

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Tuotantotalouden tiedekunta  
Älykkään laskennan pääaine

Diplomityö

**Markku Painomaa**

**TASAISEMMIN JAKAANTUNEEN CIELAB-TYYPPISEN  
VÄRIAVARUUDEN MÄÄRITTÄMINEN VÄRIEROELLISIEN  
PÄÄAKSELIEN EROJA MINIMOIMALLA**

Tarkastajat: Tutkijaopettaja Arto Kaarna, Professori Lasse Lensu

Ohjaaja: Tutkijaopettaja Arto Kaarna

# TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto  
Tuotantotalouden tiedekunta  
Älykkään laskennan pääaine

Markku Painomaa

**Tasaisemmin jakaantuneen CIELAB-tyyppisen väriavaruuden määrittäminen värieroellipsien pääakselien eroja minimoimalla**

Diplomityö

2014

50 sivua, 22 kuvaa, 4 taulukkoa ja 2 liitettä.

Tarkastajat: Tutkijaopettaja Arto Kaarna, Professori Lasse Lensu

Hakusanat: väriavaruus, värierot, värieromittari, värinsovitusfunktiot, CIELAB

Keywords: color space, color difference, color difference formulas, color matching functions, CIELAB

Tässä työssä johdetaan lineaarimuunnoksella CIE  $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ -värinsovitusfunktioista uudet värinsovitusfunktiot. Tarvittava muunnosmatriisi etsitään optimoimalla CIE ja BFD-RIT värieroellipsejä Matlab-ympäristössä. Työn tuloksena saatiin muunnosmatriisi, ja sillä muunnetut uudet värinsovitusfunktiot ja CIELAB-tyyppinen väriavaruus. Euklidisella etäisyydellä mitattuna CIE ja BFD-RIT värieroellipsien muoto ja koko paranivat noin kolmanneksen, mikä oli myös tavoitteena.

# ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology  
School of Industrial Engineering and Management  
Major in Intelligent Computing

Markku Painomaa

**Defining a new CIELAB-type color space via minimizing the variance of the semi-axes of the color difference ellipses**

Master's Thesis

2014

50 pages, 22 figures, 4 table, and 2 appendices.

Examiners: Tutkijaopettaja Arto Kaarna, Professori Lasse Lensu

Keywords: color space, color difference, color difference formulas, color matching functions, CIELAB

In this work we derive new color matching functions (CMF) with linear transform from CIE  $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$  CMF. The necessary transformation matrix is searched exhaustively by optimizing compound dataset CIE and BFD-RIT color difference ellipses in Matlab environment. As a result we got a transformation matrix that was used to derive new CMF and create the CIELAB-type color space. Measured with dedicated Euclidean distance metric the shape and size of the ellipse was improved with one-third which also was our goal.

# ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston tietotekniikan koulutusohjelman opinnäytetyönä konenäön ja hahmontunnistuksen laboratoriolle. Kiitän työn tarkastajaa ja ohjaajaa Arto Kaarnaa työn alkuvalmisteluiden ohjeistamisesta, hyvien lähdeartikkelien ja kirjallisuuden osoittamisesta, rakentavasta palautteesta sekä hyödyllisistä Matlab-koodirungoista. Lisäksi kiitän työn toista tarkastajaa Lasse Lensua.

Lappeenranta, 10. marraskuuta, 2014

*Markku Painomaa*

# SISÄLLYSLUETTELO

<b>1</b>	<b>JOHDANTO</b>	<b>8</b>
1.1	Tausta . . . . .	8
1.2	Tavoitteet ja rajaukset . . . . .	9
1.3	Rakenne . . . . .	9
<b>2</b>	<b>IHMISEN NÄKÖAISTI</b>	<b>10</b>
2.1	Värinäkö ja silmän rakenne . . . . .	10
2.2	Vastaväriteoria . . . . .	12
<b>3</b>	<b>NYKYTILA JA AIEMPI TUTKIMUS</b>	<b>14</b>
<b>4</b>	<b>CIE VÄRIAVARUUDET</b>	<b>16</b>
4.1	Tausta . . . . .	16
4.2	CIE 1931 Väriavaruudet . . . . .	16
4.3	CIE 1976 Väriavaruudet . . . . .	21
4.4	CIE standardivalaisin . . . . .	23
<b>5</b>	<b>VÄRIEROT</b>	<b>24</b>
5.1	CIE värieromittarit . . . . .	24
5.2	MacAdamin ellipsit . . . . .	25
5.3	Munsell-värijärjestelmä . . . . .	26
5.4	STRESS . . . . .	27
<b>6</b>	<b>UUDEN VÄRIAVARUUDEN MÄÄRITTÄMINEN</b>	<b>29</b>
6.1	Mallittaminen ja kaavat . . . . .	29
6.2	Käänteinen muunnos . . . . .	31
<b>7</b>	<b>KOKEELLINEN OSUUS</b>	<b>32</b>
7.1	Väridata . . . . .	32
7.2	Menetelmät . . . . .	32
7.3	Tulokset uudella väriavaruudella . . . . .	36
7.4	Korjatut muunnoskaavat . . . . .	44
<b>8</b>	<b>JOHTOPÄÄTÖKSET</b>	<b>45</b>
	<b>LÄHTEET</b>	<b>46</b>
	<b>LIITTEET</b>	
	Liite 1: CIE ellipsit	

## Liite 2: Visuaaliset värierot

## LYHENTEET JA SYMBOLIT

$\Delta V$	Visuaalinen väriero
$\Delta E$	Laskennallinen väriero
$\Delta E_{ab}$	CIE 1976 värieromittari $L^*a^*b^*$ -väriavaruudelle
$\Delta E_{94}$	CIE 1994 värieromittari $L^*a^*b^*$ -väriavaruudelle
$\Delta E_{00}$	CIE 2000 värieromittari $L^*a^*b^*$ -väriavaruudelle
$\lambda$	aallonpituus
$\phi$	minimoitava kohdefunktio
$\phi_{ASS}$	Pienimmän ja suurimman akselisuhteen omaavan ellipsin suhdeluku
$\phi_{AS_{max}}$	Suurin yksittäisen ellipsin akselisuhde
$\phi_{SAS}$	Summattu ellipsien akselien suhdeluku
$\phi_{KV}$	ellipsin akselien kulmavirhe kohtisuorasta
$\phi_{PS}$	ellipsien pinta-alojen suhde
$M, T$	muunnosmatriisi
$r_A$	Värieroellipsin isoakselin säde
$r_B$	Värieroellipsin pikkuakselin säde
<b>CIE</b>	Kansainvälinen valaistuskomitea (Commission Internationale de l'Eclairage)
<b>CIEDE2000</b>	CIE 2000 värieromittari $L^*a^*b^*$ -väriavaruudelle
<b>CIELAB</b>	CIE 1976 $L^*a^*b^*$ -väriavaruus
<b>CIE RGB</b>	CIE 1931 RGB -väriavaruus
<b>CIEXYZ</b>	CIE 1931 XYZ -väriavaruus
$D_{65}$	CIE D-sarjan standardivalaisin väriämpötilalla 6500K
$max$	vektorin tai matriisin suurin elementti
<b>MRA</b>	Multiple regression approximation
$\bar{r}\bar{g}\bar{b}$	CIE $\bar{r}\bar{g}\bar{b}$ -värinsovitusfunktiot
<b>STRESS</b>	STandard RESidual of Squared Sum
<b>PF/3</b>	Performance factor 3
$\bar{x}\bar{y}\bar{z}$	CIE $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ -värinsovitusfunktiot

# 1 JOHDANTO

Väriavaruudella tarkoitetaan matemaattista mallia, jossa yksittäinen väri on muutettu esimerkiksi spektrometrillä otetusta mittausravosta numeeriseksi arvoksi. Yleisesti väriavaruudet ovat kolmiulotteisia ja väri on siinä kolmikomponenttinen vektori. Käyttötarkoituksia väriavaruuksille on värien uudelleentuottaminen, vertailumahdollisuus ja laadunvalvonta.

## 1.1 Tausta

Nykyajan väriavaruudet pohjautuvat Kansainvälinen valaistuskomitean, Commission Internationale de l'Eclairage (CIE) 1930-luvulla tekemiin tutkimuksiin, joista tuli vuonna 1931 CIE kolorimetrijärjestelmä. Ensimmäiset CIE RGB- ja XYZ-väriavaruudet määrittelivät värit numeerisesti tavoitteena värien uudelleentuottaminen. MacAdamin värieroellipsitutkimuksesta [1] huomattiin, että standardiksi muodostunut CIE 1931 XYZ väriavaruus ei jäljittele täysin ihmisen värinäköä eikä silmin havaittava väriero ole täysin verrannollinen laskettuun euklidiseen etäisyyteen XYZ-väriavaruudessa. Tutkimusta tasaisemmin jakaantuneemman väriavaruuden kehittämiseksi on tehty jatkuvasti [2]. Toiset kehittävät parempia väriavaruuksia ja toiset parempia värieromittareita. Mainittakoon vielä ero väriavaruuden ja värihavaintomallin välillä: väriavaruus on värin numeerinen esitysmuoto ja ensisijaisesti värierojen laskemista varten, kun taas värihavaintomalli yrittää mallintaa värin mahdollisimman tarkasti ottamalla huomioon esimerkiksi taustan ja ympäristön valaistuksen. Joillekin värihavaintomalleille on myös värieromittari. Ero väriavaruuden ja värihavaintomallin välillä on häilyvä ja joskus niitä käytetään synonyymeinä. Tässä työssä keskitytään väriavaruuksiin ja värieromittareihin. Vuonna 1976 CIE julkaisi kaksi yhteinäistä väriavaruutta CIELAB ja CIELUV sekä värieromittarit, joita se suositteli käytettäväksi jatkossa. CIELAB ja CIELUV ovat tiettyssä mielessä välimaastossa, kun puhutaan väriavaruuksista, koska niissä on myös värihavaintomallin ominaisuuksia, mutta pohjimmiltaan ne ovat kuitenkin väriavaruuksia. Fairchild esittelee täydellisimmän tähän päivään mennessä kehitetyn R. G. Huntin värihavaintomallin, joka jäljittelee värinäön mekaniikkaa kaikin puolin, mutta on laskennallisesti raskas ja vaikeakäyttöinen [3]. Myöhemmin CIE kehitti CIELAB:lle parannellut värieromittarit CIE94 vuonna 1995 ja CIEDE2000 vuonna 2001 korjaamaan CIELAB:ssa huomattuja puutteellisuksia. Esimerkiksi sinisellä sävyalueella on huomattavaa epätasaisuutta verrattuna muihin sävyalueisiin ja lisäksi CIELAB ei ole muutenkaan täysin havainnollisesti tasaisesti ja kautunut eli siinä on edelleen samoja ongelmia kuin XYZ-väriavaruudessa. Muita moder-



neja värieromittareita CIELAB:lle ovat esimerkiksi CMC vuonna 1984 [4] ja BFD vuonna 1987 [5]. CIE on julkaissut värihavaintomallit CIECAM97 ja CIECAM02, joista viimeisimmälle on värieromittarit CAM02-LCD suurille värieroille ja CAM02-SCD pienille värieroille. CIECAM02 suoriutuu värieromittauksissa kokonaisuudessaan paremmin kuin CIELAB, muttei silti ole täydellinen [6, 7]. Uusimpiin värihavaintomalleihin värieromittarilla lukeutuu monikerroksinen värinäkömalli ATTD05, joka suoriutuu vertailussa vähintään yhtä hyvin kuin CIECAM02 [8]. Tutkimustyö väriavaruuksien ja värieromittarien kehittämiseksi jatkuu edelleen. Uusimpiin värieromittareihin kuuluu autovalmistaja Audin AUDI2000, joka tutkimuksen mukaan toimii yhtä hyvin kuin CAM02-värieromittarit ja jopa paremmin kuin CIEDE2000 [9]. Lisää kokeita tarvitaan, sillä tulokset riippuvat paljolti käytetystä testidatasta.

## 1.2 Tavoitteet ja rajaukset

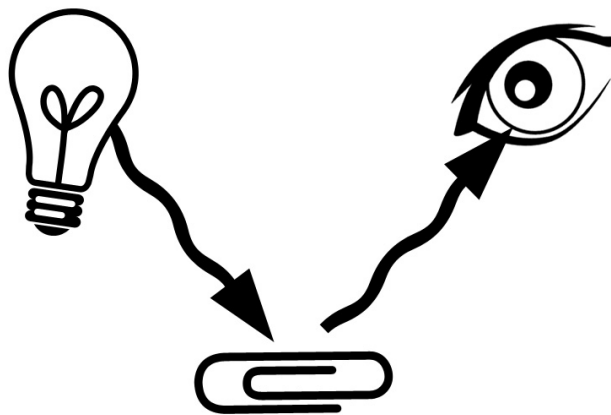
Työssä optimoidaan Matlab-ympäristössä värinsovitusfunktioita minimoimalla kymmenen värieroellipsin muoto- ja kokoeroja. Tavoitteena on, että kokoero pienenesi, ja että keskimääräinen ympyrämuotoisuus lisääntyisi vähintään kolmanneksen. Tavoite on asetettu arvioimalla, että 100% parannusta muoto- ja kokoeroihin ei ole mahdollista saavuttaa tällä tekniikalla ja vielä 50% parannus on liian optimistinen. Sen sijaan merkittävä parannus, kuten kolmannes, lienee mahdollinen. Työ rajataan niin, että muokataan vain väriavaruutta, mutta ei määritellä ainakaan täysimääräisesti uutta värieromittaria.

## 1.3 Rakenne

Johdannossa käsiteltiin työn taustat, tavoitteet ja rajaukset sekä esiteltiin tutkimuskysymykset. Kappaleessa 3 käsitellään värieromittareiden nykytilaa ja aikaisempia väriavaruuksien kehittämiseen liittyviä tutkimuksia. Kappaleessa 2 perehdytään ihmissilmän anatomiaan, värihavainnon syntyyn ja käsittelyyn aivoissa. Kappaleessa 4 kerrotaan lyhyesti CIE väriavaruuksien historiasta ja kehityksestä. Kappaleessa 5 käsitellään työn kannalta tärkeimpiä värieromittareita ja taustoitetaan värieroellipsien merkitystä. Kappaleessa 6 määritellään uusi  $L_{opt}a_{opt}b_{opt}$ -väriavaruus. Kappaleessa 7 esitellään testidata, menetelmät ja tehdään varsinaiset kokeet. Lopuksi esitellään tulokset. Viimeisessä kappaleessa 8 tehdään johtopäätökset ja arvioidaan työn tuloksia.

## 2 IHMISEN NÄKÖAISTI

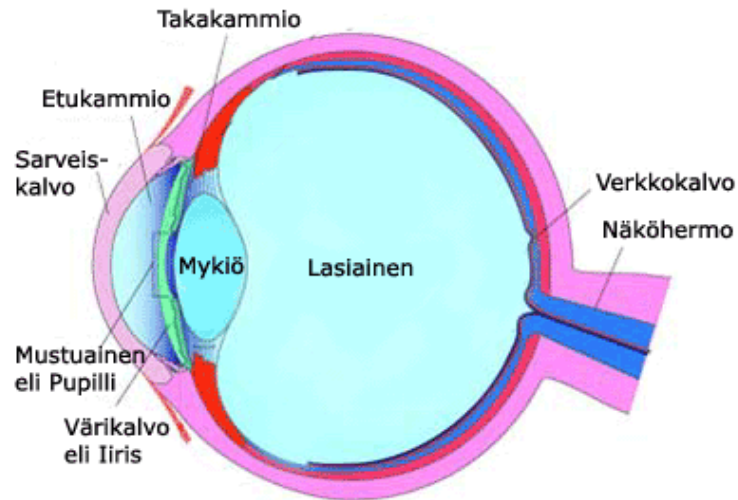
Näköaistimukseen vaaditaan valonlähde ja valoa heijastava esine tai pelkkä itsevalaiseva esine. Asiaa voidaan kuvata värinäön kolmiona kuvassa 1, johon kuuluu valo, kohde ja havaitsija. Väriäistimus on psykofyysinen, koska valon havaitseminen on fyysinen tapahtuma, mutta värin tulkitseminen tapahtuu aivoissa. Näin ollen värien näkeminen on aina subjektiivista. Toisaalta silmän anatomia on kaikilla samanlainen ja virheettömällä värinäöllä varustetut ihmiset näkevät keskimäärin samanlaisia värejä.



**Kuva 1.** Värinäön kolmio. Vasemmalta lähtien: valonlähde, heijastava esine ja katsoja.

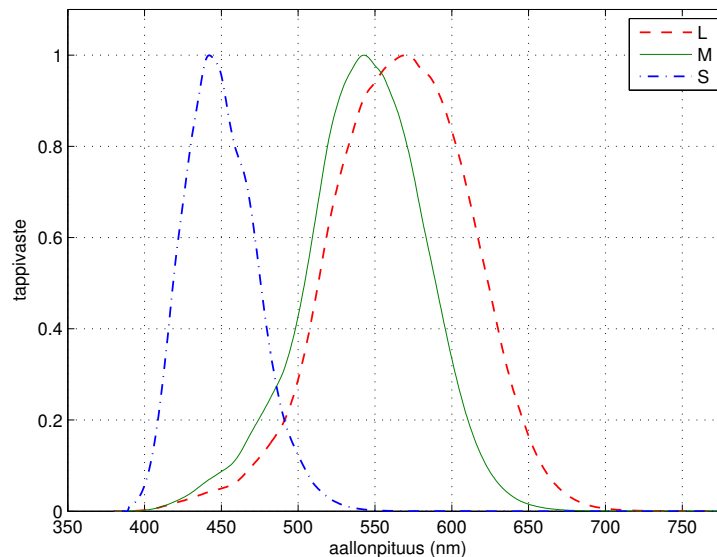
### 2.1 Värinäkö ja silmän rakenne

Kuvassa 2 on silmän anatomia poikkileikkauksena. Heijastuva valo kulkee sarveiskalvon ja mykiön eli linssin läpi ja kohdistuu verkkokalvolle. Verkkokalvo on nimensä mukaisesti kalvomainen pinta, jossa on 130 miljoonaa hermosolua, joita kutsutaan fotoreseptoreiksi eli tappi- ja sauvasoluiksi. Tappisolut reagoivat  $100 \text{ cd/m}^2$  korkeampaan luminanssiin, kun taas sauvasolut reagoivat matalampiin alle  $1 \text{ cd/m}^2$  luminanssiin. Korkeammassa luminanssissa vain tappisolut toimivat ja tätä kutsutaan fotooppiseksi näöksi, jossa havaitaan värit. Kun pelkät sauvasolut ovat toiminnassa, sitä kutsutaan skotooppiseksi näöksi eli hämäränäöksi, jolloin värejä ei voida aistia. On olemassa myös välimuoto, mesooppinen näkö, jossa kummatkin solut toimivat [3]. Verkkokalvolla olevia tappisoluja on kolme eri valon aallonpituudelle herkkää tyyppiä. Yleisin nimeämistapa on L, M ja S eli pitkät 560–580 nm, keskipitkät 530–540 nm ja lyhyet 420–440 nm valon aallonpituudelle herkät



**Kuva 2.** Silmän anatomia poikkileikkauksessa [10].

tapit. Toinen nimeämistapa on R, G ja B tapit [3]. Kuvassa 3 on esitetty verkkokalvoilta mitatut tappisolujen vasteherkkyudet.



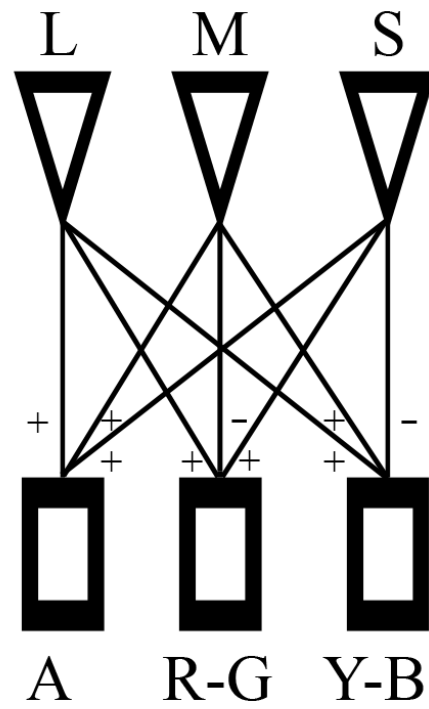
**Kuva 3.** Stockman ja Sharpe  $2^\circ$  tappivasteet.

Tappisolujen vasteherkkyksiä on tutkittu jo 1800-luvulla. Young, Helmholtz ja Maxwell tekivät tutkimuksia 1850-luvulla ja heidän työhönsä perustuu värinäön trikromaattisuusteoria. Teoria olettaa, että silmässä on kolme eri tyyppistä reseptoria punaiselle, siniselle

ja vihreälle spektrille. Näköhavainto kulkeutuu aivoihin kolmena eri värisenä kuvana, jotka yhdistetään näköjärjestelmässä sopivilla sekoitussuhteilla lopulliseksi kuvaksi [3].

## 2.2 Vastaväriteoria

Vuonna 1892 Ewald Hering kehitti värinäön vastaväriteorian huomattuaan, että tietynlaisia värejä ei havaita luonnossa koskaan yhdessä, kuten vihertävää punaista tai kellertävää sinistä. Näin ollen Hering oletti, että punainen-vihreä ja sininen-keltainen ovat vastavärejä. Tosin paremmin kirjailijana tunnettu J. Wolfgang Gothe oli huomannut saman ilmiön jo vuonna 1810 ja kehittänyt vastavärein järjestetyn väripyörän. Vastaväriteoria oli aikanaan unohdettu mahdottomana, mutta myöhemmin sitä kehitettiin edelleen. Kuten trikromaattisuusteoria, vastaväriteoria olettaa myös kolmenlaisten reseptorien olemassaolon. Sen sijaan, että tappivasteet lähetettäisiin sellaisenaan aivojen näkökeskukseen käsiteltäväksi, ne esikäsitellään yhteen- ja erotuslaskuina vastavärimuotoon. Toisin sanoen, on olemassa punainen-vihreä ( $L - M + S$ ), sininen-keltainen ( $L + M - S$ ) ja musta-valkoinen ( $L + M + S$ ) kanava. Kuten kuvasta 3 nähdään, käyrät leikkaavat osittain toisiaan ja Fairchildia mukaillen kuvassa 4 on esitetty kuinka tappivasteet esikäsitellään vastavärimuotoon aivojen näkökeskuksessa [3].



**Kuva 4.** Kaavio, kuinka tappivasteet muutetaan vastavärimuotoon aivojen näkökeskuksessa. A tarkoittaa mustavalkoista, R-G punavihreää ja Y-B keltasinistä kanavaa.

### 3 NYKYTILA JA AIEMPI TUTKIMUS

Nykyisin parhaita tuloksia antava värieromittari on CIEDE2000, joka hyväksyttiin myös viralliseksi ISO/CIE standardiksi vuonna 2014 [11]. Teknisestä toteutuksesta voidaan nähdä, että CIEDE2000 on paranneltu versio edeltäjästään CIE94:stä ja sisältää huomattavasti enemmän muuttujia [12].

Kuehni on tehnyt katsauksen värieromittauksen nykytilaan, arvostelee nykyisten mittarien epätyytyttävää tarkkuutta ja esittää ehdotuksen väriavaruuksien kehittämiseksi tulevaisuudessa [13]. Kuehnin mukaan nykyajan parhaat mittarit suoriutuvat keskimäärin 65% tarkkuudella eli vastaavasti PF/3 (Performance Factor) arvolla 35. PF/3 laskee mitatun värieron ja visuaalisen värieron välisen hajonnan, jolloin pienempi arvo kuvaa parempaa tarkkuutta arvon 0 ollessa virheetön tulos. Samaa tarkkuuseroa mittaa myös uudempi STRESS (STandardized RESidual Sum of Squares), joka on tilastollinen mittaamenetelmä. Kuehnin mukaan pitäisi kerätä luotettavampaa havainnointiaineistoa, jonka pohjalta kehittää 5 tai pienempään STRESS tai PF/3 -arvon tarkkuuteen pystyvä mittari. Loppukappaleissa Kuehni kuitenkin päätyy lopputulokseen, ettei uuden aineiston kerääminen ratkaisisi ongelmaa täysin johtuen siitä, että yksittäisten koehenkilöiden värinäkö ja värierojen havaitseminen vaihtelee suuresti. Uusi luotettava värierojen mittaustapa pitäisi kehittää, mutta kehitystyö vaatisi tarkat toteutussuunnitelmat, yhteistyötä väriteollisuuden kanssa ja valtion tukea [13].

Värieromittauksen tarkkuutta on yleensä paranneltu virittämällä mittaria sopivammaksi, mutta toisinaan myös säätämällä itse väriavaruutta. CIELAB-mallin parametreja on optimoitu minimoimalla x,y -kromaattisuusdiagrammin CIE-ellipsien muoto- ja kokoeroja, jolloin ellipsit olisivat mahdollisimmat samankokoisia ja lähempänä ympyrämuotoa [14]. Kromaattisuuseroja käsittelevässä diplomityössä MacAdamin ellipseistä projisoitiin iso- ja pikkuakselien suhteesta kromaattisuusdiagrammin ylle kaksi pintaa ja syntyneestä kokonaispinnasta arvioitiin värieroja. Tuloksissa todettiin menetelmän toimivan paikallisesti eli ellipsien sisäalueilla, muttei niiden ulkopuolella [15].

Toisenlainen lähestymistapa on laskea kokonaan uudet kantafunktiot esimerkiksi värispektridatasta NTF-tekniikalla (Non-negative Tensor Factorization) [16]. Toisessa vastaavassa tutkimuksessa aineistona on Munsell Glossy ja NCS –spektridatajoukko, josta pääkomponenttianalyysillä laskettiin ominaisarvovektorit, jotka määrittelivät uuden väriavaruuden akselit [17]. Tulokseksi saatu kolmiulotteinen spektriväriavaruus vastasi odotuksia ainakin tasaisilla spektriarvoilla, kun verrattiin CIELAB ja CIECAM97 -malleihin. Myös toinen, 301–ulotteinen spektriavaruus määriteltiin, mutta testitulokset eivät olleet riittävät

ja tämän avaruuden toimivuus ei ollut vielä tyydyttävä [17].

Toisessa spektriavaruuksiin liittyvässä tutkimuksessa palautettiin CIELAB–arvoja takaisin spektreiksi ja mitattiin spektrieroja käyttämällä SAM (Spectral angle mapper) ja SID (Spectral similarity index) tekniikoita.  $L^*a^*b^*$ –arvojen muuntamisessa käytettiin apuna k-means klusterointia kokoamaan samanlaiset CIELAB–arvot yhteen ja siten erikseen joka klusterille käytettiin MRA regressioanalyysiä (Multiple regression approximation) [18]. Tuloksena oli, että klusterointi paransi CIEDE2000 värieroarviointia CIELAB–arvoilla jopa 45%. Spektrien mittauksissa käytettyihin tekniikoihin ei oltu täysin tyytyväisiä ja lisätutkimusta tehtäen parempien mittarien kehittämiseksi.

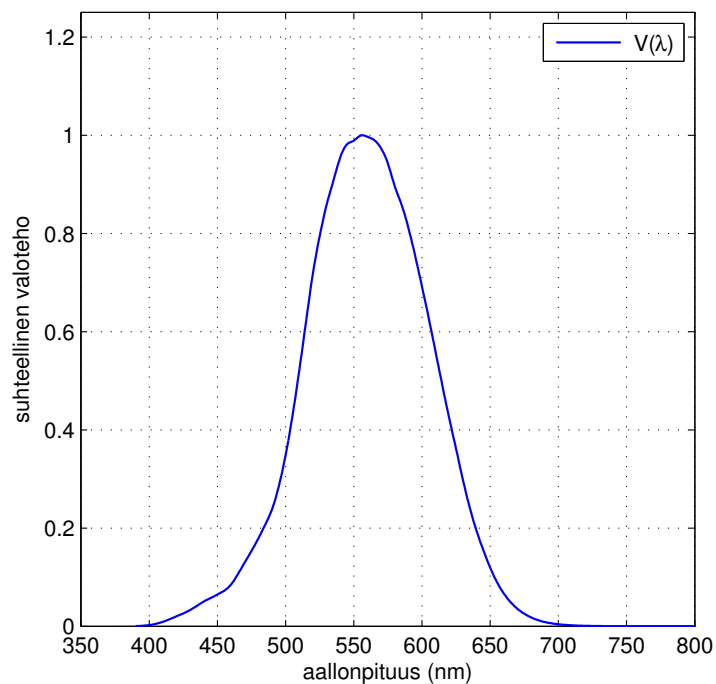
Väriavaruutta on laajennettu myös neljänteen ulottuvuuteen, jolloin värit jakaantuvat Riemannin geometrialla pallomaisessa avaruudessa hyperpallon muotoon [19]. Esimerkiksi värieroja pystytään mittaamaan geodeettisen etäisyyden sijaan jännepituudella, joka on hyperpallon pinnan kahden pisteen välinen suora. Täysin uusi keksintö neliulotteinen väriavaruus ei ole, sillä johdanto-osiossa mainitaan Edwin Boring, joka jo vuonna 1949 julkaistussa "A color solid in four dimensions" tutki värien kartoittamista neliulotteiseen  $u, v, w, s$  –avaruuteen. Boring tosin päätyi siihen, että neliulotteinen mallittaminen ei onnistu ja kannatti pysyttelemistä perinteisissä kolmiulotteisissa malleissa.

Suoranaisesti tähän työhön liittyviä aiempia tutkimuksia on soveltavin osin [14, 16]. Grahamin tutkimuksessa esiteltiin spherical sampling -optimointitekniikka, jolla etsittiin Hung-Bernsin tasaisille sävyille optimaalista RGB-värinsovitusfunktioita tuottavaa muunnosmatriisia [20, 21]. Samaa ideaa sovelsi Marguir [22]. He käyttivät optimoinnissa kolmea eri kriteeriä liittyen Hung-Bernsin tasaisiin sävyihin. Yksi kriteeri oli sävylinjojen suuruus, jota mitattiin sovittamalla suora sävylinjalle SVD (singular value decomposition) tekniikalla. Tutkimuksessa testattiin yli 300 miljoonaa muunnosmatriisia.

## 4 CIE VÄRIAVARUUKSET

### 4.1 Tausta

CIE kehitti vuonna 1924  $V(\lambda)$ -valotehofunktion, joka kuvaa ihmissilmän keskimääräistä herkkyyttä valolle aallonpituuden funktiona. Valotehofunktio on esitetty kuvassa 5. Motivaationa oli kehittää teollisuudelle apuväline mittamaan ja vertaamaan eri valaistusten kirkkautta [23]. Valotehofunktio koostettiin keskiarvona neljästä eri tutkimusdatasta, joissa mittausmetodina koehenkilöillä oli käytetty joko kirkkauden sovitusta tai välkkäfotometriä [24].



Kuva 5. CIE 1924  $V(\lambda)$ -valotehofunktio fotooppiselle näölle.

### 4.2 CIE 1931 Väriavaruudet

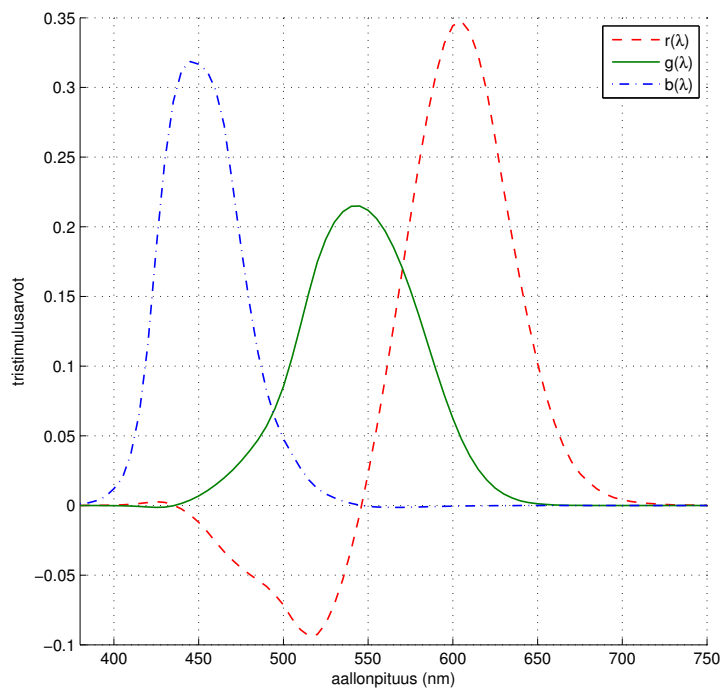
CIE värijärjestelmä perustuu englantilaisten John Wrightin ja W. David Guildin tekemiin värinsovituskokeisiin. Wright teki omat mittauksensa vuosina 1928-29 kymmenellä koehenkilöllä ja Guild vuonna 1931 seitsemällä koehenkilöllä. Kummatkin kokeet tehtiin



samoissa katseluolosuhteissa  $2^\circ$  kahtia jaetulla kentällä [23]. Grassmannin lain mukaan mikä tahansa värillinen valo  $C$  voidaan tuottaa primäärivaloista  $R$ ,  $G$  tai  $B$  lisäämällä kutakin  $\mathcal{R}$ ,  $\mathcal{G}$  ja  $\mathcal{B}$  arvoa oikea määrä [25], toisin sanoen kaavalla

$$C \equiv R(\mathcal{R}) + G(\mathcal{G}) + B(\mathcal{B}). \quad (1)$$

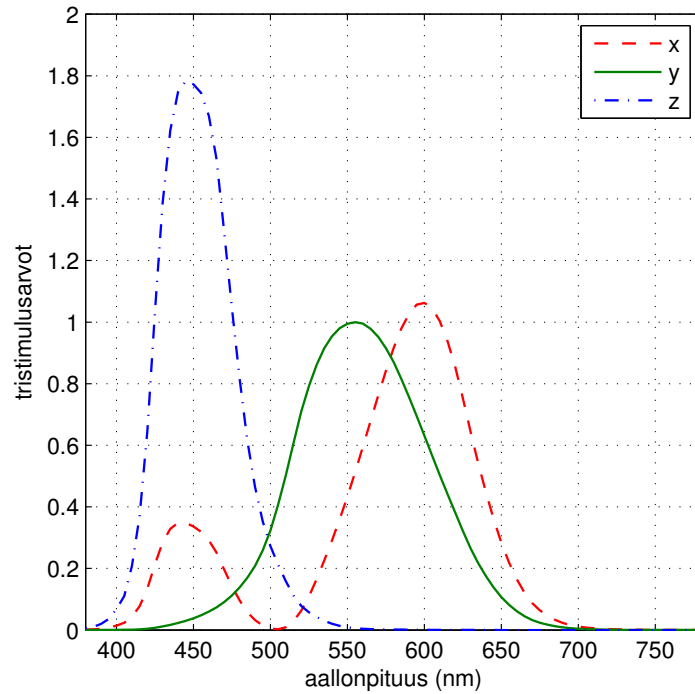
Koehenkilöt tekivät tähän ideaan perustuvia värinsovituskokeita, jolloin heidän piti primäärivalojen voimakkuuksia säätämällä saada kentän referenssivalo ja testivalo vastaamaan toisiaan. Kun testi toistetaan kaikille 380-700 nm aallonpituuksille 10 nm välein ja merkitään ylös jokaisen primäärivalon suhteellinen määrä saadaan kolme funktiota, jotka ovat kuvassa 6. Kuten käyristä voidaan huomata, ne eivät muistuta tappivasteita kuvassa 3, mutta värinsovituskäyrillä on siitä huolimatta biologinen pohja.



**Kuva 6.** CIE 1931  $\bar{r}\bar{g}\bar{b}$ -värinsovitusfunktiot.

Syitä kehittää uudet värinsovitusfunktiot oli kaksi. Koska  $\bar{r}\bar{g}\bar{b}$  sisälsivät myös negatiivisia arvoja, sitä käyttävä mittauslaitteisto olisi vaatinut aikoinaan kallista ja monimutkaista tekniikkaa. Lisäksi arveltiin, että CIE 1924 standardi fotooppinen havaitsija ei olisi yhteensopiva  $\bar{r}\bar{g}\bar{b}$ -värinsovitusfunktioiden kanssa, koska mittausmenetelmät olivat olleet erilaiset [23]. Uudet primäärivärit nimettiin XYZ ja värinsovitusfunktiot  $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ . Ehtoina oli, että  $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$  sisältävät vain positiivisia arvoja ja  $\bar{y}$  olisi johdettu vastaamaan CIE 1924  $V(\lambda)$ -

funktiota [26]. Kuvassa 7 on esitetty CIE  $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$  -värinsovitusfunktiot.



**Kuva 7.** CIE 1931 2° havainnoitsijan  $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$  -värinsovitusfunktiot.

Värinsovitusfunktiot on johdettu lineaarimuunnoksella, käyttämällä 3x3-muunnosmatriisia [26]

$$\mathbf{T} = \begin{bmatrix} 0.4900 & 0.3100 & 0.2000 \\ 0.1769 & 0.8124 & 0.0107 \\ 0.0000 & 0.0099 & 0.9901 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

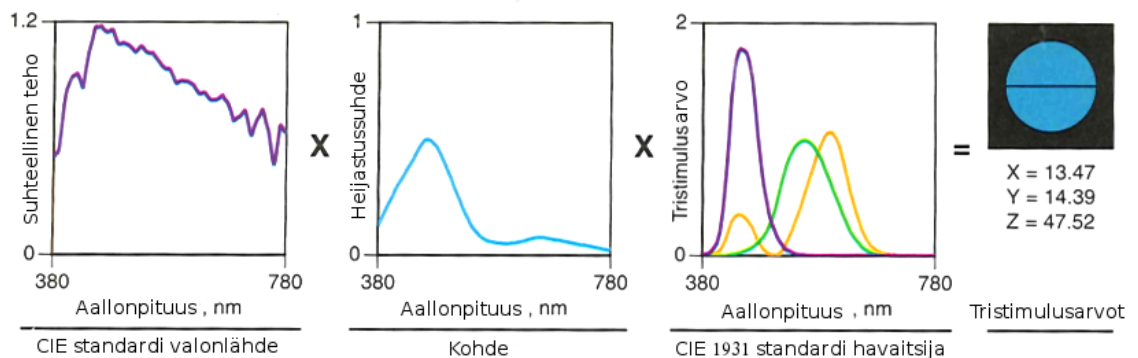
jolla kertomalla jokainen  $\bar{r}\bar{g}\bar{b}$ -värinsovitusfunktioiden arvo pystyvektorina kaavoilla 3, saadaan

$$\begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix} = \mathbf{T} \begin{bmatrix} \bar{r}(\lambda) \\ \bar{g}(\lambda) \\ \bar{b}(\lambda) \end{bmatrix}. \quad (3)$$

CIE XYZ -väriavaruus lasketaan kaavoilla

$$\begin{aligned}
 k &= 100 / \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\
 X &= k \int_{\lambda} S(\lambda) R(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\
 Y &= k \int_{\lambda} S(\lambda) R(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\
 Z &= k \int_{\lambda} S(\lambda) R(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda.
 \end{aligned} \tag{4}$$

XYZ-tristimulusarvot lasketaan CIE standardivalaisimen tehospektrijakauman  $S(\lambda)$ , kohteen heijastussuhteen  $R(\lambda)$  ja  $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ -värinsovitusfunktioiden integraaleina näkyvän valon aallonpituuden  $\lambda$  alueelta 380-700 nm. Kaavoissa vakiota  $k$  käytetään normalisoimaan arvot valonlähteen mukaan. Kuvassa 8 on vielä havainnollistettu laskentaprosessi.



**Kuva 8.** XYZ-tristimulusarvojen laskenta. Äärimmäisenä oikealla kahtia jaettu kenttä. Kuva suomenneettu lähteestä [23].

Useissa myöhemmin esitettävissä kaavoissa käytetään CIE standardivalaisimen valkoisen referenssiarvoa  $[X_n, Y_n, Z_n]$ , joka lasketaan jättämällä heijastussuhde  $R(\lambda)$  pois kaavas-

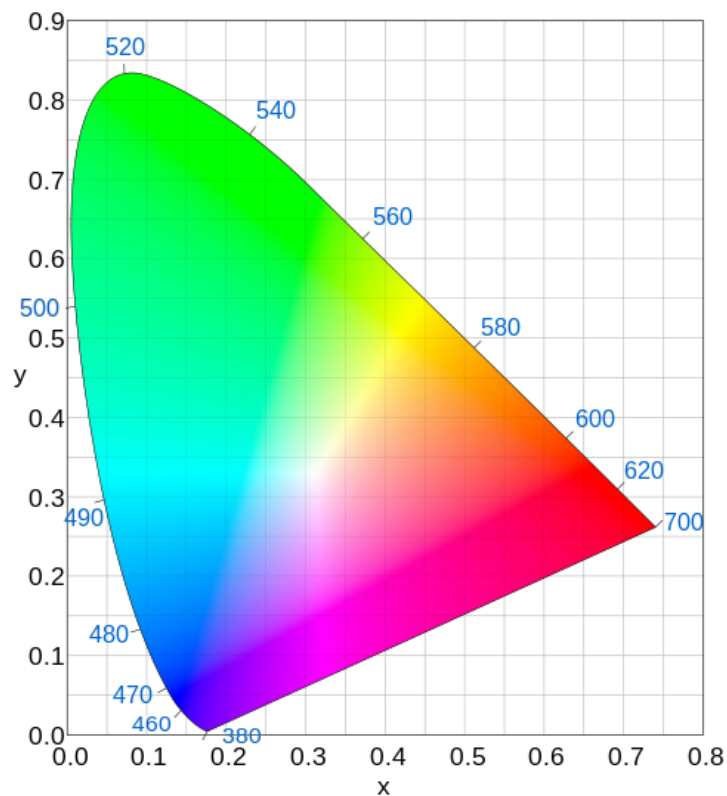
ta 4 eli

$$\begin{aligned} X_n &= k \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{x}(\lambda) d\lambda \\ Y_n &= k \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}(\lambda) d\lambda \\ Z_n &= k \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{z}(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (5)$$

CIE XYZ-väriavaruudessa  $Y$  kuvaa valoisuutta. Kromaattisuusarvot lasketaan kaavoilla

$$\begin{aligned} x &= \frac{X}{X + Y + Z} \\ y &= \frac{Y}{X + Y + Z} \\ z &= \frac{Z}{X + Y + Z}, \end{aligned} \quad (6)$$

joista muodostuu CIE xyY -väriavaruus ja  $x, y$  -kromaattisuusdiagrammi kuvassa 9.

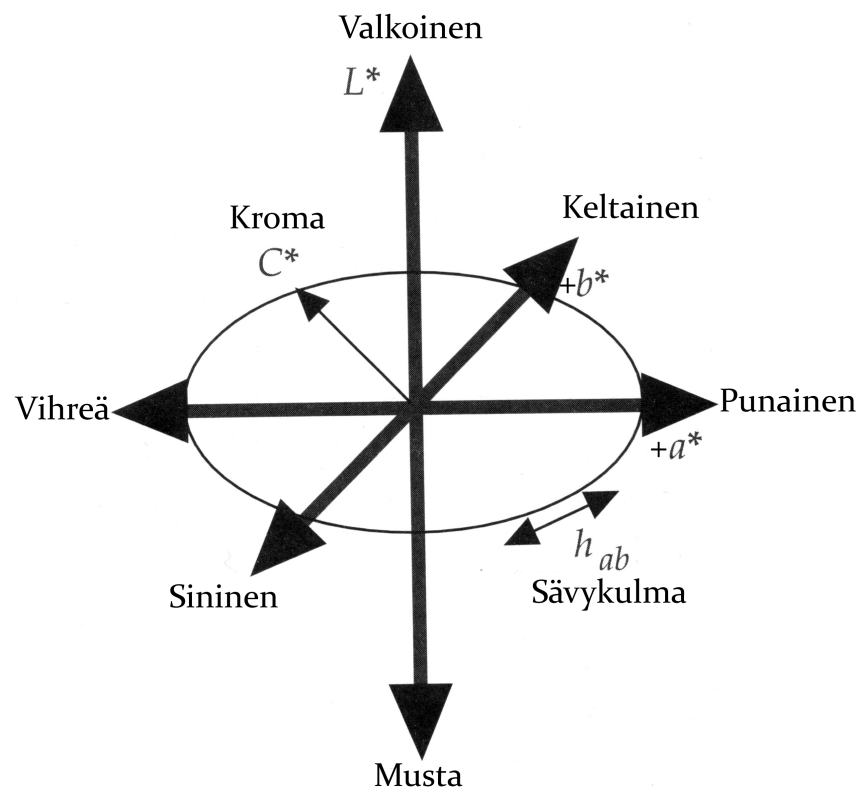


**Kuva 9.** CIE 1931  $x, y$  -kromaattisuusdiagrammi [27].

### 4.3 CIE 1976 Väriavaruudet

CIEXYZ huomattiin olevan visuaalisesti epätasaisesti jakaantunut väriavaruus. CIEXYZ oli suunniteltu laskemaan yksittäiselle värille numeerinen arvo, joten teoriassa visuaalisesti samanlaisten värien pitäisi tuottaa samat tristimulusarvot. Näin ei kuitenkaan aina ollut ja ero laskennallisella arvolla ja ihmishavannoitsijan arviolla saattoi olla huomattava [2].

Vuonna 1976 CIE esitteli kaksi havainnollisesti yhtenäistä väriavaruutta CIE  $L^*a^*b^*$  (CIELAB) ja CIE  $L^*u^*v^*$  (CIELUV), joita suositeltiin käytettäväksi jatkossa teollisuuden värimittauksissa. Asteriskit lisättiin erotukseksi muista *Lab*-väriavaruuksista kuten ANLAB- ja Hunter *Lab* -väriavaruuksista. CIELAB on tarkoitettu käytettäväksi tekstiilivärien ja CIELUV värillisten valojen kanssa. Kummallakin väriavaruudella on vastaväriakselit  $a^*$ ,  $b^*$  ja  $u^*$ ,  $v^*$ , jotka järjestyksessään kuvaavat punaisuutta-vihreyttä ja keltaisuutta-sinisyyttä sekä  $L^*$ -pystyakseli valoisuutta [23]. Kuvassa 10 on havainnollistettu sekä karteesinen että sylinterinmuotoinen koordinaattiesitys.



**Kuva 10.** CIELAB-väriavaruuden karteesinen ja sylinterinmuotoinen koordinaattiesitys. Kuva suomennettu lähteestä [3].

CIE  $L^*a^*b^*$  -väriavaruus lasketaan kaavoilla

$$\begin{aligned} L^* &= 116f(Y/Y_n) - 16 \\ a^* &= 500[f(X/X_n) - f(Y/Y_n)] \\ b^* &= 200[f(Y/Y_n) - f(Z/Z_n)] \end{aligned} \quad (7)$$

jossa

$$f(\omega) = \begin{cases} \omega^{\frac{1}{3}} & \omega > 0.008856 \\ 7.787\omega + 16/116 & \omega \leq 0.008856 \end{cases}$$

Väriavaruuden sylinterimuotoinen esitys lasketaan kaavoilla

$$C_{ab}^* = (a^{*2} + b^{*2})^{1/2} \quad (8)$$

$$h_{ab} = \tan^{-1}(b^*/a^*), \quad (9)$$

joissa pystyakseli on sama valoisuus  $L^*$  kuin kaavoissa 7,  $C_{ab}^*$  kuvaa kromaattisuutta ja  $h_{ab}$  sävyä. Kaavoissa 7  $XYZ$  ovat kohteen tristimulusarvot, jotka on laskettu aiemmin esitellyillä kaavoilla 4 ja  $X_nY_nZ_n$  ovat kohteen valkoisen tai käytetyn standardivaloisimen tristimulusarvot [2]. Käänteinen muunnos  $CIELAB \rightarrow XYZ$  lasketaan kaavoilla

$$\begin{aligned} Y &= Y_n f^{-1}\left[\frac{1}{116}(L^* + 16)\right] \\ X &= X_n f^{-1}\left[\frac{1}{116}(L^* + 16) + \frac{1}{500}a^*\right] \\ Z &= Z_n f^{-1}\left[\frac{1}{116}(L^* + 16) - \frac{1}{200}b^*\right], \end{aligned} \quad (10)$$

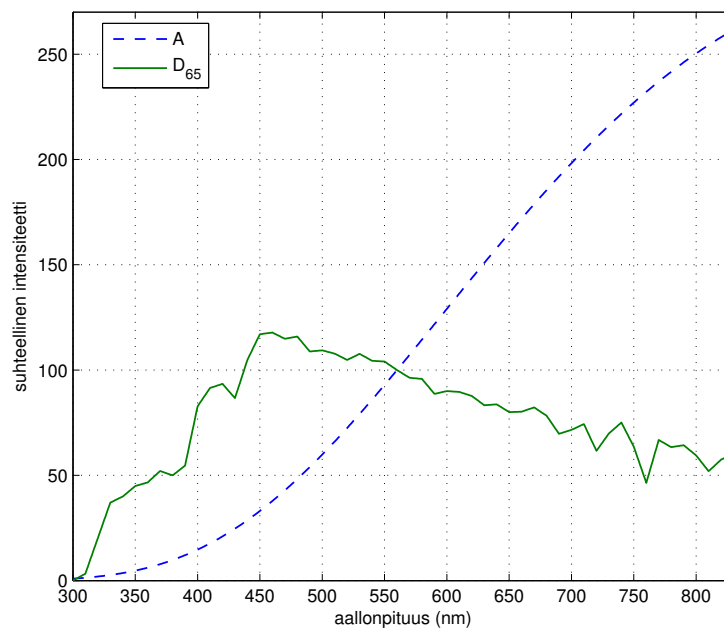
jossa

$$f^{-1}(\omega) = \begin{cases} \omega^3 & \omega > \frac{6}{29} \\ 3\left(\frac{6}{29}\right)^2\omega - \frac{4}{29} & \omega \leq \frac{6}{29} \end{cases}$$

CIE  $L^*u^*v^*$  kaavat jätetään tarkemmin käsittelemättä, koska niitä ei tulla tässä työssä myöhemmin käyttämään ja CIELUV käyttöalue on ensisijaisesti värillisillä valoilla. Sen sijaan CIE  $L^*a^*b^*$  on yleisesti tunnetumpi ja sitä käytetään heijastavien materiaalien värimittauksissa.

## 4.4 CIE standardivalaisin

Koska valo on värinäön kolmion yksi osa, se on oleellinen osa värihavaintoa. Valon määrä ja laatu vaihtelee tilanteesta riippuen, samoin siis värihavaintokin. Tämän vuoksi CIE on kehittänyt useita standardivalaisinsarjoja, joita merkitään kirjaimilla A-F. Standardivalaisin on teoreettinen valonlähde, joka perustuu jonkin valonlähteen fyysisiin ominaisuuksiin ja jolle on määritelty tämän mukainen tehospektrijakauma ja väriämpötila. Kuvassa 11 on tyypin A- ja  $D_{65}$ -standardivalaisimet. A-valaisin vastaa hehkulamppua ja sen väriämpötila on 2856 K. C-valaisin vastaa myös hehkulamppua, mutta väriämpötila on 6774 K. D-sarjan valaisimet vastaavat auringonvaloa ja siihen kuuluu neljä eri valaisinta. Yleisin käytetty D-valaisin on  $D_{65}$ , joka kuvastaa keskipäivän aurinkoa. Muita valaisimia on E, joka on tasatehoinen valaisin ja tarkoitettu lähinnä vertailukäyttöön. F-sarjassa on 12 eri valaisintyyppiä, jotka vastaavat loisteputkivaloa. Standardivalaisimia tarvitaan, jotta voidaan olla varmoja että värit ovat vertailukelpoisia ja että eri valaistusolosuhteissa mitattuja värejä voidaan vertailla [25].



**Kuva 11.** CIE A- ja  $D_{65}$  -standardivalaisimet.

## 5 VÄRIEROT

Värieromittari kehitetään useimmiten toimimaan tiettyssä väriavaruudessa tai toimimaan hyvin tietyn väridatan, kuten Munsellin [28] tai värieroellipsien [29] kanssa. Esimerkiksi CIEDE2000 on kehitetty kuudella tarkkaan valitulla värieroellipsillä [12]. Värieromittarin toimivuus perustuu siis paljolti väridatan laatuun ja luotettavuuteen [2].

### 5.1 CIE värieromittarit

Värieromittareilla lasketaan lukuarvo kahden värin erolle tietyissä CIE:n väriavaruudessa, useimmiten CIELAB:ssa. CIE värieromittarit ovat nimetty järjestään tunnuksella  $\Delta E^*$ , jossa  $E$  tulee saksankielen sanasta *Empfindung*, tunne. Vuonna 1976 CIE esitteli euklidisen etäisyyden laskevan värieromittarin CIELAB:lle [23], joka on määritelty kaavalla

$$\Delta E_{ab}^* = \left[ (\Delta L^*)^2 + (\Delta a^*)^2 + (\Delta b^*)^2 \right]^{1/2}, \quad (11)$$

jossa  $\Delta$  tarkoittaa verrokin ja kohdearvon erotusta

$$\Delta X = X_1 - X_2.$$

Sylinterinmuotoisen esitysmuodon 8 väriero voidaan laskea vastaavasti kaavalla

$$\Delta E_{ab}^* = \left[ (\Delta L^*)^2 + (\Delta C^*)^2 + (\Delta h^*)^2 \right]^{1/2}. \quad (12)$$

Vuonna 1994 julkaistiin paranneltu versio CIE94 [23]

$$\Delta E_{94}^* = \left[ \left( \frac{\Delta L^*}{k_L S_L} \right)^2 + \left( \frac{\Delta H_{ab}^*}{k_C S_C} \right)^2 + \left( \frac{\Delta C_{ab}^*}{k_H S_H} \right)^2 \right]^{1/2}, \quad (13)$$

jossa

$$\begin{aligned} S_L &= 1 \\ S_C &= 1 + 0.045 C_{ab,verrokki}^* \\ S_H &= 1 + 0.015 C_{ab,verrokki}^* \\ k_L &= k_C = k_H = 1. \end{aligned}$$



Kaavoissa 13 kromaattisuusarvon  $C_{ab,verrokkii}^*$  alaviite tarkoittaa pysyvää vertailuväriä, josta etäisyys on laskettu toiseen väripisteeseen.

CIE94 ei ollut täydellinen mittari ja vuonna 1998 CIE perusti TC 1-47 työryhmän kehittämään CIEDE2000. Vuonna 2001 valmistunut ja vuonna 2014 standardoitu CIEDE2000 lasketaan kaavoilla

$$\Delta E_{00}^* = \sqrt{\left(\frac{\Delta L'}{k_L S_L}\right)^2 + \left(\frac{\Delta C'}{k_C S_C}\right)^2 + \left(\frac{\Delta H'}{k_H S_H}\right)^2 + R_T \frac{\Delta C'}{k_C S_C} \frac{\Delta H'}{k_H S_H}}, \quad (14)$$

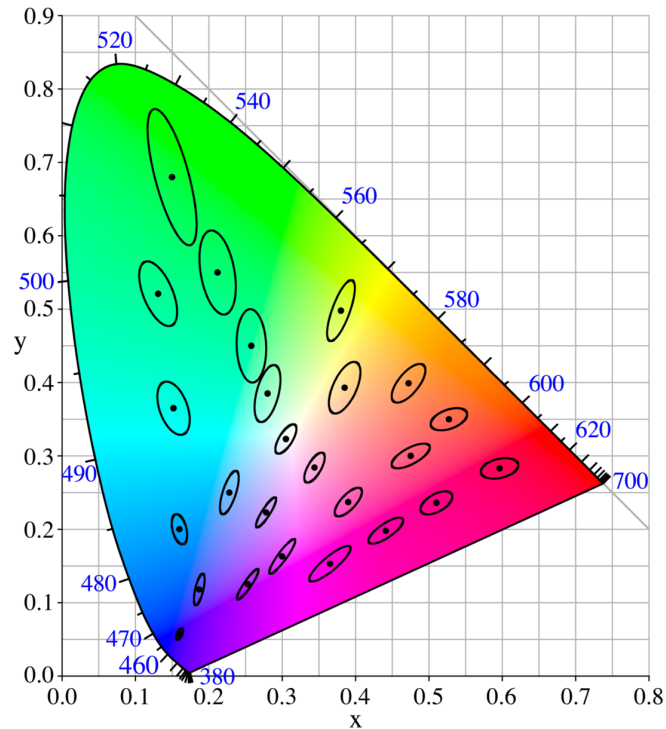
jossa on CIE94 tapaan kompensatiotermi valoisuudelle, sävyille ja kromalle sekä uutena osana rotaatiotermi

$$R_T = -2 \sqrt{\frac{\bar{C}'^7}{\bar{C}'^7 + 25^7}} \sin \left[ 60^\circ \cdot \exp \left( - \left[ \frac{\bar{H}' - 275^\circ}{25^\circ} \right]^2 \right) \right],$$

jonka tarkoitus on korjata sinisen ja violetin alueen vääristymiä.

## 5.2 MacAdamin ellipsit

David L. MacAdam tutki 1940-luvulla kuinka hyvin ihminen pystyy havainnoimaan värieroja. Tutkimusmetodina oli värinsovitustesti 25 väripisteelle yhdellä koehenkilöllä. Testeissä huomattiin, että havainnot osuivat väripisteen ympärille elliptiseen muotoon kuvan 12 CIE  $x, y$  -kromaattisuusdiagrammissa [1]. Ellipsien keskipisteen ja kehän pisteiden välinen väriero on havainnollisesti saman verran. Toisin sanoen, kuvatut ellipsin väripisteet ovat laskennallisia ja värieron suuruus vaihtelee eri puolella keskipistettä. Sen sijaan visuaalinen väriero todetaan samaksi, vaikka laskennallisesti näin ei näyttäisi olevan. Jos visuaalinen väriero olisi yhtä suuri laskennallisen värieron kanssa, ellipsit olisivat ympyröitä. Lisäksi ellipsien koko vaihtelee huomattavasti eri puolilla kromaattisuusdiagrammia. Esimerkiksi vihreällä sävyalueella ellipsit ovat pinta-alaltaan suurempia kuin sinisellä sävyalueella [2].



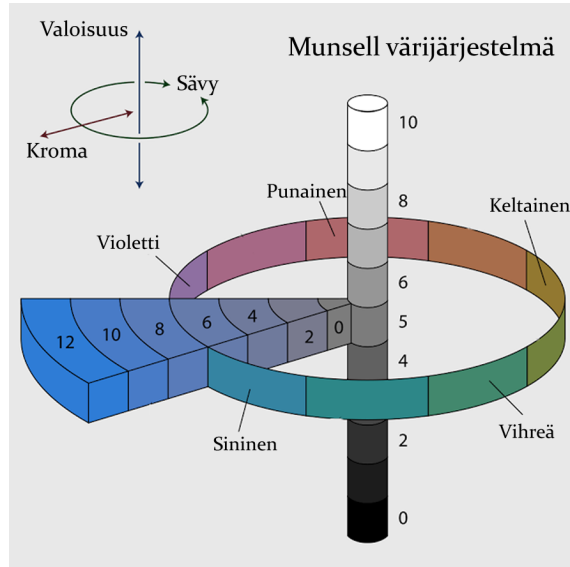
**Kuva 12.** MacAdamin ellipsit CIE x,y -kromaattisuusdiagrammissa [30]. Ellipsit on suurennettu kymmenkertaisiksi.

### 5.3 Munsell-värijärjestelmä

Vuonna 1905 taideopettaja Albert Henry Munsell suunnitteli visuaaliseen tasaisesti jaetun värijärjestelmän opetustarkoituksiin. Värijärjestelmä sisältää Munsell-sävyä, -valoisuusarvon ja -kromaa. Järjestelmä on jaettu kymmeneen pääsävyyn, jotka jakaantuvat eri valoisuusarvoihin ja kromaattisuuksiin. Järjestelmää on muokattu vuosin saatossa ja tunnetuimmat painokset ovat Munsell Book of Color Glossy and Matte Editions vuodelta 1976 [28]. Tässä työssä käytetään Joensuun yliopiston vastaavaa Munsell mattasävyistä mitattua spektridataa [31]. Mattasävyjen väripisteet on kuvattu CIELAB- ja  $L_{opt}a_{opt}b_{opt}$ -väriavaruuksissa kuvasarjassa 22. Kuvassa 13 on kolmiulotteinen esitys Munsell värijärjestelmästä. Kuvaan on merkitty selkeyden vuoksi kymmenestä pääsävyistä vain viisi, joiden välissä on merkitsemättömät toiset viisi pääsävyä. Munsellin värijärjestelmälle on myös värieromittari, vuonna 1936 kehitetty Nickerson indeksi

$$\Delta E_{index\ of\ fading} = \frac{2}{5}C\Delta H + 6\Delta V + 3\Delta C, \quad (15)$$

joka on samalla ensimmäinen kehitetty värieromittari. Mittari laskee kahden Munsell väriuskan värieron ja  $H$ ,  $V$  ja  $C$  ovat Munsellin sävy, valoisuus ja kroma [2].



**Kuva 13.** Munsell-värijärjestelmän kolmiulotteinen esitys.

## 5.4 STRESS

Värien havaintoeroja mitataan harmaasävy- tai parivertailuilla, joista saadut tulokset muutetaan visuaaliseksi värieroksi  $\Delta V$ , joka on puolestaan vertailukelpoinen  $\Delta E$  kanssa [2]. Värieromittareiden hyvyyttä mitataan arvioimalla kuinka paljon laskennallinen väriero  $\Delta E$  poikkeaa visuaalisesta värierosta  $\Delta V$ . Hyvyyttä voidaan havainnollistaa piirtämällä kuvaaja  $[\Delta V, \Delta E]$ , johon sovitetun käyrän pitäisi olla keskimäärin suora, kun visuaalinen väriero vastaa täysin laskennallista värieroa.

Laskennallisia keinoja mitata värieromittarin hyvyyttä on Performance factor 3 (PF/3) ja Standard Residual of Squares (STRESS) [32]. STRESS-arvo lasketaan kaavalla

$$STRESS = \sqrt{\frac{\sum(\Delta E_i - f\Delta V_i)^2}{\sum(f^2\Delta V_i^2)}}, \quad (16)$$

jossa

$$f = \frac{\sum(\Delta E_i^2)}{\sum(\Delta E_i\Delta V_i)}.$$

Suuri STRESS-luku tarkoittaa matalaa korrelaatiota datajoukkojen välillä ja nolla täydell-

listä korrelaatiota. Kuten aiemmin mainittu, värieromittari on hyvä jos  $\Delta V$  ja  $\Delta E$  välinen korrelaatio on suuri. PF/3 matemaattisia kaavoja ei tarkemmin käsitellä, sillä tässä työssä käytetään STRESS-mittaria, joka on yksinkertaisempi, yleisemmin käytetty ja tarkoitettu korvaamaan PF/3 [32].

## 6 UUDEN VÄRIAVARUUDEN MÄÄRITTÄMINEN

CIE  $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$  -värinsovituskäytännöt on kehitetty laskennallisesti tekemällä lineaarimuunnos  $\bar{r}\bar{g}\bar{b}$ -värinsovituskäytännöistä. Kuten teoriaosuudessa on kuvattu,  $\bar{r}\bar{g}\bar{b}$  -värinsovituskäytännöt perustuvat kahdesta erillisestä värinsovitustestistä saatujen mittaustuloksien keskiarvoon. Käytännöt pohjautuvat siten ihmissilmän fysiologiaan. Kokeellisessa osuudessa tutkitaan, voidaanko CIELAB-väriavaruudelle määritettyjä värinsovituskäytännöitä edelleen muuttamalla saada rakennettua uusi CIELAB-tyyppinen väriavaruusmalli, jossa  $\Delta E_{94}$  ja CIE-DE2000 kaltaisten värieromittarien antamat värierot olisivat lähempänä visuaalista värieroa.

### 6.1 Mallittaminen ja kaavat

Uusi väriavaruus, jota nimeämme  $L_{opt}a_{opt}b_{opt}$  tai lyhyemmin  $(Lab)_{opt}$ , määritellään CIELAB-tyyppisillä kaavoilla

$$\begin{aligned} L_{opt} &= p_1 f(Y_{opt}/Y_{n,opt}) \\ a_{opt} &= p_2 [f(X_{opt}/X_{n,opt}) - f(Y_{opt}/Y_{n,opt})] \\ b_{opt} &= p_3 [f(Y_{opt}/Y_{n,opt}) - f(Z_{opt}/Z_{n,opt})] \\ f(\omega) &= \omega^{\frac{1}{3}} \end{aligned} \tag{17}$$

jossa parametrit  $\mathbf{p} = [p_1, p_2, p_3]$  ovat väriavaruuden skaalauskerroimia ja niiden arvot asetetaan myöhemmin kokeellisessa osuudessa.  $(XYZ)_{opt}$ -arvot lasketaan kaavoilla 20. Muunnoksen tekeminen tapahtuisi samalla periaatteella, kuten kappaleessa 4 on esitetty kaavoilla 3 käyttämällä sopivaa muunnosmatriisia

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} & b_{13} \\ b_{21} & b_{22} & b_{23} \\ b_{31} & b_{32} & b_{33} \end{bmatrix}, \tag{18}$$

CIE 1931  $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$  -värinsovituskäytännöiden taustat ja muunnosmatriisin elementtien arvot on johdettu algebrallisesti artikkelissa [26]. Tässä tutkimuksessa tarkoituksena on löytää optimoinnin keinoin sellainen muunnosmatriisi  $\mathbf{M}$ , jolla kertomalla edelleen  $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ -arvot saa-

daan uudet  $\bar{x}_{opt}\bar{y}_{opt}\bar{z}_{opt}$  -värinsovitusfunktiot kaavalla

$$\begin{bmatrix} \bar{x}_{opt}(\lambda) \\ \bar{y}_{opt}(\lambda) \\ \bar{z}_{opt}(\lambda) \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} \bar{x}(\lambda) \\ \bar{y}(\lambda) \\ \bar{z}(\lambda) \end{bmatrix}, \quad (19)$$

joita käyttämällä kaavoissa 4, voidaan laskea värispektreistä visuaalisten värierojen kannalta tasaisemmin jakaantunut CIELAB-tyyppinen väriavaruus kaavalla 17. Esimerkiksi, kun haluamme laskea yksittäisen CIE ellipsin akselikärkien väripisteet uuteen koordinaatistoon, otamme neljä koordinaattipistettä heijaustussuhteina (ts. spektrijakaumina)  $R_i, i = [1, 4]$  ja laskemme  $(XYZ)_{opt}$ -tristimulusarvot kaavoilla

$$\begin{aligned} k &= 100 / \int_{\lambda} S(\lambda) \bar{y}_{opt}(\lambda) d\lambda \\ X_{opt,i} &= k \int_{\lambda} S(\lambda) R_i(\lambda) \bar{x}_{opt}(\lambda) d\lambda \\ Y_{opt,i} &= k \int_{\lambda} S(\lambda) R_i(\lambda) \bar{y}_{opt}(\lambda) d\lambda \\ Z_{opt,i} &= k \int_{\lambda} S(\lambda) R_i(\lambda) \bar{z}_{opt}(\lambda) d\lambda. \end{aligned} \quad (20)$$

Aallonpituus  $\lambda$  on välillä 380-780nm. Valkoisen referenssiarvo  $(XYZ)_{n,opt}$  lasketaan samoilla kaavoilla kuin 5, mutta käyttäen uusia värinsovitusfunktioita. Lopuksi koordinaatit lasketaan kaavoilla 17  $(Lab)_{opt}$  -väriavaruuteen. CIELAB-koordinaatit on mahdollista muuntaa suoraan uuteen väriavaruuteen tekemällä ensin muunnos  $CIELAB \rightarrow XYZ$  käänteismuunnoksen kaavoilla 10 ja sitten  $XYZ \rightarrow (XYZ)_{opt}$  kaavalla

$$\begin{bmatrix} X_{opt} \\ Y_{opt} \\ Z_{opt} \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (21)$$

ja edelleen käyttämällä kaavoja 17. Optimoinnissa voisi käyttää CIE ellipsien spektriarvojen sijaan CIELAB-koordinaatteja ja tehdä muunnokset suoraan kaavoilla 21, jolloin kaavojen 20 vaihe voitaisiin ohittaa. Tässä työssä kuitenkin päätettiin laskea ellipsien arvot spektreistä lähtien.

## 6.2 Käänteinen muunnos

Muunnos  $(Lab)_{opt} \rightarrow CIELAB$  voidaan tehdä palauttamalla ensin  $(XYZ)_{opt}$ -arvot kaavoilla

$$\begin{aligned} Y_{opt} &= Y_{n,opt} f^{-1}\left(\frac{L_{opt}}{p_1}\right) \\ X_{opt} &= X_{n,opt} f^{-1}\left(\frac{L_{opt}}{p_1} + \frac{a_{opt}}{p_2}\right) \\ Z_{opt} &= Z_{n,opt} f^{-1}\left(\frac{L_{opt}}{p_1} - \frac{b_{opt}}{p_3}\right) \end{aligned} \quad (22)$$

jossa

$$f^{-1}(\omega) = \omega^3.$$

Seuraavaksi lasketaan käänteismatriisi  $\mathbf{M}^{-1}$  ja  $(XYZ)_{opt} \rightarrow XYZ$  kaavoilla

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \mathbf{M}^{-1} \begin{bmatrix} X_{opt} \\ Y_{opt} \\ Z_{opt} \end{bmatrix} \quad (23)$$

ja lopuksi CIELAB-arvot kaavoilla 7.

## 7 KOKEELLINEN OSUUS

Tässä osuudessa etsitään optimoimalla sopiva muunnosmatriisi  $M$  käyttäen Matlab-ympäristöä. Aluksi esitellään käytettävä väridata ja sitten menetelmät, kuinka väridataa käytetään optimoinnissa. Lopuksi esitetään tulokset kuvina ja taulukoina. Väridatasta lasketaan alkuarvoja, joita verrataan koetuloksista saatuihin arvoihin laskemalla muutosprosentti alkuperäisen ja uuden arvon välillä. Negatiivinen muutosprosentti tarkoittaa, että kyseinen ominaisuus parani.

### 7.1 Väridata

Optimoinnin pääasiallisena väridatana käytetään kuutta CIE ellipsiä [12] ja niiden lisäksi valittiin neljä ellipsiä RIT-BFD -datasta [29]. Väridata on esitelty liitteessä 1. Lisäellipseiksi valittiin akselisuhteeltaan suuria ellipsejä, jotka sijoittuisivat CIE ellipsien lähetyville. Kuvassa 14 on piirretty kaikki ellipsit  $a^*$ ,  $b^*$  -tasolle. Optimoinnin seurauksena ellipsien muoto pitäisi olla lähempänä ympyrää ja pinta-alat samaa kokoluokkaa. Toisin sanoen, väripisteet ovat tällöin jakaantuneet väriavaruudessa visuaalisesti tasaisemmin.

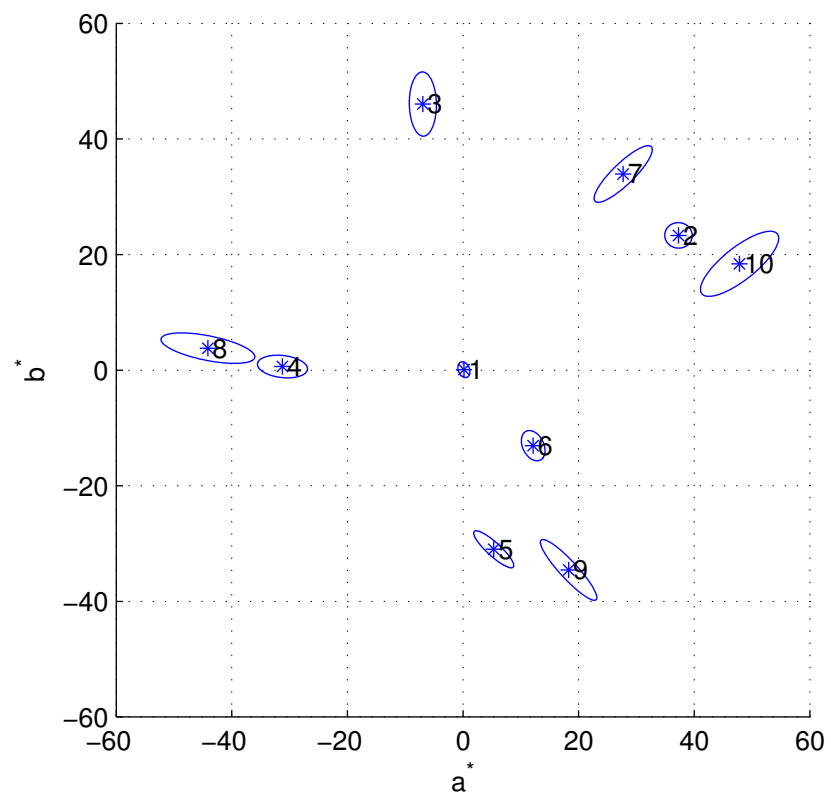
Toisin kuin muut ellipsit, erityisesti ellipsit 5 ja 9 ovat erityisen litteitä ja lisäksi kääntyneet pois päin neutraalista keskuksesta, jossa ellipsi 1 sijaitsee. Ellipsi 2 on hyvin ympyränmuotoinen, mutta sen välittömässä läheisyydessä olevat ellipsit 7 ja 10 ovat litteitä ja huomattavasti suurempia. Tämä selittynee sillä, että ellipsit ovat eri  $L^*$ -tasoilla. Optimointi tehdään niin, että  $L^*$ -arvoa kohdellaan vakiona, jolloin se jätetään pois laskutoimituksista ja väripisteiden etäisyydet lasketaan  $a^*$ ,  $b^*$ -tasossa.

Arviointidatana, mutta ei itse optimoinnissa, käytettiin STRESS-testiä [32] kymmenellä väripisteparilla [33]. Käytetty data löytyy taulukoituna liitteestä 2. Lisäksi käytettiin Ebner-Fairchild tasaisia sävyjä [34], jotka on esitetty edempänä kuvassa 19a sekä 1269 väripistettä Munsell mattasävyistä [31].

### 7.2 Menetelmät

Optimointimallin pohjana on valmis Matlab-skripti edellisestä vastaavasta tutkimuksesta [14], jossa etsittiin parempia CIELAB-kaavojen parametreja optimoimalla CIE ellipsejä. Tässä työssä edetään samalla periaatteella, mutta kuten kappaleessa 6 on esitetty,





**Kuva 14.** Värieroellipsit  $a^*$ ,  $b^*$  -tasossa. Numerot 1-6: CIE ellipsit, 7-10 BFD-RIT ellipsit. Kuvan ellipsien kokoa kasvatettu 75%.

nyt tarvitaan väridataa spektrijakaumamuodossa. Väridatapisteet ovat alunperin  $L^*a^*b^*$ -koordinaatteina, jotka on laskettu  $D_{65}$ -standardivalaisimella ja CIE 1931 XYZ  $2^\circ$  havaitsijan värinsovituskäyrillä. Munsellin mattasävyjä lukuunottamatta, jotka ovat valmiiksi spektrimuodossa, väridata palautettiin spektreiksi MRA-menetelmällä [18]. Menetelmä ei palauta täsmälleen alkuperäistä spektrijakaumaa  $L^*a^*b^*$ -arvoista, vaan riittävän tarkan approksimaation. Alkuperäisten väripisteiden ja palautetuista spektreistä uudelleenlasketujen väripisteiden  $\Delta E$  on vähemmän kuin 0.005.

Työkaluna optimoinnissa käytetään Matlab-laskentaohjelmiston *fminsearch*-funktiota. Aluksi *fminsearch*-funktiolle annetaan minimoitava kohdefunktio ja alkuarvot, jonka jälkeen funktio etsii sellaiset arvot alkuarvojen tilalle, että kohdefunktion arvo on niillä kaikkein pienin. Kohdefunktiona on

$$\arg \min_M \phi(M) = a_1 \phi_{ASS} + a_2 \phi_{KV} + a_3 \phi_{PS}, \quad (24)$$

jossa

$$\mathbf{a} = [8, 7, 4] \quad (25)$$

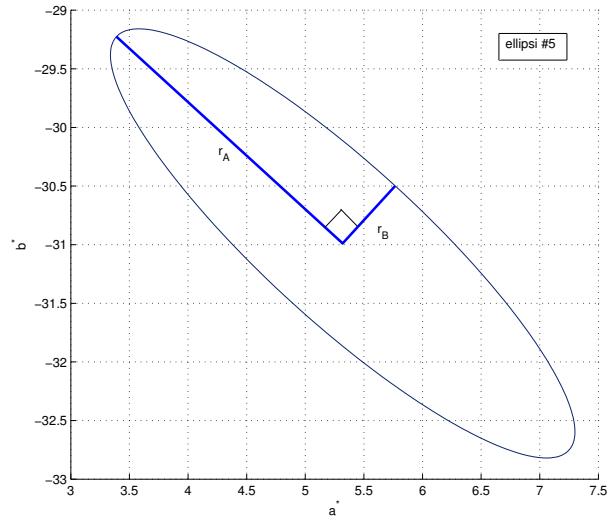
$$\phi_{ASS} = \frac{\max(r_A/r_B)}{\min(r_A/r_B)} \quad (26)$$

$$\phi_{KV} = |90^\circ - \angle(r_A, r_B)| \quad (27)$$

$$\phi_{PS} = \frac{\max(\pi * r_A * r_B)}{\min(\pi * r_A * r_B)}. \quad (28)$$

Ellipsien iso- ja pikkuakselin sädettä symboloivat  $r_A$  ja  $r_B$ , kuten esitetty kuvassa 15. Säteiden pituudet lasketaan värieromittarilla keskipisteestä kehälle, niin että valoisuus  $L^*$  (tai vastaavasti  $L_{opt}$ ) on vakio.

Kohdefunktion painokertoimet  $\mathbf{a}$  saatiin kokeilemalla eri arvoja, kunnes optimointi ei enää parantanut tuloksia merkittävästi. Funktion osat ovat ellipsien väripistekoordinaateista laskettuja suhdelukuja. Kohdefunktiossa akselisuhteiden suhde  $\phi_{ASS}$  laskee suhdeluvun pienimmän ja suurimman akselisuhteen välille, joka saa arvon 1.0, jos ellipsit ovat ympyröitä. Pinta-alasuhde  $\phi_{PS}$  on suurimman ja pienimmän ellipsin pinta-alan suhde, joka saa arvon 1.0, jos ellipsit ovat saman kokoisia. Kokeissa huomattiin, että ellipsien reunapisteet ovat sijoittuneet joissain tapauksissa niin, että akselit eivät olleet kohtisuorassa toisiinsa nähden. Tällöin kyseessä ei ole puhtaasti ellipsi eikä ympyrä. Kohdefunktion ehto  $\phi_{KV}$  laskee arvon akselien kohtisuoruudelle ja saa arvon 0.0, kun akselien välinen kulma  $\angle(r_A, r_B) = 90^\circ$ . Tällä varmistetaan että ellipsit pysyvät muodossaan ja tulokset olisivat luotettavampia.



**Kuva 15.** CIE värieroellipsi n:o 5  $a^*$ ,  $b^*$  -tasossa. Iso- ja pikkuakselin säteet  $r_A$  ja  $r_B$  ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden.

Lisäksi määritetään summattu akselisuhde ja suurin akselisuhde

$$\phi_{SAS} = \sum \left| 1 - \frac{r_A}{r_B} \right| \quad (29)$$

$$\phi_{AS_{max}} = \max \left( \left| 1 - \frac{r_A}{r_B} \right| \right), \quad (30)$$

joita ei kuitenkaan käytetä optimoinnissa vaan laskennan tulosten arvioinnissa. Kokeissa huomattiin, että  $\phi_{SAS}$  ei ole hyvä kohdefunktion osa vaan parempia tuloksia saatiin käyttämällä  $\phi_{ASS}$ .  $\phi_{SAS}$  lukemalla arvioidaan myös ellipsien ympyränmuotoisuutta, ja se kuvaa tätä ominaisuutta paremmin, kuin  $\phi_{ASS}$ . Suhdeluku saa arvon 0.0, kun kaikki ellipsit ovat pyöreitä.  $\phi_{AS_{max}}$  on vähiten ympyränmuotoisen ellipsin akselisuhde.

Alkuarvoksi, eli tulevaksi muunnosmatriisiksi, annettiin identiteettimatriisin kymmenesosa

$$M_0 = \begin{bmatrix} 0.1 & 0 & 0 \\ 0 & 0.1 & 0 \\ 0 & 0 & 0.1 \end{bmatrix}. \quad (31)$$

Kohdefunktio havaittiin vaikeaksi optimoitavaksi. Aluksi kokeiltiin alkuarvoksi identiteettimatriisia, mutta huomattiin että optimointi tuotti huomattavan suuria kertoimia muun-

nosmatriisille ja arvoja värinsovitusfunktioille. Kymmenesosan identiteettimatriisi tuotti vertailukelpoisemman muunnosmatriisin ja värinsovitusfunktiot.

Taulukkoon 1 on koottu kohdefunktiossa esitetyt ja muut edellä mainitut suhdeluvut eri väriarvot mitattuna. Arvot on laskettu koko ellipsoidista, kuten esitetty kaavoissa 25 ja 29.

**Taulukko 1.** Alkuperäisten suhdelukujen arvot

Värieromittari	$\Delta E_{ab}$	$\Delta E_{94}$	$\Delta E_{00}$
$\phi_{SAS}$	17.840	8.964	5.036
$\phi_{AS_{max}}$	3.680	2.510	1.238
$\phi_{ASS}$	4.345	3.825	2.480
$\phi_{PS}$	17.184	3.510	3.163
$\phi_{KV}$	0.0%	0.0%	0.0%

Taulukossa 2 on alkuperäiset STRESS-arvot laskettuna tutkimuksen [33] visuaalisista ja laskennallisista värieroista eri värieromittareilla. Tutkimuksessa oli esitelty  $\Delta E_{00}$  värieromittarin paremmuutta verrattuna  $\Delta E_{ab}$ , joten taulukossa on vielä erikseen laskettu arvot  $\Delta E_{94}$ , jota ei ollut käsitelty tutkimuksessa. Pienempi STRESS-arvo tarkoittaa, että värieromittarin antama tulos vastaa paremmin visuaalista eroa. Esimerkiksi arvo 0.5 tarkoittaa 50% visuaalista virhettä lasketussa värierossa. Suluissa mainitut Koe I ja Koe II viittaavat ensimmäiseen ja toiseen koesarjaan alkuperäisessä raportissa [33].

**Taulukko 2.** Alkuperäiset STRESS-arvot

Värieromittari	$\Delta E_{ab}$	$\Delta E_{94}$	$\Delta E_{00}$
STRESS (Koe I)	0.509	0.277	0.316
STRESS (Koe II)	0.450	0.242	0.256

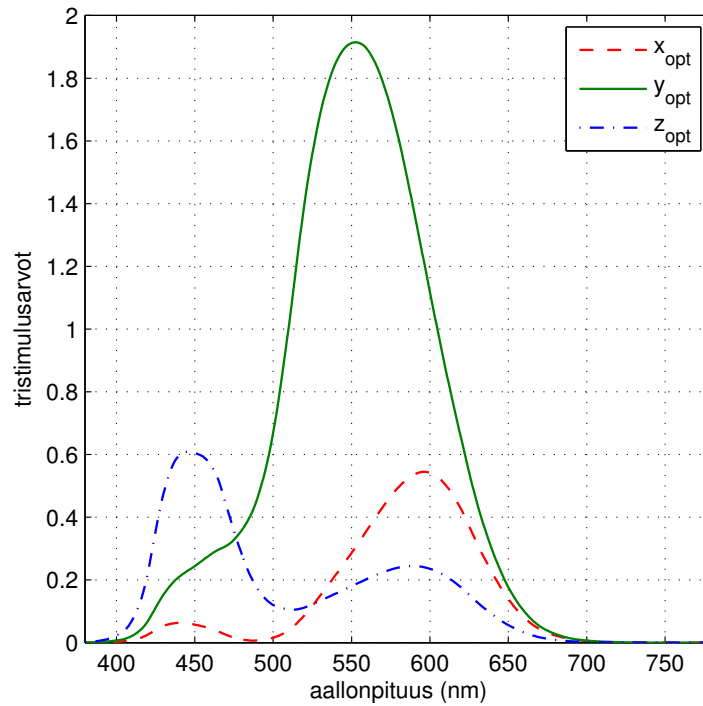
### 7.3 Tulokset uudella väriavaruudella

Väriavaruuden kaavojen skaalauskerroimiksi asetettiin aluksi alkuperäiset CIELAB-arvot  $\mathbf{p} = [116, 500, 200]$  mutta huomattiin, että optimointitulokset saavuttivat vain muutaman prosentin parannuksen alkuperäiseen verrattuna. Ilman skaalauskerroimia väripisteiden koordinaatit olivat lukuarvoiltaan liian pieniä ja vertailukelvottomia alkuperäiseen verrattuna. Arvioitiin, että parempia tuloksia saataisiin, jos vaaka-akselien  $a_{opt}$  ja  $b_{opt}$  kertoimet ovat yhtäsuuret, joten kokeiltiin arvoja  $a_{opt} = b_{opt} = 500$  ja  $a_{opt} = b_{opt} = 200$ . Valoisuus

akseli  $L_{opt}$  päätettiin antaa olla alkuperäisellä CIELAB-kertoimella 116, koska se ei vaikuta yhtä merkittävästi ellipsien muotoon tai kokoon. Myös yhtä suurilla kertoimilla 200 tai 500 tulokset näyttivät noin 20% parannusta eli enemmän kuin alkuperäisillä skaalaus-kertoimilla tehdyllä optimoinnilla. Kokeilemalla järjestelmällisesti  $a_{opt}, b_{opt}$ -kertoimia vä-  
liltä [200, 500] todettiin, että parametriarvoilla  $\mathbf{p} = [116, 450, 450]$  saadaan optimaalisin muunnosmatriisi

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 0.4568 & 0.0892 & -0.0561 \\ -0.1199 & 1.9730 & 0.1182 \\ 0.1561 & 0.1102 & 0.3092 \end{bmatrix}. \quad (32)$$

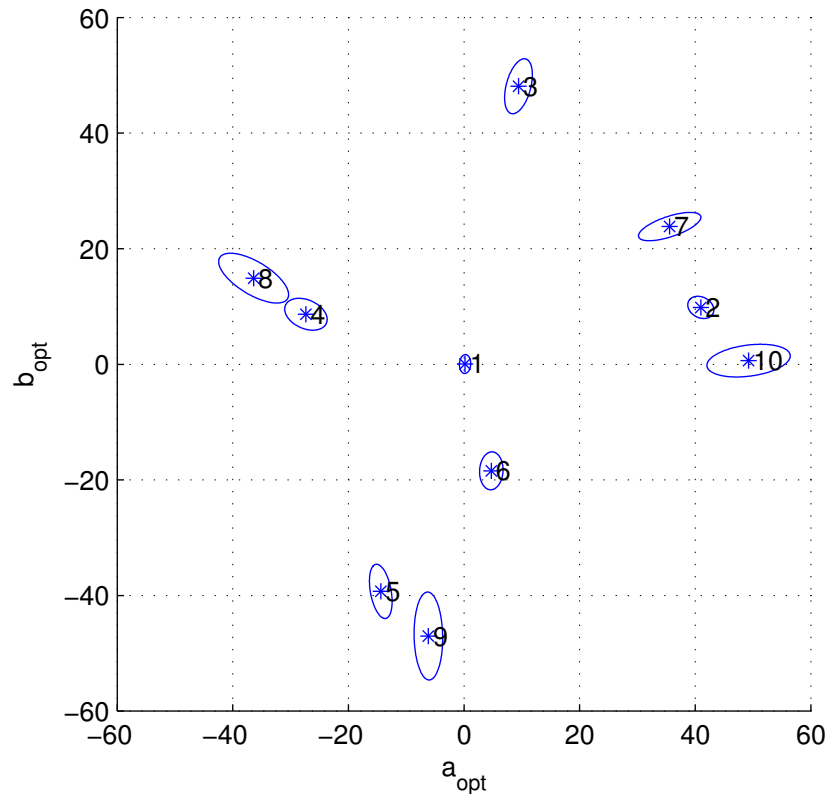
Kuvassa 16 on piirrettynä optimoidut värinsovitusfunktiot, jotka on saatu kertomalla al-  
kuperäiset  $\bar{x}\bar{y}\bar{z}$ -arvot muunnosmatriisilla  $\mathbf{M}$  kaavalla 19.



**Kuva 16.**  $\bar{x}_{opt}\bar{y}_{opt}\bar{z}_{opt}$ -värinsovitusfunktiot.

Kuvassa 17 on piirrettynä kymmenen ellipsiä uuteen väriavaruuteen  $a_{opt}, b_{opt}$ -tasolle. Vä-  
ripisteet ovat  $a_{opt}, b_{opt}$ -koordinaatistossa kiertyneet keskimäärin  $35^\circ$  myötäpäivään ori-  
gosta katsottuna verrattuna alkuperäiseen  $a^*, b^*$ -koordinaatistoon kuvassa 14. Muutokset  
nähdään selkeämmin kuvasta 18, jossa on sekä alkuperäiset että uudet ellipsit päällekkäin.

Taulukossa 3 on optimoidun väriavaruuden ellipsien geometrisista ominaisuuksista laske-



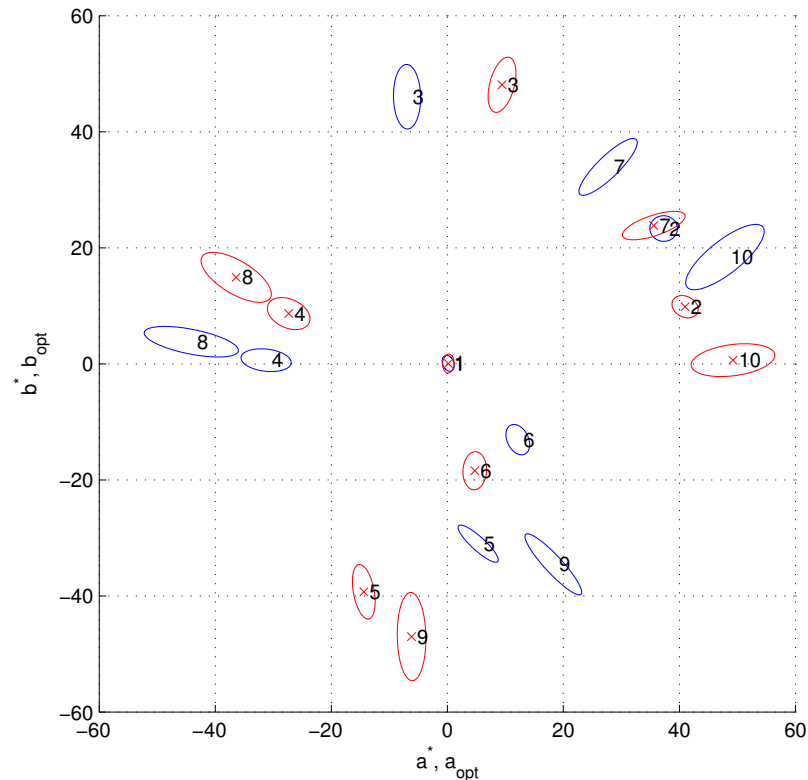
**Kuva 17.** Värieroellipsit  $a_{opt}, b_{opt}$  -tasossa. Numerot 1-6: CIE ellipsit, 7-10 BFD-RIT ellipsit. Kuvan ellipsien kokoa kasvatettu 75%.

tut suhdeluvut ja suluissa perässä prosenttilukemat, jotka ilmaisevat muutosta taulukossa 1 esitettyihin lukemiin. Taulukossa lisäksi kokeellinen  $\Delta E_{00,240^\circ}$ , joka on lähes identtinen  $\Delta E_{00}$  kanssa, mutta rotaatiotermi kaavassa 5.1 on muutettu arvo  $275^\circ$  arvoon  $240^\circ$ , eli muutos  $35^\circ$  verran myötöpäivään. Tämä on lähinnä kokeellinen värieromittari, koska luultavasti koko rotaatiotermi  $R_T$  ja  $T$  CIEDE2000 kaavoissa 14 pitäisi muodostaa kokonaan uudelleen usean väridatan pohjalta, kuten artikkelissa [12] on kuvattu. Täysimuotoisen uuden värieromittarin kehittäminen taas ei kuulu tämän työn piiriin.

Kuvassa 19b on kuvattuna Fairchild-Ebner väridatan tasaiset sävyt  $a_{opt}, b_{opt}$  -tasossa. Ku-

**Taulukko 3.** Uudet ellipsien arvot.

Värieromittari	$\Delta E_{ab}$	$\Delta E_{94}$	$\Delta E_{00}$	$\Delta E_{00,240^\circ}$
$\phi_{SAS}$	12.550 (-29.6%)	5.671 (-36.7%)	3.656 (-27.4%)	3.361
$\phi_{AS_{max}}$	2.216 (-39.8%)	1.455 (-42.1%)	0.794 (-35.9%)	0.794
$\phi_{ASS}$	2.895 (-33.4%)	2.910 (-24.0%)	2.257 (-8.9%)	2.121
$\phi_{PS}$	12.210 (-29.0%)	4.121 (+17.5%)	4.960 (+56.7%)	4.921
$\phi_{KV}$	0.4%	0.4%	0.4%	



**Kuva 18.** Alkuperäiset (siniset) ja optimoidun väriavaruuden (punaiset rastilla) värieroellipsit  $a, b$ -tasossa. Numerot 1-6: CIE ellipsit, 7-10 BFD-RIT ellipsit. Kuvan ellipsien kokoa kasvatettu 75%.

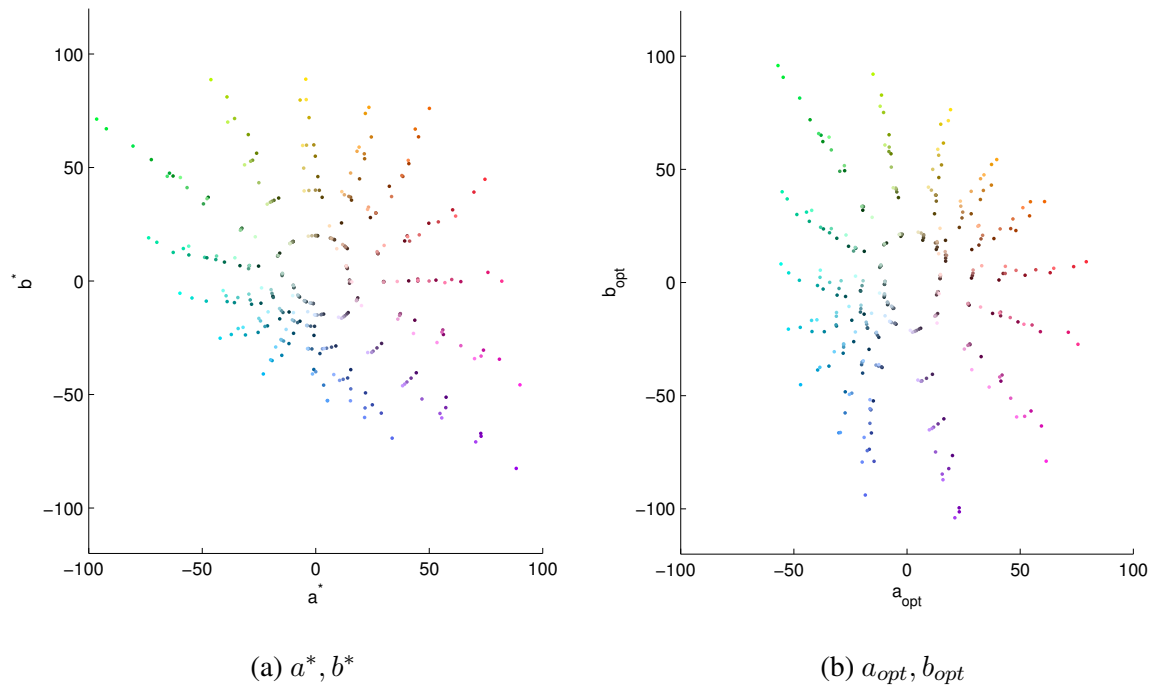
vasta nähdään, että väripisteet ovat kiertyneet myötäpäivään, kuten aiemmin nähtiin kuvassa 17. Sinisen ja violetin sävyt ovat kiertyneet enemmän kuin muut ja levittäytyneet hieman laajemmin kuin kuvassa 19a.

Taulukossa 4 STRESS-testien I ja II CIELAB- ja optimoidussa väriavaruudessa lasketut tulokset numeroina. Suluissa merkittynä muutos verrattuna CIELAB-väriavaruuteen.

**Taulukko 4.** Uudet STRESS-arvot.

Värieromittari	$\Delta E_{ab}$	$\Delta E_{94}$	$\Delta E_{00}$	$\Delta E_{00,240^\circ}$
STRESS (Koe I)	0.476 (-6.48%)	0.235 (-15.16%)	0.322 (+1.90%)	0.324 (-)
STRESS (Koe II)	0.381 (-15.33%)	0.178 (-26.45%)	0.265 (+3.52%)	0.264 (-)

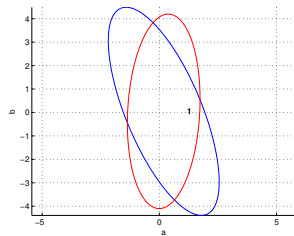
Kuvasarjoissa 20 ja 21 on jokainen ellipsi asetettu päällekkäin. Pääakselien pituudet on laskettu ensin  $\Delta E_{ab}$  ja sitten  $\Delta E_{94}$  värieromittarilla. Kuvista nähdään eroavaisuudet alkuperäisen ellipsin ja optimoidun välillä. CIEDE2000 kanssa kuvia ei esitetä, koska mittaria käytettiin lähinnä kokeilumielessä.



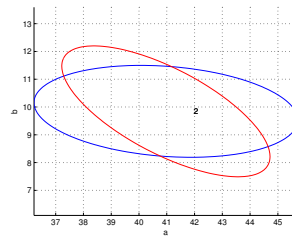
**Kuva 19.** Fairchild-Ebner tasaiset sävyt.

Kuvissa 22 on piirretty kolmesta eri tasonäkymästä Munsellin mattasävyt sekä  $L^*a^*b^*$ -, että  $(Lab)_{opt}$ -väriavaruuteen.

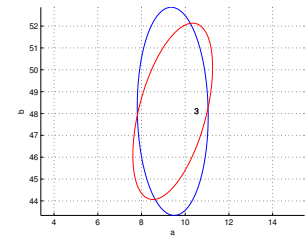




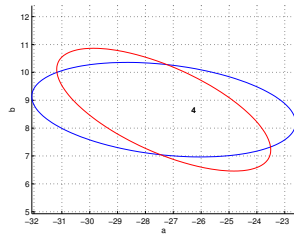
(a) CIE W1 Harmaa



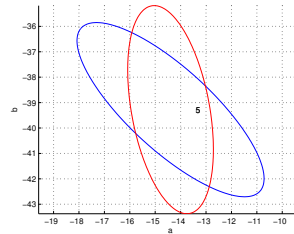
(b) CIE W2 Punainen



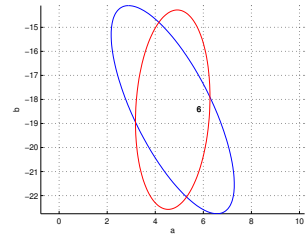
(c) CIE W3 Keltainen



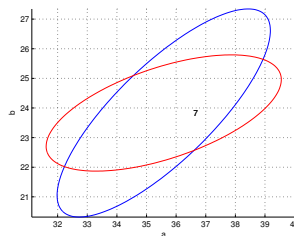
(d) CIE W4 Vihreä



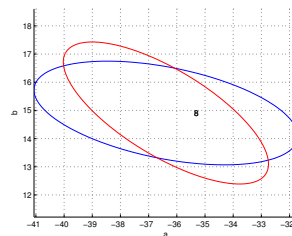
(e) CIE W5 Sininen



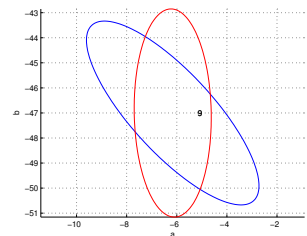
(f) CIE W6 Harmaa/Violetti



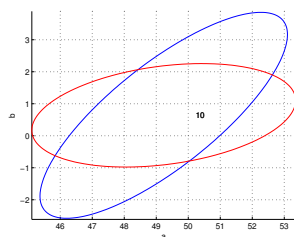
(g) BFD-RIT RCK 21



(h) BFD-RIT KPC 22

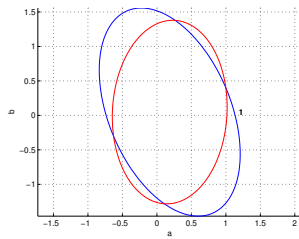


(i) BFD-RIT KPC 25

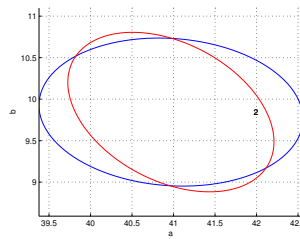


(j) BFD-RIT KPC 26

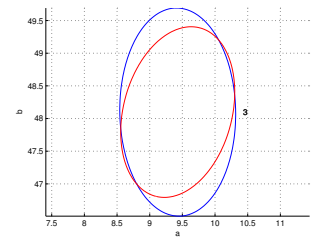
**Kuva 20.** BFD-RIT ja CIE ellipsit  $a,b$ -tasossa  $\Delta E_{ab}$  laskettuna. Sininen (ulompi) ellipsi on CIE-LAB ja punainen (sisempi) on optimoitu. Keskipiste on asetettu samoiksi optimoidun mukaan, jotta vertailu on mahdollista.



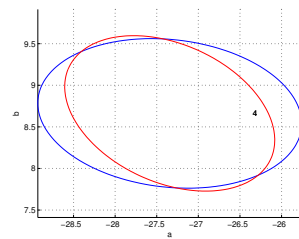
(a) CIE W1 Harmaa



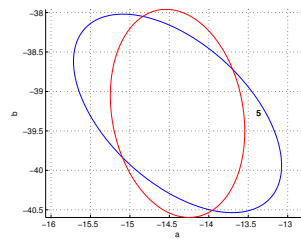
(b) CIE W2 Punainen



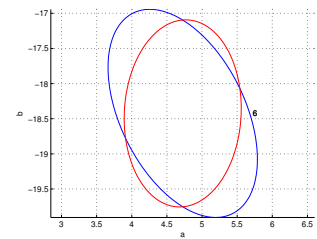
(c) CIE W3 Keltainen



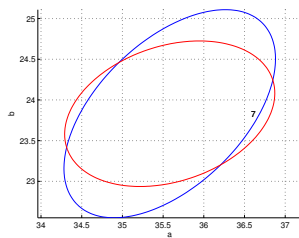
(d) CIE W4 Vihreä



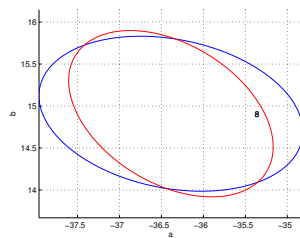
(e) CIE W5 Sininen



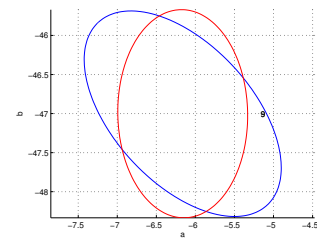
(f) CIE W6 Harmaa/Violetti



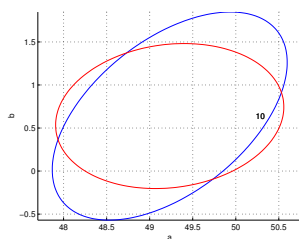
(g) BFD-RIT RCK 21



(h) BFD-RIT KPC 22

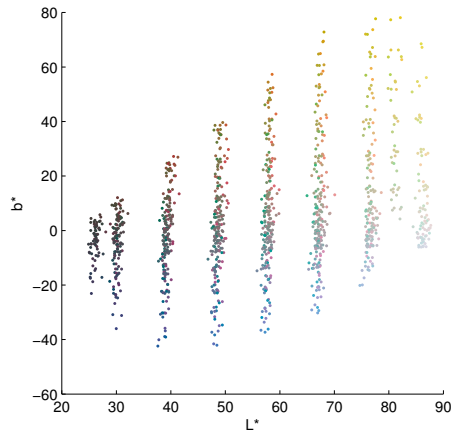


(i) BFD-RIT KPC 25

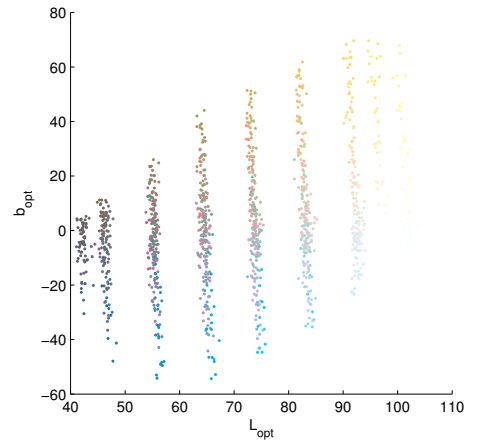
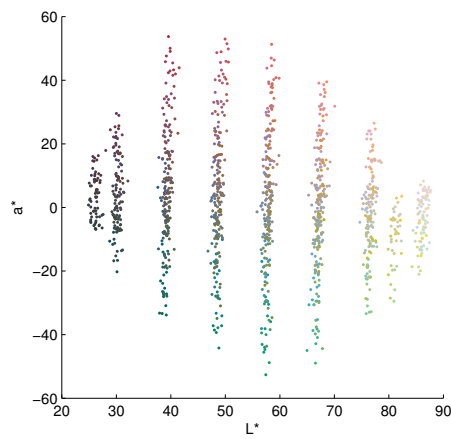
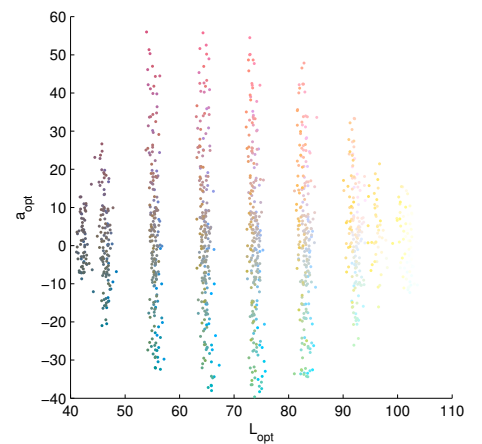
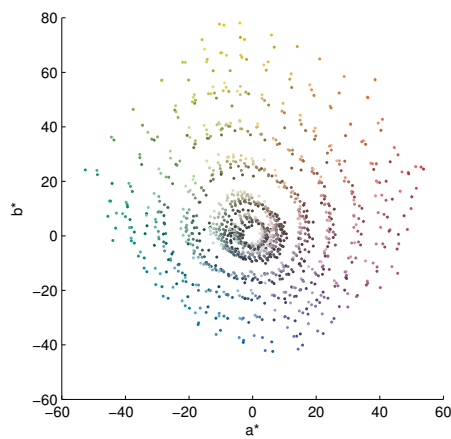
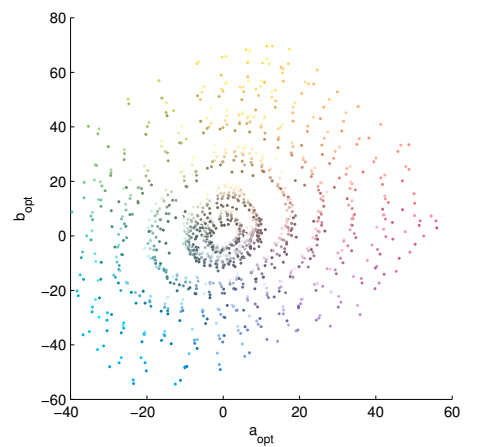


(j) BFD-RIT KPC 26

**Kuva 21.** BFD-RIT ja CIE ellipsit  $a,b$ -tasossa  $\Delta E_{94}$  laskettuna. Sininen (ulompi) ellipsi on CIE-LAB ja punainen (sisempi) on optimoitu. Keskipiste on asetettu samoiksi optimoidun mukaan, jotta vertailu on mahdollista.



(a)

(b)  $L_{opt}, b_{opt}$ (c)  $L^*, a^*$ (d)  $L_{opt}, a_{opt}$ (e)  $a^*, b^*$ (f)  $a_{opt}, b_{opt}$ 

Kuva 22. Munsell mattasävyt

## 7.4 Korjatut muunnoskaavat

Kokeellisessa osuudessa huomattiin, että kaavoilla 21 väripisteiden koordinaatit eivät asetu oikein, kun verrattiin muunnoksia  $CIELAB \rightarrow (Lab)_{opt}$  ja  $spektriarvot \rightarrow (Lab)_{opt}$ . Ratkaisuksi todettiin, että muunnosmatriisi täytyy jakaa vakiolla, jonka tarkka arvo etsittiin laskemalla. CIE  $D_{65}$ -standardivalaisimen valkoisen referenssiarvon tiedetään olevan  $(XYZ)_n = [95.047, 100.000, 108.883]$ . Kun tämä arvo halutaan muuntaa  $(XYZ)_{n,opt}$ , lasketaan

$$\begin{bmatrix} X_{n,opt} \\ Y_{n,opt} \\ Z_{n,opt} \end{bmatrix} = \mathbf{M} \begin{bmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{bmatrix} \quad (33)$$

ja saadaan arvoksi  $(XYZ)_{n,opt} = [46.2291, 198.7738, 59.5235]$ . Kun  $(XYZ)_{n,opt}$  lasketaan spektriarvoista lähtien kaavoilla 5  $(\bar{x}\bar{y}\bar{z})_{opt}$ -värinsovitusfunktioiden kanssa, arvo  $(XYZ)_{n,opt} = [23.257, 100.000, 29.942]$ . Huomataan, että kaavoilla 33 saadaan virheellinen lukema. Ratkaisemalla vakio  $c$  yhtälöstä

$$\frac{(XYZ)_{n,opt,virheellinen}}{c} = (XYZ)_{n,opt,oikea}$$

saadaan tarvittava korjausvakio. Ilman vakiolla jakamista väripisteet eivät asetu täysin samoihin koordinaatteihin verrattuna samoihin spektriarvoista laskettuihin väripisteisiin. Korjattu versio kaavasta 21 on siis

$$\begin{bmatrix} X_{opt} \\ Y_{opt} \\ Z_{opt} \end{bmatrix} = \frac{\mathbf{M}}{c} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix}, \quad (34)$$

jossa

$$c = 1.9877.$$

Käänteinen muunnos  $(XYZ)_{opt} \rightarrow XYZ$  vaatii vastaavasti  $M^{-1}$ -matriisin  $c$ -vakiolla kertomisen kaavassa 23 eli

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = c * (\mathbf{M}^{-1}) \begin{bmatrix} X_{opt} \\ Y_{opt} \\ Z_{opt} \end{bmatrix}. \quad (35)$$

## 8 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tuloksena johdettiin  $\bar{x}_{opt}\bar{y}_{opt}\bar{z}_{opt}$ -väriinsovituskäyrät ja  $L_{opt}a_{opt}b_{opt}$ -väriavaruus minimoimalla CIE ja BFD-RIT värieroellipsien muoto- ja pinta-alaeroja. Ellipsien muotoa ja keskinäistä pinta-alaeroa saatiin parannettua kaikilla kokeilla värieromittareilla mitattuna. Euklidisella etäisyydellä  $\Delta E_{ab}$  parannusta saatiin noin -30 %,  $\Delta E_{94}$  myös noin -30% muotoihin, mutta pinta-alojen ero kasvoi hieman alle 20% verran.  $\Delta E_{00}$  ja  $\Delta E_{00,240^\circ}$  mittareilla muodot paranivat -30%, mutta pinta-alaero sen sijaan kasvoi melkein 60%. STRESS-testeissä  $\Delta E_{ab}$  ja  $\Delta E_{94}$  tulokset paranivat noin 5%, mutta  $\Delta E_{00}$  ja  $\Delta E_{00,240^\circ}$  tulokset huononivat hieman tai pysyivät samana. Tosin otanta on melko pieni kymmenellä väripisteparilla ja alkuperäinen tutkimus kehottaa välttämään vakavasti otettavaa vertailua kyseisellä väridatalla [33]. Sen sijaan esimerkiksi Witt'in visuaalinen värierodata [35] on yleisesti käytetty ja olisi sopinut paremmin vertailuun, mutta CIELAB-arvoja datalle ei ollut saatavilla. Tulokset käytetyllä datalla ovat kuitenkin tarpeeksi suuntaa-antavia.  $\Delta E_{00}$  värieromittari ei täysin sovellu käytettäväksi tässä väriavaruudessa, koska se on viritetty nimenomaan CIELAB:lle, mutta sitä käytettiin vertailumielessä. Parempia tuloksia saataisiin, jos värimittari viritettäisiin uudelle väriavaruudelle.  $\Delta E_{94}$  näyttäisi toimivan hieman paremmin uudessa väriavaruudessa.

Ebner-Fairchildin tasaiset värisävyt näyttäisivät levittäytyvän laajemmin ja sävylinjat ojentautuvat hieman suuremmiksi siniseltä sävyalueelta, mikä on positiivinen muutos. Vertailu toiseen väridataan, kuten OSA-UCS sävyihin olisi ollut hyvä, mutta väridataa ei ollut saatavilla spektreinä ja MRA-menetelmää sovellettaessa osa spektri-arvoista sisälsi imaginäärilukuja, joten niitä ei voitu hyväksyä.

Munsellin mattasävyt jakaantuvat melko samantapaisesti CIELAB:iin verrattuna. Kuten Ebner-Fairchildin tasasävyissä, sininen alue on levittäytynyt laajemmalle.

## LÄHTEET

- [1] David L. MacAdam. Visual sensitivities to color differences in daylight. *J. Opt. Soc. Am.*, 32(5):247–273, May 1942.
- [2] M. Ronnier Luo. Development of colour-difference formulae. *Review of Progress in Coloration and Related Topics*, 32(1):28–39, 2002.
- [3] Mark D. Fairchild. *Color Appearance Models*. Addison-Wesley, Reading, MA, 1998.
- [4] F. J. J. Clarke, R. McDonald ja B. Rigg. Modification to the jpc79 colour-difference formula. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 100(4):128–132, 1984.
- [5] M. R. Luo ja B. Rigg. BFD (l:c) colour-difference formula Part 1 - Development of the formula. *Journal of the Society of Dyers and Colourists*, 103(2):86–94, 1987.
- [6] Lili Wang, Min Huang, Haoxue Liu ja Zhen Liu. Evaluation of color-difference formulae based on small color difference data by printed sample. In *Image and Signal Processing, 2009. CISP '09. 2nd International Congress on*, pages 1–4, Oct 2009.
- [7] Hongyong Jin, Xiuping Zhao ja Hongfang Liu. Testing of the uniformity of color appearance space. In *Computer Science and Information Engineering, 2009 WRI World Congress on*, volume 6, pages 307–311, March 2009.
- [8] Elísabet Chorro, Francisco Miguel, Martínez-Verdú, Dolores de Fez, Pascual Capilla ja Maria José Luque. Analyzing the metrics of the perceptual space in a new multistage physiological colour vision model. *Color Research & Application*, 34(5):359–366, 2009.
- [9] Manuel Melgosa, Juan Martínez-García, Luis Gómez-Robledo, Esther Perales, Francisco M, Martínez-Verdú ja Thomas Dauser. Measuring color differences in automotive samples with lightness flop: A test of the audi2000 color-difference formula. *Opt. Express*, 22(3):3458–3467, Feb 2014.
- [10] Glaukooma.com. Viitattu 3.5.2014 Pfizer. Kuva: Silmän anatomia. URL: <http://www.glaukooma.com/img/SilmanAnatomia.gif>, 2010.
- [11] ISO/CIE. ISO/CIE 11664-6:2014 Standard, CIEDE2000 Colour-Difference Formula. Technical report, CIE, 2014.

- [12] M. Ronnier Luo, G. Cui ja B. Rigg. The development of the CIE 2000 colour-difference formula: CIEDE2000. *Color Research & Application*, 26(5):340–350, 2001.
- [13] Rolf G. Kuehni. Color difference formulas: An unsatisfactory state of affairs. *Color Research & Application*, 33(4):324–326, August 2008.
- [14] Arto Kaarna. Modifying the LAB Color Space in search for uniformity. *Proceedings of the VII International Conference "International Cooperation in Engineering Education", DIST*, pages 5–12, July 2012.
- [15] T. Hyypiä. Kromaattisuuserojen laskentamalli. Diplomityö, Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2005.
- [16] M. Pahjehfouladgaran ja A. Kaarna. Spectral matching functions and ellipse mappings in search for more uniform chromaticity and color spaces. In Jacques Blanc-Talon, Don Bone, Wilfried Philips, Dan Popescu, and Paul Scheunders, editors, *Advanced Concepts for Intelligent Vision Systems*, volume 6474 of *Lecture Notes in Computer Science*, pages 80–92. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [17] Joni Orava, Timo Jääskeläinen, Jussi Parkkinen. Color differences in a spectral space. *IS&T 2003 PICS Conference*, pages 205–209, 2003.
- [18] J. Taipale ja A. Kaarna. Color Differences in Spectral Space: Clustering for MRA with CIEDE2000 Compatibility. *The Fifth International Workshop on Image Media Quality and its Applications, IMQA2011*, pages 94–103, Oct 2011.
- [19] Yurii P. Leonov ja Evgenii N. Sokolov. The representation of colors in spherical space. *Color Research & Application*, 33(2):113–124, April 2008.
- [20] Graham D. Finlayson ja S. Süsstrunk. Spherical sampling and color transformations. In *Proc. IS&T/SID 9th Color Imaging Conference*, pages 321–325, 2001.
- [21] Graham D. Finlayson ja S. Süsstrunk. Optimization for hue constant rgb sensors. In *Proc. IS&T/SID 10th Color Imaging Conference*, 2002.
- [22] J. Marguier ja S. Süsstrunk. Color matching functions for a perceptually uniform RGB space. *Proceedings of ISCC/CIE Expert Symposium*, pages 1–6, 2006.
- [23] Roy S. Berns. *Billmeyer and Saltzman's Principles of Color Technology*. John Wiley and Sons, New York, New York, United States, 3rd edition edition, 2000.
- [24] Robert M. Boynton. History and current status of a physiologically based system of photometry and colorimetry. *J. Opt. Soc. Am. A*, 13(8):1609–1621, Aug 1996.

- [25] G. Wyszecki ja W. S. Stiles. *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulas, 2nd ed.* John Wiley, New York, 1982.
- [26] Hugh S. Fairman, Michael H. Brill ja Henry Hemmendinger. How the CIE 1931 color-matching functions were derived from Wright-Guild data. *Color Research & Application*, 22(1):11–23, 1997.
- [27] Wikipedia. Viitattu 6.11.2014. Kuva: Cie 1931 xy-kromaattisuusdiagrammi. URL: <http://commons.wikimedia.org/wiki/File:CIExy1931.svg>, 2007.
- [28] *Munsell Book of Color - Matte Finish Collection*. Baltimore, Md, 1976.
- [29] M. Ronnier Luo ja B. Rigg. Chromaticity-discrimination ellipses for surface colours. *Color Research & Application*, 11(1):25–42, 1986.
- [30] Wikipedia. Viitattu 3.5.2014. Kuva: MacAdam ellipsit CIE x,y -kromaattisuusdiagrammissa. URL: [http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f4/CIExy1931\\_MacAdam.png](http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/f/f4/CIExy1931_MacAdam.png), 2005.
- [31] Itä-Suomen yliopisto. Viitattu 3.5.2014. Spectral color research, spectral database. URL <http://www.uef.fi/fi/spectral/spectral-database>, 2013.
- [32] Pedro A. García, Rafael Huertas, Manuel Melgosa ja Guihua Cui. Measurement of the relationship between perceived and computed color differences. *J. Opt. Soc. Am. A*, 24(7):1823–1829, Jul 2007.
- [33] Ming Ronnier Luo, Manuel Melgosa, David H. Alman, Martina Grosman, Luis Gómez-Robledo, Alain Trémeau, Guihua Cui, Pedro A. García, Daniel Vázquez ja Changjun Li. Practical demonstration of the ciede2000 corrections to cielab using a small set of sample pairs. *Color Research & Application*, 2012.
- [34] Fritz Ebner ja Mark D. Fairchild. Finding constant hue surfaces in color space. *Proceedings of SPIE*, 3300:107–117, 1998.
- [35] K. Witt. Geometric relations between scales of small colour differences. *Color Research & Application*, 24(2):78–92, 1999.



## Liite 1. CIE ellipsit

Taulukko A1.1. CIE ja BFD-RIT ellipsit. Nimi, *Lab*-arvot, isoakseli, akselisuhde ja kulma

Nimi	$L^*$	$a^*$	$b^*$	$A$	$A/B$	$\angle\theta$
1. W1(GREY)	62.634	0.159	0.093	0.812	1.470	112.640
2. W2(RED)	44.731	37.284	23.322	1.359	1.077	175.740
3. W3(YELLOW)	86.766	-6.944	46.038	3.176	2.377	90.970
4. W4(GREEN-1)	56.387	-31.230	0.630	2.486	2.280	173.560
5. W5(BLUE)	35.361	5.319	-30.989	2.614	3.936	137.580
6. Grey/Purple	46.389	12.146	-13.0620	1.5882	1.526	116.300
7. RCK 21	63.086	27.717	33.937	3.868	3.654	44.090
8. KPC 22	35.083	-44.122	3.813	4.722	3.888	168.790
9. KPC 25	22.160	18.270	-34.547	4.013	4.680	132.710
10. KPC 26	36.461	47.849	18.402	4.762	2.939	38.370

## Liite 2. Visuaaliset värierot

**Taulukko A2.1.** Laskennalliset värierot. Vertailtavien värien  $L_{ab}$ -arvot ja värierot kahdella eri mittarilla.

$L_{ref}^*$	$a_{ref}^*$	$b_{ref}^*$	$L_{batch}^*$	$a_{batch}^*$	$b_{batch}^*$	$\Delta E_{ab}^*$	$\Delta E_{00}^*$
51.11	0.09	0.96	48.17	0.12	0.77	2.95	2.94
81.92	-0.16	0.83	77.69	0.06	0.80	4.24	2.95
35.95	0.18	0.96	32.38	0.17	0.94	3.57	2.91
37.46	32.88	20.52	37.65	40.18	25.24	8.70	2.97
48.88	6.55	-18.88	49.23	3.81	-19.66	2.87	3.20
50.38	-9.24	-16.39	50.81	-6.31	-18.40	3.58	2.99
30.44	0.08	-32.57	30.69	5.86	-36.02	6.74	3.16
29.86	4.15	-33.70	30.10	1.33	-35.96	3.62	3.03
49.27	-1.59	2.17	49.44	-1.49	5.63	3.47	2.98
49.89	-1.22	-2.27	49.90	-3.57	-2.39	2.35	3.03

**Taulukko A2.2.** Visuaaliset värierot koe-erässä I ja II. Testihenkilöiden määrä N, värierohavainnon keskiarvo AVG, keskihajonta SD ja virhe SE. Alimmalla rivillä kokonaiskeskiarvo Mean.

Koe I				Koe II			
N	AVG	SD	SE	N	AVG	SD	SE
27	4.96	1.63	0.31	21	3.24	1.12	0.24
28	5.09	2.16	0.41	21	3.51	2.32	0.51
28	4.97	2.37	0.45	18	3.22	1.21	0.29
28	3.45	1.57	0.30	20	2.65	0.95	0.21
28	3.39	1.72	0.33	20	2.06	0.96	0.21
26	1.78	1.21	0.24	19	1.47	0.58	0.13
28	2.60	1.48	0.28	19	2.23	0.98	0.22
27	3.06	1.39	0.27	21	3.03	1.31	0.29
27	2.67	1.26	0.24	21	2.42	1.08	0.24
27	2.71	1.29	0.25	19	1.89	0.80	0.18
Mean							
27.4	3.47	1.61	0.31	19.9	2.57	1.13	0.25