

# Visualisering av multispektrale fargedata

Visualization of multispectral color data

Arne Magnus Bakke



Examensarbete  
Medieteknik  
Kungliga tekniska högskolan

---



Masteroppgave  
Master i teknologi, medieteknikk  
Høgskolen i Gjøvik, november 2004

## Forord

Dette er en rapport fra en masteroppgave i medieteknikk som er blitt gjennomført ved Høgskolen i Gjøvik (HiG) under oppsyn av Kungliga tekniska högskolan (KTH) i Sverige. Gjennomføringen av denne masteroppgaven hadde ikke vært mulig uten hjelp fra flere ressurspersoner ved HiG, og man kan trekke frem det gode fagmiljøet innen fargerelatert forskning som finnes på høgskolen. Jeg vil rette en stor takk til Dr. Jon Yngve Hardeberg og Dr. Ivar Farup ved HiG for deres innspill og entusiasme, som har vært til stor nytte ved uttenkningen av problemstillinger. Deres veiledning gjennom oppgavens gang har sørget for å belyse problemer.

I tillegg har enkelte personer involvert i andre multispektrale prosjekter ved HiGs fargelaboratorium kommet med innspill. Jérémie Gerhardt har bidratt med spektrale måledata, og disse har vært en forutsetning for testingen av idéer og algoritmer.

I denne rapporten har jeg som hensikt å undersøke forskjellige problemstillinger ved behandling av spektrale fargedata. En generell introduksjon av emnet vil bli etterfulgt av bakgrunnsinformasjon som er nødvendig for å forstå problemstillingene, før vi ser nærmere på en oversikt over tidligere arbeid innen dette og relaterte felt. Dersom leseren allerede er kjent med enkelte av emnene som omhandles i kapittelet med bakgrunnsinformasjon, kan man se det som hensiktsmessig å hoppe over dette. Dersom det motsatte er tilfellet, kan en rask gjennomgang av dette stoffet før man begynner på rapporten være nødvendig for å oppnå best mulig forståelse.

## Sammendrag

I enkelte sammenhenger er det aktuelt å arbeide direkte på de spektrale reflektansfordelingene til forskjellige overflater, i stedet for å bruke forenklete fargemodeller. Dette kan skyldes at man har et ønske om å ta hensyn til forskjellige lyskilder, eller at man vil analysere overflatens reflekterende egenskaper. De kontinuerlige fordelingene representeres ved å beskrive spektre med et visst antall komponenter, og en visning av spektrale data må ta hensyn til at dimensjonen til det resulterende datasettet kan bli høyt. Denne kompleksiteten medfører også at analyse av tallmaterialet blir vanskelig. Dette betyr blant annet at man har hatt problemer med å finne svar på om en enhet kan reprodusere et gitt fargespektrum. Vi vil presentere en metode for visualisering av spektrale fargeomfang, og se på hvordan den kan benyttes for å gi svar på om en enhet kan gjengi et tilfeldig valgt spektrum.

For å kunne foreta dette, vil vi benytte oss av eksisterende metoder for forenkling av datasett, samt vurdere alternativer for sammenligning av spektrale farger. Vi utvider konseptet reproduserbarhet, slik at vi ikke bestemmer hvorvidt en gitt spektral reflektanskurve kan gjengis, men også forsøker å finne ut hvordan den aktuelle fargen er posisjonert i forhold til et fargeomfangs overflate.

Som et relatert resultat foreslår vi en mulig metode for spektral fargeomfangstilpasning, det vil si prosessen å behandle farger (for eksempel i et bilde) slik at de kan gjengis av en enhet.

## Abstract

People who have an interest in the field of color imaging, sometimes find that they need to work on the spectral power distributions of surface reflectances. Traditional color models and color spaces are unable to accurately take into account the effects that different illuminants have on the perception of the color of a surface, whereas spectral based calculations perform better at this task. The spectral power distributions are usually represented by samples taken at a number of wavelengths. Up to 31 components are used to describe a spectrum, in order to preserve the desired level of detail. The high dimensionality of such data sets is inconvenient, since people are unable to easily analyze such data with regard to certain questions. This includes the task of deciding whether a spectrum is reproducible on a given output device. We plan to introduce a method for the visualization of multispectral color gamuts (the set of colors that a device can reproduce), and analyze how this can be used to find the answer to such questions.

In order to do this, we are going to take advantage of existing methods for simplifying sets of data, and review alternatives for the action of comparing spectral colors (spectral match). We expand the concept of reproducibility, and try to determine not only if a given spectral reflectance curve is within the spectral gamut of a device, but also to describe its position relative to the surface of the gamut.

As a related result, we suggest a possible method for spectral gamut mapping. This refers to the process of mapping spectral reflectances (e.g. multispectral images) from a source to a specific device gamut, in order to reproduce it on a medium.



## Innhold

<b>1</b>	<b>Introduksjon</b>	<b>1</b>
1.1	Multispektrale farger . . . . .	1
1.2	Problemet . . . . .	1
1.3	Motivasjon . . . . .	2
1.4	Forskningsspørsmål . . . . .	2
<b>2</b>	<b>Bakgrunn</b>	<b>4</b>
2.1	Spektral og tradisjonell fargeteori . . . . .	4
2.2	PCA . . . . .	5
2.3	Convex hull . . . . .	6
2.4	Quickhull . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Forskningsstatus</b>	<b>9</b>
3.1	Multispektrale fargeomfang . . . . .	9
3.2	Valg av dimensjon . . . . .	9
3.3	Visualisering av omfanget . . . . .	10
3.4	Reproduserbarheten til et reflektansspektrum . . . . .	11
<b>4</b>	<b>Metode</b>	<b>13</b>
4.1	Spektrale data og farger . . . . .	13
4.2	Spektrale fargeomfang . . . . .	14
4.3	Spektrale dataformat og standarder . . . . .	16
4.4	Qhull . . . . .	17
4.5	Valg av dimensjon . . . . .	18
4.6	Visualisering . . . . .	19
4.7	Reproduserbarhet . . . . .	20
4.8	Spektral fargeomfangstilpasning . . . . .	20
4.9	Sammenligning av spektrale reflektanskurver . . . . .	21
4.10	Sammenhengen mellom spektral reproduksjon og fargeomfang i vanlige 3-dimensjonale fargerom . . . . .	22
<b>5</b>	<b>Resultater og diskusjon</b>	<b>24</b>
5.1	Testdata . . . . .	24
5.1.1	Måledata fra reproduksjonsenhet . . . . .	24
5.1.2	Spektrale reflektanskurver . . . . .	25
5.1.3	Spektrale bildefiler . . . . .	25
5.2	Visualisering av det spektrale omfanget . . . . .	26
5.3	Spektral fargeomfangstilpasning . . . . .	30
5.4	Qhull . . . . .	32

5.5 Problemet med convex hull . . . . .	33
<b>6 Konklusjon og videre arbeid</b>	<b>35</b>
<b>Referanser</b>	<b>38</b>
<b>Figurer</b>	<b>41</b>
<b>Tabeller</b>	<b>42</b>
<b>Vedlegg A: Spektrale data fra Macbeth Color Checker</b>	<b>43</b>
<b>Vedlegg B: Spektral RMS-feil etter utførelse av PCA på data fra Macbeth Color Checker</b>	<b>46</b>
<b>Vedlegg C: Spektral RMS-feil etter utførelse av omfangstilpasning på data fra Macbeth Color Checker</b>	<b>47</b>

# 1 Introduksjon

## 1.1 Multispektrale farger

Mennesker oppfatter farger ved hjelp av lysfølsomme detektorer (tapper) lokalisert inne i øyet. Det finnes tre forskjellige tapper som har ulike responskurver for lysets bølgelengder. Vår oppfatning av farger er dermed avhengig av hvordan det lyset som kommer inn i øyet, fordeles på bølgelengdene. Dette er igjen avhengig av hvordan den overflaten man betrakter reflekterer lyset, og hvordan lyset som skinner på overflaten er bygd opp.

Farger blir vanligvis angitt ved hjelp av tre variabler (for eksempel RGB og XYZ) når de skal overføres digitalt mellom forskjellige enheter. Dette medfører en begrensning i den forstand at man er nødt til å innføre visse forenklinger. Blant annet binder man seg til den spesifikke lyskilden som er i bruk når fargen måles, siden belysningens virkning på mediet implisitt tas med i beregningene. Det blir dermed umulig å forutsi nøyaktig hvordan mediet oppfører seg under andre forhold, fordi fenomenet metameri tilsier at flere forskjellige spektrale reflektansspektre kan resultere i samme farge gitt den spektrale fordelingen til en lyskilde. To overflater som reflekterer lys forskjellig kan gi samme farge under en type forhold, mens de kan se forskjellige ut når man observerer dem under en annen lyskilde. Dette er en del av grunnlaget for at det i enkelte sammenhenger er ønskelig å arbeide direkte med den spektrale fordelingen til en farge. Et annet argument for å benytte de spektrale representasjonene direkte, er at man kan analysere overflatens mulige fargegjenninger under forskjellige lyskilder.

De spektrale fordelingene er kontinuerlige funksjoner av bølgelengden, men etter at man har samlet de ved noen bølgelengder vil man kunne beskrive dem relativt godt som en kombinasjon av et visst antall egenvektorer. Dette betyr at man beskriver en farge med  $N$  variabler, det vil si at det dreier seg om flerdimensjonale data.

## 1.2 Problemet

Antallet dimensjoner som er nødvendig for å kunne beskrive en farges spektrale sammensetning med en nøyaktighet som er tilstrekkelig, vil variere med det utvalget av reflektanser som er aktuelle i de forskjellige arbeidssituasjonene, og den presisjon som man krever. Ny forskning [16] kan tyde på at man i enkelte sammenhenger er avhengig av å arbeide med data som har i overkant av 20 dimensjoner, men selv om man i mange tilfeller kan klare seg med mindre vil det representere en stor utfordring når det gjelder visualisering av slike spektrale fargedata. Når man skal presentere en grafisk fremstilling på en datamaskin, er man begrenset av skjermens 2D-visning. Man må dermed redusere datamengdens dimensjonalitet,



for eksempel ved å projisere datamengden ned på et 2-dimensjonalt plan, noe som er vanlig i spill og applikasjoner som viser 3D-scener. I denne sammenhengen har man som regel et betraktelig større antall dimensjoner, og dette gjør det vanskeligere å finne en visningsmodus som lar en bruker trekke logiske slutninger om plasseringen av objekter i forhold til hverandre.

Muligheten for å gjøre slike vurderinger er viktig, fordi man vanligvis vil ha interesse av å sammenligne en enhets fargeomfang med forskjellige fargespektra, og å kunne se hvor bra enheten er i stand til å gjengi disse. Dette er en stor utfordring, siden det ikke er avklart hvordan man kan representere en enhets spektrale fargeomfang på en måte som gjør slike vurderinger enklest mulig å foreta, og samtidig gir mest mulig presise svar. En ytterligere komplikasjon er at man må ta hensyn til ulike metrikker for spektral fargeforskjell, fordi det er vanskelig å finne en generell metrikk som fungerer bra i alle aktuelle tilfeller [26], og dersom man reduserer antallet dimensjoner oppnår man kun en tilnærming til den reelle spektrale fordelingen.

### 1.3 Motivasjon

Dersom man hadde hatt en god visualiseringsmetode for multispektrale data som brukeren kunne benytte som et hjelpemiddel, kunne det medføre en bedre forståelse for de problemer som personer innen spektral fargeforskning står overfor i sitt arbeid. De trenger en multispektral fargeomfangsrepresentasjon som egner seg for forskjellige arbeidsoperasjoner, som for eksempel hvordan man finner en best mulig tilnærming til en spektral reflektans som en enhet ikke er i stand til å vise nøyaktig. Hvis man finner en hensiktsmessig representasjon av fargeomfanget, kan en visualisering som viser hvordan en spektral reflektans ligger i forhold til omfanget gjøre det enklere å svare på hvor bra enheten kan gjengi den spektrale fordelingen. En bra visualisering vil også være et utgangspunkt for fremtidig forskning innenfor fagområdet, for eksempel i forbindelse med automatisk eller delvis manuell fargeomfangstilpasning av spektrale bilder.

For å kunne gi et bidrag til forskningen innen dette emnet, vil vi gripe fatt i enkelte spørsmål som danner utgangspunktet for denne rapporten.

### 1.4 Forskningsspørsmål

#### **Hvordan beskriver man best et multispektralt fargeomfang?**

I denne konteksten vil det være naturlig å konsentrere seg om å se på hvordan man kan vise multispektrale data på en mest mulig hensiktsmessig måte i forhold til de nevnte utfordringene. Dette forutsetter at man først vurderer ulike måter å beskrive et spektralt fargeomfang på, og identifiserer deres styrker og svakheter.

Alternativene inkluderer konvekse legemer avgrenset av hyperplan, og bruk av modeller som forutsier enheters spektrale karakteristikk.

### **Hvordan velger man datamengdens dimensjon ut ifra bruksområdet?**

For å kunne finne et spektralt fargeomfang, er det en forutsetning at man har funnet ut hvilken dimensjon datamengden bør reduseres til. Dette innebærer at man må se på hvorvidt det er aktuelt å bruke rådata samlet med regelmessige frekvensintervaller, eller om man bør redusere antallet dimensjoner ved å foreta en komponentanalyse. Et annet alternativ kunne være å benytte samme antallet dimensjoner som enheten (f.eks. skriveren) baserer seg på. Kvalitative vurderinger av alternativene i forhold til forskjellige bruksområder bør kunne gi ny kunnskap om dette

### **Hvordan kan man visualisere omfanget hensiktsmessig?**

Ved å finne en bra representasjon får man et utgangspunkt for å foreta selve visualiseringen av omfanget. Man må deretter finne en best mulig metode for å lage et 2-dimensjonalt snitt eller projeksjon av data, og se på hvorvidt det kan lønne seg å lage en 3-dimensjonal modell med mulighet for rotasjoner og forflytninger som et mellomsteg før den endelige visningen på skjermen. Før man kan gjøre dette, må man finne ut om det overhodet er mulig å finne et snitt gjennom fargeomfangets representasjon, og eventuelt omgå problemet ved å finne nye, alternative løsninger. Hvordan vil for eksempel en visning hvor punkter på omfangets overflate som er nær det interessante planet projiseres ned på 2D fungere? Hvordan velger man det aktuelle planet? Kan man benytte enhetens hvit- og svartpunkt samt det spektrum som man vil reprodusere som utgangspunkt for planet? Disse spørsmålene kan ikke besvares uten å teste forskjellige teorier ut i praksis.

### **Hvordan avgjøre om et reflektansspektrum er reproduserbart?**

Når man har en representasjon av et spektral omfang og den tilhørende visualiseringen, må man se på måter for å avgjøre om et spektrum er reproduserbart på en enhet. Det vil da også være nødvendig å se på hvilke metrikker for spektral fargeforskjell som man bør benytte, for å se på forskjellen mellom den ønskede spektrale reflektansfordelingen og det resultat man faktisk kan oppnå.

### **Hvordan kobler man spektral reproduserbarhet opp mot vanlige fargeforskjellsmodeller?**

Spektral reproduserbarhet er kun en side av problemet. Man bør også se på om en visualisering av hvordan de spektrale fargene oppfattes under forskjellige lysforhold kan benyttes for å bedre illustrere fargeomfangets overflate og de aktuelle fargespektrene.



Figur 1: En visuell representasjon av lys ved forskjellige bølgelengder

## 2 Bakgrunn

### 2.1 Spektral og tradisjonell fargeteori

Det som man vanligvis oppfatter og refererer til som lys, består av elektromagnetisk stråling med bølgelengder mellom 400 og 700 nanometer. Lys ved de ulike bølgelengdene gir forskjellig fargeinntrykk, som vist i figur 1. Den menneskelige sansen syn forekommer ved at øynene stimuleres av denne strålingen, og signaler overføres derfra til hjernen. Bakerst i øyet sitter et fotosensitivt (lyfølsomt) område kalt netthinnen, eller retina. Netthinnens bestanddeler er celler som omgjør lys til nerveimpulser. Disse spesialiserte cellene kan deles i to hovedkategorier, tapper og staver. Stavene er lokalisert i ytterkanten av netthinnen, og lar oss skille mellom lyse og mørke områder i dårlig belysning, men kan ikke skille mellom farger.

Tappene har et lyfølsomt pigment som reagerer på lys med visse bølgelengder. Hos en person med vanlig fargesyn vil man finne tre forskjellige typer tapper, der hver type har ulik følsomhet for lys ved de forskjellige bølgelengdene. Signalene som disse tappene genererer kobles sammen før de sendes via nerver til hjernen. Hjernen tolker signalene, og resultatet blir de fargene som vi ser.

Disse egenskapene danner utgangspunktet for det man kaller den trikromatiske fargeteori, som har sine røtter tilbake på 1800-tallet. Den sier at man kan generere enhver farge som en blanding av tre primærfarger, dersom man forutsetter at ingen av de tre fargene kan genereres ved blanding av de to andre, og samtidig tillater negative verdier. I 1931 ble det foretatt et eksperiment, der deltakerene gjenskapte forskjellige testfarger ved å blande tre primærfarger. Ved å viderebehandle resultatene, kom man frem til tre fargematchingsfunksjoner som er positive for alle bølgelengder, og hvor en av primærfargene tilsvarende det mennesket oppfatter som lyshet. Fargematchingseksperimentet resulterte i definisjonen av en standardobservatør, mens fargematchingsfunksjonene er basisen for CIEXYZ-fargerommet, som danner utgangspunktet for måling og konvertering av farger.

Standardobservatøren beskrives ved hjelp av en tabell som angir andelen av primærfargene som et teoretisk menneske med gjennomsnittssyn vil benytte for å generere forskjellige farger. Det opprinnelige eksperimentet i 1931 benyttet fargeområder som dekket 2 grader på netthinnen. Senere oppdagelser og eksperimenter tilsier at dette ikke er representativt for måten vi oppfatter farger på, og dette re-

sulterte i en gjentakelse av eksperimentet i 1964 med 10 graders fargeområder, samt flere forsøkspersoner. Dette er årsaken til at man har flere mulige standard-observatører å velge mellom når man ønsker å generere CIEXYZ-data fra et gitt spektrum.

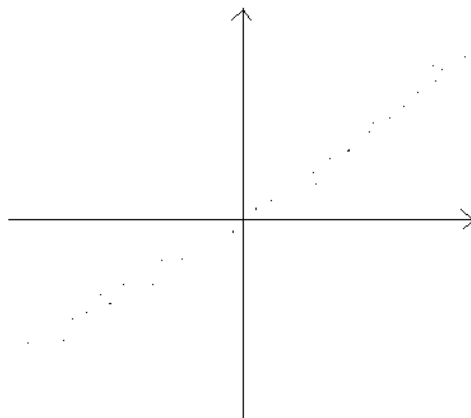
Beregning av CIEXYZ fra samlede spektrale data gjøres ved å summere verdiene til fargematchingsfunksjonene, lyskilden og reflektanskurven multiplisert med hverandre ved de forskjellige bølgelengdene. CIEXYZ-verdier er dermed alltid angitt i forhold til en lyskilde. Fargerommet CIEXYZ har den svakhet at avstander i rommet ikke har sammenheng med den oppfattede fargeforskjellen, og punktkoordinater oppleves som lite intuitive. CIELAB ble introdusert som en løsning på disse svakhetene. Avstander i dette fargerommet er noenlunde relatert til fargeforskjell, slik at en avstand på 1 enhet akkurat skal være mulig å se. I tillegg er fargerommet bygd opp rundt de perseptuelle karakteristikkene lyshet, fargetone og metning.

## 2.2 PCA

Principal Component Analysis er en metode som finner avhengigheter mellom variabler i et tallmateriale. Disse avhengighetene karakteriseres ved korrelasjoner mellom flere av variablene, det vil si at en variabel opptrer med en viss grad av samvariasjon med andre variabler. I spektrale data som er samlet ved visse bølgelengder oppleves korrelasjon ved at nærliggende verdier som regel til en viss grad følger hverandre. Avhengige variabler fører til en viss redundans i datamaterialet, og ved å benytte PCA kan man redusere graden av redundans, og dermed klare seg med et mindre antall variabler enn det som opprinnelig ble benyttet.

Enheter som reproducerer en farge ved å blande flere primærfarger, vil produsere spektre som til en viss grad vil kunne beskrives som en kombinasjon av primærenes spektrale komposisjon. PCA fungerer ved at man beregner kovariansen mellom variablene, for deretter å finne prinsipalkomponentene som et sett ortonormale basiskomponenter. I begrepet ortonormal legger vi at vektorene skal ha lengde 1, samtidig som de skal stå vinkelrett på hverandre slik at ingen vektor kan utformes som en kombinasjon av de andre.

Vi kan se på et eksempel som illustrerer PCA på 2-dimensjonale data. Figur 2 viser datapunkter i 2D. Man kan se at datasettet har forholdsvis høy korrelasjon mellom de to variablene, det vil si at Y-verdien ikke beveger seg tilfeldig i forhold til X. Ved å foreta PCA på dette datasettet kommer man frem til figur 3, som viser de nye basisvektorene (merk at vektorenes lengde er ikke satt til 1). I stedet for å beskrive data ved hjelp av koordinatene i det opprinnelige rommet, kan man nå beskrive de ved hjelp av de to basisvektorene. Dersom man kun benytter en variabel, kan man fremdeles komme frem til en temmelig nøyaktig beskrivelse av deres posisjon, siden verdiene for den andre variabelen vil være relativt små. For å



Figur 2: Eksempeldata i 2D.

transformere data fra det PCA-baserte rommet tilbake til det opprinnelige, behøver man kun å foreta en matrisemultiplikasjon med basisvektorene. Transformasjon av data den andre veien benytter naturligvis den inverse matrisen.

### 2.3 Convex hull

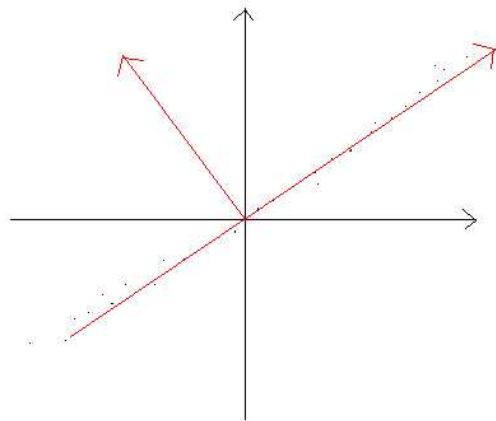
Et convex hull av et sett med punkter er det minste konvekse objektet som inneholder alle punktene. Et konvekst objekt er slik at alle punkter som ligger på en linje mellom to vilkårlig valgte punkter i objektet, også vil være innenfor objektets overflate. I et 2-dimensjonalt rom vil et convex hull representeres som et enkelt konvekst polygon<sup>1</sup> bestående av linjestykker som gir objektets overflate, se figur 4.

Definisjonen av et convex hull gjelder også for høyere dimensjoner, og overflaten for et slikt objekt blir delt inn i bestanddeler kalt fasetter<sup>2</sup>. En fasett består av like mange punkter som datamengdens dimensjonalitet, og fasettene blir dermed til linjestykker i 2D og trekkanter i 3D. En slik fasett danner basisen for et

---

<sup>1</sup>Enkle polygoner består av et lukket sett med linjestykker i et plan, der ingen av linjestykkene krysser hverandre.

<sup>2</sup>Begrepet fasett er også kjent fra beskrivelser av diamanter, der en fasett er en planslipt del av overflaten.



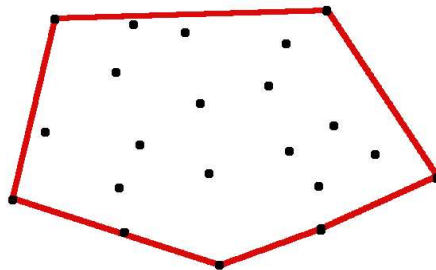
Figur 3: PCA gjennomført på 2-dimensjonale data. 2 nye basisvektorer er funnet.

hyperplan, som tilsvarer plan i 2D, men er generalisert til et vilkårlig antall dimensjoner. Et hyperplan deler rommet i flere deler ved at man kan si at et punkt befinner seg over, på eller under planet. Oppbyggingen av et convex hull tilsier at ethvert punkt som befinner seg utenfor hyperplanet til en av dets fasetter, ikke er en del av objektet. Man må merke seg at det ikke er tilstrekkelig at et punkt er innenfor ett hyperplan for å kunne si at det er en del av objektet, men at det må befinne seg på innsiden av alle hyperplanene.

Et hyperplan defineres ved hjelp av en normalvektor og en distanse, og ved å bevege seg fra origo langs normalvektoren i den angitte distansen vil man komme til planet. Planet vil bestå av alle punkter som er slik at prikkproduktet mellom posisjonsvektoren og normalvektoren er lik hyperplanet angitte distanse.

## 2.4 Quickhull

Barber med flere [19] introduserte en algoritme for beregning av convex hull i flere dimensjoner kalt Quickhull. Metoden baserer seg på å først å konstruere et konvekst objekt av  $N+1$  punkter i dimensjon  $N$ , det vil si en trekant i 2D og et tetraeder i 3D. Deretter settes hvert datapunkts tilhørighet til en fasett der punktet er på utsiden av det aktuelle hyperplanet. Dersom et punkt ikke er utenfor noen av hyperplanene, er det ikke med i den konvekse overflaten og ikke lenger aktuelt for



Figur 4: Eksempel på et convex hull

videre behandling. Så vil man gå gjennom alle fasettene i rekkefølge, og fjerne de fasetter som er slik at det finnes punkter på utsiden av deres hyperplan. Nye fasetter dannes ut ifra det punktet som befinner seg lengst fra originalfasetten og den grensen som dannes mellom de fasettene som man beholder og de som ikke lenger er en del av overflaten.

Algoritmen er mye brukt, og dens praktiske egenskaper velkjent. Kompleksiteten øker eksponentielt med dimensjonen, og i tillegg til økende tids- og plasskrav for hver enkelt operasjon og strukturdel. Vedlikeholding av nabostrukturer og beregning av hyperplan tar lengre tid i et rom med høyere dimensjonalitet, samtidig som antallet mulige fasetter for et gitt antall punkter øker drastisk. Dette fører i praksis til at det ikke er aktuelt å beregne convex hull for punktsamlinger i mer enn 8-9 dimensjoner, på grunn av det store kravet til minnekapasitet og regnekraft.

## 3 Forskningsstatus

### 3.1 Multispektrale fargeomfang

Man må finne en bra strukturell representasjon av multispektrale fargeomfang for å ha et bra utgangspunkt for selve visualiseringen av data. Haneishi og Sakuda [1] viser hvordan man kan beskrive en spektral gamut gitt ved et visst antall komponentkoeffisienter som polyeder i  $N$  dimensjoner. Først finnes  $N$  basisvektorer som spenner ut et underrom av de spektrale reflektansene ved hjelp av prinsippal komponentanalyse (PCA), og så beskrives reflektansene som en samling koeffisienter. Elementer med  $N$  punkter danner overflaten til objektet som de mulige koeffisientkombinasjonene. Dersom  $N=2$  vil overflaten bestå av linjer, mens  $N=3$  gir trekkanter. Videre drøfter artikkelen underrommet som angir de metamere spektralfordelingene, og hvordan man kan finne et snitt gjennom polyederet som angir disse. Artikkelen sier lite om hvor bra denne strukturen beskriver omfanget til en enhet, og den beskriver ingen forsøk på å se om den er hensiktsmessig for å finne ut hvorvidt en spektral fordeling er innenfor det resulterende objektet. Man kan tenke seg at det vil være gunstig å foreta en sammenligning av denne metoden med andre muligheter for å beskrive en enhet spektralt, for eksempel basert på spektrale fargemodeller. Artikkelen nevner heller ikke visualisering av selve fargeomfanget.

### 3.2 Valg av dimensjon

Imai med flere [7] presenterer en ny metode for å forutsi hvordan reproduksjon av hud ser ut under forskjellige lysforhold. De benytter prinsippal komponentanalyse (PCA), og gir en begrunnelse for at spektralfordelingen i dette tilfellet kan tilnærmes tilstrekkelig med tre basisfunksjoner.

Forfatterne av [10] beskriver en mulig fremgangsmåte for å få tak i en spektral representasjon av et bilde ved hjelp av et kamera, for deretter å simulere hvordan bildet vil oppleves under forskjellige lyskilder. Først foretar de en spektral karakterisering av kameraet ved å observere hvordan kameraet reagerer på kjente stimuli. Deretter finner de frem til en invers modell for å kunne gå tilbake til den spektrale fordelingen gitt en kamerarespons. De viser at forhåndskunnskap om mediets oppbygging kan være til hjelp når man velger basiskomponenter, og benytter seg av kamerafiltre som skal kunne dekke de aktuelle reflektansspektrene når man tar hensyn til kameraets og lyskildens egenskaper. Så sammenligner de spektral simulering av bildet under andre lyskilder mot en enkel CIELAB (se seksjon 2.1) color appearance modell, og man kan se hvordan den spektrale fremstillingen gir et bedre resultat. Vi kan her se at antallet dimensjoner som er nødvendig for å representere spektrale fordelinger kan reduseres dersom man kan



gjøre forutsetninger om hvilke typer spektre som er aktuelle.

Hardeberg [16] har foretatt en undersøkelse av hvor mange komponenter som trengs for å beskrive spektrale reflektansfordelinger av ulike slag. Data fra eksisterende spektrale databaser har blitt benyttet i en analyse av hvor mange komponenter som trengs for å beskrive spektrale fordelinger i forskjellige kategorier. Ved å benytte prinsipal komponentanalyse samt en betingelse på hvor mye av den akkumulerte signalstyrken som skulle beholdes, har forfatteren kommet frem til et forslag til hvor mange dimensjoner som behøves for å beskrive forskjellige spektrale fordelingstyper. I likhet med [7] og [10] viser denne studien at valget av dimensjon som regel gjøres avhengig av hvilke reflektansfordelinger man er interessert i å reprodusere, men at et stort antall er nødvendig for å kunne gjengi tilfeldig forekommende spektra. Et gjenværende spørsmål er hvor strenge krav man bør stille til gjengivelsen for å si at den er tilstrekkelig god nok. Dette kan være problematisk, siden det naturlige utgangspunktet med menneskets oppfatning av fargene vil variere med ulike lyskilder.

### 3.3 Visualisering av omfanget

Visning av data i mer enn 3 dimensjoner er et komplisert tema. Man kan til en viss grad benytte tiden som en 4. dimensjon, og i enkelte sammenhenger kan man benytte seg av at forutsetninger som gjelder for et spesielt problem kan forenkle løsningen. Banchoff [8] diskuterer generelle objekter i 4 eller mer dimensjoner, og hvordan man kan oppnå økt forståelse for slike fenomener. I forbindelse med spektrale farger har Nakauchi med flere [6] drøftet en visualiseringsmetode hvor multispektrale data omgjøres til RGB-verdier, og hvor man forsøker å beholde mest mulig av den spektrale topografiske sammenhengen. Mappingen fra spektrale data til RGB gjøres ved hjelp av selvorganiserende kodebøker som bygger på Self-Organizing Maps (SOM). Dette foregår slik at man har en ikke-lineær sammenheng mellom de spektrale koeffisientene og visningsfargen.

Flere har arbeidet med simulering av multispektrale fargedata under gitte lyskilder. Johnson og Fairchild [12] har presentert en implementasjon av en spektral renderer som en utvidelse for OpenGL. Rosen med flere [9] diskuterer fordelene som spektrale fargeberegninger har innen visse bruksområder, og de svakheter som de tradisjonelle metameriske XYZ-modellene har. Forfatterne har utviklet et verktøy for visning og manipulering av spektrale bilder, men har ikke sett på muligheten for å visualisere spektrale fargeomfang. I likhet med [10] beskriver de en mulig prosess for innhenting av spektrale fargedata. Artikkelen introduserer en tenkt spektral bildeprofil, og presenterer ulike scenarioer hvor praktisk bruk demonstreres. Dette er aktuelt for innhenting av spektrale fargedata, noe som vil være nødvendig for å gjennomføre uttesting av aktuelle teknikker for visualisering av fargeomfang.

Visning av flerdimensjonale data er relevant innen mange fagområder, og man kan se på om det er fornuftig å ta utgangspunkt i eksisterende metoder som har blitt utviklet i den forbindelse. Aguila [5] har i sin masteroppgave diskutert metoder for visualisering og forståelse av objekter i dimensjoner høyere enn 3. Dette inkluderer blant annet projeksjoner og operasjoner (rotasjoner osv.) på flerdimensjonale data, noe som er aktuelt for å kunne ha en visualisering hvor man har flere muligheter når det gjelder valg av hvilket 2-dimensjonalt plan som vises for brukeren. En svakhet ved å benytte løsningen som er skissert i denne masteroppgaven, vil trolig være at et høyt antall dimensjoner fører til et uhandterlig oversiktlig grensesnitt som gjør det vanskelig å finne frem til relevant informasjon i visningen. Et alternativ kunne være å forsøke å finne frem til forslag til visningsparametere automatisk.

Pan [14] drøfter ulike metoder for visualisering av data som har et spesielt stort antall dimensjoner. I artikkelen ser man på blant annet scatter plots, scatter plot matriser, table lens, parallelle koordinater og timefinder som mulige visualiseringsteknikker. PCA foreslås som en mulig metode for å redusere antallet dimensjoner før visualisering.

Sangole og Knopf [11] drøfter visualiseringsteknikker for mangedimensjonale data, og presenterer en visualiseringsalgoritme som benytter sfæriske selvorganiserende egenskapskart (Self-Organizing Feature Maps) for å kunne karakterisere likhet og struktur mellom data. SOFM har som utgangspunkt at data som danner samlinger (cluster) i  $N$  dimensjoner skal gjøre det samme i 2-dimensjonale egenskapskart. Sfæriske SOFM viderefører dette konseptet til fargekodede kuler i 3 dimensjoner. Artikkelen viser hvordan dette kan benyttes i forskjellige sammenhenger, men det er lite trolig at denne metoden egner seg til å gi svar på de spørsmål som er aktuelle i forbindelse med spektrale data.

### 3.4 Reproduserbarheten til et reflektansspektrum

En av de viktigste anvendelsene til en visualisering vil være å angi om en gitt enhet kan gjengi et spesifikt fargespektrum. Flere har gjennomført eksperimenter som berører dette emnet, blant annet Taplin og Berns [15], som testet nøyaktigheten til en blekkskriver med seks fargepatroner. For å beskrive skriveren benyttet man en modifisert Neugebauer likning, og fargeforskjellen mellom forventet og virkelig utskrift ble målt for forskjellige typer spektrale fargedata.

Solka og Clark [13] beskriver et rammeverk for analyse av flerdimensjonale data. Hensikten er å kunne klassifisere slike data, og å kunne si hvilke romlige sammenhenger som finnes. Applikasjonen kan vise plott av avstanden mellom punktene i to sett, og vise plott av punktene med flere parallelle koordinataksler. Artikkelen refererer til flere aktuelle visualiseringsmetoder brukt innen statistikk, men analysemetodene kan ikke gi svar på de spørsmål som vi er interessert i når

det gjelder multispektral reproduksjon.

I [17] foretar Imai med flere en sammenligningsstudie av forskjellige eksisterende mål for spektral fargeforskjell. Dette inkluderer blant annet standard CIE fargeforskjellsformler og andre metrikker som er avhengig av en gitt lyskilde. I tillegg ser de på mer generelle spektrale fargeforskjellsmål, som ikke er avhengig av en lyskilde. Resultatene viser at det ikke finnes en metrikk som kan anbefales på generelt grunnlag. Dette må man ta hensyn til når man ser på hvor bra en enhet kan gjengi en spektral reflektansfordeling. I forbindelse med muligheter for å kombinere spektral gjengivning med tradisjonelle fargegjengivningsvurderinger, kan man vise til det arbeid som er blitt gjort i forbindelse med utviklingen av applikasjonen ICC3D<sup>3</sup> [2, 3, 4].

---

<sup>3</sup>ICC3D (Interactive Color Correction in 3 Dimensions) er en programvare som er blitt utviklet av forfatteren av dette dokumentet i samarbeid med to andre studenter i forbindelse med gjennomføringen av et hovedprosjekt på HiG. Programmet inneholder muligheter for visualisering og automatisk/manuell manipulering av 3-dimensjonale fargeomfang.

Se <http://colorlab.hig.no/icc3d> for mer informasjon.

## 4 Metode

Vårt mål er å presentere en metode for visualisering av spektrale data. Dette medfører blant annet at vi vil

- gi ny kunnskap om hvor bra forskjellige måter å beskrive fargeområdet på fungerer, spesielt med hensyn til avgjørelser angående en spektral fordelings reproduserbarhet på en enhet.
- utvikle nye metoder og verktøy som lar brukeren sammenligne et refleksjonsspektrum med de spektra som en enhet kan gjengi.
- gi en kvalitativ vurdering av om visningen gjør brukeren i stand til å bestemme reproduserbarhet.
- gi ny forståelse for hvilken effekt valg av dimensjon har på prosessen.

Vår målsetning om å introdusere en metode for visualisering av spektrale data forutsatte utvikling en prototyp, slik at den kan presentere de prinsipper som vi drøfter. I tillegg kan den benyttes i sammenheng med bevisførsel for at vi har oppnådd det vi ønsker. For å minimalisere arbeidet dette vil utgjøre i form av systemutvikling, har vi sett det som hensiktsmessig å benytte et eksisterende rammeverk. Applikasjonen ICC3D [2, 3, 4] fungerer som utgangspunkt, siden den modulære strukturen begrenser arbeidsmengden ved at vi kan gjøre bruk av mye eksisterende basisfunksjonalitet. Dette dreier seg først og fremst om visualiserings- og datarepresentasjonsteknikker, samt støtte for mange forskjellige operasjoner på fargedata. I tillegg er det fordelaktig å ha funksjonalitet for spektral analyse i samme verktøy som man benytter til andre fargestyringsforemål, slik at overføring av data (for eksempel bilder) blir en rask og enkel prosess.

### 4.1 Spektrale data og farger

Bearbeiding av spektrale data krever ikke at man har muligheten for å omgjøre spektrale fordelinger til synsinntrykk, men det er en stor fordel å ha muligheten til å kunne gjøre dette. Man kan dermed få en visuell bekreftelse på de operasjoner som man gjennomfører, noe som er spesielt nyttig på grunn av vanskeligheten med å finne hensiktsmessige mål for spektral fargeforskjell uavhengig av lyskilder og 3-dimensjonale fargerom. Sentralt i prototypen som er utviklet ligger muligheten for å beregne CIEXYZ-verdier fra spektrale fordelinger, og ved hjelp av eksisterende funksjonalitet i ICC3D kunne viderebehandle disse fargene i vanlige fargerom med en fargestyrt prosess.

Brukeren har muligheten til å velge visningsforhold i form av lyskilde (spektral emisjonskurve) og observatør (fargematchingsfunksjoner). Disse datene sam-



Figur 5: Eksempelbilde ved standard D65 lyskilde.

menkobles slik at man får en overføringsmulighet i form av en matrise fra spektrale reflektansfordelinger til CIEXYZ-verdier. På grunn av forskjellige samplingsintervall for lyskilde, observatør og spektrale måledata justeres matrisen i forhold til maksimalt mulig Y-verdi, slik at den gir rette verdier i forhold til lyskildens hvitpunkt (absolutt kolorimetri). Figur 5 viser et spektralt bilde, der hvert bildepunkt internt er angitt ved en spektral reflektanskurve samlet ved hver 5. nanometer mellom 400 og 700. Vi kan her se en illustrasjon av hvordan bildet vil se ut under en av standardlyskildene til CIE, selv om dette ikke kan bli nøyaktig grunnet manglende fargestyring av rapportfremvisning og eventuelle utskrifter. Figur 6 og figur 7 viser det samme bildet, men under forskjellige lysforhold. Fordelen med å arbeide med de spektrale representasjonene av bildet er at man får en nøyaktig utprøving av hvordan bildet ser ut under forskjellige lysforhold, samtidig som man unngår problematikken med metamere farger. En lyskilde med litt spesiell spektral oppbygging er valgt i figur 7 for å bedre illustrere forskjellene mellom bildene.

## 4.2 Spektrale fargeomfang

Når man arbeider med spektral reproduksjon av farger, benytter man seg vanligvis av modeller som beskriver sammenhengen mellom inndata og utdata, se [18, 20]. Disse modellene utnytter kunnskap om enhetstypens spektrale karakteristikk, slik at man kun behøver å måle innhenting eller reproduksjon av enkelte farger for å forutsi hvordan enheten oppfører seg ved en vilkårlig valgt farge. Vi har i



Figur 6: Eksempelbilde under lysforhold med høy blå metning.



Figur 7: Eksempelbilde under mørk grønn lyskilde.

våre undersøkelser ikke benyttet slike modeller, som kun gjelder for en bestemt kategori enheter, for eksempel skrivere, og i tillegg krever en karakterisering av enheten. I stedet har vi valgt å arbeide direkte med spektrale måledata fra enhetene. Dette gjør representasjonen av fargeomfang lik for alle enheter, og metoden kan benyttes for både kilde- og reproduksjonsomfang. Det er kun nødvendig med spektrale samplingsverdier som befinner seg ved omfangets overflate, slik at det aktuelle rommet dekkes best mulig.

Fordelen med de spektrale modellene er at de krever et mindre antall målinger, og dermed minsker arbeidet ved innhenting av spektrale måledata fra enheten. Vår metode kan nyttiggjøre seg slike modeller (for eksempel den Yule-Nielsen modifiserte Neugebauer-modellen som beskrevet i [21, 22]) ved at man inkluderer data generert av modellen sammen med de spektrale målingene man har foretatt.

PCA er en metode som er mye benyttet [23, 14, 7, 16] for behandling av spektrale data, og det vil derfor være en fordel om det spektrale fargeområdet kan beskrives som et veldefinert objekt i PCA-baserte underrom med forskjellig antall dimensjoner. Bruk av convex hull som beskrivelse av fargeomfang benyttes i vanlige 3-dimensjonale fargerom [24], og er også en del brukt i rom basert på spektrale data [1]. Convex hull er godt egnet til å beskrive overflater i forskjellige dimensjoner, og ved å se på visualisering av slike strukturer kan man oppnå økt forståelse for metodens egnethet til applikasjonsområdet spektrale fargeomfang.

### 4.3 Spektrale dataformat og standarder

Interessen for reproduksjon av spektrale fargedata er relativt ny, og det finnes derfor få etablerte standarder for utveksling av spektral informasjon. Forskjellige kilder oppgir måledata for forskjellige bølgelengder. Samplingsintervallet kan variere fra 1 til 20 nanometer, hvor 5 og 10 er mest brukt. Laveste og høyeste bølgelengde som samples er heller ikke likt. Disse faktorene blir valgt ut fra det personen som foretar målingen anser som hensiktsmessig for sitt bruksområde.

Mangelen på standarder er spesielt merkbart når man ser på de ulike filformatene for spektrale bilder. Ett alternativ er å oppgi spektrale rådata i et filformat som for eksempel Matlab benytter. Dette sikrer brukeren tilgang på de ubehandlede data som målingene skapte, og man behøver kun å velge samplingsintervall og avgrense det aktuelle frekvensområdet. En slik lagringsmetode forutsetter tilgang til stor lagringsplass, og utveksling av data mellom personer over internett eller lokale nettverk vil enten ta lang tid eller kreve bruk av høyhastighetstilkoblinger og raske servere.

Vi har tidligere sett på at det finnes mange meninger om hvilken dimensjonalitet som kreves for å oppgi spektrale data tilstrekkelig nøyaktig (se Hardeberg [16]). Dette har gitt seg utslag i flere filformat som angir spektrale data som et flerkanalsbilde, der hver kanal angir koeffisienter til en gitt spektral basisvektor.

En tilnærming av den originale spektrale refleksjonsfordelingen til et gitt piksel i et bilde kan dermed gjenopprettes som en serie av enkle matrisemultiplikasjoner. Dette begrenser også datamengdens inneboende dimensjonalitet, som ikke lenger kan overskride antallet kanaler.

MUSP/AIX [28] er et eksempel på en foreslått filformattype for multispektrale bilder. Gitt tilgjengeligheten av eksempelbilder, samt en meget veldefinert filformatbeskrivelse, ble dette et naturlig valg for innhenting av bildedata. Vi retter en takk til Color AIXperts GmbH for å ha gjort filformatbeskrivelsen og bildene tilgjengelig.

Spektrale data vil uansett kilde og bruksområde (spektrale bilder, måledata fra spektrofotometer, spektrale energidistribusjoner til lyskilder) kunne angis som en todimensjonal datamengde, der antallet samplingsverdier per spektralfordeling og antallet spektrale angir matrisens størrelse. Vi introduserer et dataformat som vist i vedlegg A for utveksling av spektrale data. Vanlig praksis på området er at man oppgir måleverdiene uten å angi informasjon om bølgelengdene i samme fil, noe som kompliserer prosessen med å automatisere innlesing og lagring av måleverdiene. Ved å benytte ett enkelt veldefinert format for disse bruksområdene, unngår man unødvendige misforståelser, samtidig som det fremhever at det dreier seg om likeverdig informasjon. Bruk av felles interne dataformat gjør det enkelt å foreta likeverdige operasjoner på bildefiler, måledata fra testfarger og målinger av en enhets spektrale reproduksjonsegenskaper. For å unngå unødvendig bruk av lagringskapasitet kan man benytte et likeverdig binært filformat, og enkelt konvertere mellom disse. Kategorispesifikke egenskaper, som bildestørrelse i bredde og høyde, kan også inkluderes i filformatet.

## 4.4 Qhull

Sentralt i vårt forslag til en visualiseringsmetode for multispektrale data er beregningen av det konvekse legemet som omfatter de spektrale testdata som benyttes fra den aktuelle reproduksjonsenheten. Applikasjonen ICC3D har eksisterende rutiner for å finne konvekse hull i 2 og 3 dimensjoner ved hjelp av quickhull-algoritmen, og en utvidelse til et høyere antall dimensjoner er fullt gjennomførbart. Likevel er det mange faktorer som taler for bruk av allerede eksisterende eksterne implementasjoner av algoritmen. De krevende kalkulasjonene innebærer at optimalisering og håndtering av spesialtilfeller (f.eks. et større antall punkter som befinner seg på samme plan) fører til en meget tidkrevende kodingsprosess. I tillegg finnes det verktøy som er spesialkonstruert og i høy grad optimalisert for akkurat slike beregninger, og som har demonstrert sin pålitelighet gjennom lengre tids bruk innen flere fagområder.

Qhull er en implementasjon av Quickhull-algoritmen [19], og kan benyttes for å finne enkelte geometriske egenskaper til et sett punkter i en (teoretisk) vilkår-



lig dimensjon. Selv om programmet internt i hovedsak kun beregner det minste konvekse objektet som inneholder en gitt punktsamling, finnes det andre tilsvarende geometriske oppgaver som kan finnes indirekte gjennom denne kalkulasjonen. Dette inkluderer problemet å finne forskjellige trianguleringer av en punktsky, som kan løses ved å utvide datasettet med en dimensjon og finne det konvekse legemet rundt disse punktene. Bruksområdene for programmet er mange og varierte, og det store antallet forskningsprosjekter som benytter Qhull er en indikasjon på programmets stabilitet.

For vårt tilfelle er vi bare interessert i å finne overflaten til det konvekse legemet, slik at vi kan bestemme om et gitt punkt befinner seg innenfor eller utenfor ett spesifikt fargeomfang. Hver overflatefasett definerer et hyperplan, og som et utgangspunkt for videre databehandling behøver vi kun disse. Qhull kan instrueres til å motta data fra en tekstfil, og ved å angi de riktige parametrene kan man be om at Qhull kun hyperplanets normalcoeffisienter og distansen fra origo rapporteres tilbake.

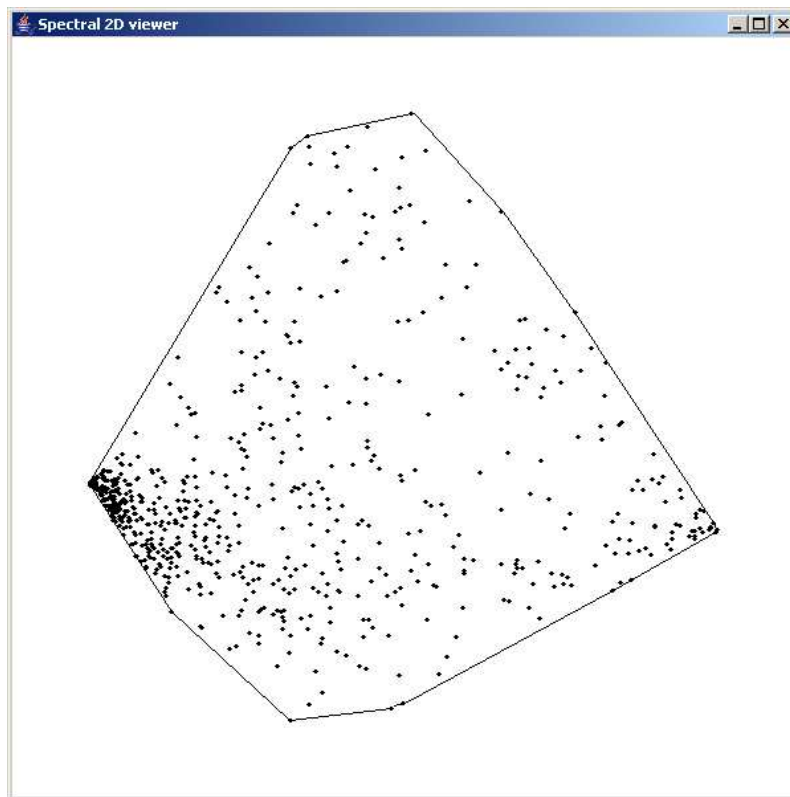
## 4.5 Valg av dimensjon

Prototypen er lagt opp slik at man enkelt kan velge hvor mange dimensjoner man vil arbeide med. Dette forenkler arbeidet med å se på de konsekvensene dette valget innebærer, noe som fremdeles er et åpent spørsmål.

Mange vil argumentere for at full dimensjonalitet ikke er hensiktsmessig å arbeide med. Dette skyldes flere årsaker:

- En vanlig reproduksjonsenhet er ikke i stand til å gjengi et tilfeldig valgt spektrum nøyaktig, noe som gjør all vurdering av reproduserbarhet i forhold til fargeomfang meningsløs i et fullverdig spektralt rom.
- Datamengden krever så stor lagringskapasitet at den i seg selv vanskeliggjør distribusjon og behandling, spesielt i forhold til spektrale bilder.
- Beregning av spektrale fargeomfang ved bruk av convex hull er ikke hensiktsmessig ved 10 eller flere dimensjoner med dagens algoritmer og maskinvare, noe vi kommer tilbake til når vi skal se på resultatene i denne rapporten.
- De mange artiklene om dimensjonaliteten til spektrale data viser at det i mange sammenhenger er unødvendig å benytte mange dimensjoner.

Det som dermed blir utfordringen er å eksperimentere seg frem til et valg som er passende for den situasjonen som man befinner seg i.



Figur 8: Visualisering av fargeomfang i 2-dimensjonalt PCA-rom.

## 4.6 Visualisering

Det å finne en fornuftig visning av det flerdimensjonale fargeomfanget er en stor utfordring, spesielt med tanke på å gi svar på problemstillingene vedrørende reproduserbarhet og spektral fargeomfangstilpasning. Dersom man begrenser seg til 3 eller mindre dimensjoner, vil det være enkelt å illustrere fargeomfanget. Man kan for eksempel gi en 2-dimensjonal oversikt over en enhets måledata, samt det resulterende fargeomfanget. Figur 8 viser de 2 første koordinatene i et PCA-basert underrom til måledata fra en skriver som en samling punkter, mens den konvekse overflaten er skissert som linjestykker. På liknende vis vil de 3 første koordinatene kunne vises som 3D-grafikk, der overflaten vil være en samling trekkanter.

En mulighet hadde vært å projisere data ned på et mindre antall dimensjoner, men dette ville tilsvare operasjonen å finne en skygge av et objekt. Dersom man ville svare på spørsmål om reproduserbarhet hadde man vært avhengig av å finne en projeksjon som sørger for størst mulig separasjon mellom fargeomfanget og det aktuelle reflektanspunktet, noe som ikke er en triviell oppgave. Derfor er

beregningen av snitt gjennom objektet en bedre løsning. For å finne en snittflate gjennom dette objektet som inneholder den spektrale fordelingen som man er interessert i å reprodusere, kan man finne skjæringspunktet mellom omfanget og en linje som går fra sentrum og ut til punktet. Dette gir et 1-dimensjonalt snitt, som så kan utvides til 2D ved å beregne en rekke skjæringspunkter mellom overflaten og linjer i et plan gitt av vektoren fra sentrum til det aktuelle punktet, samt en annen vektor som for eksempel går fra sentrum i retning hvitpunktet. Dette gir en løsning som minner mye om figur 8 (som faktisk er et spesialtilfelle av denne metoden), men hvor det aktuelle spektrale omfanget kan representeres i en høyere dimensjon. Dette kan også gjøres i 3D, selv om økningen i nytteverdi trolig er liten.

#### 4.7 Reproduserbarhet

Dersom man forutsetter at det konvekse objektet er en bra representasjon av et spektralt fargeomfang, vil et spektrums reproduserbarhet være enkelt å fastslå. Dette kan gjøres raskt og effektivt ved å sette inn spekterets koordinater i hver enkelt hyperplanlikning, og finne ut om punktet befinner seg på innsiden eller utsiden av disse planene. Dersom punktet befinner seg på innsiden av alle planene, vil punktet være innenfor fargeomfangets overflate, og ifølge definisjonen dermed være reproduserbart. I det motsatte tilfellet er det nok at spekteret er utenfor ett eneste hyperplan for å kunne si at enheten ikke er istand til å gjengi det. Valg av dimensjonalitet kompliserer situasjonen, siden et gitt punkt som er innenfor omfanget i en dimensjon ikke nødvendigvis kan gjengis av enheten. Dette skyldes at fjerningen av mindre viktige komponenter også forandrer enhetens spektrale fordelinger, slik at når man forsøker å konvertere fra PCA-rommet til en praktisk reproduksjon på enheten ikke kan gjengi fordelingen uten å reintrodusere disse avvikene.

Ved å finne skjæringspunktet som beskrevet tidligere mellom omfanget og linjen mellom sentrum og den aktuelle reflektansfordelingen, vil man i tillegg til å kunne si om fordelingen er reproduserbar, kunne si noe om hvor punktet befinner seg i forhold til omfangets overflate. Man vet også punktet på overflaten hvor linjen møter omfanget, noe som kan benyttes til foreta en mapping fra kilden til reproduksjonsomfanget.

#### 4.8 Spektral fargeomfangstilpasning

Hvis man ser på de eksisterende metodene for tilpasning til fargeomfang i 3-dimensjonale fargerom [27], kan man dele de inn i to kategorier. Avanserte metoder tar i bruk det opprinnelige fargeomfanget i tillegg til omfanget til reproduksjonsheten, og kan slik foreta en tilpasning som prøver å beholde eksisterende

forskjeller mellom de originale fargene som enheten ikke kan reprodusere. De enkle metodene ser kun på fargeomfanget til reproduksjonsenheten, og foretar tilpasningen ved å beholde de farger som er innenfor omfanget slik som de er, mens de som er utenfor flyttes ned på overflaten. Dette kan medføre at farger som i utgangspunktet er forskjellige, ender opp på samme sted på overflaten. Likevel benyttes disse metodene fordi de er enkle, bildeuavhengige (de foretar det samme med en gitt farge uten å ta hensyn til konteksten), og de sørger for at et bilde blir bestående av kun reproduserbare farger.

Man kan foreta forskjellige valg ved flyttingen av de ikke-reproduserbare fargene ned på reproduksjonsenhetens fargeomfang, som for eksempel å flytte punktene ned på det nærmeste punktet på overflaten. Andre metoder [27] flytter punktene i retning av et bestemt punkt som befinner seg innenfor fargeomfanget.

Vi kan ut ifra dette se at vi i realiteten har utviklet en metode for spektral fargeomfangstilpasning. Vi benytter fargeomfangets geometriske midtpunkt som det punktet man flytter utenforliggende punkter mot. Ved å finne skjæringspunktet mellom omfangets overflate og en linje mellom dette punktet og det aktuelle spektrets posisjon, vil man kunne foreta den nødvendige tilpasningen. Dersom posisjonen befinner seg innenfor omfanget, vil det ikke være nødvendig å foreta noen tilpasning. Hvis det viser seg at enheten ikke kan gjengi spektret, vil man ganske enkelt forandre det ved å flytte det ned på skjæringspunktet mellom overflaten og linjen, for så å beregne den spektrale reflektansen på nytt ut ifra posisjonen i det PCA-baserte rommet. Eventuelle utvidelser til denne metoden kan gå ut på å velge et annet punkt enn sentrum som utgangspunkt for algoritmen, slik at man i stedet beveger seg for eksempel mot en spektral lyshetsakse.

## 4.9 Sammenligning av spektrale reflektanskurver

Det finnes flere forslag til formler for spektral fargeforskjell. En av de mest brukte er spektral RMS (Root Mean Square), der man finner kvadratroten av gjennomsnittet av de kvadrerte avvikene mellom reflektansverdiene ved de forskjellige bølgelengdene.  $R$  og  $P$  er måleverdier ved bølgelengde  $i$ , mens  $N$  er antall samlede bølgelengder og  $E$  er kalkulert spektral RMS.

$$E = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (R_i - P_i)^2}$$

Denne formelen ser kun på de spektrale fordelingene, og vurderer ikke den reelle fargeforskjellen under lyskilder. Hardeberg [16] viser til en korrelasjon mellom spektral RMS og bevart signalenergi for PCA-modifiserte data, og undersøker denne faktoren for å finne den inneboende dimensjonaliteten til forskjellige spektrale fargedatabaser.

Tilsvarende er det flere som kun ser på fargeforskjell under et sett lyskilder, og til en viss grad ser bort ifra deler av den spektrale fordelingen. Dersom man kun ser på fargeforskjell under en lyskilde, tar man ikke hensyn til problematikken vedrørende metameri, og får ikke utnyttet potensialet ved å arbeide spektralt. Mellom disse ytterpunktene finnes det flere forslag til metoder som utnytter både vanlig fargeforskjell under lyskilder og spektrale avvik. Dette går for eksempel ut på å beregne noe tilsvarende spektral RMS, men med ulik vektning av målepunktene, avhengig av fargematchingfunksjonenes og vanlige lyskilders verdi ved den aktuelle bølglengden. Metamerindekser sier hvor like to spektrale farger er, og kan for eksempel basere seg på utregning av fargeforskjell i et mest mulig perseptuelt korrekt (avstand tilsvarende oppfattet fargeforskjell) fargerom under forskjellige lyskilder, for så å beholde den største verdien. Mindre verdier vil dermed tilsi like farger, mens større verdier betyr at forskjellen er stor.

Viggiano [26] har undersøkt flere av metodene, og kommet frem til at kun spektral RMS (samt hans egen metode) er god til å vurdere både større og mindre spektrale fargeavvik. Derfor benytter vi spektral RMS samt visuell inspeksjon av reflektansfordelingene for å se på hvilke endringer som finner sted ved modifisering av spektrene. Når man behandler vanlige bildefiler (som ikke er beregnet for spektrale analysemetoder av ulike slag), bør man likevel ta hensyn til at hovedhensikten må være å observere bildet under ett eller flere visningsforhold. Dette aktualiserer konverteringen av disse bildene til CIEXYZ under forskjellige lyskilder, slik at man kan vurdere virkningen av metodene visuelt.

#### **4.10 Sammenhengen mellom spektral reproduksjon og fargeomfang i vanlige 3-dimensjonale fargerom**

I en fargestyrt arbeidsflyt har man valget mellom å arbeide spektralt, eller å benytte betraktelig mer velutprøvde metoder for tradisjonelle fargemodeller. En ytterligere komplikasjon er at spørsmålet om reproduserbarhet kan ha forskjellig svar, avhengig av om man ser på en reproduksjonens spektrale egenskaper eller målte CIEXYZ-verdier. En enhet som ikke kan gjengi en farge under en gitt lyskilde, kan heller ikke gjengi den spektrale reflektanskurven til den opprinnelige fargen. Dersom enheten kan gjengi fargen spektralt, ville den kunne gjengi fargen under enhver lyskilde. Derimot er det mulig at enheten ikke kan gjengi den spektrale sammensetningen, men er i stand til å reprodusere en visuell match under en gitt lyskilde.

Muligheten til å kunne analysere data både spektralt og i et 3-dimensjonalt fargerom gir opphav til nye spørsmål, som hvorvidt man vil prioritere å ha en korrekt gjengivelse under en lyskilde, eller om man vil prioritere å ha en mest mulig lik spektral gjengivelse. Ved å ta i bruk spektrale karakteriseringsmodeller og

eksperimenter kan man også se på spektrale forskjeller mellom å benytte vanlige algoritmer for fargeomfangstilpasning i et 3-dimensjonalt fargerom, og å benytte seg av data og metoder som forsøker å ta mer hensyn til den spektrale delen av reproduksjonen.

## 5 Resultater og diskusjon

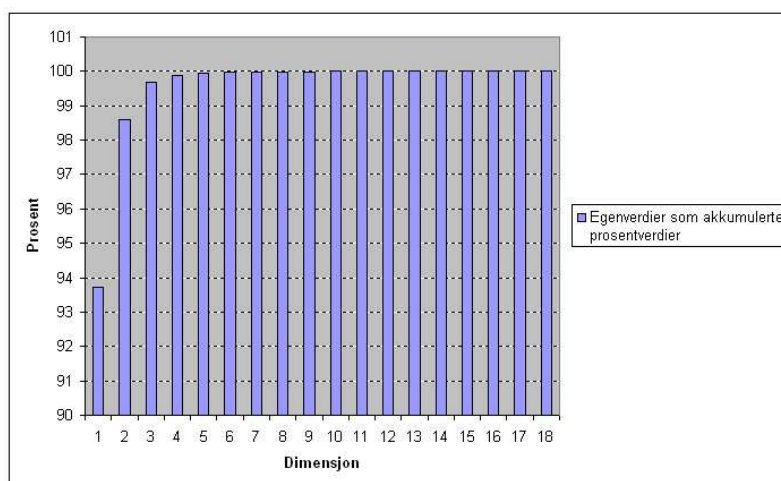
### 5.1 Testdata

For å kunne vurdere ulike aspekter ved spektral reproduksjon av farger, er man avhengig av at man har eksempler på spektrale reflektansfordelinger. Dette gjelder både for konstruksjonen av et spektralt fargeomfang, der man behøver spektrale måledata fra en enhet, samt spektrale kurver som man er interessert i å gjengi. I dette tilfellet skal vi se på gjengivelse av enkelte kurver, men også 2-dimensjonale samlinger av spektrale data i form av bilder.

#### 5.1.1 Måledata fra reproduksjonsenhet

Som et grunnlag for utprøving av de metoder for databehandling og visualisering som vi har foreslått i denne rapporten, benyttet vi måledata hentet fra en blekk-skriver. Disse data ble gjort tilgjengelige av Jeremie Gerhardt ved HiG. Enheten som ble benyttet var en Hewlett Packard Deskjet 1220c, mens man benyttet seg av spesielt utvalgte blekk fra Collins Ink Corporation for å oppnå et best mulig resultat. De spektrale egenskapene til skriverens reproduksjon av farger ble målt med et GretagMacbeth Spectrolino spektrofotometer montert på et Spectroscan x-y innskanningsbord. Målingene har tidligere blitt benyttet for å karakterisere enhetens spektrale egenskaper, og for mer informasjon om dette eksperimentet vises det til artikkelen [18] av Hardeberg og Gerhardt.

De spektrale rådata fra skriveren ble benyttet som utgangspunkt for generering av PCA-baserte underrom rettet mot reproduksjonsenhetens spektrale fargeomfang. Ved å se på de akkumulerte egenverdi prosentene beregnet ut ifra den totale summen (Figur 9), kan vi se at de spektrale måledataene fra skriveren kan beskrives relativt bra med et lavt antall uavhengige variabler.



Figur 9: Akkumulerte egenverdier ved PCA.

De spektrale reflektansfordelingene ble deretter konvertert til et mindre antall uavhengige datavariabler i disse underrommene. Ved å finne de hyperplanene som definerer disse punktenes konvekse overflate fant vi forslag til definisjon av skriverens spektrale fargeomfang.

### 5.1.2 Spektrale reflektanskurver

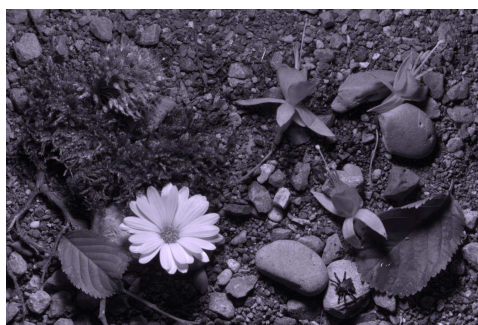
For å kunne gjøre vurderinger vedrørende reproduserbarheten til forskjellige spektra, hadde vi et behov for eksempler på spektrale reflektanskurver som det ville være interessant å reproducere på enheten. Vi valgte å benytte oss av spektrale målinger av Macbeth Color Checker. Dette er en industristandard for analyse av bildereproduksjonsutstyr, og består av et fargekart med 24 farger som er utvalgt fordi de dekker de fleste hovedkategorier av farger som man er interessert i å reproducere. Dette dreier seg om alt fra en vanlig gråskala til hudtoner, og ved å se på reproduksjonen av dette fargekartet kan man finne problemområder for en enhets fargehåndtering.

De spektrale reflektansfordelingene er i likhet med skriverens egenskaper basert på målinger ved hver 10. nanometer innen den synlige delen av lysspekteret.

### 5.1.3 Spektrale bildefiler

Vi tok i bruk tilgjengelige bilder i MUSP/AIX-formatet for å se på kvalitetsdegradering knyttet til dimensjonsreduksjonen ved bruk av PCA-baserte underrom. Man må her ta i betraktning at bildefilene ikke inneholder spektrale data i full





Figur 10: Bilde rekonstruert fra 1 PCA-komponent.

dimensjonalitet (31 eller 61 ved henholdsvis 10 eller 5 nanometer samplingsintervall), men beskriver spektrene ved hjelp av et utvalg koeffisienter og basisvektorer. Eksempelbildene hadde for det meste 16 koeffisienter, det vil si data som i utgangspunktet er maksimalt 16-dimensjonale.

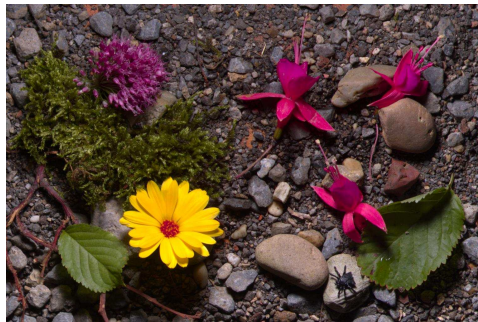
Ved bruk av PCA i vår sammenheng er man interessert i å sammenligne enhetsdata og billedata, og kanskje foreta en spektral fargeomfangstilpasning til enhetens fargerom. Vi har derfor valgt å benytte PCA-rom bygd opp på basis av enhetens måledata. Ved å benytte forskjellig antall dimensjoner, kom vi frem til de bildene man kan se i figur 10 til figur 16. Sett fra en enkel visuell inspeksjon av bildene, vil man kunne si at mye av fargeinformasjonen beholdes ved et lavt antall komponenter. Nøyere analyse ved hjelp av utregning av  $\Delta E$  i CIELAB og spektral RMS viser at de mindre blomstene til høyre i bildet representerer problemområder, men man må huske på at PCA-rommet ble generert ut ifra skriverens måledata. Dersom man ser på disse målingene, vil man se at det er logisk at de spektrale reflektansfordelingene er vanskelig å beskrive ved hjelp av prinsippkomponentene, siden de trolig også vil være vanskelig å generere ved hjelp av skriveren.

## 5.2 Visualisering av det spektrale omfanget

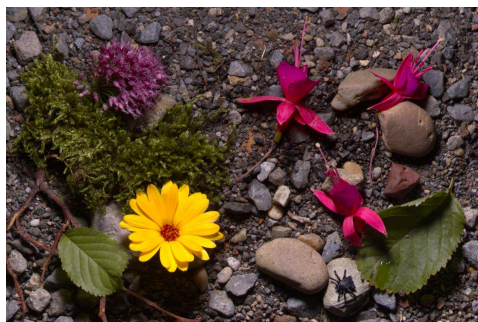
Ved å benytte seg av metoden for å finne skjæringen mellom omfanget og et plan, vil man kunne vise omfanget og et aktuelt spektrum slik som i figur 17 og 18. Omrisset av omfanget er tegnet inn, og man kan tydelig se at spektret i figur 17 befinner seg innenfor omfanget, mens det motsatte er tilfellet i figur 18. Vi ser også hvor langt det er fra overflaten til spektret, og vi kan se hvor mye det er nødvendig å flytte spektret for at det skal komme innenfor enhetsomfanget. En spektral gråakse i form av retningen til 1. PCA-komponent er inkludert i illustrasjonen. Visualiseringen gir helt klart svar på spørsmålet om en spektral reflektanskurve



Figur 11: Bilde rekonstruert fra 2 PCA-komponenter.



Figur 12: Bilde rekonstruert fra 3 PCA-komponenter.



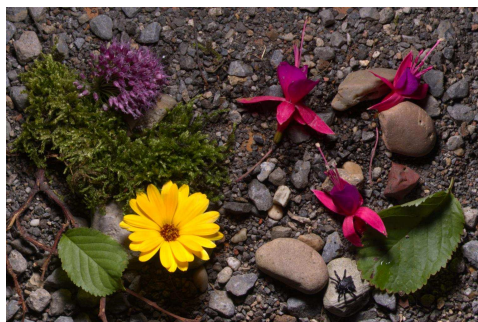
Figur 13: Bilde rekonstruert fra 4 PCA-komponenter.



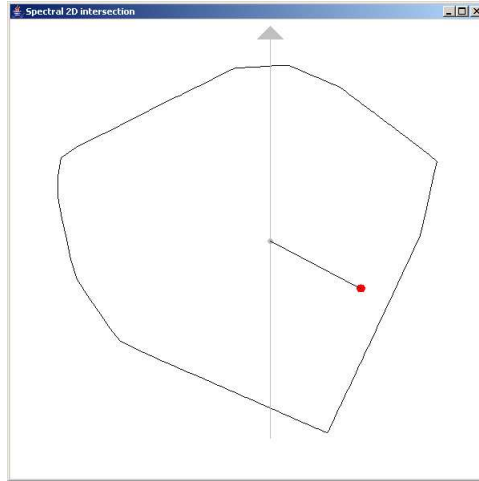
Figur 14: Bilde rekonstruert fra 5 PCA-komponenter.



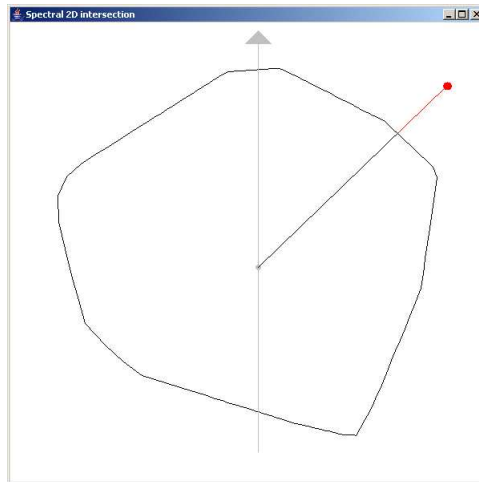
Figur 15: Bilde rekonstruert fra 8 PCA-komponenter.



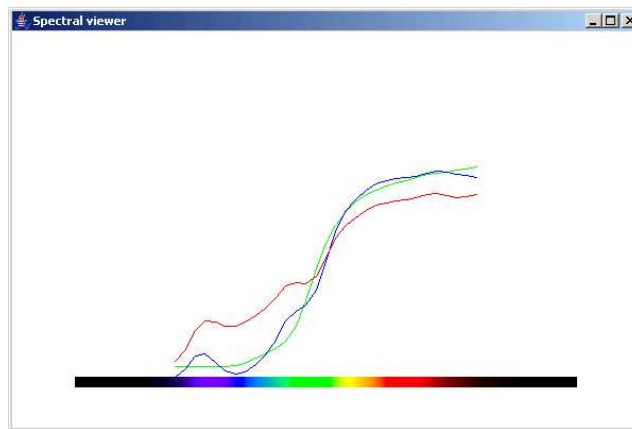
Figur 16: Bilde rekonstruert fra 15 PCA-komponenter.



Figur 17: Snittflate gjennom et spektralt fargeomfang.



Figur 18: Snittflate gjennom et spektralt fargeomfang.



Figur 19: Spektral fargeomfangstilpasning i 5 dimensjoner.

befinner seg innenfor representasjonen av enhetens spektrale fargeomfang.

### 5.3 Spektral fargeomfangstilpasning

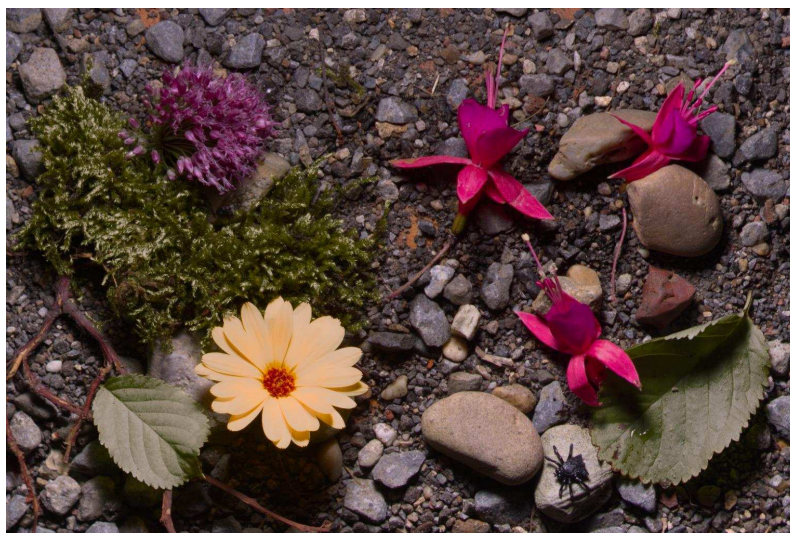
Dersom man vil utføre fargeomfangstilpasning kan man se på overføringen av data til PCA-baserte rom som første del av prosessen. Vi påstår derfor at det vil derfor være hensiktsmessig å velge rom basert på enhetens spektrale karakteristikk, siden man dermed har beveget seg over til et rom som passer enhetens spektrale reproduksjonsegenskaper, uten at man kan si noe om man befinner seg innenfor eller utenfor det akutte fargeomfangets overflate. Det har også en fordel ved at man minimerer den spektrale feilkilden man får når man konverterer de PCA-baserte posisjonene tilbake til spektrale fordelinger, i forhold til enhetens gjengivning av spektret.

Vi ser her resultatet av å benytte PCA på eksempelfordelinger fra Macbeth Color Checker, for deretter å flytte spektrene inn på overflaten til skriverens spektrale omfang. Figur 19 viser den opprinnelige spektrale reflektansfordelingen som en grønn kurve, mens den blå er resultatet som man får etter at målingene er projisert ned på et 5-dimensjonalt PCA-underrom. Den røde kurven indikerer at fordelingen befant seg utenfor fargeomfanget, og illustrerer hva som skjer etter at man har flyttet punktet ned på overflaten. Liknende undersøkelser viser at kurven kan beskrives bedre ved hjelp av flere komponenter, mens kurven endres litt mer når den flyttes til overflaten.

En reell test av denne metoden krever at man benytter den i tillegg til en spektral karakteriseringsmodell, og forsøker å gjengi spektrale bilder på en enhet. Dette er en omfattende prosess som inkluderer bruken av parsammenligninger og

Dimensjon	2	3	4	5	6	7	8
RMS etter PCA	0.067	0.037	0.030	0.025	0.021	0.020	0.018
RMS etter tilpasning	0.072	0.058	0.060	0.078	0.071	0.068	0.088

Tabell 1: Spektral RMS etter PCA og omfangstilpasning



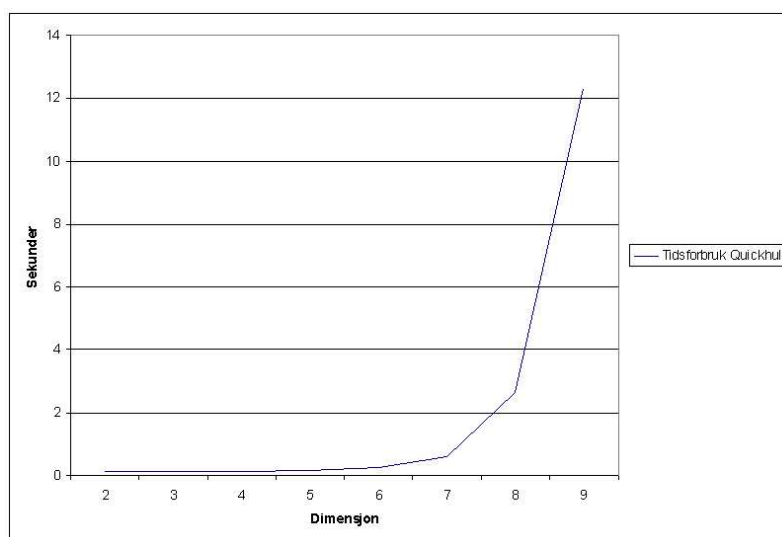
Figur 20: Et bilde som er blitt tilpasset et reproduksjonsomfang i 4 dimensjoner.

liknende for å vurdere resultatet, og omfanget ligger utenfor omfanget til denne rapporten. Vi har imidlertid sett nærmere på effekten av dimensjonsvalg på omfangstilpasningen. Ved å beregne gjennomsnittlig spektral RMS etter å ha utført PCA og omfangstilpasning på de 24 spektrene fra Macbeth Color Checker, har vi kommet frem til de resultatene som man kan se i tabell 1. Vi kan se at gjennomsnittlig spektral RMS-feil minsker med dimensjonen etter PCA, noe som følger av at man benytter flere komponenter for å beskrive spektrene. Siden RMS-verdiene etter omfangstilpasningen inkluderer feilen ved PCA, kan man se at feilen ved omfangstilpasning generelt sett øker med dimensjonen. En mulig forklaring er at testmålingene fra enheten hovedsaklig brer seg utover langs de viktigste prinsippkomponentene, og at man ved å benytte flere komponenter ender opp med å flytte spektrene som er utenfor lengre enn ødvendig langs overflaten av omfanget. Dette kan bety at de mindre viktige komponentene prioriteres for mye, noe som kan være et problem ved denne metoden. For en oversikt over enkeltverdier fra fargekartet, se vedlegg B og C.

Vi skal også se på et eksempel på tilpasning av et spektralt bilde. Ved å foreta PCA etterfulgt av en omfangstilpasning i 4 dimensjoner, har vi kommet frem til

Dimensjon	2	3	4	5	6	7	8	9
1000 punkter	0.141	0.141	0.141	0.156	0.266	0.594	2.641	12.296
2000 punkter	0.234	0.25	0.25	0.281	0.438	1.125	6.219	-
4000 punkter	0.422	0.453	0.453	0.485	0.734	1.579	10.121	-

Tabell 2: Qhull tidsforbruk i sekunder.



Figur 21: Qhull tidsforbruk

resultatet i figur 20. Her kan vi tydelig se effekten av omfangstilpasningen, som spesielt vises på de gule områdene i bildet. En kontroll av måledata fra skriveren viser at flere målepunkter hadde vært ønskelig i dette området av spektret, noe som er en tydelig indikasjon på at valget av måledata kan være av avgjørende betydning for hvor bra resultatet blir.

## 5.4 Qhull

Vi vil her se på tidsforbruket som er assosiert med å beregne et convex hull for skriverens spektrale fargeomfang. Tabell 2 og figur 21 viser en eksponentiell økning av tidsforbruk når datamengdens dimensjon øker. Tidsforbruket ved de lavere dimensjonene går hovedsaklig med til å starte den eksterne Qhull-prosessen, samt diskaksess for å kommunisere data mellom prosessene. Det kan også være aktuelt å kalkulere fargeomfanget til bilder som består av ikke altfor mange unike farger, dersom man begrenser dimensjonaliteten til datasettet. Dette vil være en

logisk utvidelse dersom man er interessert i å utvikle en bildeavhengig algoritme for spektral omfangstilpasning, noe som er aktuelt for å forbedre resultatet som slike metoder kan gi. Ved å ha et kildeomfang i tillegg til reproduksjonsomfanget, vil det være mulig å foreta mer avanserte tilpasninger enn kun klipping til reproduksjonsomfanget. Test av Qhull på data med et høyere antall dimensjoner er ikke gjennomført, på grunn av at datamengdene blir for store for å kunne bli holdt i internminnet på en vanlig pc, noe som fører til betydelige hastighetsreduksjoner grunnet overføring av data til og fra disk.

## 5.5 Problemet med convex hull

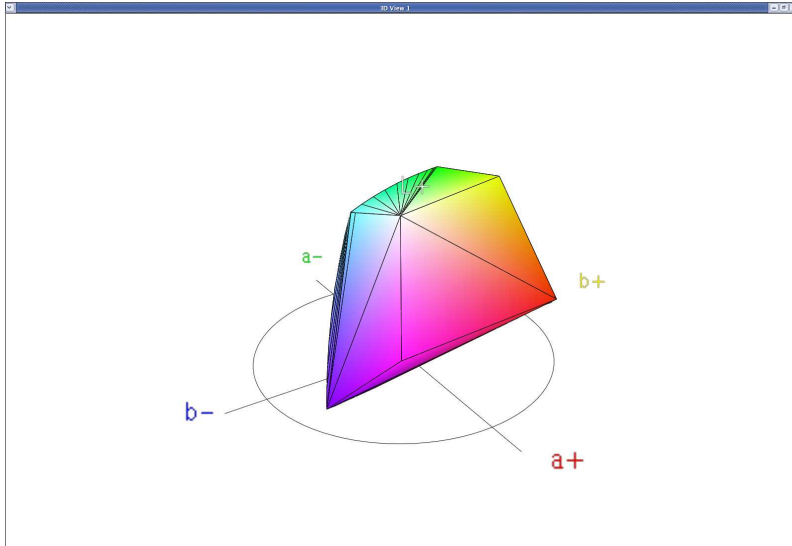
Undersøkelser gjort i vanlige 3-dimensjonale fargerom tilsier at convex hull overestimerer volumet til fargeomfang, så lenge et tilstrekkelig antall målepunkter benyttes. Figur 22 viser overflaten til et fargeomfang, beregnet som et vanlig convex hull. Man kan se at overflaten er konveks, og store arealer beskrives ved hjelp av forholdsvis få punkter. Til sammenligning er figur 23 mer i tråd med det man ville kalle overflaten gitt settet med målepunkter. Man kan se at vanlige convex hull overforenkler fargeomfanget, og dette problemet kan på samme måte overføres til spektrale rom.

Figur 23 viser en foreslått løsning [29] på denne svakheten ved convex hull. Man har også her beregnet overflaten som et convex hull, men her har man først foretatt en skalering av punktenes posisjon langs radius fra sentrum ved hjelp av en gammafunksjon<sup>4</sup>. Deretter flytter man den resulterende overflaten tilbake til det opprinnelige rommet ved hjelp av en invers transform. Metoden er avhengig av at riktig gammaparameter angis eller kalkuleres ut ifra dimensjonen og de aktuelle punktene. Skaleringen av punktene kan også gjennomføres i PCA-baserte underrom av vilkårlig dimensjon, noe som er en aktuell utvidelse av prototypen og metoden. Det vil derimot komplisere utregningen av skjæringspunkt med enhetsomfanget, siden den resulterende overflaten ikke er konveks i det opprinnelige rommet, mens det gammamodifiserte rommet ikke er en lineær transformasjon av det originale.

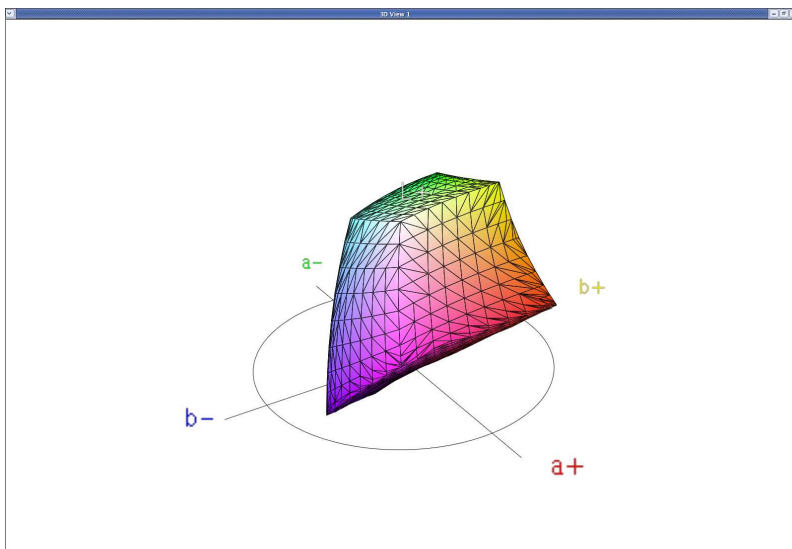
---

<sup>4</sup>Gammafunksjonen bidrar til en valgfri skalering der punktene beveger seg mot overflaten til en kule, der et parameter bestemmer hvor my man flytter punktene mot kuleoverflaten. Dette bidrar til at flere punkter blir med i overflatestrukturen etter beregning av convex hull i det skalerte rommet.





Figur 22: Et fargeomfang i CIELAB representert som et vanlig convex hull.



Figur 23: Et fargeomfang i CIELAB representert som et convex hull beregnet på grunnlag av skalerte koordinater.

## 6 Konklusjon og videre arbeid

Vi har i denne rapporten sett på en metode for visualisering av spektrale fargedata. Den er bygget opp rundt PCA-basert forenkling av spektrale data, før spektrale fargeomfang beregnes ved hjelp av Quickhull-algoritmen. Vi har sett at bruk av PCA-rom med et lavt antall dimensjoner reduserer nøyaktigheten ved angivelse av spektrale fordelinger, og at hva som menes med tilstrekkelig nøyaktighet varierer med bruksområdet. Ved beregning av convex hull med Qhull fant vi at data i mer enn 9 dimensjoner ikke er tilrådelig ut ifra Quickhull-algorithmens kompleksitet. Bruk av mindre enn 3 variabler for å beskrive en spektralfordeling er totalt uegnet for formål som retter seg mot reproduksjon av fargeinformasjon, noe som er forståelig sett ut ifra trikromatisitetsteorien. Sett ut ifra de krav som forskjellige artikkelforfattere stiller til nøyaktighet, vil dermed denne løsningen være aktuell for enkelte formål. Man må imidlertid være oppmerksom på at valg av et større antall dimensjoner krever mer måledata fra enhet enn lavere dimensjoner, siden det blir lengre avstander mellom punktene, dersom man vil beholde en nøyaktig overflatebeskrivelse. Det er også anbefalt å benytte datapunkter som befinner seg ut mot overflaten til fargeomfanget, siden punkter som ikke er en del av omfangets overflate ikke bidrar med noe til prosessen, og kun øker tidsforbruket.

Analyse av spektral reproduserbarhet må ta hensyn til at spektre nesten aldri er fullstendig reproduserbare på en enhet, noe som forsværer tap av nøyaktighet ved overgang til PCA-baserte rom. Bruk av convex hull i PCA-rom er tidligere blitt benyttet for å beskrive spektrale fargeomfang, og vi har sett på muligheter for å visualisere snitt av disse strukturene. Man kan visualisere disse snittene ved å finne skjæringspunkt mellom linjer og overflaten, slik at man generere 2- og 3-dimensjonale snitt. I tillegg kan man finne et spektrums relative avstand fra sentrum i forhold til overflaten, og man kan flytte ikke-reproduserbare farger ned på overflaten. Dette introduserer et forslag til spektral fargeomfangstilpasning, som bør undersøkes videre. I forhold til de forskningsspørsmålene som vi stilte oss i forkant av projektet, har vi sett på forskjellige aspekter vedrørende spektral reproduksjon og omfangsvurdering.

### Representasjon av multispektrale fargeomfang

Ved å benytte convex hull har vi sett at dette gir en veldefinert overflate, samtidig som det er teoretisk enkelt å besvare spørsmål angående et spektrums reproduserbarhet. Vi har sett at under forutsetningen om at omfanget har minst mulig konkaviteter, vil convex hull gi en tilfredsstillende representasjon av de spektre som en enhet kan gjengi. Utvidelser av modellen kan også være aktuelt, og vi har foreslått bruken av eksisterende forbedringer for 3-dimensjonale omfang som aktuelt også for spektralt arbeid.

### **Valg av datamengdens dimensjon**

Vi har sett på hvordan valget av dimensjon innvirker på presisjon og analyse av omfanget. De aktuelle algoritmers tidsforbruk er undersøkt, og vi har funnet frem til dimensjonsvalg som kan benyttes i reelle situasjoner innen spektrale bildereproduksjon, og sett på hva dette innebærer for spektrale bilders visuelle fremtoning. I forbindelse med analyse og omfangstilpasning i vårt tilfelle, viser det seg at data i mer enn 8 dimensjoner gir et tids- og minneforbruk som ikke er gjennomførbart på alminnelig tilgjengelig maskinvare. Tilsvarende har vi sett at 3 dimensjoner er et absolutt minimumskrav for å beholde fargeinformasjon, dersom formålet er at resultatet skal gi et noenlunde riktig synsinntrykk. Vi har vist at spektral RMS-feil for spektrale reflektansfordelinger minsker med dimensjonen, men et generelt presisjonskrav som kan benyttes for å bestemme nødvendig dimensjonalitet finnes fremdeles ikke. Hvilken dimensjon man benytter ved behandling av spektrale data, vil i tråd med eksisterende litteratur på området være situasjonsbetinget.

### **Visualisering av omfanget**

Ved å benytte oss av snittflater gjennom omfanget, har vi gjort det mulig å vise grafisk hvordan et spektrum ligger i forhold til omfangets overflate. Det er imidlertid viktig at man innser at det mest sannsynlig finnes punkter på overflaten som er nærmere spektret enn de som vises i snittflaten. Likheter med liknende metoder som arbeider med 3-dimensjonale data rettferdiggjør valget av snittflate som et aktuelt hjelpemiddel i arbeidet med spektrale data og omfang, samtidig som visualiseringen er med på å belyse arbeidet med forbedring av spektrale omfangsbeskrivelser, samt utvikling av metoder for spektral fargeomfangstilpasning. Visualiseringen kan dermed gi et utgangspunkt for videre arbeid innen spektral bildereproduksjon, og fører til en økt forståelse av vår metode for omfangstilpasning.

### **Fargeforskjellsmodeller og reproduserbarheten til et reflektansspektrum**

Vi har sett at avgjørelser om reproduserbarhet på enheter, som regel vil bestå av vurderinger av hvor nært det ønskede resultatet man kan komme. Ved utviklingen av verktøy for interaktiv omfangstilpasning, har vi gjort et forsøkt på å se nærmere på denne problemstillingen. Fordelen er stor ved at man kan forandre dimensjons- og tilpasningsvalg, for deretter å analysere resultatet ved hjelp av fargeforskjells-mål som spektral RMS, i tillegg til simulering av det visuelle resultatet under en gitt lyskilde. Vi har sett på reproduksjon av spektrale reflektansfordelinger fra Macbeth Color Checker i forhold til måledata fra en skriver, og vi har foretatt spektral fargeomfangstilpasning ved å flytte måledata ned på en representasjon av

skriverens spektrale omfang, langs en linje mot sentrum av omfanget. Ved å beregne spektral RMS-feil for resultatet i forhold til de opprinnelige måleverdiene, har vi sett at PCA introduserer en feilfaktor som blir mindre med antallet dimensjoner, mens selve omfangstilpasningen fører til større endringer ved et høyere antall dimensjoner.

## **Videre arbeid**

Sentralt i det videre arbeidet med utviklingen av visualiseringsteknikker og spektral fargeomfangstilpasning står inklusjonen av spektrale karakteriseringsmodeller, for å kunne uttale seg om korrektheten av det spektrale fargeomfanget man kommer frem til. Dette krever at man undersøker reproduksjonsenheter, og analyserer sammenhengen mellom det teoretiske og det virkelige spektrale fargeomfanget. Ved å benytte spektral fargeomfangstilpasning som et mellomledd i kjeden mellom spektral innhenting og reproduksjon av bilder, vil man kunne foreta begrunnede valg for hvordan man behandler spektre som i utgangspunktet ikke kan gjengis bra på enheten.

Vi har i denne rapporten sett på eksperimentelle data fra en enkelt enhet. Dette gir kun en indikator på metodens effektivitet, og et bredere sammenligningsgrunnlag er ønskelig for å kunne se nærmere på aspekter vedrørende utvalget av måledata, spesielt med tanke på å oppnå en best mulig approksimasjon av enhetenes spektrale fargeomfang. En problemstilling som er spesielt aktuell, er sammenligning av spektrale omfang fra forskjellige enheter. En slik sammenligning kan også være nyttig for tradisjonell bildereproduksjon, siden man kan for eksempel få et bedre beslutningsgrunnlag ved utvelgelse av kloranter i ulike situasjoner. Dette viser at det i tiden fremover vil bli gjort mye arbeid innen feltet spektral reproduksjon av farger, og nye metoder for omfangstilpasning og visualisering kan skapes med utgangspunkt i det arbeid som hittil er blitt gjort.

## Referanser

- [1] H. Haneishi og Y. Sakuda. "Representing Gamut of Spectral Reflectance by a Polyhedron in High Dimensional Space". *Proceedings of the 3rd International Conference on Multispectral Color Science (MCS'01)*, 2001.
- [2] I. Farup, J. Y. Hardeberg, A. M. Bakke, S. Kopperud og A. Rindal. "Visualization and Interactive Manipulation of Color Gamuts". *IS&T/SID Tenth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering: Systems, Technologies and Applications*, Scottsdale, Arizona, Nov. 2002. [URL: <http://colorlab.hig.no/icc3d/papers.php>].
- [3] I. Farup og J. Y. Hardeberg. "Interactive Color Gamut Mapping". *11th International Printing and Graphic Arts Conference, Bordeaux, France, Okt. 2002*. [URL: <http://colorlab.hig.no/icc3d/papers.php>].
- [4] A. M. Bakke, A. Rindal og S. Kopperud. "Visualisering av 3D fargerom". HiG hovedprosjektrapport, høgskoleingeniør data, tilgjengelig fra biblioteket på Høgskolen i Gjøvik, Teknologiveien 22, 2815 Gjøvik.
- [5] R. P. Aguila. "The Extreme Vertices Model in the 4D space and its Applications in the Visualization and Analysis of Multidimensional Data Under the Context of a Geographical Information System". Masteroppgave Sta. Catarina Mártir, Cholula, Puebla, México, 16. mai 2003.
- [6] S. Nakauchi, T. Niitsuma, T. Hayasaka og S. Usui. "Visualization of Multispectral Color Images by Adaptive Color Scaling with Self-Organized Codebooks". *Proceedings of the 3rd International Conference on Multispectral Color Science (MCS'01)*, 2001.
- [7] F. H. Imai, N. Tsumura, H. Haneishi og Y. Miyake. "Principal component analysis of skin color and its application to colorimetric color reproduction on CRT display and hardcopy". *The Journal of Imaging Science and Technology*, vol. 40, no. 5, Sep/Oct 1996, ss. 422-430; ISBN/ISSN: 1062-3701.
- [8] T. F. Banchoff. *Beyond the third dimension: Geometry, computer graphics, and higher dimensions*. Scientific American Library, 1990.
- [9] M. R. Rosen, M. D. Fairchild, G. M. Johnson og D. R. Wyble. "Color Management within a Spectral Image Visualization Tool". *IS&T/SID Eight Color Imaging Conference*, (2000).

- [10] J. Y. Hardeberg, F. Schmitt, H. Brettel, Jean-P. Crettez og H. Maître. "Multispectral image acquisition and simulation of illuminant changes". *Colour Imaging: Vision and Technology*, 1999.
- [11] A. Sangole og G. K. Knopf. "Representing high-dimensional data sets as closed surfaces". *Information Visualization 1*, (2002).
- [12] G. M. Johnson and M. D. Fairchild. "Full-Spectral Color Calculations in Realistic Image Synthesis". *IEEE Computer Graphics and Applications*, Juli/August 1999.
- [13] J. L. Solka og B. T. Clark. "A Visualization Framework for the Analysis of HyperDimensional Data". *International Journal of Image and Graphics*, vol. 2, no. 1, (2002).
- [14] Z. Pan. "Principal Component Analysis Based Visualization and Human Melanoma Classification". CMSC 838b Term Paper, University of Maryland.
- [15] L. A. Taplin og R. S. Berns. "Spectral Color Reproduction Based on a Six-Color Inkjet Output System". *The Ninth Color Imaging Conference: Color Science and Engineering: Systems, Technologies, Applications*, Scottsdale, Arizona, ss. 209-213. November 2001. ISBN/ISSN: 0-89208-235-6.
- [16] J. Y. Hardeberg. "On the spectral dimensionality of object colours". *CGIV 2002: The First European Conference on Colour in Graphics, Image and Vision*, 2002.
- [17] F. H. Imai, M. R. Rosen and R. S. Berns. "Comparative Study of Metrics for Spectral Match Quality". *The First European Conference on Colour in Graphics, Image and Vision (CGIV)*, Poitiers, Frankrike, vol. 1, ss. 492-496, 2002.
- [18] J. Y. Hardeberg og J. Gerhardt. "Characterization of an eight colorant inkjet system for spectral color reproduction". *Proc. CGIV 2004 Second European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision*, ss. 263-267, Aachen, Tyskland, 2004.
- [19] C. B. Barber, D. P. Dobkin og Hannu Huhdanpaa. "The quickhull algorithm for convex hulls". *ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS)*, vol. 22 no. 4, ss. 469-483, Desember 1996.
- [20] R. Schettini, D. Bianucci, G. Mauri og S. Zuffi. "An Empirical Approach for Spectral Color Printers Characterization". Tilgjengelig fra *Università degli Studi di Milano-Bicocca, Piazza dell'Ateneo Nuovo, 1 - 20126, Milano (Italia)*. [URL: <http://www.unimib.it/> ]

- [21] H. E. J. Neugebauer. "Die theoretischen Grundlagen des Mehrfarbendruckes". *Zeitschrift für wissenschaftliche Photographie Photophysik und Photochemie*, 36(4), 1937.
- [22] J. A. C. Yule og W. J. Nielsen. "The penetration of light into paper and its effect on halftone reproductions". *Proceedings of the Technical Association of the Graphic Arts (TAGA)*, vol. 3, s. 65, 1951.
- [23] N. Matsushiro, F. H. Imai og N. Ohta. "Principal component analysis of spectral images based on the independence of color matching function vectors". *Proc. of Third International Conference on Multispectral Color Science*, ss. 77-80, 2001.
- [24] I. Farup, J. Y. Hardeberg og M. Amsrud. "Enhancing the SGCK Colour Gamut Mapping Algorithm". *CGIV 2004 - Second European Conference on Color in Graphics, Imaging and Vision*, Aachen, Tyskland, ss. 520-524, 2004.
- [25] R. Baribeau. "Optimized Spectral Estimation Methods for Improved Colorimetry with Laser Scanning Systems". *Proc. 1st International Symposium on 3D Data Processing Visualization and Transmission*, ss. 400-404, 2002.
- [26] J. A. S. Viggiano. "Metrics for Evaluating Spectral Matches: a Quantitative Comparison". *Proceedings of CGIV-2004: the Second European Conference on Colour Graphics, Imaging, and Vision*. Springfield, VA: IS&T - The Society for Imaging Science & Technology, 2004.
- [27] J. Morovic og M. R. Luo. "The Fundamentals of Gamut Mapping: A Survey". *Journal of Imaging Science and Technology*, 45/3, ss. 283-290, 2001.
- [28] P. Herzog. "MUSP Multispectral Image File Format v. 1.4". Personlig kommunikasjon.
- [29] R. Balasubramanian og E. Dalal. "A method for quantifying the Color Gamut of an Output Device". *Proceedings of SPIE 3018, Color Imaging: Device-Independent Color, Color Hard Copy, and Graphic Arts II*, ss. 110-116, 1997.

## Figurer

1	En visuell representasjon av lys ved forskjellige bølgelengder . . .	4
2	Eksempeldata i 2D. . . . .	6
3	PCA gjennomført på 2-dimensjonale data. 2 nye basisvektorer er funnet. . . . .	7
4	Eksempel på et convex hull . . . . .	8
5	Eksempelbilde ved standard D65 lyskilde. . . . .	14
6	Eksempelbilde under lysforhold med høy blå metning. . . . .	15
7	Eksempelbilde under mørk grønn lyskilde. . . . .	15
8	Visualisering av fargeomfang i 2-dimensjonalt PCA-rom. . . . .	19
9	Akkumulerte egenverdier ved PCA. . . . .	25
10	Bilde rekonstruert fra 1 PCA-komponent. . . . .	26
11	Bilde rekonstruert fra 2 PCA-komponenter. . . . .	27
12	Bilde rekonstruert fra 3 PCA-komponenter. . . . .	27
13	Bilde rekonstruert fra 4 PCA-komponenter. . . . .	27
14	Bilde rekonstruert fra 5 PCA-komponenter. . . . .	28
15	Bilde rekonstruert fra 8 PCA-komponenter. . . . .	28
16	Bilde rekonstruert fra 15 PCA-komponenter. . . . .	28
17	Snittflate gjennom et spektralt fargeomfang. . . . .	29
18	Snittflate gjennom et spektralt fargeomfang. . . . .	29
19	Spektral fargeomfangstilpasning i 5 dimensjoner. . . . .	30
20	Et bilde som er blitt tilpasset et reproduksjonsomfang i 4 dimensjoner. . . . .	31
21	Qhull tidsforbruk . . . . .	32
22	Et fargeomfang i CIELAB representert som et vanlig convex hull. . . . .	34
23	Et fargeomfang i CIELAB representert som et convex hull beregnet på grunnlag av skalerte koordinater. . . . .	34



**Tabeller**

1	Spektral RMS etter PCA og omfangstilpasning . . . . .	31
2	Qhull tidsforbruk i sekunder. . . . .	32

# Vedlegg A: Spektrale data fra Macbeth Color Checker

```

# Samples
24
# Channels
81
# First Wavelength
380
# Wavelength delta
5
# Spectral data
0.048 0.051 0.055 0.06 0.065 0.068 0.068 0.067 0.064 0.062 0.059 0.057
0.055 0.054 0.053 0.053 0.052 0.052 0.052 0.052 0.053 0.054 0.055 0.057
0.059 0.061 0.062 0.065 0.067 0.07 0.072 0.074 0.075 0.076 0.078
0.079 0.082 0.087 0.092 0.1 0.107 0.115 0.122 0.129 0.134 0.138
0.142 0.146 0.15 0.154 0.158 0.163 0.167 0.173 0.18 0.188 0.196
0.204 0.213 0.222 0.231 0.242 0.251 0.261 0.271 0.282 0.294 0.305
0.318 0.334 0.354 0.372 0.392 0.409 0.42 0.436 0.45 0.462 0.465
0.448 0.432 0.421
0.103 0.12 0.141 0.163 0.182 0.192 0.197 0.199 0.201 0.203 0.205 0.208
0.212 0.217 0.224 0.231 0.24 0.251 0.262 0.273 0.282 0.289 0.293
0.296 0.301 0.31 0.321 0.326 0.322 0.31 0.298 0.291 0.292 0.297
0.3 0.298 0.295 0.295 0.305 0.326 0.358 0.397 0.435 0.468 0.494
0.514 0.53 0.541 0.55 0.557 0.564 0.569 0.574 0.582 0.59 0.597
0.605 0.614 0.624 0.637 0.652 0.668 0.682 0.697 0.713 0.728 0.745
0.753 0.762 0.774 0.783 0.788 0.791 0.787 0.789 0.794 0.801 0.799
0.771 0.747 0.734
0.113 0.138 0.174 0.219 0.266 0.3 0.32 0.33 0.336 0.337 0.337 0.337
0.335 0.334 0.331 0.327 0.322 0.316 0.31 0.302 0.293 0.285 0.276
0.268 0.26 0.251 0.243 0.234 0.225 0.215 0.208 0.203 0.198 0.195
0.191 0.188 0.183 0.177 0.172 0.167 0.163 0.16 0.157 0.153 0.15
0.147 0.144 0.141 0.137 0.133 0.13 0.126 0.123 0.12 0.118 0.115
0.112 0.11 0.108 0.106 0.105 0.104 0.104 0.103 0.103 0.102 0.102
0.102 0.102 0.102 0.102 0.104 0.104 0.104 0.104 0.106 0.106 0.107
0.11 0.115 0.12
0.048 0.049 0.049 0.049 0.05 0.049 0.049 0.05 0.05 0.051 0.052 0.053
0.054 0.056 0.058 0.06 0.061 0.063 0.064 0.065 0.067 0.068 0.07
0.072 0.078 0.088 0.106 0.13 0.155 0.173 0.181 0.182 0.177 0.168
0.157 0.147 0.137 0.129 0.126 0.125 0.122 0.119 0.115 0.109 0.104
0.1 0.098 0.097 0.098 0.1 0.1 0.099 0.097 0.096 0.095 0.095
0.095 0.097 0.101 0.11 0.125 0.147 0.174 0.21 0.247 0.283 0.311
0.329 0.343 0.353 0.358 0.362 0.364 0.36 0.362 0.364 0.368 0.368
0.355 0.346 0.341
0.123 0.152 0.197 0.258 0.328 0.385 0.418 0.437 0.446 0.448 0.448 0.447
0.444 0.44 0.434 0.428 0.421 0.413 0.405 0.394 0.381 0.372 0.362
0.352 0.342 0.33 0.314 0.294 0.271 0.249 0.231 0.219 0.211 0.209
0.209 0.207 0.201 0.196 0.196 0.199 0.206 0.215 0.223 0.229 0.235
0.241 0.245 0.245 0.243 0.243 0.247 0.254 0.269 0.291 0.318 0.351
0.384 0.417 0.446 0.47 0.49 0.504 0.511 0.517 0.52 0.522 0.523
0.522 0.521 0.521 0.522 0.521 0.521 0.516 0.514 0.514 0.517 0.515
0.5 0.491 0.487
0.11 0.133 0.167 0.208 0.252 0.284 0.303 0.314 0.322 0.329 0.336 0.344
0.353 0.363 0.375 0.39 0.408 0.433 0.46 0.492 0.523 0.548 0.566
0.577 0.582 0.583 0.58 0.576 0.569 0.56 0.549 0.535 0.519 0.501
0.48 0.458 0.436 0.414 0.392 0.369 0.346 0.324 0.302 0.279 0.26
0.245 0.234 0.226 0.221 0.217 0.215 0.212 0.21 0.209 0.208 0.209
0.211 0.215 0.22 0.227 0.233 0.239 0.244 0.249 0.252 0.252 0.25
0.248 0.244 0.245 0.245 0.251 0.26 0.269 0.278 0.288 0.297 0.301
0.297 0.296 0.296
0.053 0.054 0.054 0.054 0.054 0.054 0.053 0.053 0.052 0.052 0.052 0.052
0.052 0.052 0.052 0.052 0.052 0.052 0.053 0.054 0.055 0.056 0.057
0.059 0.061 0.064 0.068 0.076 0.086 0.101 0.12 0.143 0.17 0.198
0.228 0.26 0.297 0.338 0.38 0.418 0.452 0.481 0.503 0.52 0.532
0.543 0.552 0.56 0.566 0.572 0.578 0.583 0.587 0.593 0.599 0.602
0.604 0.606 0.608 0.611 0.615 0.619 0.622 0.625 0.628 0.63 0.633
0.633 0.633 0.636 0.637 0.639 0.638 0.633 0.633 0.636 0.641 0.639
0.616 0.598 0.582
0.099 0.12 0.15 0.189 0.231 0.268 0.293 0.311 0.324 0.335 0.348 0.361
0.373 0.383 0.387 0.383 0.374 0.361 0.345 0.325 0.301 0.275 0.247
0.223 0.202 0.184 0.167 0.152 0.137 0.125 0.116 0.11 0.106 0.103
0.099 0.094 0.09 0.086 0.083 0.083 0.083 0.085 0.086 0.087 0.087
0.086 0.085 0.084 0.084 0.085 0.088 0.092 0.098 0.105 0.111 0.118
0.123 0.126 0.126 0.124 0.12 0.117 0.115 0.115 0.116 0.118 0.12
0.124 0.128 0.133 0.139 0.149 0.162 0.178 0.197 0.219 0.242 0.259
0.275 0.294 0.316
0.096 0.108 0.123 0.135 0.144 0.145 0.144 0.141 0.138 0.134 0.132 0.132
    
```

	0.131	0.131	0.129	0.128	0.126	0.126	0.125	0.123	0.119	0.114	0.109
	0.105	0.103	0.102	0.1	0.097	0.094	0.091	0.089	0.09	0.092	0.096
	0.102	0.106	0.108	0.109	0.112	0.126	0.157	0.208	0.274	0.346	0.415
	0.473	0.517	0.547	0.567	0.582	0.591	0.597	0.601	0.604	0.607	0.608
	0.607	0.606	0.605	0.605	0.605	0.604	0.605	0.606	0.606	0.604	0.602
	0.601	0.599	0.598	0.596	0.595	0.593	0.587	0.584	0.584	0.586	0.584
	0.566	0.551	0.54								
0.101	0.115	0.135	0.157	0.177	0.191	0.199	0.203	0.206	0.198	0.19	0.179
	0.168	0.156	0.144	0.132	0.12	0.11	0.101	0.093	0.086	0.08	0.075
	0.07	0.067	0.063	0.061	0.059	0.058	0.056	0.054	0.053	0.052	0.052
	0.053	0.054	0.055	0.055	0.054	0.053	0.052	0.052	0.053	0.055	0.059
	0.065	0.074	0.086	0.099	0.113	0.126	0.138	0.149	0.161	0.172	0.182
	0.193	0.205	0.217	0.232	0.248	0.266	0.282	0.301	0.319	0.338	0.355
	0.371	0.388	0.406	0.422	0.436	0.451	0.46	0.471	0.481	0.492	0.495
	0.482	0.471	0.467								
0.056	0.058	0.059	0.059	0.06	0.061	0.061	0.061	0.062	0.063	0.064	0.066
	0.068	0.071	0.075	0.079	0.085	0.093	0.104	0.118	0.135	0.157	0.185
	0.221	0.269	0.326	0.384	0.44	0.484	0.516	0.534	0.542	0.545	0.541
	0.533	0.524	0.513	0.501	0.487	0.472	0.454	0.436	0.416	0.394	0.374
	0.358	0.346	0.337	0.331	0.328	0.325	0.322	0.32	0.319	0.319	0.32
	0.324	0.33	0.337	0.345	0.354	0.362	0.368	0.375	0.379	0.381	0.379
	0.376	0.373	0.372	0.375	0.382	0.392	0.401	0.412	0.422	0.433	0.436
	0.426	0.413	0.404								
0.06	0.061	0.063	0.064	0.065	0.065	0.064	0.064	0.064	0.064	0.064	0.065
	0.065	0.066	0.067	0.068	0.069	0.073	0.077	0.084	0.092	0.1	0.107
	0.115	0.123	0.133	0.146	0.166	0.193	0.229	0.273	0.323	0.374	0.418
	0.456	0.487	0.512	0.534	0.554	0.57	0.584	0.598	0.609	0.617	0.624
	0.63	0.635	0.64	0.645	0.65	0.654	0.658	0.662	0.667	0.672	0.675
	0.676	0.677	0.678	0.681	0.685	0.688	0.69	0.693	0.696	0.698	0.698
	0.698	0.698	0.7	0.701	0.701	0.701	0.695	0.694	0.696	0.7	0.698
	0.673	0.653	0.639								
0.069	0.081	0.096	0.114	0.136	0.156	0.175	0.193	0.208	0.224	0.244	0.265
	0.29	0.316	0.335	0.342	0.338	0.324	0.302	0.273	0.239	0.205	0.172
	0.144	0.12	0.101	0.086	0.074	0.066	0.059	0.054	0.051	0.048	0.046
	0.045	0.044	0.043	0.042	0.041	0.041	0.04	0.04	0.04	0.04	0.039
	0.039	0.04	0.04	0.04	0.04	0.041	0.041	0.042	0.042	0.042	0.043
	0.043	0.043	0.044	0.044	0.044	0.044	0.045	0.046	0.048	0.05	0.051
	0.053	0.056	0.06	0.064	0.07	0.079	0.091	0.104	0.12	0.138	0.154
	0.168	0.186	0.204								
0.055	0.056	0.057	0.058	0.058	0.058	0.059	0.059	0.059	0.06	0.062	0.063
	0.065	0.067	0.07	0.074	0.078	0.084	0.091	0.101	0.113	0.125	0.14
	0.157	0.18	0.208	0.244	0.286	0.324	0.351	0.363	0.363	0.355	0.342
	0.323	0.303	0.281	0.26	0.238	0.217	0.196	0.177	0.158	0.14	0.124
	0.111	0.101	0.094	0.089	0.086	0.084	0.082	0.08	0.078	0.077	0.076
	0.075	0.075	0.075	0.077	0.078	0.08	0.082	0.085	0.088	0.089	0.089
	0.09	0.09	0.09	0.089	0.092	0.094	0.097	0.102	0.106	0.11	0.111
	0.112	0.112	0.112								
0.052	0.052	0.052	0.052	0.051	0.051	0.05	0.05	0.049	0.049	0.049	0.049
	0.049	0.049	0.049	0.048	0.048	0.047	0.047	0.046	0.045	0.045	0.044
	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.044	0.045	0.046
	0.047	0.048	0.05	0.053	0.057	0.063	0.072	0.086	0.109	0.143	0.192
	0.256	0.332	0.413	0.486	0.55	0.598	0.631	0.654	0.672	0.686	0.694
	0.7	0.704	0.707	0.712	0.718	0.721	0.724	0.727	0.729	0.73	0.73
	0.729	0.727	0.728	0.729	0.729	0.727	0.723	0.721	0.724	0.728	0.727
	0.702	0.68	0.664								
0.054	0.053	0.054	0.053	0.053	0.053	0.053	0.052	0.052	0.052	0.053	0.053
	0.053	0.054	0.055	0.056	0.059	0.065	0.075	0.093	0.121	0.157	0.202
	0.252	0.303	0.351	0.394	0.436	0.475	0.512	0.544	0.572	0.597	0.615
	0.63	0.645	0.66	0.673	0.686	0.698	0.708	0.718	0.726	0.732	0.737
	0.742	0.746	0.749	0.753	0.757	0.761	0.765	0.768	0.772	0.777	0.779
	0.78	0.78	0.781	0.782	0.785	0.785	0.787	0.789	0.792	0.792	0.793
	0.792	0.79	0.792	0.792	0.79	0.787	0.782	0.778	0.78	0.782	0.781
	0.752	0.728	0.71								
0.118	0.142	0.179	0.228	0.283	0.322	0.343	0.354	0.359	0.357	0.35	0.339
	0.327	0.313	0.298	0.282	0.267	0.253	0.239	0.225	0.209	0.195	0.182
	0.172	0.163	0.155	0.146	0.135	0.124	0.113	0.106	0.102	0.102	0.105
	0.107	0.107	0.106	0.107	0.112	0.123	0.141	0.166	0.198	0.235	0.279
	0.333	0.394	0.46	0.522	0.58	0.628	0.666	0.696	0.722	0.742	0.756
	0.766	0.774	0.78	0.785	0.791	0.794	0.798	0.801	0.804	0.806	0.807
	0.807	0.807	0.81	0.813	0.814	0.813	0.81	0.808	0.811	0.814	0.813
	0.785	0.765	0.752								
0.093	0.11	0.134	0.164	0.195	0.22	0.238	0.249	0.258	0.27	0.281	0.296
	0.315	0.334	0.352	0.37	0.391	0.414	0.434	0.449	0.458	0.461	0.457
	0.447	0.433	0.414	0.392	0.366	0.339	0.31	0.282	0.255	0.228	0.204

	0.18	0.159	0.141	0.126	0.114	0.104	0.097	0.092	0.088	0.083	0.08
	0.077	0.075	0.074	0.073	0.073	0.073	0.073	0.073	0.073	0.074	0.075
	0.076	0.076	0.077	0.076	0.075	0.074	0.074	0.073	0.072	0.072	0.071
	0.073	0.075	0.078	0.082	0.09	0.1	0.116	0.133	0.154	0.176	0.191
	0.2	0.208	0.214								
0.153	0.189	0.245	0.319	0.409	0.536	0.671	0.772	0.84	0.868	0.878	0.882
	0.883	0.885	0.886	0.886	0.887	0.888	0.888	0.888	0.888	0.888	0.888
	0.888	0.887	0.887	0.887	0.887	0.887	0.887	0.887	0.887	0.887	0.886
	0.886	0.887	0.887	0.887	0.888	0.888	0.887	0.886	0.886	0.886	0.887
	0.888	0.889	0.89	0.891	0.891	0.891	0.891	0.89	0.889	0.889	0.889
	0.889	0.889	0.888	0.888	0.888	0.888	0.888	0.888	0.888	0.887	0.886
	0.886	0.886	0.885	0.885	0.885	0.884	0.884	0.883	0.882	0.882	0.881
	0.88	0.88	0.879								
0.15	0.184	0.235	0.299	0.372	0.459	0.529	0.564	0.58	0.584	0.585	0.587
	0.587	0.588	0.588	0.587	0.586	0.585	0.583	0.582	0.581	0.58	0.58
	0.58	0.58	0.58	0.58	0.581	0.581	0.582	0.582	0.582	0.583	0.583
	0.583	0.584	0.584	0.585	0.586	0.587	0.588	0.588	0.588	0.588	0.588
	0.587	0.586	0.586	0.585	0.584	0.583	0.581	0.58	0.579	0.578	0.577
	0.576	0.575	0.574	0.573	0.572	0.571	0.57	0.569	0.568	0.567	0.566
	0.565	0.564	0.562	0.562	0.56	0.56	0.558	0.557	0.556	0.555	0.554
	0.553	0.551	0.55								
0.138	0.167	0.206	0.249	0.289	0.324	0.346	0.354	0.357	0.358	0.359	0.36
	0.361	0.362	0.362	0.361	0.361	0.359	0.358	0.358	0.357	0.356	0.356
	0.356	0.356	0.356	0.356	0.356	0.357	0.357	0.357	0.358	0.358	0.358
	0.358	0.358	0.359	0.359	0.36	0.361	0.361	0.361	0.361	0.361	0.36
	0.36	0.359	0.358	0.357	0.356	0.355	0.354	0.353	0.352	0.351	0.35
	0.349	0.348	0.346	0.346	0.345	0.344	0.343	0.342	0.341	0.34	0.339
	0.338	0.337	0.336	0.335	0.334	0.333	0.332	0.331	0.33	0.329	0.328
	0.327	0.326	0.325								
0.113	0.131	0.15	0.169	0.183	0.193	0.199	0.201	0.202	0.203	0.203	0.204
	0.205	0.205	0.205	0.205	0.204	0.204	0.203	0.203	0.202	0.202	0.202
	0.202	0.202	0.202	0.202	0.202	0.202	0.202	0.203	0.203	0.203	0.203
	0.203	0.203	0.203	0.203	0.204	0.204	0.205	0.205	0.205	0.205	0.204
	0.204	0.204	0.203	0.203	0.202	0.201	0.201	0.2	0.199	0.198	0.198
	0.197	0.197	0.196	0.195	0.195	0.194	0.194	0.193	0.192	0.192	0.191
	0.191	0.19	0.189	0.189	0.188	0.188	0.187	0.187	0.186	0.185	0.185
	0.184	0.184	0.183								
0.074	0.079	0.084	0.088	0.091	0.093	0.094	0.094	0.094	0.094	0.094	0.095
	0.095	0.095	0.095	0.094	0.094	0.094	0.094	0.093	0.093	0.093	0.093
	0.092	0.092	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093
	0.093	0.092	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.093	0.092	0.092
	0.092	0.092	0.091	0.091	0.091	0.09	0.09	0.09	0.09	0.089	0.089
	0.089	0.088	0.088	0.088	0.087	0.087	0.087	0.087	0.086	0.086	0.086
	0.086	0.085	0.085	0.085	0.085	0.085	0.084	0.084	0.084	0.084	0.084
	0.083	0.083	0.083								
0.032	0.033	0.033	0.034	0.035	0.035	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036	0.036
	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.035	0.034	0.034	0.034
	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034	0.034
	0.034	0.034	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033
	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033
	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.033	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032	0.032
	0.032	0.032	0.032								

## Vedlegg B: Spektral RMS-feil etter utførelse av PCA på data fra Macbeth Color Checker

Dimensjon	2	3	4	5	6	7	8
RMS feil farge 1	0.022	0.022	0.022	0.021	0.020	0.020	0.019
RMS feil farge 2	0.042	0.039	0.029	0.029	0.022	0.022	0.022
RMS feil farge 3	0.044	0.035	0.027	0.022	0.013	0.013	0.012
RMS feil farge 4	0.045	0.035	0.033	0.030	0.030	0.028	0.023
RMS feil farge 5	0.096	0.062	0.062	0.058	0.054	0.050	0.048
RMS feil farge 6	0.078	0.049	0.033	0.025	0.018	0.016	0.014
RMS feil farge 7	0.059	0.034	0.023	0.015	0.014	0.014	0.014
RMS feil farge 8	0.075	0.025	0.016	0.016	0.012	0.010	0.008
RMS feil farge 9	0.049	0.030	0.025	0.025	0.019	0.018	0.013
RMS feil farge 10	0.067	0.046	0.045	0.037	0.036	0.036	0.030
RMS feil farge 11	0.158	0.057	0.055	0.042	0.036	0.036	0.033
RMS feil farge 12	0.112	0.044	0.033	0.033	0.031	0.031	0.029
RMS feil farge 13	0.069	0.027	0.022	0.011	0.011	0.010	0.008
RMS feil farge 14	0.094	0.045	0.043	0.029	0.025	0.025	0.023
RMS feil farge 15	0.092	0.070	0.037	0.034	0.034	0.027	0.016
RMS feil farge 16	0.177	0.040	0.040	0.035	0.031	0.031	0.030
RMS feil farge 17	0.127	0.056	0.051	0.040	0.039	0.034	0.025
RMS feil farge 18	0.053	0.049	0.030	0.029	0.013	0.007	0.006
RMS feil farge 19	0.053	0.027	0.021	0.016	0.016	0.015	0.015
RMS feil farge 20	0.045	0.038	0.030	0.022	0.015	0.015	0.015
RMS feil farge 21	0.035	0.033	0.028	0.023	0.015	0.015	0.015
RMS feil farge 22	0.023	0.021	0.019	0.016	0.011	0.011	0.011
RMS feil farge 23	0.011	0.011	0.010	0.008	0.006	0.006	0.006
RMS feil farge 24	0.004	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002

## Vedlegg C: Spektral RMS-feil etter utførelse av omfangstilpassing på data fra Macbeth Color Checker

Dimensjon	2	3	4	5	6	7	8
RMS feil farge 1	0.022	0.022	0.022	0.021	0.020	0.020	0.019
RMS feil farge 2	0.042	0.039	0.029	0.029	0.022	0.022	0.022
RMS feil farge 3	0.044	0.035	0.080	0.107	0.094	0.093	0.111
RMS feil farge 4	0.045	0.035	0.033	0.030	0.098	0.036	0.060
RMS feil farge 5	0.096	0.062	0.062	0.063	0.054	0.060	0.107
RMS feil farge 6	0.078	0.112	0.133	0.117	0.134	0.123	0.103
RMS feil farge 7	0.059	0.034	0.023	0.015	0.014	0.014	0.014
RMS feil farge 8	0.075	0.025	0.026	0.041	0.019	0.010	0.064
RMS feil farge 9	0.049	0.030	0.025	0.025	0.019	0.018	0.013
RMS feil farge 10	0.067	0.046	0.045	0.068	0.056	0.060	0.119
RMS feil farge 11	0.158	0.144	0.150	0.130	0.157	0.143	0.148
RMS feil farge 12	0.112	0.059	0.035	0.077	0.101	0.088	0.103
RMS feil farge 13	0.069	0.027	0.027	0.035	0.011	0.010	0.072
RMS feil farge 14	0.094	0.187	0.217	0.186	0.240	0.215	0.199
RMS feil farge 15	0.092	0.070	0.037	0.034	0.034	0.094	0.191
RMS feil farge 16	0.177	0.153	0.156	0.183	0.166	0.153	0.166
RMS feil farge 17	0.127	0.056	0.051	0.052	0.042	0.084	0.147
RMS feil farge 18	0.057	0.049	0.048	0.033	0.030	0.021	0.061
RMS feil farge 19	0.157	0.103	0.139	0.407	0.200	0.212	0.239
RMS feil farge 20	0.045	0.038	0.046	0.114	0.087	0.085	0.089
RMS feil farge 21	0.035	0.033	0.029	0.057	0.057	0.051	0.051
RMS feil farge 22	0.023	0.021	0.019	0.037	0.056	0.031	0.025
RMS feil farge 23	0.011	0.011	0.010	0.008	0.006	0.006	0.006
RMS feil farge 24	0.004	0.004	0.004	0.003	0.002	0.002	0.002