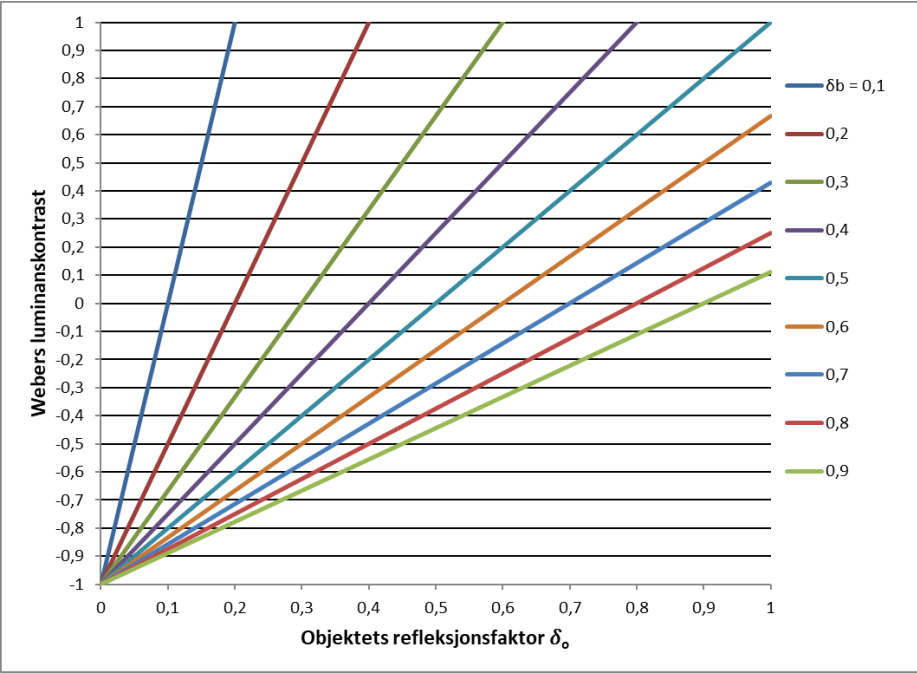
Gjør vi tilsvarende beregning for Michelsons kontrast, C_M , får vi $C_M = \frac{\delta_{maks} - \delta_{min}}{\delta_{maks} + \delta_{min}} = \frac{86 - 14}{86 + 14} = 0,72$, når vi regner kun med refleksjonsfaktorene. Ved beregning med reflekterte belyningsstyrker, får vi $C_M = \frac{E_{r,maks} - E_{r,min}}{E_{r,maks} + E_{r,min}} = \frac{602 - 84}{602 + 84} = 0,75$. Som vi ser, er ikke avviket stort her heller.

Det er en vesentlig forskjell på Webers luminanskontrast og de andre. Michelsons luminanskontrast, C_M , løper fra 0 til 1. NCS lyshetskontrast, K_{NCS} , løper fra -1 til 1 om vi også der regner inn fortegnet. Webers luminanskontrast, C_W , løper fra -1 til ∞ , om vi regner inn fortegnet. Norske byggeforskrifter bruker Webers luminanskontrast i sine ytelseskrav (KMD, 2017). Figur 3.4-1 viser sammenhengen mellom Webers luminanskontrast og NCS lyshetskontrast.



Figur 3.4-1: Webers luminanskontrast som funksjon av NCS lyshetsgrader. Beregning: Jonny Nersveen.

Sammenhengen mellom refleksjonsfaktorene, R_b og R_o , og Webers luminanskontrast er vist i figur 3.4-2.



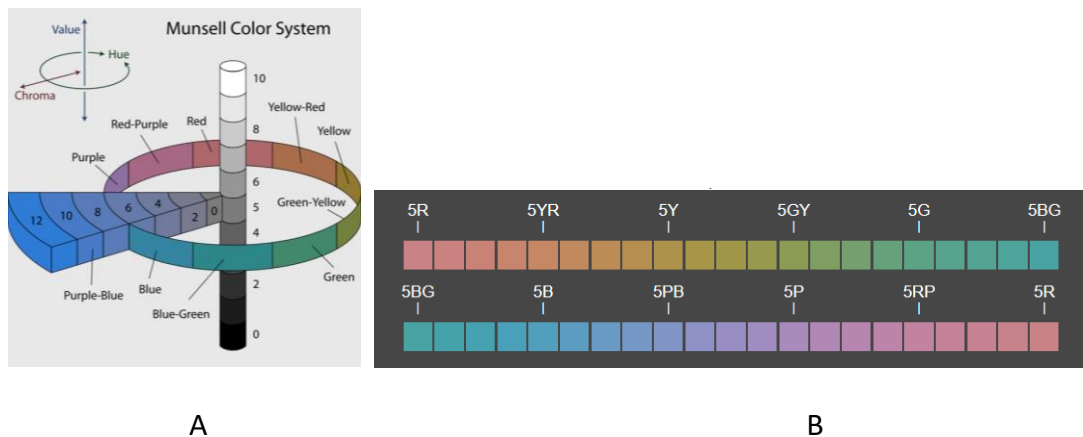
Figur 3.4-2: Webers luminanskontrast som funksjon av objektet og bakgrunnens refleksjonsfaktor. R_b og R_o er hht bakgrunnen og objektets refleksjonsfaktor som forholdstall. Beregning: Jonny Nersveen.

3.5 Farger og fargeforvrengninger

Hovedæren for dagens fargeforståelse kommer fra Munsell og Göthe. Den som har satt mest spor etter seg er imidlertid Munsell, med beskrivelse av fargesirkelen.

For å forstå betydningen av farger er det nødvendig å gå gjennom fargeteoriens historie, og det startet i praksis med Munsell. Munsell laget en fargebeskrivelse basert på *Chroma* (fargens intensitet), *Value* (fargens lyshet) og *Hue* (fargekombinasjonen i fargesirkelen). Se figur 3.5-1 A.

Fargesirkelen deles opp i 5 like store sprang, basert på fargene *rød, gul, grønn, purpur* og *blå*, der avstanden mellom hver kvadrant er 10 stepp. Lyshet deles også opp i 10 trinn, mens intensitet vil variere med fargens lyshet. Ut fra Munsells oppdeling kan intensitet komme helt opp i 30. Notasjonen var i rekkefølgen *Lyshet, Farge* og *Intensitet*. Eksempel: 5Y $\frac{3}{4}$, betyr at fargen har lyshetsgrad 5, fargen befinner seg 3 enheter mellom Y og G, målt fra Y, og har metningsgrad 4. Se figur 3.5-1 B. Denne måten å beskrive farger på, har en sterk sammenheng med NCS (Natural Colour System) sin metode som brukes i dag (Tonnquist, 1995).

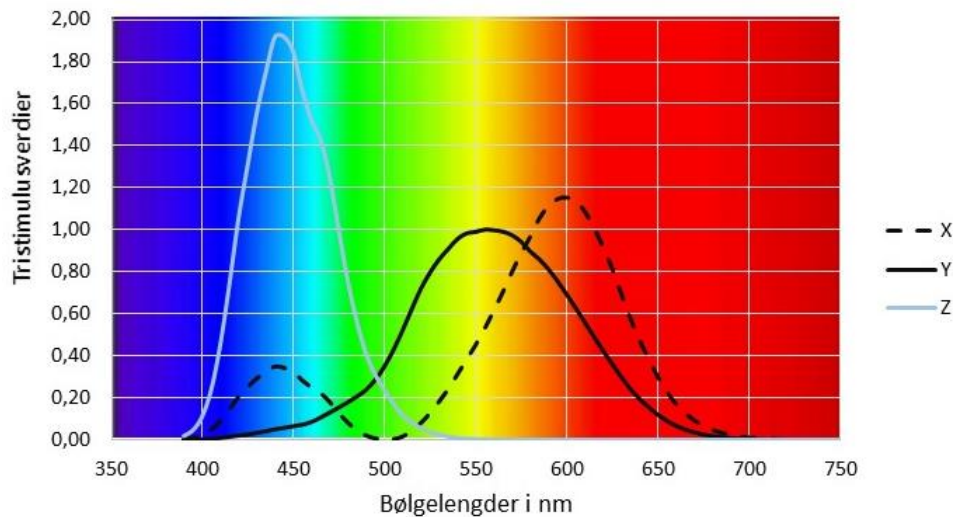


Figur 3.5-1: Munsells fargebeskrivelse. A viser prinsippet, mens B viser fargene for lyshet 5 og mettetthet 8. Bildet er hentet fra: (Wikipedia, 2022a).

Farger kan beskrives fysisk på samme måte som luminanser og lyshetsgrad, og følgelig er det også mulig å beregne forskjellen mellom dem. NCS beskriver farger med *grad av sorthet, grad av metning* og *posisjonen i fargesirkelen*. Disse parameterne skaper synlige forskjeller, og kan både måles og beregnes. I tillegg beskriver de også *lyshetsgraden*, beskrevet i kapittel 3.2-6. NCS er en svært utbredt standard som bl.a. brukes for fargebeskrivelse av maling. (Tonnquist, 1995).

Fra kapittel 3.1 har vi at synet vårt har tre fargesensoriske celler, *L, M* og *S*, som kan forklares med elektromagnetiske bølgelengder. Synet vårt kombinerer primærfargene, til fargeblandinger som gir nye farger. Vi kan skape farger på to forskjellige måter; blande lys basert på kombinasjoner av primærfargene, eller blande fargepigmenter for å skape farger på en flate. Fargeblanding med lys kalles for *adaptiv fargeblanding*, mens farger som oppstår ved blanding av fargepigmenter kalles *subtraktiv fargeblanding*. Fargene vi ser på en lysreflekterende flate, er fargene som reflekterer tilbake fra flaten, dvs. *de fargene som ikke absorberes*. Ved fargestrykk brukes *Cyan, Magenta* og *Gult* (CMY). Cyan absorberer alt rødt, dvs. den virker som et filter for rødt lys. Magenta absorberer grønt lys, mens gult absorberer blått lys. Fargen som absorberes er *komplementærfargen*, dvs. at rødt er komplementærfargen til cyan, grønt til magenta og blått til gult. Det er mulig å skape en fargetrekant ved hjelp av subtraktive farger, og tilsvarende for RGB-fargene, men da har vi to forskjellige trekkanter. Derfor slås disse sammen til en sirkel basert på *rødt, gult, grønt* og *blått*, og denne er laget slik at man kan lese ut fargers komplementærfarge ved diagonalt gå til andre siden av fargesirkelen. Se bilde A i figur 3.5-1.

Farger kan kun måles via lys, og forklares med *LMS*-funksjonen vist i figur 3.1-4. De første beskrivelsene var basert kun på farger, men man trengte også å ha med parameteren *luminans*. I 1928 publiserte Wright (Wright, 1928) en metode som koplet sammen *LMS*-funksjonene med luminansen, og denne ble vedtatt av CIE i 1931. Figur 3.5-2 viser *CIE 1931 tristimuliverdier*. Tristimuliverdiene *X*, *Y* og *Z* er matematiske størrelser som funksjon av bølgelengden (CVRL, 2022).



Figur 3.5-2: CIE 1931 XYZ tristimulusverdier. (CVRL, 2022).

Verdiene *X*, *Y* og *Z* er definert slik at *Y* er luminansen basert på $V_2(\lambda)$ -kurven i hht til figur 3.1-6. *Z* tilsvarer en variant av blå i *CIE RGB fargerom*. *X* er en miks av alle *RGB*-fargene. Det må presiseres at *X*, *Y* og *Z* er matematiske størrelser som ikke beskriver farger som faktisk finnes, men er ment som et hjelpemiddel der man kan beregne seg fram til både lystekniske størrelser og farger via disse. Det er vanlig å framstille kurvene i figuren slik at *Y* enten er satt lik 1,0 eller 100. Benyttes en av disse verdiene, kalles *Y* for *relativ luminans*.

X, *Y* og *Z* er målbare parametere som brukes i analyser av farger, og fungerer som en standardisert referanse som de andre fargerommene *RGB* og *LMS* knytter seg opp til.

Fargene vi oppfatter er en kombinasjon av tre farger, som kompliserer visuell framstilling. Dette er løst ved at *CIE 1931 XYZ tristimulusverdier* gjøres om til trikromatiske verdier, dvs.:

$$x(\lambda) = \frac{X(\lambda)}{X(\lambda)+Y(\lambda)+Z(\lambda)} \quad \text{[Likning 3.5-1]}$$

$$y(\lambda) = \frac{Y(\lambda)}{X(\lambda)+Y(\lambda)+Z(\lambda)} \quad \text{[Likning 3.5-2]}$$

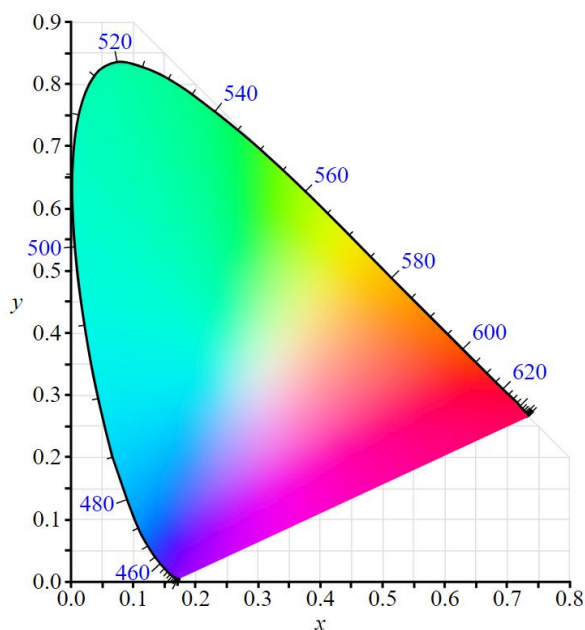
$$z(\lambda) = \frac{Z(\lambda)}{X(\lambda)+Y(\lambda)+Z(\lambda)} \quad \text{[Likning 3.5-3]}$$

der:

$x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$ = CIE 1931 xyz trikromatiske verdier (små bokstaver)

$X(\lambda), Y(\lambda); Z(\lambda)$ = CIE 1931 XYZ tristimulusverdier (store bokstaver)

Fordi x , y og z er relative verdier, vil $x+y+z = 1$, og følgelig $z=1-x-y$. Er x og y kjent, er også z kjent. Basert på x og y kan *CIE 1931 xyz kromatisitetsdiagram*, tegnes ut. Se figur 3.5-3:



Figur 3.5-3: *CIE 1931 xyz kromatisitetsdiagram*. Bilde: (Wikipedia, 2022).

I figur 3.5-3 kan vi legge merke til at jo nærmere man kommer origo, jo mer innslag av blått lys. Når x og y er $1/3$, vil også z være det samme, og denne posisjonen tilsvarer hvitt lys (hvitpunktet). *CIE 1931 xyz fargerom* var et framskritt, fordi man klarte å kople sammen netthinns reseptorer og strålingsfysikk, men den manglet den perseptuelle delen.

Det ble tidlig klart at *CIE 1931 xyz kromatisitetsdiagram* kun beskrev farger fysisk. I 1960 vedtok CIE et nytt system, *CIE 1960 UCS* (Uniform Chromaticity Space) utviklet av David Lewis MacAdam (Ohta og Robertson, 2006). Han omformet *CIE 1931 xyz kromatisitetsdiagram* til et *projeksjonsperspektiv*, som han mente var mer perseptuell. MacAdam definerte to enheter, u og v :

$$u = \frac{4x}{12y-2x+3} \quad \text{[Likning 3.5-4]}$$

og

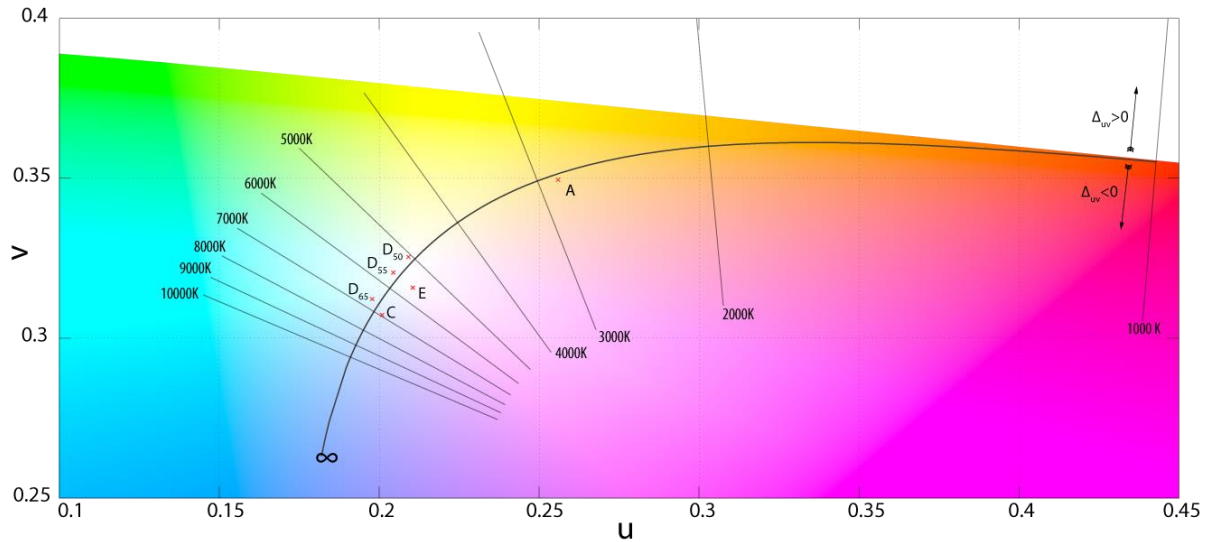
$$v = \frac{6y}{12y-2x+3}, \quad \text{[Likning 3.5-5]}$$

der:

x og y = kromatisitetskoordinatene brukt i figur 3.5-3, og definert i likningene 3.5-1, -2 og -3.

Figur 3.5-3 omdannet til *CIE 1960 UCS fargerom*, blir nå seende ut som vist i figur 3.5-4. Den buede kurven er fargene man får ved å varme opp et absolutt svart legeme, til det lyser. Kurven oppstår som en funksjon av sin temperatur i Kelvin, og følger Plancks strålingslov. CIE har definert noen standard lyskilder som er avmerket i diagrammet. A er lyskilder som ligger nær utstrålingen fra det absolutt sorte legeme, og anvendes ved lave fargetemperaturer, når man skal beregne lyskilders

fargegjengivelse. *C* er lyset fra en overskyet himmel. *D*₅₀, *D*₅₅ og *D*₆₅ er lys fra lysrør med fargetemperaturer på hhv. 5000, 5500 og 6500 Kelvin. *E* er lik energi for x, y og z, og er hvitt lys.



Figur 3.5-4: CIE 1960 UCS. Bilde er hentet fra: (Wikipedia, 2022b).

Det kom en forholdsvis rask revidering av CIE 1960 UCS fargerom. Kritikken var at den ikke fanger opp luminansens betydning. Derfor ble CIE 1960 UCS fargerom modifisert til CIE 1964 UVW fargerom. (Wyszecki, 1963). Kromatisitetsverdiene *u* og *v* erstattes med *u*^{*} og *v*^{*}.

$$W^* = 13(25Y^{\frac{1}{3}} - 17) \quad \text{[Likning 3.5-6]}$$

$$u^* = 13W_i(u - u_o) \quad \text{[Likning 3.5-7]}$$

$$v^* = 13W_i(v - v_o) \quad \text{[Likning 3.5-8]}$$

der:

Y = luminansen [Cd/m²]

u og *v* = CIE 1960 UCS kromatisitetskoordinater

u^{*} og *v*^{*} = CIE 1964 UVW kromatisitetskoeffisienter til hvitpunktet for testlyskilden som studeres

*u*_o og *v*_o = CIE 1960 UCS kromatisitetskoordinater til hvitpunktet for en referanselyskilde

CIE 1964 UVW fargerom brukes i dag hovedsakelig til beregning av lyskilders fargegjengivelse, og da spesielt CRI *R*_a-indeksen. Den beregnes ved å se på gjennomsnittet av forskyvningene i UVW fargerom for 8 standardiserte testfarger:

$$CRI R_a = 100 - \frac{\sum_1^8 \sqrt{(u_i^* - u_{r,i})^2 + (v_i^* - v_{r,i})^2}}{8} \quad \text{[Likning 3.5-9]}$$

der:

*u*_{*i*}^{*} og *v*_{*i*}^{*} = CIE 1964 UVW kromatisitetskoordinater for testlyskilden for farge *i*

*u*_{*r,i*}^{*} og *v*_{*r,i*}^{*} = CIE 1964 UVW kromatisitetskoordinater for referanselyskilden for farge *i*

Standardfargene som brukes i testene er vist i figur 3.5-5.

Farge-standard	Munsell-kode	Farge
TCS01	7,5R6/4	
TCS02	5Y6/4	
TCS03	5GY6/8	
TCS04	2,5G6/6	
TCS05	10BG6/4	
TCS06	5PB6/8	
TCS07	2,5P6/8	
TCS08	10P6/8	
TCS09	4,5R4/13	
TCS10	5Y8/10	
TCS11	4,5G5/8	
TCS12	3PB3/11	
TCS13	5YR8/4	
TCS14	5GY4/4	
TCS15	1YR6/4	

Figur 3.5-5: Fargestandardene som benyttes under testing av $CRI R_a$ og $CRI R_e$ (Ohta og Robertson, 2006). Illustrasjon: Jonny Nersveen

I figur 3.5-5 ser vi at alle testfargene til $CRI R_a$, er duse. Noe senere ble det derfor laget en korreksjon kalt $CRI R_e$ (extension), basert på 14 farger. Den 15'tende fargen har også kommet til, for å få med hudfarge. Beregningsmetoden er den samme som for $CRI R_a$.

Selv om $CIE R_e$ har forbedret seg, så manglet fortsatt perseptuell lyshet. En større endring ble vedtatt av CIE i 1976, og kalles $CIE 1976 L^*a^*b^*$ fargerom. For å få med perseptuell lyshet, benyttes Munsells beskrivelse. (CIE, 2004).

Sammenhengen mellom $CIE 1976 L^*a^*b^*$ fargerom og $CIE 1931 XYZ$ tristimuliverdier, er:

$$L^* = 116 \cdot \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - 16 \quad [\text{Likning 3.5-10}]$$

$$a^* = 500 \cdot \left[\left(\frac{X}{X_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}}\right] \quad [\text{Likning 3.5-11}]$$

$$b^* = 200 \cdot \left[\left(\frac{Y}{Y_n}\right)^{\frac{1}{3}} - \left(\frac{Z}{Z_n}\right)^{\frac{1}{3}}\right] \quad [\text{Likning 3.5-12}]$$

der:

L^* = Perseptuell lyshet i hht Munsell

a^* = skala som beskriver farger fra grønn til rød, og

b^* = skala som beskriver farger fra blå til gul

X, Y og Z = $CIE 1931$ tristimulusverdier målt på prøveobjekt [W]

X_n, Y_n og Z_n = $CIE 1931 XYZ$ tristimulusverdier målt på referanseobjektet med samme

belysning som for prøveobjektet. Denne er standardisert, der verdiene kan hentes fra tabell.

Metoden er begrenset til at $\frac{X}{X_n}, \frac{Y}{Y_n}, \frac{Z}{Z_n} < 0,008856$.

For lave verdier av tristimulusverdiene korrigeres likningene 3.5-10, -11 og -12.

Med basis i *CIE 1976 L*a*b* fargerom*, ble det utviklet en annen skala kalt *CQR* (Davis og Ohno, 2010). Denne benytter også 15 farger, der fargene er valgt ut fra hele fargesirkelen til Munsell. Figur 3.5-6 viser fargene den er basert på.



Figur 3.5-6: Fargeskalaen til CQR. Illustrasjon: Jonny Nersveen.

Sammenlikner vi fargene fra *CRI R_e* i figur 3.5-5 med fargene til *CQR* i figur 3.5-6, ser vi at fargene i *CQR* har en større grad av metning.

I 2015 standardiserte CIE enda en ny måte å beskrive farger på, kalt *CIE CAM02 fargerom* (Fairchild, Luo og Hunt, 2000). Denne har dannet grunnlaget for en standard utviklet av IES, kalt *IES TM-30-15* (David et al., 2015), og som baserer seg på indeksene; *R_f* og *R_g*.

Spranget fra *CIE L*a*b* fargerom* til *CIE CAM02 fargerom*, er stor. Fordi denne standarden har blitt tatt i bruk både innen skjermteknologi og også innen belyningsbransjen, gis en beskrivelse av denne.

Utgangspunktet er at fargebeskrivelsen skal fungere teknisk, samt fange opp korreksjoner forårsaket av luminansen når farger sees mot hverandre.

CIE CAM02 fargerom baserer seg på 6 parametere; *brightness*, *lightness*, *colorfulness*, *chroma*, *saturation* og *hue*. Definisjonene på disse på norsk er:

- *Brightness* = perseptuell lyshet forårsaket av belyningsnivået
- *Lightness* = en farges perseptuelle lyshet (fargens naturlige lyshet)
- *Colorfulness* = graden av forskjell mellom en farge og grått
- *Chroma* = fargerikheten i forhold til en annen farge som ser ut som hvit under lignende visningsforhold
- *Saturation* = grad av fargerikhet i forhold til sin perseptuelle lyshet
- *Hue* = fargens sammensetning, dvs. fargens posisjon i fargesirkelen

Både *Brightness* og *Lightness* påvirker fargers perseptuell lyshet. *Colorfulness*, *Chroma* og *Saturation* er aspekter av en farges intensitet.

I Munsells beskrivelse av farger, er vertikal skala betegnet som *Value*, som i *CIE CAM02 fargerom* blir det samme som *Lightness*. *Chroma* er fargens metning, mens *Hue* er posisjonen i fargesirkelen.

I stedet for *u* og *v* eller *u** og *v**, beskrevet i CIE 1960 og 1964, bruker *CAM02* parameterne *J*, *a* og *b*. *J* er en variant av *Brightness*, mens *a* og *b* er en kartesisk beskrivelse av *Hue*. Utgangspunktet for *Hue* er Munsells fargesirkel, vist i figur 3.5-1, der vinkelen i fargesirkelen beskriver fargens posisjon i fargesirkelen, og avstanden fra midtaksen beskriver fargens grad av metning, dvs. *chroma*.

Beregning av fargegjengivelse handler om forskyvninger i fargesirkelen og forskyvninger i graden av metning.

$V_2(\lambda)$ -kurven er basert på en måling av 2° synsfelt, dvs. helt sentralt i synsfeltet, og *CIE 1931 XYZ tristimulusverdier* er basert på denne. Når vi studerer en farge eller et objekt mot en bakgrunn, har også det omliggende feltet betydning og ikke bare den sentrale delen av makula. Derfor benytter *IES TM-30-15*, $V_{10}(\lambda)$, målt under fotopiske forhold. Denne kurven er basert på et synsfelt på 10° , og ikke 2° som $V_2(\lambda)$ -kurven er basert på. Helt sentralt i foveola finnes ikke S-celler (blå), bare M- og L-celler. Ved å bruke 10° synsfelt, blir blått derved tatt mer hensyn til. Dette gir en annen transformasjonsmatrise fra *XYZ* til *LMR*, og *XYZ*-koordinatorene for testlyskilden konverteres derfor til X_{10} , Y_{10} og Z_{10} . Da luminansens nivå påvirker opplevelse av lyshet, må den standardiseres, og her skaleres Y_{10} til $Y_{10}(\lambda = 560 \text{ nm}) = 100$, som er toppunktet til kurven for Y_{10} .

J er en korrigert versjon av luminansen, der verdien er skalert i forhold til at toppverdien av $Y = 100$. a og b uttrykker korrigerede fargeskalaer der a beskriver skalaen fra rød til grønn, mens b beskriver skalaen fra gul til blå. Vi er vant med å tenke farger beskrevet i en sirkel, men her går man over til kartesiske koordinater i stedet vinkelkoordinater.

Fordi *IES TM-30-15* bruker $V_{10}(\lambda)$ som sensorisk kurve i stedet for $V_2(\lambda)$, brukes betegnelsene J' , a' og b' .

Referanselyskilden i *CRI R_a* og *R_e* skifter referanse ved fargetemperatur 5000 K. Lavere fargetemperatur følger Plancks strålingslov, mens over 5000K benyttes *CIE D₅₀*, som har sitt opphav i lysrør. Dette gir et sprang i både *R_a*- og *R_e*-indeksen fra 4999 K til 5000K, noe som er unaturlig. *IES TM-30-15* benytter Plancks strålingslov fram til 4500 K (den buede kurven i figur 3.5-4). Mellom 4500 og 5500 K benyttes en kombinasjon av Plancks strålingslov og *CIE D₅₀*, i en glidende overgang som funksjon av fargetemperaturen. For fargetemperaturer over 5500 K benyttes en blanding av to transformasjonsmatriser mellom *XYZ* og *LMS*, der transformasjonsmatrisene er en funksjon av testlyskildens fargetemperatur med forskjellige algoritmer, avhengig av om fargetemperaturen er over eller under 7000 K. Med unntak av overgangen fra 4500 til 5500 Kelvin, er beskrivelsen av referanselyskilden den samme som ble vedtatt av *CIE* i 1995 (*CIE*, 1995).

Den andre utfordringen man har med måling av fargegjengivelse, er utvalget farger lyskilden testes mot. *IES TM-30-15* benytter et utvalg av *NCS* sitt fargesystem, der man har valgt ut 99 farger etter en bestemt matematisk prosedyre. I tillegg har man tatt med naturlige farger vi normalt omgår oss med. Prosedyren er utførlig beskrevet i dokumentasjonen av metoden (David *et al.*, 2015).

Avviket mellom testlyskilden og referanselyskilden beregnes på denne måten:

$$R_f = 100 - \frac{7,54}{99} \sum_{i=1}^{99} \sqrt{(J'_{test,i} - J'_{ref,i})^2 + (a'_{test,i} - a'_{ref,i})^2 + (b'_{test,i} - b'_{ref,i})^2}$$

[Likning 3.5-13]

Tallet 7,54 er en skaleringsfaktor for å harmonisere *IES TM-30-15* med *CRI R_a*.

Ved fargesensibilitetsmålinger har målefeltets omkrets betydning. I belyningsanlegg vil vi alltid ha omkrets, men i mørke rom hvor man kun betrakter en dataskjerm, kan omkretsen være begrenset eller fraværende. For vurdering av lyskilder, beregnes, R_f , med utgangspunkt i full omkrets.

I tillegg til beregninger i avvik av fargegjengivelse, inkluderer *IES TM-30-15* endringer i *metningsgraden*. *Metningsgraden* beskriver intensiteten i fargen. I *IES TM-30-15* benyttes *gamutarealet* til hhv testlyskilden og referanselyskilden, som utgangspunkt for sammenlikning av metning. a' og b' er en kartesisk beskrivelse av fargesirkelen. Ved å transformere fra kartesisk til polar form, dvs. tilbake til fargesirkelen, kan fargeforskyvningen beskrives ved vinkelen i fargesirkelen. Det er denne vinkelen som *CIE CAM02 fargerom* benevnes som *Hue*.

Fargesirkelen deles deretter inn i 16 sektorer. Alle a' og b' koordinatene for samtlige 99 farger, tegnes deretter inn i diagrammet. Hver sektor vil utgjøre et rektangel. Innenfor hvert rektangel beregnes aritmetisk middelværdi av a' - og b' -koordinatene for hhv testlyskilden og referanselyskilden. Middelværdiene for hver sektor avmerkes deretter i polardiagrammet. Man trekker deretter rette streker fra middelværdiene i hver sektor slik at man får et polygonbilde for testlyskilden, A_t , og for referanselyskilden, A_r . Arealene for polygonene beregnes deretter.

R_g beregnes som forholdet mellom A_t og A_r , dvs.:

$$R_g = 100 \cdot \frac{A_t}{A_r} \quad [\text{Likning 3.5-14}]$$

der:

R_g = gamutindeksen

A_t = gamutarealet for testlyskilden

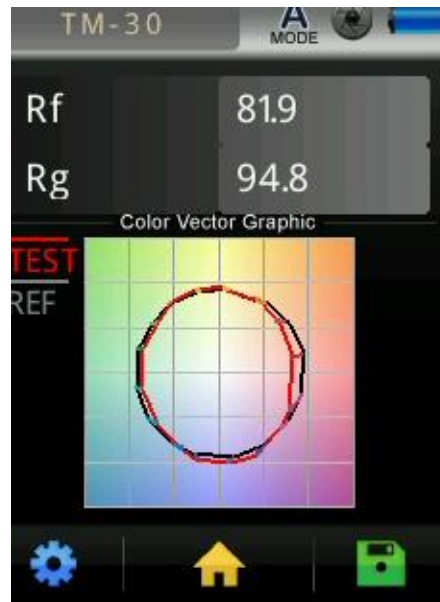
A_r = gamutarealet for referanselyskilden

Gamutindeksen måler kun forholdet mellom arealene. Referanselyskilden skal være hvitt lys, og det skal gi tilnærmet jevnt polygonbilde. Hvis testlyskildens areal blir oval, har den en eksentrisitet der noen farger dominerer, i forhold til de øvrige. Dette kommer ikke til syne i indeksen.

$R_g > 100$ betyr at fargene i testlyskilden gir mer mettede farger enn referanselyskilden, og motsatt hvis $R_g < 100$. Det er ønskelig med en indeks så nær 100 som mulig.

Man må huske på at resultatet av indeksen er et gjennomsnitt av 99 farger. Avvik på noen få farger vil derfor slå lite ut i indeksen.

Figur 3.5-7 viser en måling av en LED-lysarmatur. Her er R_g målt til 94,8. Dette betyr at lyskilden har lavere grad av fargemetning enn den standardiserte referanselyskilden. Fargetemperaturen på lyskilden er litt i underkant av 3000 Kelvin, og det betyr at referansen er et absolutt svart legeme. Vi ser også av bildet at sirkelen ikke er helt rund, noe som betyr dårligere grad av metning på noen enkeltfarger. I dette tilfellet er R_f bare litt over 80, noe som betyr at den har en dårlig fargegjengivelse.



Figur 3.5-7: Måling av TM-30-15 Rf og Rg, målt spesifikk lysarmatur. Måling: Alf Dalby.

Johannes Itten beskrev 7 varianter av kontraster; *lys - mørk-kontrast*, *komplementærkontrast*, *kald – varm-kontrast*, *simultankontrast*, *kvalitetskontrast* og *kvantitetskontrast* (Itten og Veres, 1961). *Lys – mørk-kontrasten* er den samme som *lyshetsgraden* i NCS, *komplementærkontrasten* er kontraster mellom komplementærfarger, *kald – varm-kontrasten* er kontraster mellom kalde og varme farger, *simultankontrasten* er kontraster som oppstår fordi perseptuell oppfattelse av farger påvirkes av omliggende farger, *kvalitetskontraster* er kontraster tilsvarende endring i metningsgraden i NCS, *kvantitetskontraster* er ubalanse i mengde komplementærfarger slik at en komplementærfarge dominerer over andre. Johannes Ittens fargelære brukes hovedsakelig innen kunst, men den er godt koordinert med andre systemer.

De forskjellige måtene å behandle kontraster på har sitt opphav i ulike behov. For studier av kontrastsensibilitet, der man søker å finne grenseverdiene for synlighet, benyttes Michelson og Weber. NCS og RAL lyshetskontrast benyttes innen arkitektonisk design, mens kontrastbegrepene definert av Johannes Itten benyttes inn fargekunst.

NCS brukes hovedsakelig innen fargesetting med maling. En alternativ fargedefinisjon er tyske RAL som administrert av Det tyske firmaet German GmbH (RAL, 2020). RAL ble opprinnelig startet i 1927 av en gruppe kalt Reichs-Ausschuß für Lieferbedingungen, og munnet ut i en beskrivelse av 40 farger, kalt *RAL 840*. I 1930-årene ble systemet omgjort til en firesifret kode kalt *RAL 840R*. Nye revisjon kom i 1940, og enda en i 1961, med navnet *RAL 840-HR*, inneholdende 210 fargebeskrivelser.

I 1993 kopleet RAL seg til *CIE L*a*b* fargerom*, basert på en 7 sifret kode, med *Hue*, *Lightness* og *Chroma*, og består av 1825 farger under navnet RAL Design. RAL brukes hovedsakelig til fargebeskrivelser av lakk-, pulver og referansepaneler for plast. Både den 4-sifrede- og den 7-sifrede koden er parallelt i bruk. Den 7-sifrede koden har sterk likhet med NCS.

Pantone Matching System (PMS) (Pantone, 2022), er en fargestandard brukt hovedsakelig innen fargestrykk, spesielt rettet mot grafisk og produktdesign. Den er basert på fargene Cyan, Magenta og Yellow, som tilsvarer subtraktiv fargeblanding. Som standardisert metode, kalles dette *CMYK*. Fordi *CMY* er komplementærfargene til *RGB*, har den en direkte kopling til CIE's ulike fargerom.

Som vi kan se, har RAL Design, Pantone, NCS og CIE sine fargerom en klar sammenheng. Det gir gode måletekniske muligheter samt mulighet til å konvertere mellom de ulike systemene.

4 Kontrastsensibilitet

4.1 Fysiologiske kontrastfenomener

Både stav-og tappcellene er koplet til dendritter som samler opp lysstimulans. Dendrittene er nervetråder som samler opp lysenergi rundt hver celle. Figur 4.1-1 viser en illustrasjon av et dendrittisk felt. På grunn av utseendet, kalles også dendrittarmene for dendrittiske trær.



Figur 4.1-1: Illustrasjon av dendrittisk felt. Illustrasjon: Jonny Nersveen.

Hver tapp har sitt eget dendrittisk felt. Nabetapper er koplet til hverandre via horisontalceller på en måte som gjør at de kan samarbeide. Ved fravær av lysstimuli av tapper, frigjør berørte tapper glutamat, som igjen depolariserer berørte horisontalceller. Når horisontalceller depolariseres, genereres hyperpolarisering av nabotappceller. Når en tapp stimuleres av lys, reduseres produksjonen av glutamat, berørte horisontalceller hyperpolariseres slik at nabotappcellene depolariseres. Jo mer netthinna lysstimuleres, jo mer depolariseres horisontalcellene og jo mer uavhengig av hverandre er nabotappcellene. Teoretisk sett kan hver tappcelle jobbe for seg, når adaptasjonstilstanden tilsier det. (Masland, 2012).

Teoretisk sett må to avbildede synsobjekter ha minst en tappcelle som skiller avbildningen fra hverandre, for at det skal oppfattes som to adskilte objekt, og netthinna må være så godt adaptert at forbindelsene via horisontalcellene er blokkert.

Ganglioncellene tappene er koplet til, inneholder spesialiserte celler, I og D, som reagerer forskjellig på positiv og negativ kontrast. Eksempel på positiv og negativ kontrast er vist i figur 4.1-2 A og B.



A: *Negativ kontrast*



B: *Positiv kontrast*

Figur 4.1-2: *Positiv og negativ kontrast. Illustrasjon: Jonny Nersveen.*

Anta at det lille feltet i midten av bildene i figur 4.1-2 B, avbildes innenfor gangliecellens reseptive felt. I-cellen vil respondere med kraftigere signaler ved økende positiv kontrast, mens det motsatte skjer med D-cellen. Hvis testfeltet vi ser på, er monotont med jevnt reflekterende lys, dvs. ingen kontrast, påvirkes nervecellenes aktiverende og hemmende prosesser samtidig. De gir derfor liten respons i I-cellen. Hvis kontrasten er negativ, hemmes I-cellens aktivitet, mens i D-cellen skjer det motsatte. D-cellen aktiveres når bakgrunnen er lys og midtfeltet er mørkt. Det er altså to forskjellige ganglionceller som responderer på positiv og negativ kontrast. Celletypenes grad av respons er avhengig av kontrastens størrelse, ikke det generelle lysnivået, forutsatt at øynene er fotopisk adaptert. (Valberg, 1998).

En alternativ måte å framstille grenseverdier for luminanskontrast, er kontrastfølsomheten, definert som:

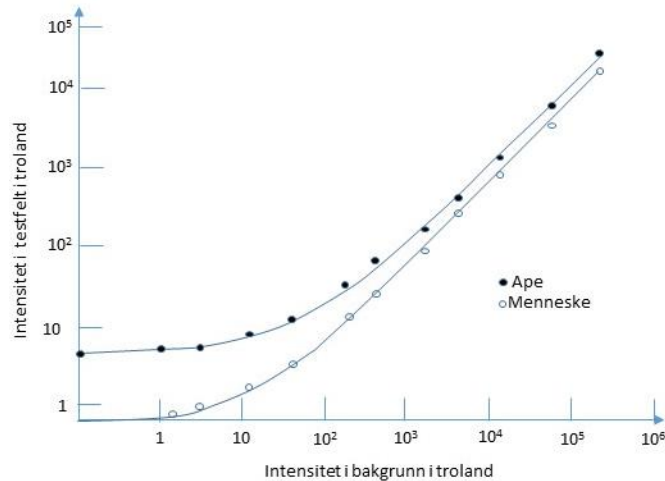
$$R = \frac{1}{C_W} \quad \text{[Likning 4.1-1]}$$

der:

R = kontrastfølsomhet

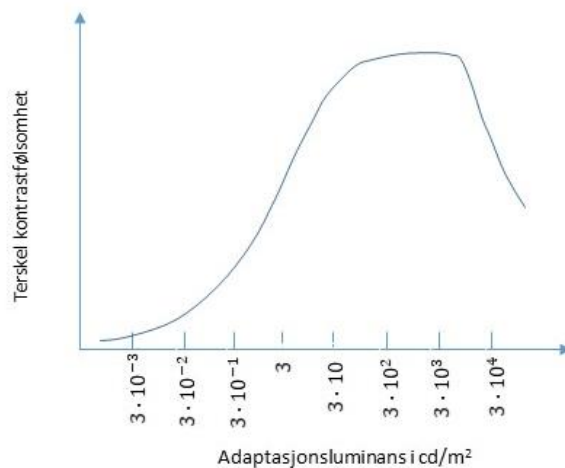
C_W = Webers luminanskontrast, likning 3.3.2-2.

Figur 4.1-3 viser en studie utført av Boynton og Witten (Boynton og Whitten, 1970; Records, 1979), hvor netthinnsas sensibilitet for luminanskontraster er studert for mennesker og aper. Skalaenes parametere er troland, som er luminansen multiplisert med pupillens areal i mm². Testfeltet tilsvarer vanlig testfelt tilsvarende figur 3.3.2-1. Apeforsøkene ble utført ved målinger av elektriske signaler direkte på netthinna, der testfeltets reaksjon ble fysisk målt. For mennesker ble forsøkene utført ved at man varierte testfeltintensiteten, inntil testpersonen kunne se forskjell på testfelt og bakgrunn, dvs. at man fant grenseverdien for synlighet. Slike kurver vil selvsagt variere både med størrelsen på testfeltet og adaptasjonsluminansen, samt en normalspredning fra testindivid til testindivid. Det som imidlertid er interessant er begge kurvenes forløp. For fotopisk adapterte øyne ender kurvene i en rett strek, noe som betyr at kontrastfølsomheten er tilnærmet konstant for fotopisk adapterte øyne fra et visst nivå.



Figur 4.1-3: Måling av terskelrespons i troland som funksjon av bakgrunnen. (Boynton et al., 1970; Records, 1979).
Reproduksjon av kurve: Jonny Nersveen.

Figur 4.1-4 viser en illustrasjon av sammenhengen mellom kontrastfølsomhetsterskelen og adaptasjonsluminansen for mesopisk og fotopisk adapterte øyne, og er en reproduksjon av en kurve vist i læreboken til professor Arne Valberg (Valberg, 1998). Kurven i figuren er en generell beskrivelse av kontrastfølsomheten, og stammer ikke fra en enkelt studie.



Figur 4.1-4: kontrastfølsomhetsterskel (Valberg, 1998). Reproduksjon av kurve: Jonny Nersveen.

Jeg har valgt ikke å angi noen skala på Y-aksen, da denne vil variere med testfeltstørrelsen og en rekke andre forhold. Det som er interessant er kurvens utflatning på toppen, fra adaptasjonsluminanser fra ca 50 til ca 10.000 cd/m^2 . Dette er samme område som vi finner igjen i den rette delen av kurven i figur 4.1-3, og kalles for Weber - Fechners lov. Weber - Fechners lov sier at kontrastfølsomheten er uavhengig av adaptasjonsluminansen i området 50 til 10.000 cd/m^2 . Regnes luminanser fra lysarmaturer inn, er dette luminansområdet det vanlige vi finner innendørs, både i hjem og på arbeid. 10.000 cd/m^2 er et høyt luminansnivå, som kan gi kraftig blinding og også kraftig synsnedsettende blinding. Utendørs i fullt dagslys er 10.000 cd/m^2 et helt vanlig luminansnivå. En måling på snøen utenfor mitt kontor, 07.04.2022, kl. 09:50, viste en luminans på over 4.000 cd/m^2 målt på snøen på et skyggelagt sted. Se figur 4.1-5. Himmelen var relativt skyfri når bildet ble tatt, og himmelluminansen var tilsvarende luminansen på snøen.



Målepunkt for luminansmåling

Figur 4.1-5: Sted hvor luminans ble målt på skyggelagt snø. Foto: Jonny Nersveen

Den korrekte formelen for Weber - Fechners lov er:

$$\frac{\Delta L}{L+L_m} = \text{konstant} \approx \frac{\Delta L}{L} \quad [\text{Likning 4.1-2}]$$

der:

ΔL = luminansdifferansen mellom objektet og dens bakgrunn [cd/m^2]

L = bakgrunns luminansen [cd/m^2]

L_m = er en konstant, en form for nevralt støy eller mørkelys som den også kalles [cd/m^2]

L_m er svært liten, har kun betydning ved svært lave bakgrunns luminanser, og kan i de fleste tilfellene sees bort i fra.

Fechner utnyttet likning 4.1-2, og beskrev den terskelen for den minste stimulusforskjellen som kan oppfattes (Fechner, 1948):

$$\Delta r_F = c \cdot \frac{\Delta L}{L} \quad [\text{Likning 4.1-3}]$$

der:

Δr_F = minste merkbare forskjell

ΔL = luminansdifferansen mellom objektet og dens bakgrunn [cd/m^2]

L = bakgrunns luminansen [cd/m^2]

c = proporsjonalitetsetenhet, som skaler likning 4.1-3 til en egnet enhet

Fechner gikk over til mer generelle matematiske størrelser, ved at Δr og ΔL gjøres om til differensialer, dvs. til dr og dL :

$$dr_F = c \cdot \frac{dL}{L} \quad [\text{Likning 4.1-4}]$$

Integralet av likning 4.1-4 blir:

$$r_F = c \int_{L_t}^L \frac{1}{L} dL = c[\ln(L) - \ln(L_t)] = c \cdot \ln\left(\frac{L}{L_t}\right) \quad [\text{Likning 4.1-5}]$$

der:

r_F = Fechners beskrivelse av perseptuell opplevelse av lyshet

L = luminansen som genererer opplevd lyshet [cd/m²]

L_t = sensorisk grenseverdi for luminans, dvs. den laveste luminansen som kan sees [cd/m²]

c = proporsjonalitetsenhet

Det likning 4.1-5 sier, er at økningen i merkbar forskjell er proporsjonal med logaritmen til forholdet mellom objektet eller flaten som betraktes og grenseverdien for synlig luminans. Likningen er egentlig generell, og brukes innenfor mange fagområder. Dette er også årsaken til at man bruker desibel innen hørsel, og den brukes også innen flere aspekter innen lys. Likning 4.1-5 kalles for Fechners lov. Det er reist alvorlig spørsmål om man kan overføre likning 4.1-3 til et integral (Valberg, 1998), men det har ikke hindret bruken i denne sammenheng. Både naturlig og briggsk logaritme anvendes, også innenfor lys. Forskjellen på bruk av briggsk logaritme og naturlig logaritme, er kun hvilken verdi konstanten c får.

Terskelverdier for kontrast har vært studert i mange sammenhenger. Blackwell utviklet en empirisk formel for terskelkontrast som funksjon av objekt- og bakgrunsluminansen, hvor i synsfeltet kontrasten befant seg, synsvinkelens størrelse og testpersonens alder, basert på webers luminanskontrast (3.3.2-2). Utviklingen av formelen er basert på positiv kontrast, dvs. at objektet er lysere enn sin bakgrunn. Blackwells arbeid munnet ut i en CIE-rapport og har også blitt benyttet som standard i IES (Illuminating Engineering Society) (CIE, 1981):

$$C_{ref} = 0,05936 \left[\left(\frac{S}{t \cdot L} \right)^{0,4} + 1 \right]^{2,5} \quad [\text{Likning 4.1-6}]$$

der:

$\text{Log}(S) = 0,5900 - 0,6235 \cdot \text{Log}(d) - 0,1980 \cdot X - s$

C_{ref} = standardisert terskelkontrast dvs. den laveste kontrasten en person kan oppfatte

L = bakgrunsluminansen [Cd/m²]

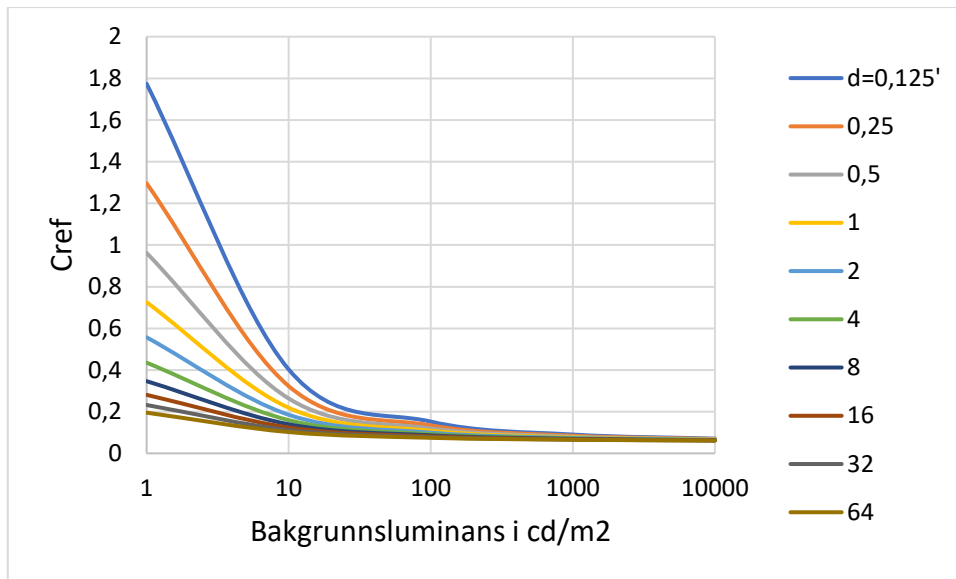
X = ekvivalent eksentrisitet, målt i forhold til synslinjen [grader]

S = funksjon av observatørens alder. $s=0$ ved alder på 20 år.

t = funksjon av observatørens alder. $t=1$ ved alder på 20 år.

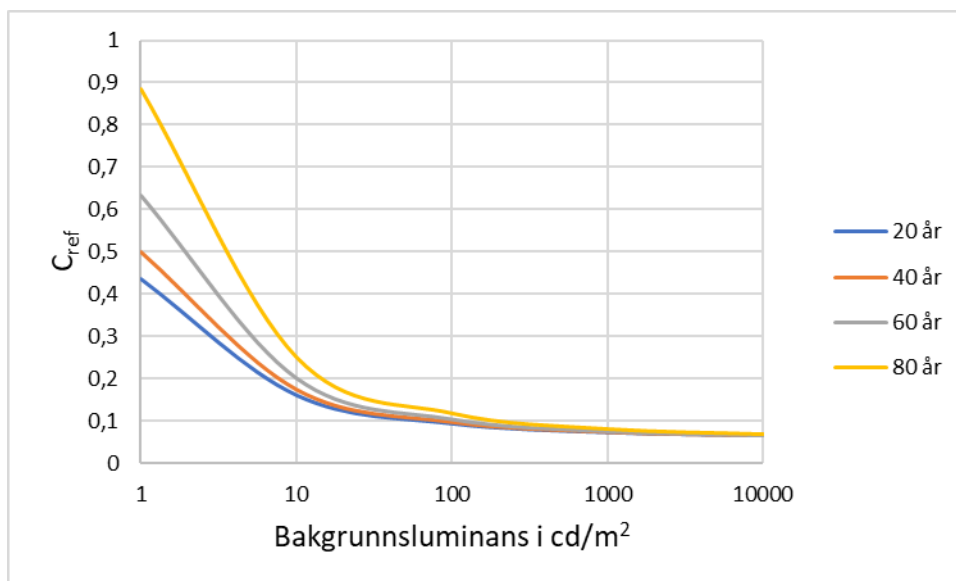
d = synsvinkelen synsobjektet sees under [bueminutter]

Figur 4.1-6 viser innflytelsen av synsobjektets størrelse på terskelkontrasten, C_{ref} . I visse situasjoner har man definerte synsvinkler, men det er vanlig å bruke 4 bueminutter som standard.



Figur 4.1-6: Referanseterskelkontrasten, C_{ref} , som funksjon av bakgrunsluminansen og synsobjektets størrelse. Beregning: Jonny Nersveen.

Blackwells data inneholder også aldersendringer av synet. I utgangspunktet gjelder dataene for naturlige synsendringer. I hht til Nordisk lærebok i oftalmologi, har alle personer over 70 år med eller mindre grad av utviklet grå stær (senil katarakt) (Høvding *et al.*, 2016). Vi må derfor forvente at grå stær har påvirket resultatene. Figur 4.1-7 viser alderens innflytelse på referanseterskelkontrasten, C_{ref} , beregnet ut fra likning 4.1-3.



Figur 4.1-7: Referanseterskelkontrasten, C_{ref} , som funksjon av bakgrunsluminansen og alder. Beregning: Jonny Nersveen.

Ved prosjektering av belysning for å oppnå synlige kontraster, må reell kontrast være høyere enn referanseterskelkontrasten. En meget god måte å framstille synlighet av kontraster, er med parameteren synlighetsnivået, VL (Visibility Level) (CIE, 1981). Synlighetsnivået er definert som forholdet mellom kontrasten man har i en reell situasjon og referanseterskelkontrasten, C_{ref} , dvs.:

$$VL = \frac{C_W}{C_{ref}}$$

[Likning 4.1-7]

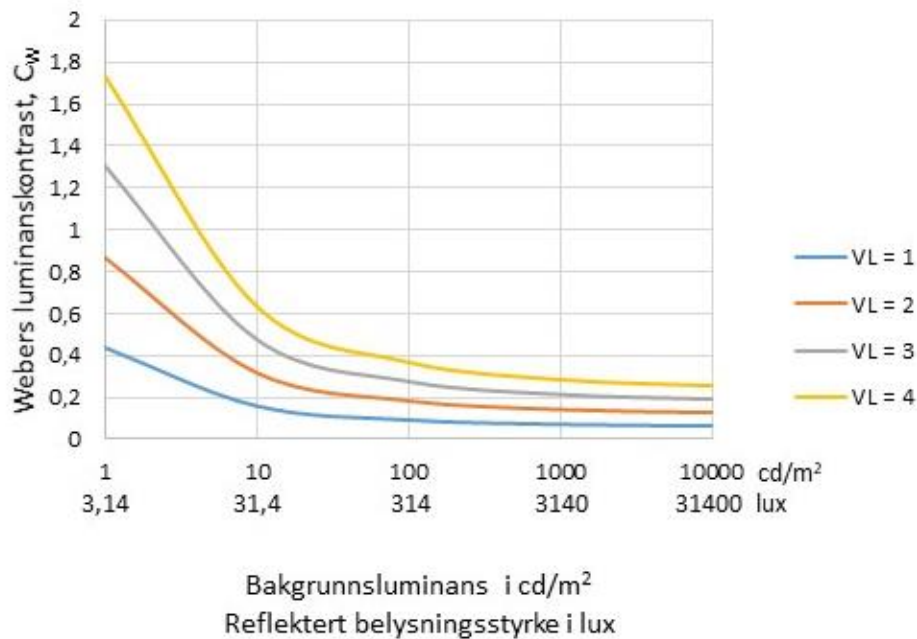
der:

VL = synlighetsnivået

C_W = Webers luminanskontrast

C_{ref} = referanseterskelkontrasten iht. likning 4.1-6

Figur 4.1-8 viser sammenhengen mellom reell kontrast, C_W , i forhold til bakgrunsluminansen, for ulike synlighetsnivåer. Beregningene i figuren er basert på $X = 0^\circ$ eksentrisitet, $d = 4$ bueminutter objektstørrelse og alder 20 år. For bakgrunnens reflekterte belysningsstyrke er det forutsatt diffus refleksjon, dvs. at Lamberts cosinuslov er gjeldende. Kurven gjelder kun for positiv kontrast.



Figur 4.1-8: Webers luminanskontrast, C_W , som funksjon av bakgrunsluminansen, reflektert belysningsstyrke og synlighetsnivået, VL . Beregning: Jonny Nersveen.

Synlighetsnivået beskriver graden av synlighet. $VL = 2$ forteller oss at luminanskontrasten vi har er det dobbelte av standard grenseverdi for synlighet. $VL = 3$ er det tredobbelte, osv. Av figuren ser vi at med lav bakgrunsluminans, må vi ha høy luminanskontrast for å oppnå synlighet. Økes bakgrunsluminansen, kan luminanskontrasten reduseres. Hver enkelt kurve representerer en gitt grad av synlighet.

Blackwells arbeid er kun basert på positive kontraster, C_W kan derfor bli større enn 1. Som figur 3.4-2 viser, kan negative kontraster aldri bli høyere enn absoluttverdien 1. Vi kommer ikke borti fra at Blackwells kontrastskala har en del utfordringer.

4.2 Perseptuell lyshet, positiv og negativ kontrast

Det er mange som har jobbet med spørsmålet om perseptuell skala for lyshet. En viktig person i denne sammenheng er Stevens, som postulerte sin potenslov. (Stevens, 1960; Mammen, 1994; Valberg, 1998).

Stevens hevdet at perseptuell opplevelse av lyshet følger formelen:

$$v_S = \textit{konstant} \cdot I^n \quad \text{[Likning 4.2-1]}$$

der:

v_S = perseptuell opplevelse av lyshet

Konstant = konstant størrelse som tilpasser likningen til en valgt skala.

I = stimulusstørrelse, eksempelvis luminans.

n = potensfaktor.

Studier utført av Miescher et al. har vist at for en gråskala med 10 trinn, mot hvit bakgrunn, følger formelen (Miescher, Richter og Valberg, 1982):

$$v_{Me} = 10 \cdot \delta^{0,5} \quad \text{[Likning 4.2-2]}$$

der:

v_{Me} = Perseptuell lyshet

δ = refleksjonsfaktoren

Ved mørk bakgrunn endrer formelen seg noe for de mørkeste fargene. Her korresponderer Stevens formel med:

$$v_S = 10 \cdot \delta^{0,33} \quad \text{[Likning 4.2-3]}$$

Når vi beveger oss mot grenseverdien for synlighet, blir Stevens formel:

$$\frac{\Delta v_S}{v_S} = n \frac{\Delta I}{I} \quad \text{[Likning 4.2-4]}$$

der:

$\frac{\Delta v_S}{v_S}$ = relativ tilvekst av lyshet, målt i forhold til lysheten, v_S , vi sammenlikner med

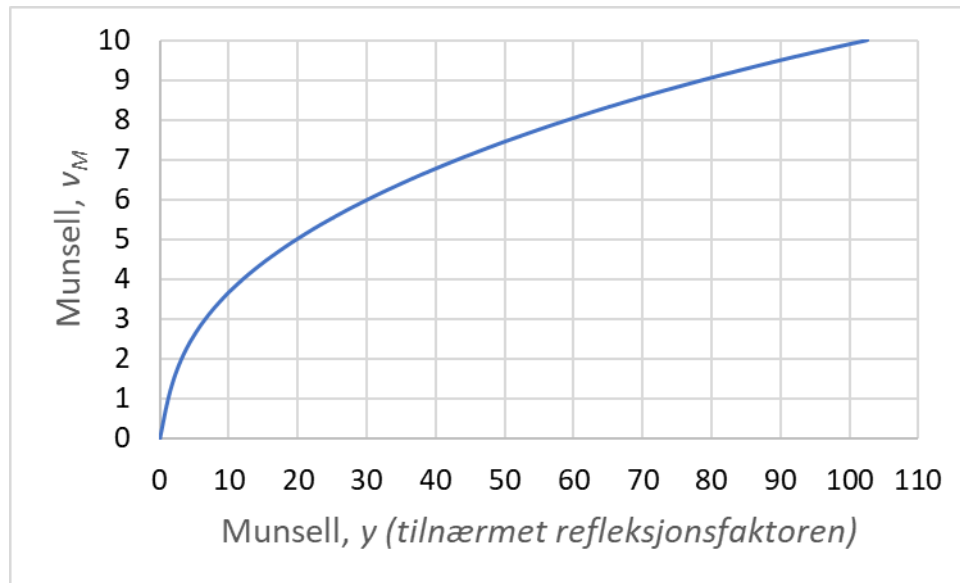
$\frac{\Delta I}{I}$ = Weber – Fechners lov

n = potensfaktoren i likning 4.2-1.

Likning 4.2-1 er ifølge Stevens, et resultat av en mengde forsøk. Fechners lov, basert på logaritmen, er den samme som Stevens lov, når $n = 0,3$, og som er en faktor Stevens fant i mange av sine forsøk (Valberg, 1998). Forskjellen på Stevens og Fechners lov er altså ikke så stor.

I 1929 publiserte Munsell boken «Munsell Book of Color», og denne har senere dannet en standard (Munsell, 1929). Noen få korreksjoner ble foreslått av Optical Society of America og publisert i 1943 (Newhall, Nickerson og Judd, 1943). Figur 4.2-1 er laget på basis av verdier angitt i

denne publikasjonen. Som vi ser her, er det ikke lineær sammenheng mellom refleksjonsfaktoren og perseptuelle oppfattelse av lyshet.



Figur 4.2-1: Munsells perseptuelle skala for lys (Munsell, 1929; Newhall, Nickerson og Judd, 1943) Rekonstruksjon av kurve: Jonny Nersveen

Under diffuse forhold vil y bli tilnærmet det samme som refleksjonsfaktoren i %, og i disse forsøkene ble den hvite bakgrunnen skapt av presset magnesiumoksyd med refleksjonsfaktor 97,5 %. Når flatene var helt like, ble V_y satt lik 10. Dette gir $y = 102,568$. På denne måten ble v skalert til å bli mellom 0 og 10.

På bakgrunn av fysiske intensitetskurver basert på Munsells beskrivelse av lyshet (value), utviklet Seim og Valberg, en annen skalering av lyshet, V_y , med like store perseptuelle trinn i en gråtoneskala (Seim og Valberg, 1986):

$$V_y = \frac{40(Y-0,43)^{0,51}}{(Y-0,43)^{0,51}+31,75} \quad (Y \geq 0,43) \quad [\text{Likning 4.2-5}]$$

Der:

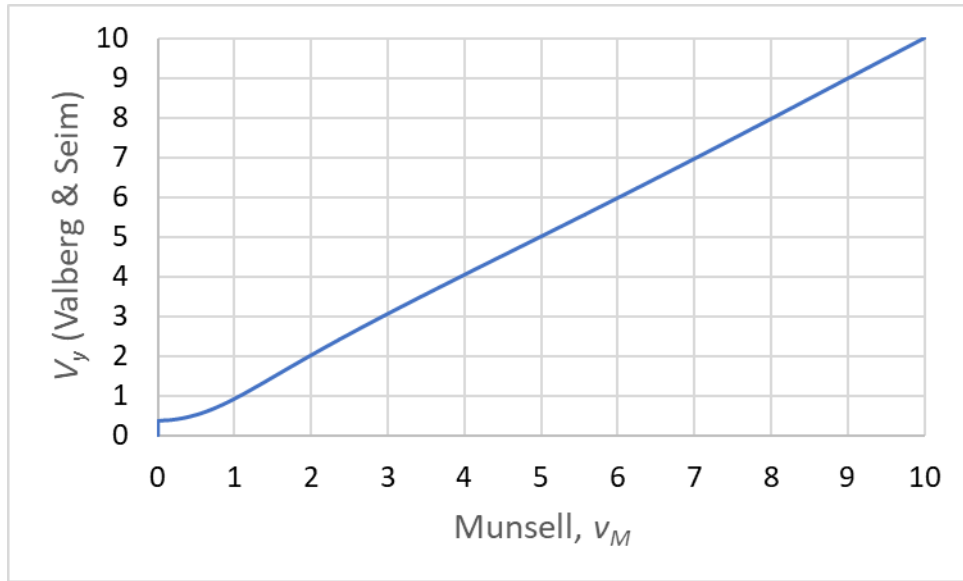
V_y = perseptuell grad av lyshet

Y = luminansforholdet $100 \cdot L/L_w$

L = objektets luminans [cd/m^2]

L_w = bakgrunsluminansen (hvitt lys) [cd/m^2]

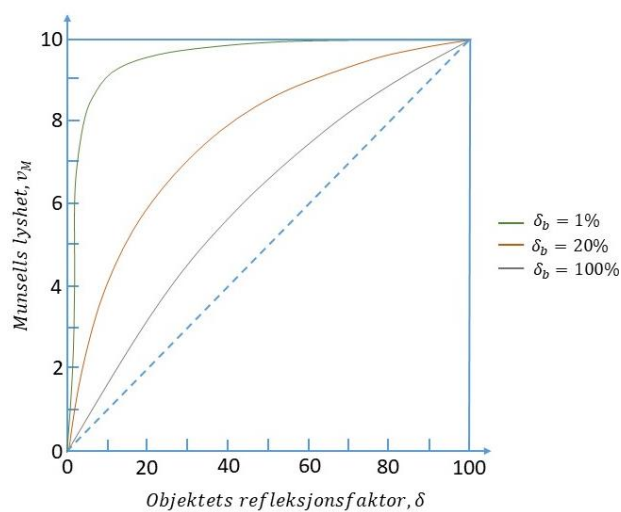
Figur 4.2-2 viser et plot basert på likning 4.2-5 som funksjon av Munsell lyshet, v_M .



Figur 4.2-2: Plot av v_y som funksjon av Munsell, v_M . (Munsell, 1929; Newhall, Nickerson og Judd, 1943; Seim og Valberg, 1986) Kurveproduksjon: Jonny Nersveen.

Plottet i figur 4.2-2 viser linearitet ned til $y = 1,2$. Dette er eneste praktiske uoverensstemmelsen mellom likning 4.2-5 og Munsells lyset, v_M . Ved $v_M = 1,0$ er $V_y = 1,08$. Jeg har beregnet standardfeilen, SE , mellom Munsells verdier og Seim og Valbergs likning 4.2-5, for alle y helt ned til 0. Den var $SE = 0,053$, ved $n=1000$. Refleksjonsfaktorer lavere enn 1,2 % er så lave verdier at de sjeldent forekommer. Seim og Valbergs tilnærming til Munsells skala er derfor meget god, selv om det er noe avvik ved de laveste refleksjonsfaktorene.

Perseptuell lyshet påvirkes av bakgrunnen til objektet som persiperes. Figur 4.2-3 er en reproduksjon av en kurve i professor Arne Valbergs lærebok Lys – Syn – Farge (Valberg, 1998). Ofte brukes lys bakgrunn som referanse, der y kan være svært nær 100%. De største avvikene finner vi ved lave refleksjonsfaktorer.



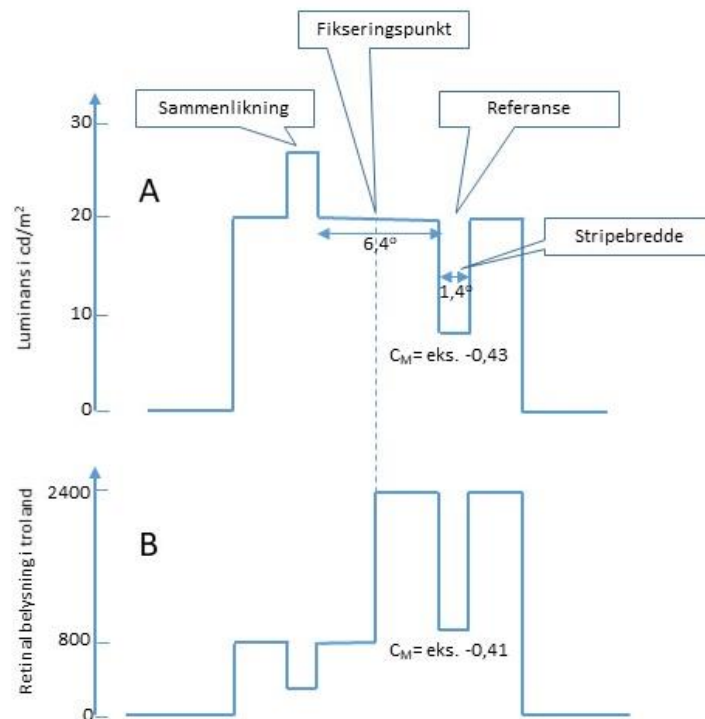
Figur 4.2-3: Munsells lyshet, v_M , som funksjon av referansen (Valberg, 1998). Reproduksjon av kurve: Jonny Nersveen.

Hvilken betydning har så fortegnen på kontrasten? Burkhardt et al. (Burkhardt *et al.*, 1984) gjennomførte svært detaljerte studier av sammenlikning mellom positive og negative kontraster, der spørsmålet var om vi opplever kontrastene som like eller som forskjellige perseptuelt. Denne studien gir mye av svarene på stilte spørsmål, og beskrives derfor i detalj.

Studien ble utført ved at to rektangulære testfelt ble presentert på hver sin side av et fokuspunkt, sett mot en definert bakgrunns luminans. Kontrastparameteren var den samme som Michelsons, dvs.

$$C_M = \frac{L_{maks} - L_{min}}{L_{maks} + L_{min}}, \quad [\text{Likning 3.3.3-1}]$$

men testfeltet er ikke presentert som et grid, slik Michelsons testmetode opprinnelig beskrives. Figur 4.2-4 viser hvordan testfeltene har blitt benyttet. Michelsons likning er basert på at arealet med L_{maks} og L_{min} er like store. Derfor vil kontrastens adaptasjonsluminans være $\frac{L_{maks} + L_{min}}{2}$, dvs at C_M er proporsjonal med invers av adaptasjonsluminansen. Slik Burkhardt et.al. bruker Michelsons kontrast, vil ikke dette være oppfylt, fordi det befinner seg to testareal i samme synsfelt, og at disse to arealene er betydelig mindre i sum enn bakgrunnsarealet. For å markere at Michelsons kontrast anvendes på en annen måte enn definisjonen, merkes C_M med en apostrof, dvs. C_M' . Testresultatene i form av målte kontraster kan derfor ikke sammenliknes med øvrige studier der grid er benyttet.



Figur 4.2-4: Testoppsett for studier av negativ kontrast (Burkhardt et al., 1984). Reproduksjon av figur: Jonny Nersveen.

Testfeltenes bakgrunn utgjør 8° vertikalt og $13,6^\circ$ horisontalt. To vertikale striper benyttes som referansetestfelt og sammenlikningsfelt, begge med størrelsene 8° høyde og $1,4^\circ$ bredde. Midt mellom testfeltene er et fikseringspunkt som testpersonene fikserer mot, for hver test. Se figur 4.2-4, del A. Testene er gjennomført med referansetestkontraster på hht. $C_M' = (-0,05, -0,15, -0,29, -0,43, -0,56, \text{ and } -0,64)$. Hver referanseteststripe sammenliknes med 5 korresponderende kontraster for

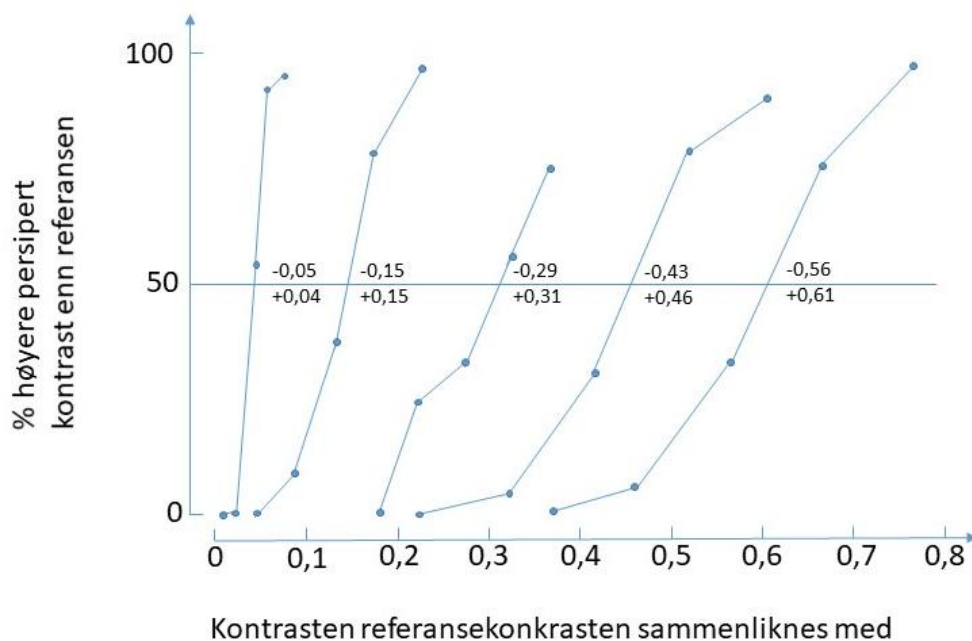
referanseteststripen kontrastene sammenliknes med. Totalt utgjør dette en serie på 30 tester, og som repeteres 30 ganger i samme økt per bakgrunns luminans. Testkontrastenes rekkefølge er randomisert.

For hver sammenlikning, markerer testpersonen med en mentorknapp hvilken av kontrastene som persiperes som størst, som tvangsvalg (force choice). Hver test viser kontrastene i 0,5 sekunder. Neste test gjennomføres 3 sekunder etter at forrige test er besvart. Hver økt med tester gjennomføres med ulike bakgrunns luminanser, løpende fra 0,017 til 200 cd/m². For hvert skift i bakgrunns luminans, adapteres synet i 10 minutter. Det er totalt 8 testpersoner med i testene, men det er bare to av dem, testperson A og B, som er grundig testet. De øvrige er benyttet for å kontrollere at trendene ikke avviker fra testperson A og B.

Figur 4.2-5 viser resultatet for testperson A. Positivt tall til høyre for hver kurve, viser referansekontrastens verdi. Negativt tall viser testkontrastens interpolerte verdi som korresponderer med kontrastnivået 50% av svarene som beskriver kontrasten som større enn referansekontrasten. Denne metoden for å kunne finne matchende svar, kalles psykometrisk funksjon (psychometric function), en vanlig målemetode brukt innen persepsjonspsykologien.

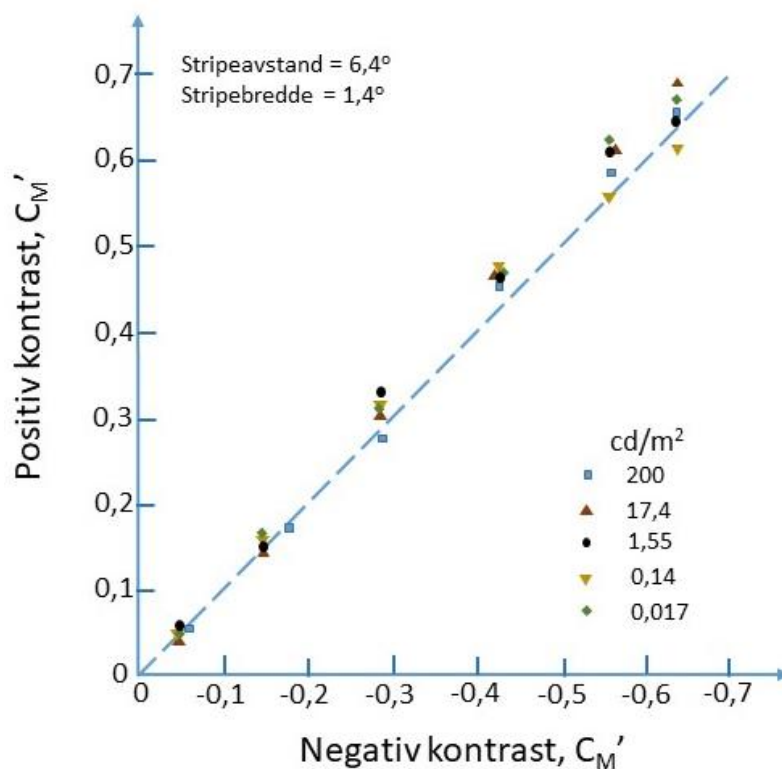
Vi ser at 50% av svarene viser at verdiene til positiv og negativ kontrast er svært lik. Testresultatet stemmer godt med andre tilsvarende studier, og også studier i studier med elektrofysiske målinger på aper. Det man imidlertid ser er at symmetrien brytes ned ved lave bakgrunns luminanser. Testresultatene som er vist her, ble gjennomført med en bakgrunns luminans på 17,4 cd/m². Det er grunn til å påpeke at symmetrien gjelder ved bruk av Michelsons likning, C_M' , for kontrast.

I figur 4.2-5 ser vi at helningen på kurvene er større ved økende referansekontrast. Det betyr større usikkerhet i sammenlikningen av negativ og positiv kontrast.



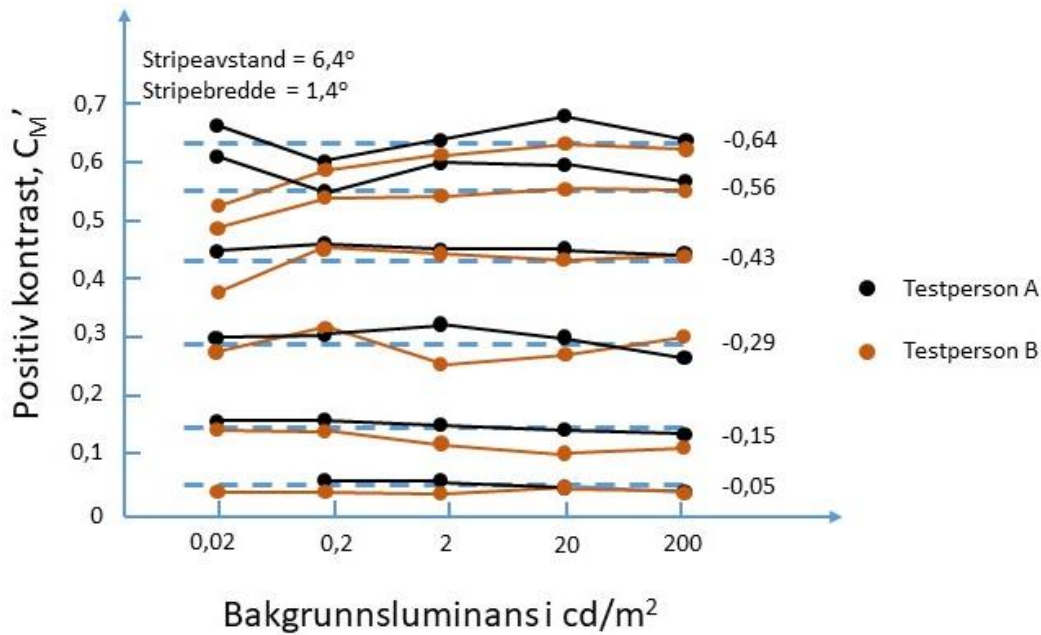
Figur 4.2-5: Sammenlikning av persipert likhet mellom negativ og positiv kontrast, for testperson A (Burkhardt et al., 1984). Reproduksjon av kurve: Jonny Nersveen.

Figur 4.2-6 viser korrelasjonen mellom negativ og positiv kontrast for testperson A, som funksjon av 5 ulike nivåer av bakgrunns luminansen (Burkhardt *et al.*, 1984). Vi ser her at symmetrien mellom negativ og positiv kontrast er uavhengig av bakgrunns luminansen, og dermed adaptasjons luminansen, opp til 200 cd/m². I forhold til vanlige omgivelser er 200 cd/m² et vanlig luminansnivå.



Figur 4.2-6: Korrelasjon mellom negativ og positiv kontrast for testperson A (Burkhardt *et al.*, 1984). Stiplet linje viser ideell symmetri. Reproduksjon av kurve: Jonny Nersveen.

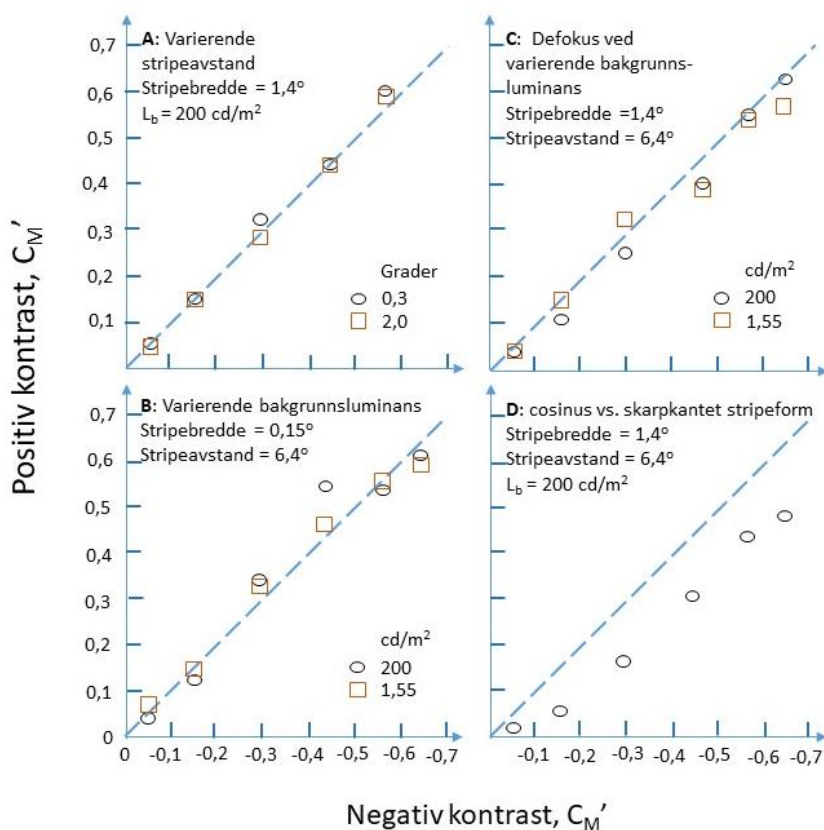
Figur 4.2-5 og -6 gjelder kun for testperson A. Som en kontroll utførte Burkhardt *et al.* tilsvarende omfattende tester for testperson B, for å se hvor mye resultatene sprikte. Figur 4.2-7 viser avviket i persipert kontrast, C_M' , i forhold til ren symmetri for testperson A og B. Blå stiplet linje viser negativ referansekontrast, mens sammenlikningskontrasten er positiv. Heltrukne linjer for testperson A og B viser korresponderende kontraster ved fullkommen symmetri. Teststripene hadde skarpe kanter, med stripebredde 1,4° og stripeavstand 6,4°. De største forskjellene er ved lave bakgrunns luminanser og høye kontraster, noe som er naturlig. Fra bakgrunns luminanser 20 cd/m² opp til 200 cd/m², er differansen mellom testpersonene svært liten. Vi ser også at jo høyere kontrasten er, jo vanskeligere er det å sammenlikne negativ og positiv kontrast, og som også gir de største sprikene mellom testpersonene.



Figur 4.2-7: Avvik fra symmetri som funksjon av bakgrunsluminansen, for testperson A og B (Burkhardt et al., 1984).
Reproduksjon av kurver: Jonny Nersveen.

Figur 4.2-5, -6 og -7er utført med fast avstand mellom teststripekantene på 6,4° og fast stripebredde på 1,4°. Det er tenkbart at spatiale og optiske forhold kan påvirke resultatet. Derfor ble det utført eksperimenter der man varierte avstanden mellom stripekantene, bredden på stripekantene, sinusformet stripekant i forhold til skarp stripekant, defokusering av testfeltet samt varierende bakgrunsluminans. Resultatene i figur 4.2-8, er kun basert på testperson A, men denne avviker ikke vesentlig fra de øvrige. I figur A varieres avstanden mellom teststripekantene med hhv. 0,3 og 2,0°, dvs. betydelig kortere avstand enn standardavstanden på 6,4°. Bakgrunsluminansen var 200 cd/m^2 . Vi ser av figuren at positiv og negativ kontrast følger idealkurven meget godt, dvs. at vi har symmetri, også ved svært korte avstander mellom stimulifeltene. I figur B utgjør teststripene en bredde på bare 0,15°, mens avstanden mellom dem er beholdt på 6,4°. Bakgrunsluminansen varierer med hhv. 200 og 1,55 cd/m^2 . Vi ser noe avvik i forhold til perfekt symmetri, men ikke mye, tatt i betraktning den korte teststripebredden. Selv om bakgrunsluminansen på 1,55 cd/m^2 er i mesopisk adaptasjonsområde, mens 200 cd/m^2 er langt inn i fopisk område, er resultatet svært symmetrisk. I figur C er det testet ut defokusering av testfeltet, som i realiteten betyr at testobservatørene ikke ser klart. Denne kan fint sammenliknes med senil katarakt (Nersveen, 2022; Høvdning et al., 2016), ved at kantene på testfeltene flyter ut. Resultatet viser relativ god symmetri. I figur D sammenliknes testfeltenes kantoverganger fra testfelt til bakgrunn. Tradisjonelt benytter Michelsons kontrast en testgrid bestående av sinusformede striper med valgbare spatiale frekvenser. I testen som Burkhardt et.al. har utført, er en enkeltstripe med sinusform sammenliknet med teststriper, med skarpe overganger. Det er et optisk datastyrt system som er benyttet, og teststripen med skarpe overganger er så skarp som et digitalt system er i stand til å lage. Dette vil si at acutance, beskrevet i kapittel 3.3.5, blir svært forskjellig for disse to teststripene. Til forskjell fra testene beskrevet i A, B og C, er det tydelig forskjell på sinusformet testfelt og kantede testfelt. Opplevelsen av nivået til persipert kontrast er lavere for sinusformet testfelt i forhold til testfelt med skarpe kanter.

Resultatforskjellen mellom sinusformet testfelt og testfelt med skarpe kanter er ikke overraskende. I god belysning er følsomheten for statiske kontraster størst for arealer fra $0,2^\circ$ og oppover, forutsatt skarpe kanter. Er randen diffus, slik det blir med sinusformet testfelt, blir følsomheten redusert såfremt den diffuse overgangen er større enn 7 bueminutter, og hvis den er over 12 bueminutter, reduseres følsomheten med opptil 70% målt i forhold til skarpe kanter. 12 bueminutter er utgjør $12/60 = 0,2^\circ$. (Schober, 1958; Valberg, 1998).

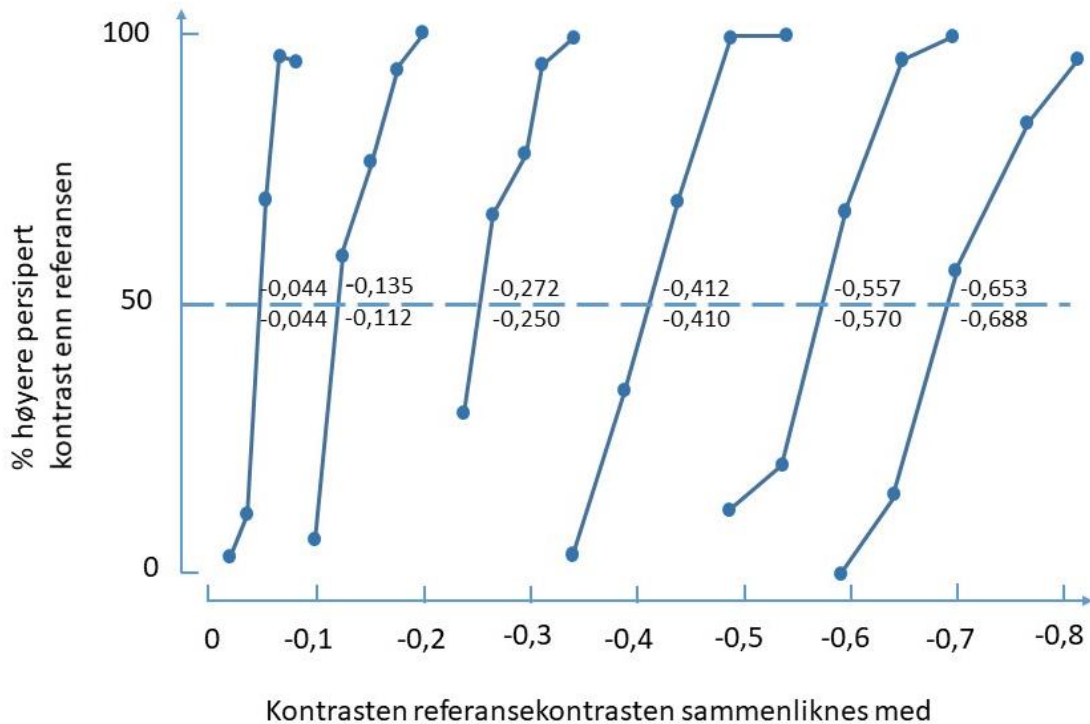


Figur 4.2-8: Symmetri som funksjon av varierende stripeavstander, stripebredder, bakgrunsluminans, defokus og stripekantenes skarphet. Stiplede linjer viser ideell symmetri. (Burkhardt et al., 1984). Reproduksjon av kurver: Jonny Nersveen.

Lysets netthinnestimulans styres av luminansen i kombinasjon med pupillens areal. Luminansene som brukes i Burkhardt's studier innbefatter både mesopisk og fotopisk adaptasjon, der pupillens størrelse vil endres. Derfor har de gjennomført studier hvor sammenlikningen mellom teststripe og referans stripe er funksjon av troland i stedet for luminans. Dette er gjort med fiksert pupillstørrelse med 2,75 mm diameter, som oppnås ved hjelp av måleutstyret. I første forsøk ble de 6 standardkontrastene sammenliknet med 800 og 2400 troland retinal belysning. Oppsettet er vist i figur 4.2-4 B. Prosedyrene for gjennomføring av testene er som for de øvrige testene, der 5 kontraster som ligger verdimesig nært referansekontrasten, vises. Ved hjelp av en mentorknapp oppgir testpersonen hvilken av kontrastene som persiperes som kraftigst. En serie består altså av $5 \times 6 = 30$ sammenlikninger, og hver serie gjennomføres 30 ganger. Totalt består en økt av 900 tester.

Figur 4.2-9 viser resultatet, for testperson A. Øverste tallet til høyre for hver kurve, angir resultatet for 2400 troland, mens tallet under gjelder for 800 troland. Med fast pupillstørrelse på

2,75 mm, tilsvarer 2400 troland en luminans på $L_b = \frac{4 \cdot 2400}{2,75^2 \cdot \pi} = 404 \text{ cd/m}^2$, mens 800 troland tilsvarer $L_b = \frac{4 \cdot 800}{2,75^2 \cdot \pi} = 135 \text{ cd/m}^2$. Begge disse luminansnivåene representerer godt fotopisk adapterte øyne. Tallene i figuren viser at en endring fra 800 til 2400 troland gir svært like resultater.

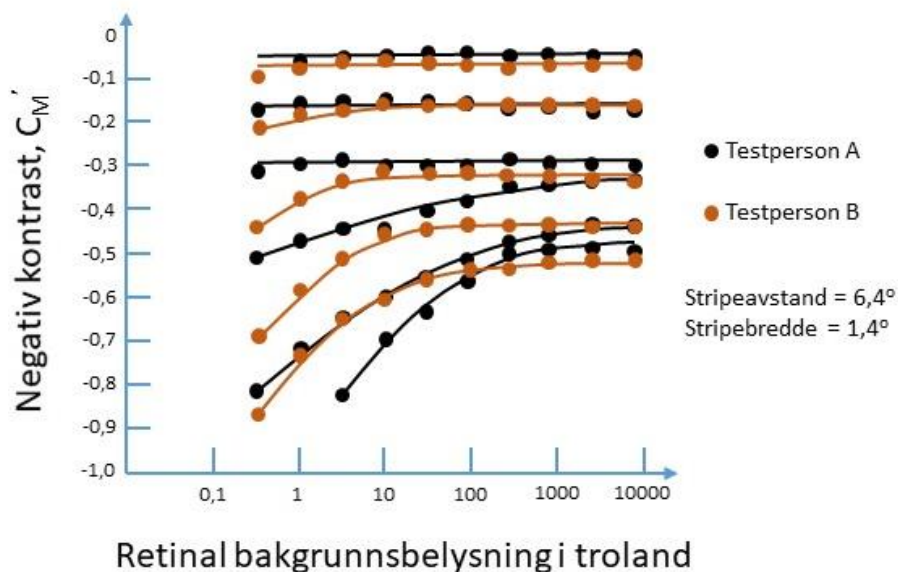


Figur 4.2-9: Sammenlikning av opplevd likhet mellom to kontraster som funksjon av to ulike retinale bakgrunnsbelysninger, for testperson A (Burkhardt et al., 1984). Reproduksjon av kurve: Jonny Nersveen.

Figur 4.2-9 viser kun sammenlikning med to forskjellige retinale belysningsnivåer. I figur 4.2-10 vises resultatet for 10 ulike retinale belysningsnivåer. For hvert nye par med retinal belysning, er testfeltenes bakgrunnslys redusert til en tredjedel. Totalt ble 10 retinale belysningspar benyttet, der parene som ble sammenliknet var [(2400 – 800), (800 - 266,67), (266,67 - 88,89), (88,89 - 29,63), (29,63 - 9,88), (9,88 - 3,29), (3,29 - 1,10), (1,10 – 0,37), (0,37 – 0,12) og (0,12 – 0,04] troland). Kalibreringen av alle kontrastene var krevende, og for å sikre kvalitet i målingene er hver testøkt gjennomført to ganger.

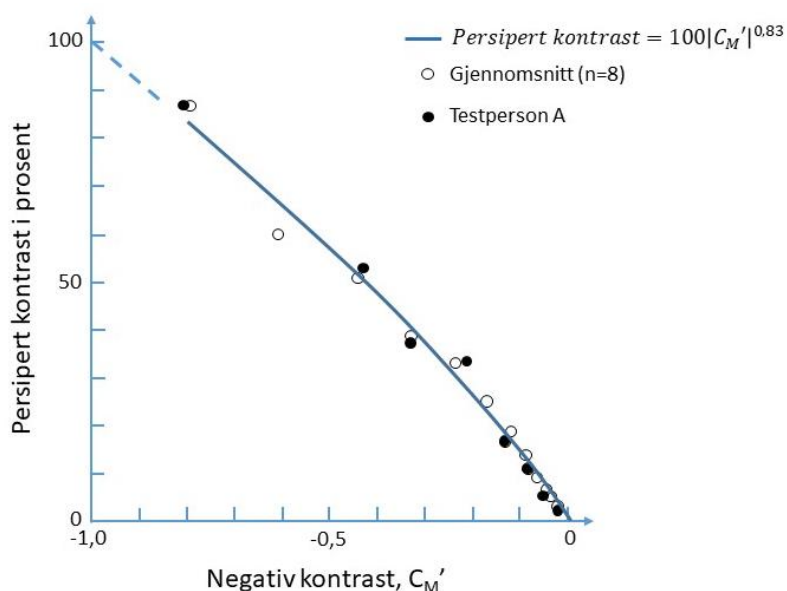
Figur 4.2-10 viser endringen i fysisk målt kontrast som funksjon av retinal belysning, ved lik perseptuell oppfattelse av kontrastnivået, for testperson A og B. Hver kurve representerer lik perseptuell kontrast. Y-aksen viser fysisk kontrast, C_M' , mens X-aksen viser retinal belysning i troland. Testoppsettet er som vist i figur 4.2-4 B.

Som vi også har sett i de øvrige testene, er det de svakeste kontrastene som persiperes som mest stabile. Vi ser også at persipert kontrast stabiliserer seg fra 100 troland. 100 troland utgjør $L_b = \frac{4 \cdot 100}{2,75^2 \cdot \pi} = 17 \text{ cd/m}^2$, som igjen tilsvarer reflektert belysningsstyrke på 53 lux ved diffus refleksjon. Vi ser at det er forskjell mellom testpersonene, særlig ved lave lysnivåer.



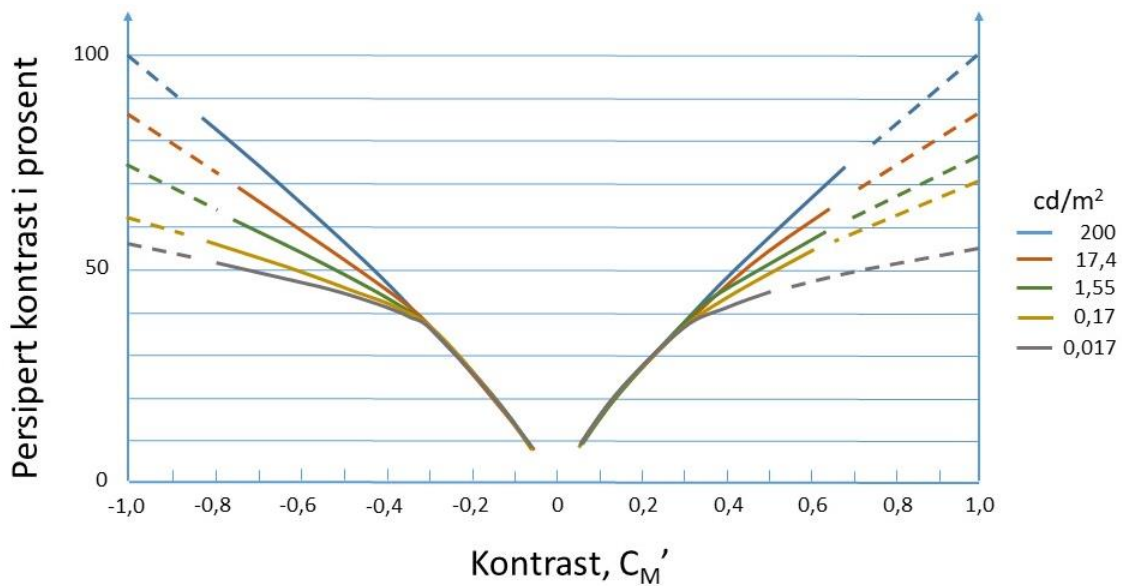
Figur 4.2-10: Sammenhengen mellom kontrast C_M' og persipert kontrast, som funksjon av retinal bakgrunnsbelysning, for testperson A og B (Burkhardt et al., 1984). Reproduisert kurve: Jonny Nersveen.

Så langt er kun resultatene for to testpersoner presentert. I figur 4.2-11 er sammenhengen mellom persipert kontrast og negativ kontrast, C_M' , vist for alle 8 testpersonene. Det man er interessert i å se, er om fysisk kontrast gir god beskrivelse av persipert kontrast. Figur 4.2-11 viser denne sammenhengen. Åpne sorte sirkler er de geometriske gjennomsnittene til alle 8 testpersonene. Heltrukken kurve er least square regresjonslinje for beste tilpasning til dataene, basert på regresjonslikningen for «Persipert kontrast» vist i figuren. Heltrukken linje gjelder for området dataene dekker opp. Stiplet linje er basert på ekstrapolering ut fra regresjonslikningen. Kurven gjelder for bakgrunsluminans 200 cd/m^2 .



Figur 4.2-11: Statistisk persipert kontrast som funksjon av negativ kontrast, C_M' , for 8 testpersoner, ved bakgrunsluminans 200 cd/m^2 (Burkhardt et al., 1984). Reproduksjon av kurve: Jonny Nersveen.

Med basis i regresjonsfunksjonene for persipert kontrast som funksjon av negativ og positiv kontrast, C_M' , kan man nå lage en kurveskare for persipert kontrast som funksjon av fysisk kontrast, C_M' , der bakgrunsluminansen også varierer. Denne er vist i figur 4.2-12. I originaldokumentasjonen spres kurveskaren seg noe igjen når den nærmer seg 0 persipert kontrast. Dessverre er kurvene i originaldokumentasjon så utydelige, at det ikke er mulig med sikkerhet å skille kurvene fra hverandre. Jeg har derfor valgt å avslutte kurveskaren der jeg med sikkerhet kan si at originalkurvene er korrekt gjengitt. Det viktigste med resultatene Burkhardt et.al. har kommet fram til, er at positive og negative kontraster, når Michelsons kontrast C_M' , benyttes, har tilnærmet symmetriske egenskaper når øynene er fotopisk adaptert, for relevante kontrastnivåer.



Figur 4.2-12: Persipert kontrast som funksjon av fysisk kontrast, C_M' , kontrastpolaritet og adaptasjonsluminans. Stipulerte linjer er ekstrapolasjon av kurvene. (Burkhardt et al., 1984). Reproduksjon av kurver: Jonny Nersveen.

Det er kjent at symmetriegenskapene brytes ned når bakgrunsluminansen er svært lav. Det er i så fall utendørs med svært dårlig eller uten belysning, at dette vil skje. Derfor er arbeidet til Burkhardt et.al. svært interessant. Vi har omfattende data fra Blackwells arbeid, med likningen 4.1-6. Det er derfor mulig å overføre Blackwells data til Burkhardts formel til C_M' .

Vi tar utgangspunkt i likning 3.3.3-1 og 3.3.2-2.

$$C_M' = \frac{L_o - L_b}{L_o + L_b} = \frac{\frac{L_o}{L_b} - 1}{1 + \frac{L_o}{L_b}} \quad [\text{Likning 3.3.3-1}]$$

$$C_W = \frac{L_o - L_b}{L_b} = \frac{L_o}{L_b} + 1 \quad [\text{Likning 3.3.2-2}]$$

der:

C_M' = Michelsons formel, men basert på et objekt sett mot en bakgrunn

C_W = Webers luminanskontrast

L_o = objektets luminans [cd/m^2]

L_b = bakgrunnens luminans [cd/m^2]

Vi kan nå løse ut $\frac{L_o}{L_b}$:

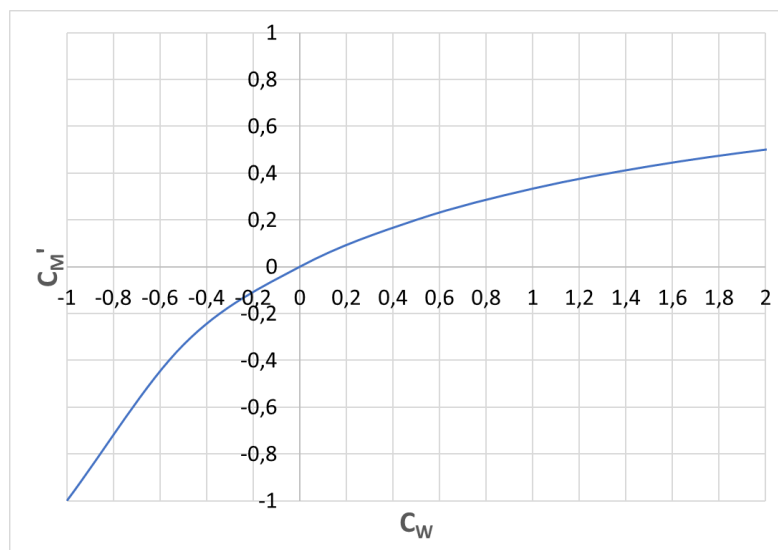
$$\frac{L_o}{L_b} = C_W + 1, \quad [\text{Likning 4.2-6}]$$

som kan settes inn i likning 3.3.3.-1, og som gir oss sammenhengen mellom C_M' og C_W :

$$C_M' = \frac{L_o - L_b}{L_o + L_b} = \frac{\frac{L_o}{L_b} - 1}{1 + \frac{L_o}{L_b}} = \frac{C_W}{C_W + 2} \quad [\text{Likning 4.2-7}]$$

I dette tilfellet trenger vi fortegnet i Webers luminanskontrast, og bruker derfor ikke absoluttvegnet.

Figur 4.2-13 viser C_M' som funksjon av C_W .



Figur 4.2-13: C_M' som funksjon av C_W . Beregning: Jonny Nersveen.

Norske kriterier for luminanskontraster er $C_W = 0,8$ for farevarsling og $C_W = 0,4$ for oppmerksomhet (KMD, 2017), der positive og negative kontraster behandles likt. I hht til Burkhardt et.al., er perseptuell lyshet ned til svært lave luminanser symmetrisk for positive og negative kontraster, når C_M' benyttes som skala. Vi ser av figur 4.2-13 at dette bryter med bruken av absoluttverdien av Webers luminanskontrast.

Tabell 4.2-1 viser korresponderende kontrastverdier av C_M' for grenseverdiene byggeforskriftene har for Webers luminanskontrast.

Tabell 4.2-1: Korresponderende C_M' for norske byggeforskrifter (KMD, 2017). Beregning: Jonny Nersveen

C_W	C_M'
-0,8	-0,67
-0,4	-0,25
0,4	0,17
0,8	0,29

Fra tabell 4.2-1 ser vi at for negative kontraster, representerer relativ økningen i Webers luminanskontrast $0,67/0,25 = 2,68$, når vi sammenlikner luminanskontrast for farevarsling og oppmerksomhet. Tilsvarende relativ økning for positive kontraster er 1,71. Dette er bare et eksempel, men la oss si at man eksempelvis er fornøyd med $C_M' \geq 0,25$ for oppmerksomhet og det dobbelte, dvs. $C_M' \geq 0,5$ for farevarsling. Da kan vi regne oss tilbake til hvilke verdier for Webers luminanskontrast som korresponderer med disse verdiene. Beregningen er vist i tabell 4.2-2.

Tabell 4.2-2: Korresponderende C_W basert på perseptuell symmetri for $C_M' = 0,5$ og $0,25$. Beregning: Jonny Nersveen.

C_M'	C_W
-0,5	-0,67
-0,25	-0,40
0,25	0,67
0,5	2,00

4.3 Perseptuell kontrast

Vi har ikke erfaring med kravsetting relatert til C_M' i Norge, og det er ukjent for forfatteren om dette har vært brukt i andre land som ytelseskrav til universell utforming. I kapittel 3.3.7 er lyshetsgraden i NCS beskrevet, og denne har vært brukt som ytelseskrav bl.a. av Statens vegvesen for utendørsforhold relatert til universell utforming. Det kan derfor være interessant å se på sammenhengen mellom lyshetskontrasten K_{NCS} og C_M' .

NCS tar utgangspunkt i matt refleksjon, dvs. Lamberts cosinuslov, og dermed at refleksjonsfaktoren er proporsjonal med luminansen. Se kapittel 3.3.7.

Sammenhengen mellom en flates lyshet i NCS og flatens refleksjonsfaktor er i hht likning 3.3.7-1:

$$\delta = \frac{0,56 \cdot \nu}{(1,56 - \nu)} [\%] \quad [\text{Likning 3.3.7-1}]$$

Sammenhengen mellom en flates refleksjonsfaktor og luminansen, når flaten følger Lamberts cosinuslov, er i hht til likning 3.2-18:

$$L = \frac{\delta \cdot E}{\pi} \quad [\text{Likning 3.2-18}]$$

Ved å kombinere likning 3.3.3-1 med likning 3.2-18 og 3.3.7-1, får vi sammenhengen mellom

K_{NCS} og C_M' :

$$C_M' = \frac{(K_{NCS} + V_b) \cdot (1,56 - v_b) - v_b \cdot (1,56 - K_{NCS} - V_b)}{(K_{NCS} + V_b) \cdot (1,56 - v_b) + v_b \cdot (1,56 - K_{NCS} - V_b)} \quad [\text{Likning 4.3-1}]$$

der:

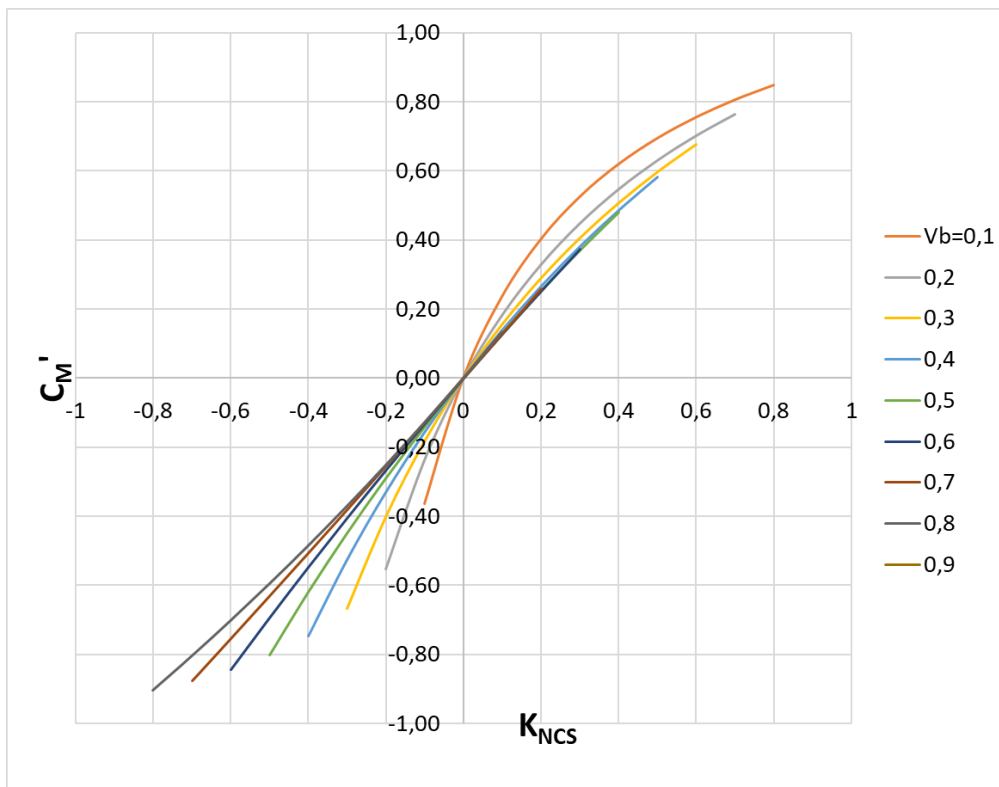
C_M' = Michelsons formel, men basert på ett objekt sett mot en bakgrunn

K_{NCS} = lyshetskontrast etter NCS

v_b = bakgrunnens lyshetsgrad etter NCS

Det påpekes at gyldigheten av likning 4.3-1 forutsetter at kontrasten kun er skapt av reflekterende lys fra flatene, jevn belysning på kontraststedet og matt overflate.

Figur 4.3-1 viser C_M' som funksjon av lyshetskontrasen K_{NCS} og bakgrunnens lyshetsgrad, v_b :



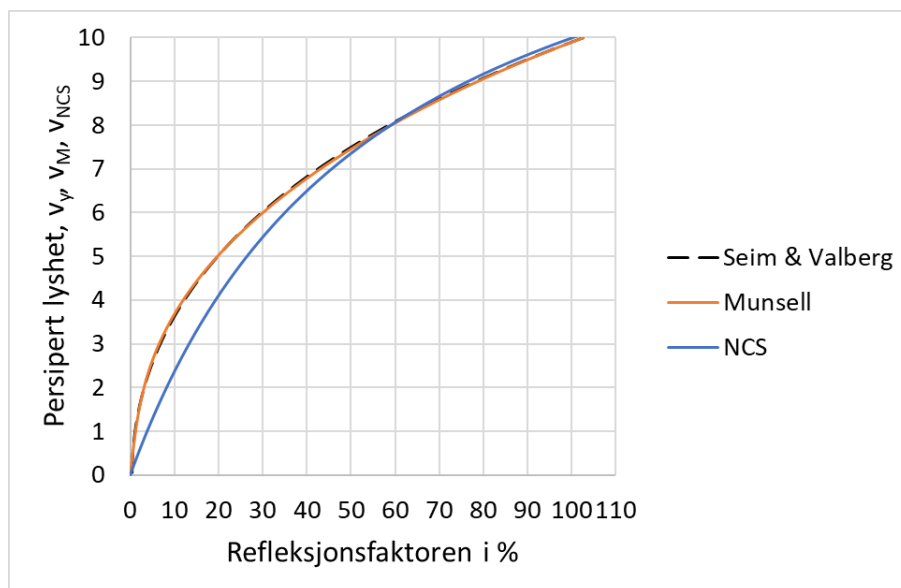
Figur 4.3-1: C_M' som funksjon av K_{NCS} og v_b : Beregning og kurveframstilling: Jonny Nersveen.

Av figur 4.3-1 ser vi at det ikke er noen entydig lineær sammenheng mellom resultatene fra Burkhardt et.al. og NCS sitt system. NCS er basert på grunnlaget som Munsell beskrev med like trinn i lyshet (Tonnquist, 1995). Følgelig må man forvente at lyshetskontrasten er nær perseptuelt lineær. Hvis denne antakelsen stemmer, er ikke Michelsons skala for C_M' lineær for lave bakgrunsluminanser.

Figur 4.3-2 viser persipert lyshet basert på Munsell, v_M , Seim og Valberg, v_y , og NCS v_{NCS} , som funksjon av flatens refleksjonsfaktor. Det må oppgis her, at Munsell og Seim og Valberg benyttet $y = 100 \frac{L}{L_w}$, som er tilnærmet det samme som refleksjonsfaktoren, mens NCS bruker refleksjonsfaktoren, δ , definert av CIE. CIE's definisjon av refleksjonsfaktoren er den samme som den

trikromatiske parameteren y . Forskjellen mellom $100 \frac{L}{L_w}$ og δ er imidlertid ubetydelig. Forskjellen på kurvene har ikke opphav i bruk av y eller δ , men heller hvilken referanse som er benyttet som bakgrunn under målingene. Som figur 4.2-3 viser, vil bakgrunnens lyshet påvirke skalaen til perseptuell lyshet.

Standardfeilen mellom v_{NCS} og V_M er $SE = 0,35$, ved $n = 1000$, når persipert skala går fra 0 til 10. De største avvikene er for de mørkest flatene, dvs. når bakgrunnen har lav refleksjonsfaktor. Som vi ser i figur 4.3-1, er det ved mørk bakgrunn vi finner forskjeller mellom C_M' og K_{NCS} , dvs. i de samme områdene som vi ser mellom C_M' og K_{NCS} . Avvikene er større for positive enn for negative kontraster.



Figur 4.3-2: Sammenlikning av persipert lyshet for Seim og Valberg, Munsell og NCS, som funksjon av flatens refleksjonsfaktor. Beregning av kurver: Jonny Nersveen.

Fra likning 4.2-7 ser vi at sammenhengen mellom C_M' og C_w er uavhengig av luminansen, fordi begge er luminansbasert. Fra likning 4.3-1 ser vi at bakgrunnens lyshet, v_b , objektet sees mot, inngår som parameter når vi sammenlikner NCS sin lyshetskontrast, K_{NCS} , mot C_M' . v_b 's rolle er korrigering for adaptasjonens innflytelse på perseptuell lyshet. Vi kan se at v_b 's innflytelse reduseres med økende bakgrunsluminans.

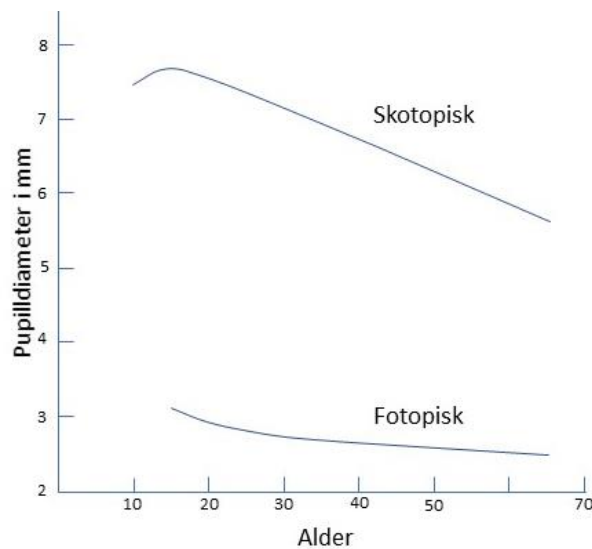
Sammenlikner vi figur 4.2-12 og 4.3-1, kan vi til en viss grad kjenne igjen formen på kurven i figur 4.3-1. Fordelen med C_M' er at den er symmetrisk, der man kan benytte positive og negative kontraster uten å tenke på fortegnet. Fordelen med NCS lyshetskontrast, K_{NCS} , er at den er å regne som symmetrisk, men har den ulempen at den krever matte flater og jevn belysning. Kontraster kan skapes både av ulike lyshetsgrader/luminanser, men også av lys i seg selv som endrer persipert kontrast. Dette kan fanges opp av C_M' , men ikke av K_{NCS} . Derfor er ikke løsningen uten videre å gå over til lyshetskontraster, selv om den har åpenbare fordeler.

Et spørsmål man må stille seg er om det er mulig å bruke K_{NCS} , med mulighet for å legge til en kontrast som er forårsaket av lyskildeskapt luminans som et tillegg. Dessverre er det ikke mulig å forfølge denne ideen videre i denne publikasjonen, grunnet prosjektets begrensede ressurser.

4.4 Tap av kontrast

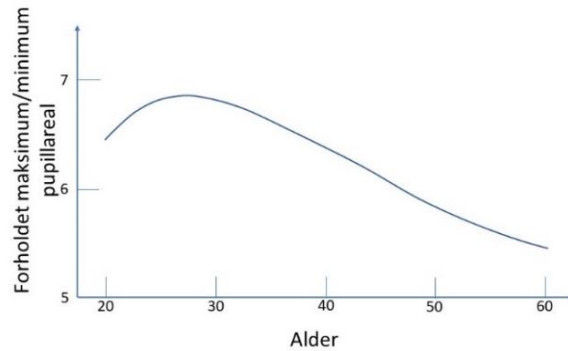
Sensibilitet for kontraster påvirkes av flere forhold. Med alderen reduseres pupillåpningen, med påfølgende redusert netthinne stimulans (Høvding *et al.*, 2016). Naturlige aldersendringer i øyelinsene (gulning) gir transmisjonstap som også fører til uklar kontrast på netthinna og redusert netthinnestimulans. Synsnedsettende blinding fører til spredning av lyset i glasslegemet, og som skaper en sløringsluminans som reduserer kontrasten på netthinna. En rekke øyesykdommer påvirker både synsnedsettende blinding og netthinns evne til å oppfatte kontraster. For spesifikke øyesykdommer henvises til Lærebok i lys, belysning og svaksynthet, 2022 (Nersveen, 2022).

En meget kjente forsker som har jobbet med resulterende stimuli av netthinna er Weale, hvor han i årevis har studert konsekvenser av aldringen i pupill og øyelinse. Figur 4.4-1 viser en publisert kurveframstilling laget av Weale (Weale, 1961), satt sammen av tre tidligere studier utført av Birren&Casperson&Botwinnick&Geront, Kadlekova&Peleska&Vasko og Leinhos. Vi ser her at pupillåpningen reduseres kraftig med alderen for skotopisk adaptert øye, men i betydelig mindre grad ved fotopisk adaptasjon. Resultatet er ikke overraskende for fotopisk adaptert øye. Man kan ikke få mindre pupillåpning enn det som er mulig. For et øye som er fotopisk adaptert, uten forekomst av isokori med defekt pupillreaksjoner eller mydriasis, vil pupillåpningen være liten (Nersveen, 2022; Høvding, 2016). Den store endringen på skotopisk side skyldes endringen i styrkeforholdet mellom dilatatormuskelen som trekker pupillen sammen og sfinktermuskelen som åpner den.



Figur 4.4-1: Pupillåpning som funksjon av alder ved skotopisk og fotopisk adaptert øye. (Weale, 1961). Reproduksjon av kurve: Jonny Nersveen.

Den store endringen som skjer med begrensninger i pupillarealet ved stigende alder, kan sees i figur 4.4-2. Kurven er et resultat fra to forskjellige studier utført av Weale og Saide. (Weale, 1961). Den maksimale pupillstørrelsen vil oppstå ved helt mørkeadaptert øye (skotopisk), og den minste ved fullt dagadaptert øye (fotopisk). Denne endringen påvirker øynenes tilpasningsevne til ulike lysnivåer i stor grad.

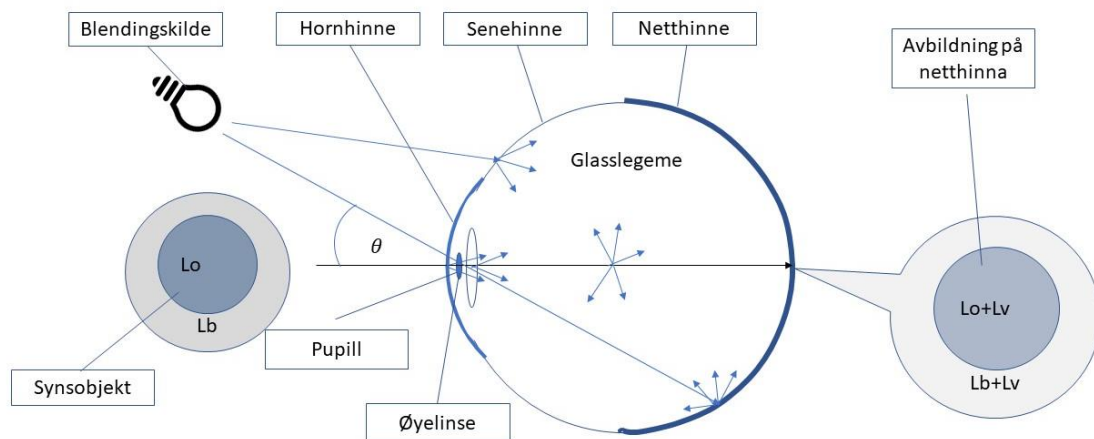


Figur 4.4-2: Studie av forholdet mellom maksimal og minimal pupillareal som funksjon av alder. (Weale, 1961).
Reproduksjon av kurve: Jonny Nersveen.

Lysets stimulering av netthinna måles på utsiden av øyet, enten i form av luminans eller troland. Luminanser fanger ikke opp aldersendringer, mens troland gjør det bare til en viss grad. For et ungt menneske er grensen for fotopisk adaptert øye, ca. 3 cd/m^2 , men denne grensen forflytter seg mot høyere terskelverdier med alderen. Dette påvirker luminansterskelverdien for fargesynet.

Holladay var av de første som studerte synsnedsettende blinding og beskrev prosessen som en sløringsluminans som legger seg over avbildningen av synsobjektet på netthinna (Hopkinson og Collins, 1970). Figur 4.4-3 illustrerer hva som skjer i det optiske systemet i øyet.

Glasslegemet består av en geléaktig væske som inneholder en viss forurensning som fører til lysspredning i glasslegemet. Senehinna lekker noe lys, både hornhinna og øyelinsen sprer noe av lyset, og netthinna er jo ikke sort – den reflekterer også lys. Alt dette uønskede lyset spres rundt i glasslegemet og noe av det legger seg over synsobjektavbildningen på netthinna. Holladay kalte dette for tilsløring av synsobjektet og beskrev det som en *sløringsluminans* (*veiling luminance*). (Hopkinson og Collins, 1970).



Figur 4.4-3: Synsnedsettende blinding. Illustrasjon: Jonny Nersveen.

Sløringsluminansen er strølyset som legger seg som en lyshinne over avbildningen av synsobjektet på netthinna. Formelen som benyttes for å beregne Holladays sløringsluminans, er:

$$L_v = k \frac{E}{\theta^2} \text{ [cd/m}^2\text{]} \quad \text{[Likning 4.4-1]}$$

der:

L_v = sløringsluminansen [cd/m²]

k = aldersavhengig faktor,

E = belyningsstyrken, forårsaket av blendingskilden, målt på øyet i retning synsobjektet [lux]

θ = vinkelen definert i figur 5.13.2-1 [grader]

Konsekvensen av synsnedsettende blending er svekkelse av kontrasten. Med utgangspunkt i Webers luminanskontrast, likning 3.3.2-2, kan likningen modifiseres ved å legge til sløringsluminansen, L_v , i alle ledd:

$$C_W = \left| \frac{(L_o + L_v) - (L_b + L_v)}{(L_b + L_v)} \right| = \left| \frac{L_o - L_b}{(L_b + L_v)} \right| = \left| \frac{L_b}{(L_b + L_v)} \cdot \frac{(L_o - L_b)}{L_b} \right| = D \cdot \left| \frac{(L_o - L_b)}{L_b} \right| \quad \text{[Likning 4.4-2]}$$

der:

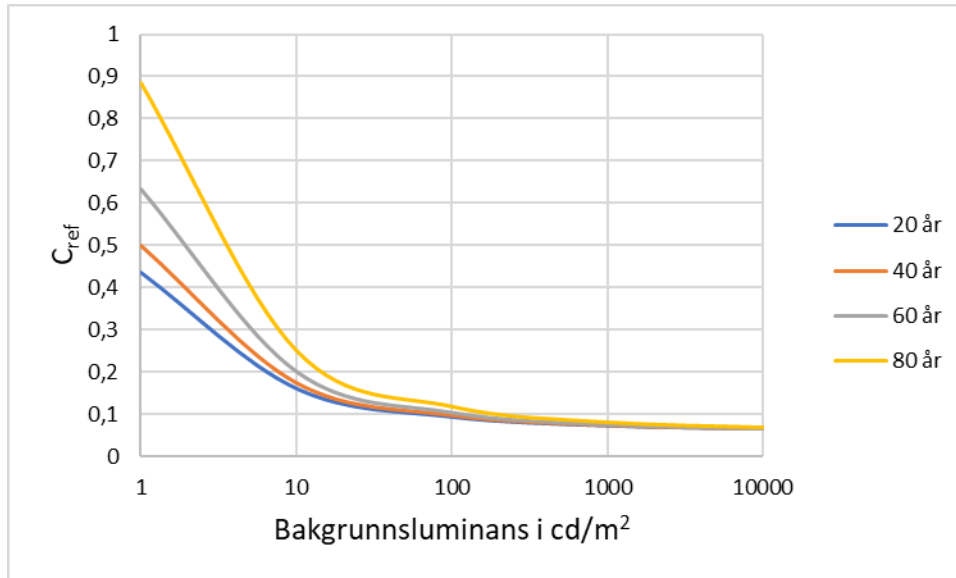
$$D = \frac{L_b}{(L_b + L_v)} \quad \text{(kalt blendingsgraden)} \quad \text{[Likning 4.4-3]}$$

L_o = objektluminansen [cd/m²]

L_b = bakgrunnsluminansen [cd/m²]

L_v = likning 5.13.2-1 [cd/m²]

Blackwells arbeid, som munnet ut i likning 4.1-6, inneholdt også studier av tap av kontrastsensibilitet, knyttet til alder. Utgangspunktet er naturlige synsendringer, der ikke spesifikke øyesykdommer er med i dataene. I utgangspunktet gjelder dataene for naturlige synsendringer, men i hht til Nordisk lærebok i oftalmologi, har alle personer over 70 år med eller mindre grad av utviklet grå stær (senil katarakt) (Høvdning *et al.*, 2016). Vi må derfor forvente at katarakt har påvirket resultatene. Figur 4.4-4 viser alderens innflytelse på referanseterskelkontrasten, C_{ref} , beregnet ut fra likning 4.1-6.



Figur 4.4-4: Referanseterskelkontrasten, C_{ref} , som funksjon av bakgrunsluminansen og alder. Beregning: Jonny Nersveen.

Blackwells arbeid er kun basert på positive kontraster, og kan bli større enn 1. Som figur 3.4-2 viser, kan negative kontraster aldri bli høyere enn absoluttverdien 1. Vi kommer ikke borti fra at Blackwells kontrastskala har en del utfordringer.

En annen måter å beregne tap av kontrast på, er DGF, definert i ANSI-standarden LS-1-21 (ANSI/IES):

$$DGF(\text{disability glare factor}) = \frac{VL(\text{ikke uniform bakgrunn})}{VL(\text{uniform bakgrunn})} \quad [\text{Likning 4.4-4}]$$

der:

VL = synlighetsnivået i hht likning 4.2-4.

Under beregning av VL ved ikke uniform bakgrunn, brukes en ekvivalent sløringsluminans som er den reelle bakgrunsluminansen:

$$L_e = \frac{L_b + L_v}{1,074} \quad [\text{Cd/m}^2] \quad [\text{Likning 4.4-5}]$$

der:

L_e = ekvivalent bakgrunsluminans $[\text{cd/m}^2]$

L_b = synsobjektets bakgrunsluminans $[\text{cd/m}^2]$

L_v = sløringsluminansen $[\text{cd/m}^2]$

Forskjellen på blendingsgraden D og DGF er at blendingsgraden D kun forteller oss om den fysiske endringen i kontrasten, mens DGF forteller oss om kontrasttapet der kontrastfølsomhet også regnes inn. I valget av disse to er DGF absolutt å foretrekke.

Aldersrelatert tilgrumming av øyelinsen (også kalt gulning), har blitt grundig studert. Denne type studier gjøres bl.a. ved å måle lensens lysabsorpsjonsevne på linser hentet fra

døde mennesker, og det er gjort en god del slike målinger. En øyelinse reflekterer en andel av innkommende lysmengde (δ), absorberer noe (α), og slipper det resterende gjennom (τ). Summen av disse er $\alpha + \delta + \tau = 1$. I slike studier er det vanlig å se på relativ mengde lys som ikke klarer å passere øyelinsen, dvs. den absorberende og den reflekterende evnen til linsen, og denne oppgis som *absorbans* (IUAPC, 2003). Absorbans er definert som negativ naturlig logaritme til forholdet mellom lysstyrken, I_s , som passerer øyelinsen og lysstyrken, I_0 , som treffer øyelinsen:

$$-Ln\left(\tau = \frac{I_s}{I_0}\right) = Ln\left(\frac{1}{\tau} = \frac{I_0}{I_s}\right) = \mu \cdot d = (\mu_s + \mu_a) \cdot d = Abs \quad [\text{Likning 4.4-6}]$$

der:

τ = transmisjonskoeffisienten

I_s = lysstyrken som passerer linsen [cd]

I_0 = lysstyrken som treffer linsen [cd]

$Abs = \mu \cdot d$ = absorbans

d = tykkelsen på mediet lyset sendes gjennom [m]

Transmisjonskoeffisienten deles igjen opp i to faktorer:

μ_s = spredningskoeffisient forårsaket av spredning av lyset i linsen

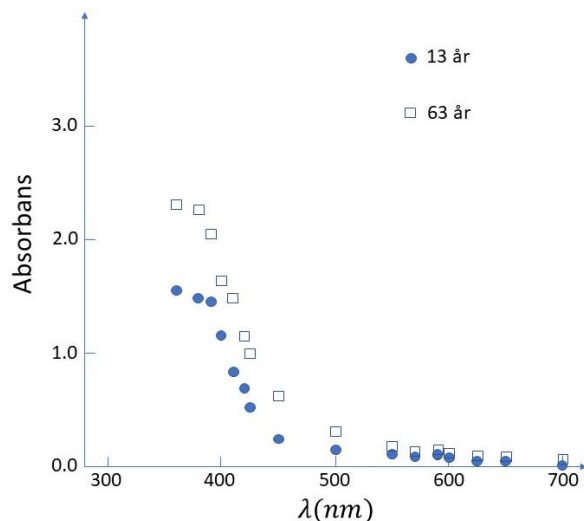
μ_a = absorpsjonskoeffisient forårsaket av absorbert lys i linsen

I litteraturen brukes også D som betegnelse for absorbans, men dette kommer i konflikt med samme betegnelse på blendingsgrad i denne publikasjonen. Jeg har derfor døpt om absorbans til *Abs* i beste mening. Absorbans betegnes også som optisk tetthet.

Teoretisk ville det vært ønskelig kun å måle absorpsjonskoeffisienten, men ofte blir dette komplisert. Absorbans kan derfor inneholde både elementer av refleksjon i linsen og lysspredning i tillegg til absorpsjon.

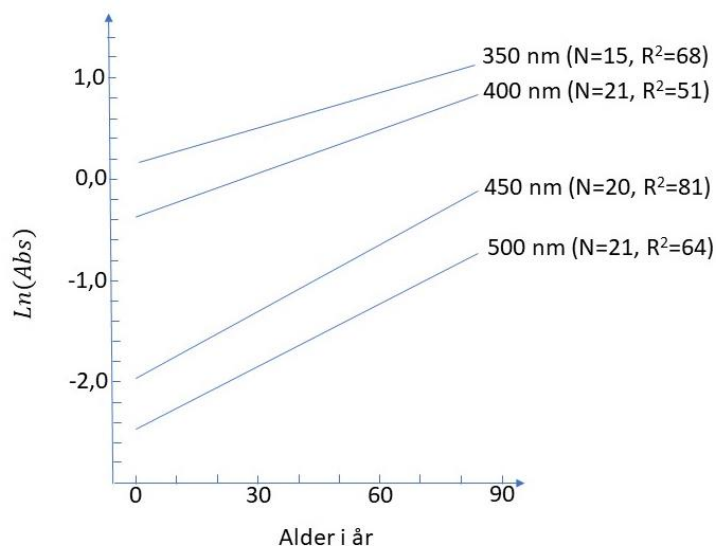
Hvis man kun måler lysspredning, dvs. strølys, er det vanlig å bruke briggske logaritme i stedet for naturlig logaritme.

Weale har gjennomført studier av absorbans. Absorbans påvirkes av øyelinsas tykkelse, og tykkelsen påvirker transmisjonstapet. For å eliminere denne unøyaktigheten, plasserte Weale øyelinsene slik at de fikk gitt tykkelse og gitt bredde. En slik studie er vist i figur 4.4-5, og er målinger på øyelinsen fra en 13 år gammel gutt og en 68 år gammel mann. Det viktigste her er ikke de eksakte verdiene, men sammenfallet av kurvenes utflatning. De store tapene i lystransmittans skjer på bølgelengder lavere enn 550 nm, dvs. i de kalde lysfargenes spekter. Dette forklarer hvorfor eldre mennesker opplever å se bedre i glødelampelys enn i moderne LED-lys som inneholder en vesentlig mengde blått lys. Det forklarer også effekten av bruk av filterbriller, der det kaldeste lyset blokkeres.



Figur 4.4-5: Målt absorbans på øyelinser fra to forskjellige personer. (Weale, 1988). Reproduksjon av kurve: Jonny Nersveen.

I figur 4.4-6 vises endringen av absorbans som funksjon av alder. Kurvene representerer regresjonslinjen for den naturlige logaritmen av absorbans. Den viktige informasjonen her er endringen per kurve. For kurvene for 450 og 500 nm, stiger absorbansen med nærme 1,5 logaritmisk enhet når man måler fra nyfødt og opp til 85 år. Dette berører den blå andelen av lyset, som igjen påvirker både adaptasjonen og stimuleringen av søvnhormonet melatonin. Går vi tilbake til figur 4.4-5, ser vi at transmisjonstapet i øyelinsen er betydelig mindre for bølgelengder lengre enn 500 nm.



Figur 4.4-6: Regresjonslinjer fra 24 måleserier av $\text{Ln}(\text{Absorbans})$ som funksjon av alder. Kurven er reprodusert med basis i en måleserie publisert av Weale (Weale, 1988). Reproduksjon av kurve: Jonny Nersveen

Kurvene i figur 4.4-6 har sin bakgrunn i en regresjonsanalyse av $\text{Ln}(\text{Abs})$ som funksjon av alderen, er basert på 24 måleserier, og følger formelen (Weale, 1988):

$$\text{Ln}[\text{Abs}(\text{alder})] = \text{Ln}[\text{Abs}(0 \text{ år})] + \beta \cdot \text{Alder} \quad [\text{Likning 4.4-7}]$$

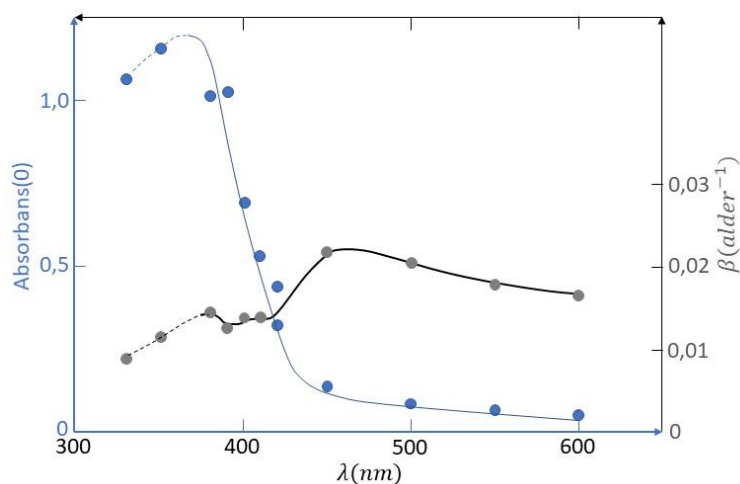
Ved å løse ut absorpsjonen, får vi:

$$Abs(alder) = Abs(0 \text{ år}) \cdot e^{\beta \cdot alder} \quad [\text{Likning 4.4-8}]$$

Øyelinsens transmisjon, τ , vil være:

$$\tau = \frac{I_s}{I_0} = e^{-Abs} \quad [\text{Likning 4.4-9}]$$

I figur 4.4-7 viser blå skala og kurve absorpsjonen for nyfødte avdøde øyelinser, mens grå kurve viser leddet $e^{\beta \cdot alder}$ som er relativ endring som funksjon av alderen. Høy absorpsjon er ensbetydende med stor grad av absorbert lys i øyelinsa, som igjen tilsvarer lav grad av transmisjon. Ut fra figur 4.4-7 ser vi at øyelinsa har best transmisjon i spekterområdet gult til rødt lys. Vi kan også legge merke til at kurveforløpet til β gjør et hopp i blått område og avtar igjen mot rødt bølglengdeområde.



Figur 4.4-7: Endring av absorpsjon som funksjon av alder. Reproduksjon av kurve: Jonny Nersveen.

Øyelinsa har høyest absorpsjon i blått spekter, mens den er lavere ved UVA og i synlig spekter ved lengre bølgelengder (varmere lys). Stiplede linjer viser spekter i UVA-område.

I likning 4.4-1 er Holladays formel for sløringsluminans, beskrevet:

$$L_v = k \frac{E}{\theta^2} \quad [\text{Likning 4.4-1}]$$

der:

L_v = sløringsluminansen [cd/m^2]

k = aldersavhengig faktor

E = belysningsstyrken målt på øyet i retning synsobjektet [lux]

θ = vinkelen definert i figur 5.13.2-1 [grader]

Konstanten, k , i likningen, er en aldersavhengig faktor slik Holladay beskrev den:

$$k = 9,05 \left[1 + \left(\frac{\text{Alder}}{66,4} \right)^4 \right] \quad [\text{Likning 4.4-10}]$$

Vi skal huske at Holladay hadde begrenset verktøy til å studere denne sammenhengen, og lyskilden var kun glødelampen. Det har imidlertid i senere tid blitt gjort omfattende arbeider i dette temaet, og CIE har vedtatt ny formel for strølys.

Strølys i øyet er sterkt aldersavhengig, rammer i betydelig grad personer over 70 år og er en kjent årsak til redusert netthinnebelysning fordi objektluminansen spres over et større område enn der objektavbildningen skulle vært.

Strølysparmeteren ble i sin tid utviklet av van den Berg i The Netherlands Ophthalmic Research Institute/Netherlands Institute for Neuroscience, og er en målestokk på grad av spredningen av lyset. (van den Berg *et al.*, 2013). I den sammenheng ble også punktspredningsfunksjonen, PSP , definert:

$$\text{Strølysparmeter} = s = \Theta^2 \cdot \frac{L_{ekv}}{E_{bl}} = \Theta^2 \cdot PSF = 10^{[C \cdot (1 + (\frac{\text{alder}^4}{D_a}))]} \quad [\text{Likning 4.4-11}]$$

der:

s = strølysparmeter

Θ = vinkelen mellom linje øye - blendingskilde og synsretningen [grader]

L_{ekv} = ekvivalent sløringsluminans [cd/m^2]

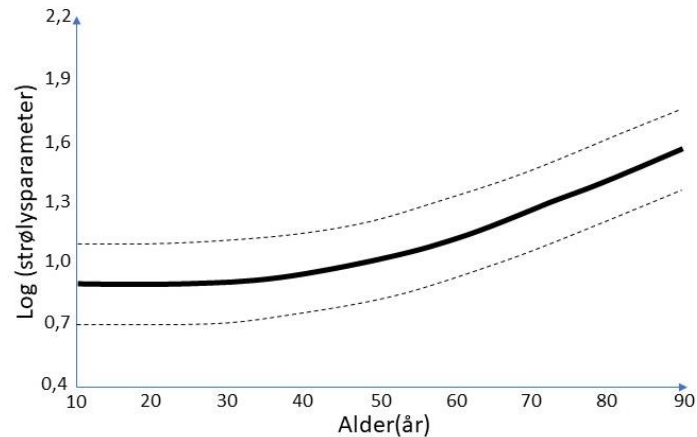
E_{bl} = belysningsstyrken forårsaket av blendingskilden, målt i synsretningen [Lux]

PSP = punktspredningsfunksjon

D_a = gjennomsnittlig alder der strølysparmeteren doubles [år]

Holladay brukte $D_a = 66,4$ år i likning 4.4-2, mens van den Berg benyttet 65 år. Generelt kan sies at D_a ligger mellom 62,5 og 70 år (van den Berg *et al.*, 2013).

Figur 4.2-8 viser resultatet fra en stor studie hvor man målte strølysparmeteren som funksjon av alder. I figuren er heltrukken linje beregnet regresjon, mens prikkede linjer viser grensene for 95% konfidensintervall. Vi ser at strølys først gjør seg gjeldende etter ca 40-årsalderen.



Figur 4.2-8: Log (strølysparameter) som funksjon av alder. (van den Berg, 2007). Reprodusert kurve: Jonny Nersveen.

Løser vi ut ekvivalent bakgrunns luminans L_{ekv} fra likning 4.2-3, får vi:

$$L_{ekv} = E_{bl} \cdot PSF \quad \text{[Likning 4.4-12]}$$

Som for absorpsjon er det vanlig å uttrykke strølysparameteren logaritmisk, men med briggsk logaritme, dvs.:

$$\text{Log}(\text{strølysparameter}) = \text{Log}(s) = C \cdot \left[1 + \left(\frac{\text{alder}^4}{D_a} \right) \right] \quad \text{[Likning 4.4-13]}$$

Strølysparameteren påvirkes av flere forhold enn det som framkommer i likning 4.4-11, og derfor har CIE definert en standard testobservatør. Dette er en svært komplisert likning:

$$PSF = \frac{10}{\theta^3} + \left(\frac{5}{\theta^2} + \frac{0,1 \cdot p}{\theta} \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{A}{62,5} \right)^4 \right] + 2,5 \cdot 10^{-3} \cdot p \quad \text{[Likning 4.4-14]}$$

der:

PSF = punktspredningsfunksjonen

θ = vinkelen mellom linje blendingskilde og synsretningen [grader]

A = alder [år]

p = pigmentfaktor, der $p=0$ for svært mørke øyne, $p=0,5$ for brune øyne og $p=1$ for blå-grønne øyne.

Ser vi bort fra pigmentfaktoren, ender likning 4.2-6 med:

$$PSF = \frac{10}{\theta^3} + \left(\frac{5}{\theta^2} \right) \cdot \left[1 + \left(\frac{A}{62,5} \right)^4 \right] \quad \text{[Likning 4.4-15]}$$

Det hører med til historien at van den Berg har en betydelig mer nøyaktig formel for PSF , men at CIE ikke valgte å benytte den.

Alderens totale virkning på netthinnebelysningen består av tre generelle fenomener; redusert pupillåpning, redusert transmisjon i øyelinsene og økt strølys i glasslegemet. I figur 4.4-1 kan vi lese av endringen i maksimal pupillåpning for både fotopisk og skotopisk adapterte øyne. For fotopisk

adapterte øyne, reduseres netthinnebelysningen fra optimalt nivå til ca 60% fram til 65 år. Tilsvarende for skotopisk adaptasjon reduseres netthinnebelysningen til ca 50%. Fra figur 4.4-5 kan vi regne oss fram til resterende transmisjon til ca 80% for grønnfarge (500 nm). Til sammen reduseres netthinnebelysningen med litt i overkant av 50% når øynene er fotopisk adaptert. Dette vil si at vi må doble belyningsstyrken for å kompensere for tapet i pupillen og øyelinsa. Absorbansen sier kun noe om lystransmisjon generelt, og ikke lysmengden som treffer sentral del av netthinna. Hvis vi forenkler litt, og benytter Holladays formel for sløringsluminans, likning 4.4-1, så har den et aldersledd i faktoren, k . Faktoren, k , er proporsjonal med sløringsluminansen, L_v . Sammenlikner vi 65 år med nyfødt, så dobles faktoren, k . Ved å kombinere likning 4.4-3 og 4.4-10, kan vi skrive likning 4.4-3 som:

$$D = \frac{1}{1 + \frac{L_v}{L_b}} = \frac{1}{1 + \frac{9,05 \left[1 + \left(\frac{\text{alder}}{66,4} \right)^4 \right] \cdot \frac{E}{\Theta^2}}{L_b}} \quad [\text{Likning 4.4-16}]$$

der:

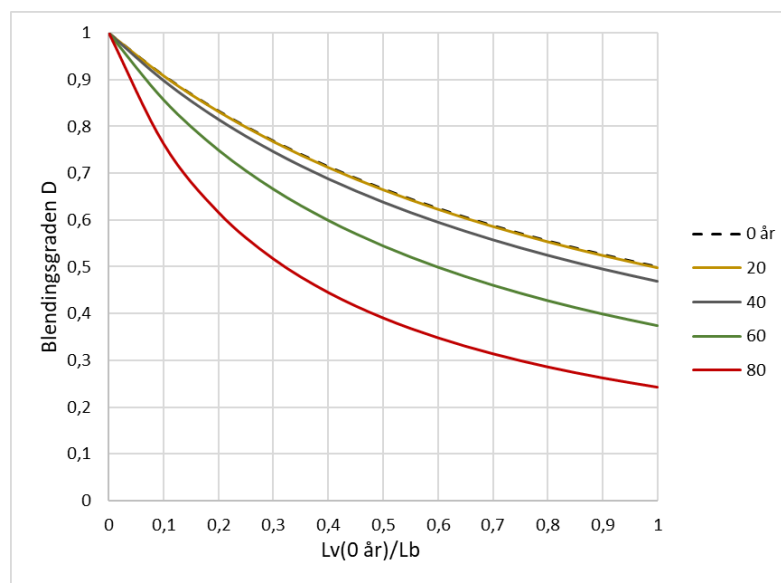
D = blendingsgraden

Θ = vinkelen mellom synretningen og linjen øye – blendingskilde [grader]

E = belyningsstyrken forårsaket av blendingskilden [lux]

L_b = bakgrunsluminansen [cd/m^2]

Holder vi bakgrunsluminansen konstant og lar blendingskilden ha fast posisjon, vil uttrykket $L_b \cdot \Theta^2$ i likning 4.4-16 være en konstant. Da er det kun belyningsstyrken E og alder som endres i likning 4.4-16. Vi omdøper $\frac{9,05 \cdot E}{L_b \cdot \Theta^2}$ til et forholdstall som i realiteten er forholdet $L_v(0 \text{ år})/L_b$. Med denne forenklingen som utgangspunkt, kan vi tegne ut en kurveskare der vi kan se virkningen i alder. Virkningen vil være svært nær personer med mild katarakt. Figur 4.4-9 viser kurveskaren med forutsetningene som er oppgitt.



Figur 4.4-9: Alderens påvirkning på blendingsgraden, D . Beregning: Jonny Nersveen.

I figuren kan vi nå lese av hvor mye blendingsgraden, D , endres fra 0 til 60 år, når L_v eksempelvis er 50% av L_b . Ved 0 år blir $D = 0,67$. Ved 60 år blir $D = 0,55$. Endringen forårsaket av alderen fra 0 til 66 år er 18%, mens tapet forårsaket av blendingskilden er 33%. Det virkelig store tapet av netthinnebelysning er innskrenkningen av pupillåpningen. Når alle tre faktorene med redusert pupillåpning, redusert transmisjon i øyelinsene og strølys forårsaket av blinding, reduseres kontrastoppfattelsen betydelig. Fortuin hevdet at en 60 år gammel person må tredoble belyningsstyrken for å kompensere for visuelt alderstapet (Fortuin, 1963). Andre har hevdet at tallet er enda høyere (Bjørset, 1980).

Det er ikke bare kontrasttap som skjer på grunn av strølys. Strølyset legger seg som en hinne over opprinnelig synsobjektavbildning på netthinna. Har blendingskilden hvitt lys, så vil også strølyset bli tilnærmet hvitt. Objektavbildningen på netthinna blir derfor blandet ut med hvitt lys, og fargene vil blekes. Vi får noe av den samme effekten som ved å se mot horisonten på lang avstand, der fargene påvirkes av luften lyset må passere.

Innen lysteknikk er vi godt vant med Holladays formel, likning 4.4-1, for beregning av sløringsluminansen, L_v . Denne metoden fungerer ikke så godt for personer med synslidelser, da den er generell og ikke tar hensyn til øyesykdommer. Frandsen, Coppens og van den Berg utviklet derfor et måleinstrument som kunne måle reell sløringsluminans, for å kunne beregne reell ekvivalent sløringsluminans gyldig for personer særlig med katarakt. Målemetoden består i at testpersonen presenteres for en synsstimuli i form av en ring, med et sort felt i midten, hvor fokuseringspunktet er det sorte feltet. Ringen lyses opp med svakt flimrende lys. Deretter tilsettes det sorte feltet en økende luminans, inntil testpersonen ikke oppfatter flimringen lenger. For nærmere beskrivelse, vises til litteraturreferansen (Franssen, Coppens og van den Berg, 2006).

5 Oppsummering

Vårt visuelle synsapparat er fysiologisk skapt for å oppfatte visuelle kontraster, der noen celler har dedikerte oppgaver. Uten visuelle kontraster, har vi i praksis ikke noe fungerende syn. Det meste av verden ser vi faktisk ikke. Vi ser ikke enkeltatomer, om de ikke er kraftig forstørret. Vi ser heller ikke stjerner på dagtid på grunn av himmelluminansens synshemmede virkning. Det er normalt at noe er synlig og noe ikke. Utfordringen vi får, er når samfunnet som bygges forutsetter at visse elementer er synlig. For svaksynte som kanskje ikke ser elementene, øker dette risikoen for å skade seg eller ha orienteringsutfordringer. Dette er årsaken til at det er stilt luminanskrav til visuelle kontraster.

Under utviklingen av luminanskontrastkrav, både av byggeforskriftene og norske standarder, var kunnskap og oversikt over litteratur fra ulike fagfelt mangelvare. Det finnes mange varianter av metoder for beregning av visuelle kontraster. Ingen av dem er perfekte som dokumentasjonsmetode, selv om noen er bedre enn andre. Webers luminanskontrast, er den som historisk er mye brukt. Den er målbar, er knyttet opp mot betydelig forskningsresultater, men

fungerer dårlig for negative kontraster. En feil som begås her er at den tradisjonelt benyttes som absoluttverdi, selv om følsomheten for positive og negative kontraster ikke er lik.

Michelsons luminanskontrast, slik Michelson benyttet den, har sin historiske bakgrunn i følsomheten for å oppfatte sinusformede striper over hele synsfeltet. Nå har Michelsons formel også blitt brukt til andre studier enn striper. Dette er interessant fordi resultatene viser at positive og negative kontraster målt på denne metoden kan sidestille positive og negative kontraster perseptuelt. Imidlertid er ikke Michelsons formel lineær i forhold til perseptuell oppfattelse av lyshet.

Et par andre metoder er også nevnt i publikasjonen; RMS og luminansforholdet. RMS er hovedsakelig brukt innen skjermteknologi, også innen webdesign der man har kontroll med visuelle forhold. I en skjermteknisk verden kan man raskt med software analysere et bilde, og derved bruke det i en designprosess. Ute i et samfunn, uansett om det er innendørs eller utendørs, har man ikke full oversikt over forstyrrende elementer som kan påvirke en perseptuell prosess. Derfor vil heller aldri en RMS-beregning gi et sannferdig svar. Man kan selvsagt analysere et bilde av en scene, og analysere dette med en software, men ute i virkeligheten endres forholdene seg hele tiden. Derfor vil ikke en slik metode fungere i praksis.

Luminansforholdet er i bruk som dokumentasjon på skilting, eksempelvis som evakueringsskilt og skilting i industrien. Luminansforhold er kun en teknisk beskrivelse av et produkt. Det sier noe om produktet, men ikke noe om produktet i bruk. Det er heller ikke knyttet opp mot fysiologiske eller perseptuelle studier av synlighet.

Innen design og arkitektfag er RAL og NCS vanlig å bruke. Begge disse er koplet opp mot synsfysiologi. NCS er standarden i Europa som er mest brukt av arkitekter, og har både lyshet og kontrast utviklet for å være perseptuelt lineære. Hvor godt dette stemmer, kan nok diskuteres, men den er i hvert fall ikke dårligere enn de øvrige metodene. Ulempen til NCS er at den utelukkende tar utgangspunkt i fargepigmentene i flatene/objektene som sammenliknes, uten å korrigere for påvirkning av lyshet på grunn av belysningen. Det er å dekoppe seg fra virkeligheten. Netthinns mulighet til å oppfatte kontraster, har lyset som medium. Uten lys finnes ingen stimulering av netthinna. Jo kraftigere lys som bestråler objektet, jo mer vil fargene i objektet likne på lyskildens lysfarge når lyset når netthinna. Er lyskildens lys hvit, vil flaten til slutt bli seende hvit ut når lyset er kraftig nok. Lys kan også brukes bevisst for å oppnå kontraster, f.eks. med diodestriper, fluoriserende striper eller med lyskastere med goboforsats (forsats som gir projiserte lysfigurer på flater). Her er det lyset selv som skaper kontrastene, og ikke fargepigmentene. Det vi trenger er en dokumentasjonsmetode som kombinerer egenskapene til C_M' og K_{NCS} . Det er ikke mulig å gjøre en omregning fra C_M' til K_{NCS} uten å ha med bakgrunnens lyshet, og bakgrunnens lyshet kan bli påvirket av lys.

Slik norske byggeforskrifter er i dag, er det ytelseskrav, dvs. grenseverdiene, man må overholde. Å vite at man er på trygg side av loven, er en opplysning, men når skalaen ikke er lineær, er det vanskeligere å vurdere kvalitet. Kvalitet er mer enn å overholde loven. Hvor mye bedre er $CM'=1,0$ i forhold til 0,8. Ulempen med en ikke-lineær skala er at verdien av hvert trinn i skalaen ikke er lik. Slik

er det ikke med K_{NCS} , der hensikten er at hvert trinn i skalaen skal ha lik betydning. Det gir mer kvalitativ informasjon. Sammenhengen mellom K_{NCS} og C_M' , slik den er vist i denne publikasjonen, baserer seg på at lyshet er skapt av reflektert lys. Den er ikke gyldig når emitterende lys eksisterer i tillegg til reflekterende lys fra fargepigmenter i en flater. Det er ikke rett fram å finne en god kombinasjon mellom disse.

Et forhold som aldri har vært oppe som tema i forskrifts- eller standardutvikling, relatert til visuelle kontraster, er krav til acutance. Både perseptuell oppfattelse og sensibilitet for kontraster påvirkes av graden av endring når to ulike luminanser møtes. Her vises til Burkhardt et al. sine studier ,gjengitt i denne publikasjonen. og til professor Arne Valbergs lærebok om spatial kontrastfølsomhet generelt. (Burkhardt *et al.*, 1984; Valberg, 1998).

Kontrasttap er også noe som må tas hensyn til, og denne kan være betydelig. Når man setter ytelseskrav i forskrifter og standarder, kan dette fanges opp ved å øke kravet.

Denne publikasjonen har avdekket store svakheter ved Webers luminanskontrast, men har ikke et klart svar på hva den skal erstattes med. Kan man akseptere å benytte en ikke-lineær skala, er C_M' å foretrekke. I så fall må det gjøres et arbeid med vurdering av ytelseskrav. Utgangspunktet er målte eller beregnede luminanser, noe vi også gjør i dag med Webers luminanskontrast. Kreves perseptuell lineær skala, kan verken Webers luminanskontrast eller Michelsons, C_M' benyttes direkte. Ved diffus refleksjon og jevn belysning på kontrastmålepunktet er K_{NCS} den beste løsningen.

6 Referanser

- ANSI/IES ANSI/IES LS-1-21. Lighting Science: Nomenclature and Definitions for Illuminating Engineering.: IES.
- Bjørset, H.-H. (1980) *Lysteknikk - lys og belysning*. Universitetsforlaget.
- Boynton, R. M. og Whitten, D. N. (1970) Visual adaptation in monkey cones: recordings of late receptor potential, *Science*, 1970 - science.sciencemag.org, 170.
- Burkhardt, D. A. *et al.* (1984) Symmetry and constancy in the perception of negative and positive luminance contrast, *Journal of the Optical Society of America A*, 1(3), s. 309-316. doi: 10.1364/JOSAA.1.000309.
- CIE (1981) Technical Report: An Analytic Model for Describing the Influence of Lighting Parameters upon Visual Performance (b. Pulbicztion no 10/2.1): CIE.
- CIE (1995) Method of Measuring and Specifying Colour Rendering Properties of Light Sources: Technical Report: CIE 13.3-1995, i. CIE.
- CIE (2004) Colorimetry, 3rd edition. CIE 15:2004. Commission Internationale de l'Eclairage, Vienna: CIE.
- CVRL (2018) CIE 2006 LMS functions - Luminous efficiency 2 degree. CVRL: Institute of Ophthalmology, University College London. Tilgjengelig fra: <http://www.cvrl.org/>.
- CVRL (2022) *CIE 2006 LMS functions - Luminous efficiency 2 degree*. . <http://www.cvrl.org/>: CVRL: Institute of Ophthalmology, University College London. Tilgjengelig fra: <http://www.cvrl.org/>
- David, A. *et al.* (2015) Development of the IES method of evaluating the color rendition of light sources., *Optics Express*, 23 (12), s. 15888-15906.
- Davis, W. og Ohno, Y. (2010) Color Quality Scale, *Optical Engineering* 49, no. 3: 033602–033602–16. doi: doi:10.1117/1.3360335.
- Fairchild, M. D., Luo, M. R. og Hunt, R. W. G. (2000) A Revision of CIECAM97s for Practical Applications, *Color Research & Application*. Wiley Interscience, 25. doi: doi:10.1002/1520-6378.
- Feschner, G. T. (1948) Elements of psychophysics, 1860. , *Readings in the history of psychology*. Appleton-Century-Crofts., s. 206–213. doi: <https://doi.org/10.1037/11304-026>.
- Fortuin, G. J. (1963) AGE AND LIGHTING NEEDS, *Ergonomics*, 6(3), s. 239-245. doi: 10.1080/00140136308930703.
- Franssen, L., Coppens, J. E. og van den Berg, T. J. T. P. (2006) Compensation Comparison Method for Assessment of Retinal Straylight, *Investigative Ophthalmology & Visual Science*, 47(2), s. 768-776. doi: 10.1167/iovs.05-0690.
- Hopkinson, R. G. og Collins, J. B. (1970) *The ergonomics of lighting*. Macdonald & Company.

- Høvding et al. (2016) *Oftalmologi. Nordisk lærebok og atlas*. John Grieg Grafisk AS, Bergen.
- Itten, J. og Veres, P. (1961) *The Art of Color the Subjective Experience and Objective Rationale of Color*. Wiley.
- Judd, D. B. (1951) Colorimetry and artificial daylight. Report of U.S. secretariat. Committee of Colorimetry, CIE 1951. , *Proceedings 1, CIE 12th session*.
- KMD (2017) *Byggeteknisk forskrift (TEK 17)*. Oslo: Lovdata. Tilgjengelig fra: <https://lovdata.no/dokument/SF/forskrift/2017-06-19-840?q=byggeteknisk%20forskrift>.
- Lucas, R. J. et al. (2014) Measuring and using light in the melanopsin age, *Trends in Neurosciences*, 37(1), s. 1-9. doi: <https://doi.org/10.1016/j.tins.2013.10.004>.
- Maître, H. (2015) *Image Quality From Photon to Pixel*. s. 205-251.
- Mammen, J. (1994) En praktisk-realistisk teori for erkendelse af kvantiteter, *Perspektiver i samfundsvidenskaben. Faglige bidrag i anledning af Erik Harsaaes*, s. 165-185.
- Masland, R. H. (2012) The neuronal organization of the retina, *Neuron*, 76(2), s. 266-280. doi: 10.1016/j.neuron.2012.10.002.
- Maxwell, J. C. (1865) A dynamical theory of the electromagnetic field, *Phil. Trans., R. Soc*, A373:20140473. doi: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0473>.
- McDougal, D. H. og Gamlin, P. D. (2010) The influence of intrinsically-photosensitive retinal ganglion cells on the spectral sensitivity and response dynamics of the human pupillary light reflex, *Vision Research*, 50(1), s. 72-87. doi: <https://doi.org/10.1016/j.visres.2009.10.012>.
- Michelson, A. (1927) *Studies of Optics*. U. of Chicago Press.
- Miescher, K., Richter, K. og Valberg, A. (1982) Farbe und Farbsehen, Beschreibung von Experimenten für die Farbenlehre, *Farbe + Design*, 23/24. Tilgjengelig fra: <https://opus4.kobv.de/opus4-bam/frontdoor/index/index/docId/8951>.
- Munsell, A. H. (1929) *Munsell Book of Color*. Munsell Color Company, Inc.
- Nersveen, J. (2022) *Lærebok i lys, belysning og svaksynthet. En lærebok for høgskoler og universiteter*. Lys- og uu-kompetanse.no: Dr. Nersveen Lys- og uu-kompetanse.
- Newhall, S. M., Nickerson, D. og Judd, D. B. (1943) Final Report of the O.S.A. Subcommittee on the Spacing of the Munsell Colors*, *Journal of the Optical Society of America*, 33(7), s. 385-418. doi: 10.1364/JOSA.33.000385.
- Ohta, N. og Robertson, A. (2006) *Colorimetry: fundamentals and applications*. John Wiley & Sons.
- Pantone (2022) *Pantone Color Matching System* (Hentet: 05.04.2022 2022).
- Peli, E. (1990) Contrasts in complex images, *Journal of Optical Society of America*.

- Provencio, I. *et al.* (2000) A novel human opsin in the inner retina, *Journal of Neuroscience*, 20(2), s. 600-605.
- RAL (2020) *RAL Colours history*. Tilgjengelig fra: <https://www.ral-farben.de/en/history> (Hentet: 05.04.2022 2022).
- Records, E. (1979) *Physiology of the Human Eye and Visual System* Herper & Row, London.
- Schober, H. (1958) *Das sehen. Bin I og II*. Fachbuchferlag, Leipzig: Fachbuchferlag, Leipzig.
- Seim, T. og Valberg, A. (1986) Towards a uniform color space: A better formula to describe the Munsell and OSA color spaces, *Color Res. Appl.*, 11, s. 11-24.
- SNL (2016) Store Norske Leksikon.
- Standard Norge (2012) NS-ISO 3864-3: Grafiske symboler - Sikkerhetsfarger og sikkerhetsskilt - Del 1: Prinsipper for utforming av sikkerhetsskilter og sikkerhetsmerking. [/www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=524972](http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=524972): Standard Norge. Tilgjengelig fra: [/www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=524972](http://www.standard.no/no/Nettbutikk/produktkatalogen/Produktpresentasjon/?ProductID=524972).
- Stevens, S. S. (1960) On the New Psychophysics, *Scandinavian Journal of Psychology*, 1, s. 27-35.
- Teigen, K. H. (2004) *En psykologihistorie*. Fagbokforl.
- Tonnquist, G. (1995) *Färgsystemanalys*. Dagmar Design AB.
- Valberg, A. (1998) *Lys Syn Farge*. Tapir forlag, 7005 Trondheim.
- van den Berg, T. J. T. P. *et al.* (2013) History of ocular straylight measurement: A review, *Z Med Phys*, 23(1), s. 6-20. doi: 10.1016/j.zemedi.2012.10.009.
- Weale, R. A. (1988) Age and the transmittance of the human crystalline lens, *Journal of Physiology*, s. 577-587.
- Wright, W. D. (1928) A re-determination of the trichromatic coefficients of the spectral colours, *Trans. Opt. Soc. London*, 30, s. 141-164.
- Wyszecki, G. (1963) Proposal for a New Color-Difference Formula, *Journal of the Optical Society of America*, 53(11), s. 1318-1319. doi: 10.1364/JOSA.53.001318.

Norsk forskningslaboratorium for universell utforming, NTNU

Norsk forskningslaboratorium for universell utforming ble startet opp i 2010, og eies i sin helhet av NTNU. Forskningslaboratoriet består av et sanselaboratorium for syn og hørsel, et fullskalalaboratorium for bygging og testing i målestokk 1:1, undervisningsrom, snekkerverksted og kontorfasiliteter. Forskningslaboratoriet har sin beliggenhet i Mustad Næringspark, Raufossveien 40, Gjøvik

Forskningslaboratoriet påtar seg oppdrag innen forskning, utredninger, produkttesting og produktutvikling, i tillegg til å drive utstrakt kursvirksomhet innen universell utforming.

En rekke offentlige institusjoner har bidratt med midler, og en rekke private firmaer har bidratt med gratis utstyr eller utstyr til sterkt reduserte priser, for at vårt laboratorium kunne oppstå. Disse institusjonene og firmaene er:

Oppland fylke

Hedmark fylke

Husbanken

NAV Hjelpemiddelsentral Oppland

AvDesign AS

Glamox Luxo Lighting

Topro AS

Tess AS

Montér AS

Kinnarps AS

YIT AS

Betonmast AS

Hunndalen Mur & Flis AS

Gudbrandsdal steinindustri AS

Handicare As

Vi takker institusjonene og firmaene for sin generøsitet.

Institusjonene og firmaene har ingen innflytelse på vår faglige integritet, innsyn i eller gjennomføringen av prosjekter.