

TEKNILLINEN KORKEAKOULU
Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto
Diplomityö

Janne Jaakkola

Mittausepävarmuuden määrittäminen mobiilinäyttöjen mittausprosessissa

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi diplomi-insinöörin tutkintoa varten.

Espoossa 9.10.2007

Työn valvoja

Prof. Pirkko Oittinen

Työn ohjaaja

DI Mikko Miettinen

Tekijä, työn nimi Janne Jaakkola Mittausepävarmuuden määrittäminen mobiilinäyttöjen mittausprosessissa	
Päivämäärä: 9.10.2007	Sivumäärä: 80
Osasto Sähkö- ja Tietoliikennetekniikan osasto	Professuuri AS-75 Viestintätekniikka
Työn valvoja Prof. Pirkko Oittinen	Työn ohjaaja DI Mikko Miettinen
<p>Näyttömittauksia tehdään näytön elinkaaren jokaisessa vaiheessa ja mittauksille asetettavat vaatimukset vaihtelevat suuresti mittaustarkoituksen mukaan. Vaihtelevien vaatimusten ansiosta näyttöjen mittaamiseen käytettävien laitteiden kirjo on laaja ja tulokset huonosti vertailtavissa. Jotta tuloksista saataisiin vertailukelpoisia, on mittaustuloksiin liitettävä tieto mittausepävarmuudesta. Tämän työn päällimmäisenä tavoitteena oli määrittää mittausepävarmuus Elektrobitin näyttöjenmittausprosessissa.</p> <p>Työ koostuu teoria- ja kokeellisesta osiosta. Teoriaosiossa on esitelty näyttömittauksiin liittyvät perustiedot kuten valon aaltoluonne, valon mittaaminen, näyttötekniikat, mittalaitteet ja mittausmenetelmät. Lisäksi työssä on käyty läpi epävarmuusanalyysin teoriaa ja vertailtu tähän tarkoitukseen kehitettyjä menetelmiä. Työn kokeelliseen osioon menetelmistä on valittu VESA:n FPDMv2 näyttömittastandardi sekä ISO:n Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement epävarmuuden määrittämiseen.</p> <p>Kokeellisessa osiossa tutkittiin Elektrobitin näyttölaboratorion mittausprosessissa ilmenevää epävarmuutta sekä luminanssi- että värikoordinaattimittauksissa. Luminanssimittausten epävarmuutta tutkittiin myös eri kirkkautasoilla. Tällä pyrittiin selvittämään laitteiston soveltuvuutta myös tummien kohteiden mittaamiseen. Epävarmuuden lisäksi työssä selvitettiin laboratorion mittalaitteen toistettavuus sekä pidemmän aikavälin vakaus yhden kuukauden aikana. Tieto laitteen toistettavuudesta on tärkeä, sillä VESA asettaa mittalaitteen toistettavuudelle minimiehdot jotka mittalaitteen tulee täyttää, jotta mittaukset olisivat standardin mukaisia.</p> <p>Epävarmuusanalyysi toteutettiin ISO:n oppaan esittelemien menetelmien mukaisesti eristämällä prosessista virhelähteet mahdollisuuksien mukaan ja selvittämällä niille yksilölliset epävarmuudet. Epävarmuudet selvitettiin virhelähteestä riippuen joko tyyppin A tai tyyppin B tarkastelulla ja yhdistettiin lopuksi yhdistetyksi epävarmuudeksi, joka laajennettiin kertoimella kaksi. Lisäksi tummien kohteiden luminanssin epävarmuuden avulla selvitettiin kontrastimittauksille oma mittausepävarmuus.</p> <p>Tuloksena tutkimuksesta saatiin epävarmuuksiksi luminanssille 2,81 %, värikoordinaateille u', v' $0,0003 + u_{cal,u'}$ ja $0,0007 + u_{cal,v'}$, jossa u_{cal} on kalibroinnista johtuva, kohteen aallonpituudesta riippuvainen epävarmuustekijä. Kontrastimittauksien epävarmuuksiksi tutkituilla testinäytöillä saatiin 3,54 % ja 14,3%. Lisäksi mittausprosessin pitkän aikavälin käyttäytymisen havaittiin vastaavan toistettavuusehdon asettamia raja-arvoja eikä prosessissa siltä osin ollen havaittu puutteita. Myös saatu toistettavuus 0,05 % täyttää VESA:n standardin asettamat ehdot.</p> <p>Avainsanat: mobiilinäytöt, näyttötekniikka, näyttömittaus, toistettavuus, epävarmuus, kolorimetria</p>	

Author, Title of the thesis Janne Jaakkola Determination of measurement uncertainty in mobile display measurement process	
Date: 9.10.2007	Pages: 80
Department Department of Electrical and Communications Engineering	Professorship AS-75 Media Technology
Supervisor Prof. Pirkko Oittinen	Instructor M.Sc. Mikko Miettinen
<p>Display measurements are made throughout the entire lifecycle of a display and the requirements set for the process vary greatly depending on the purpose. Because of the varying demands, also the portfolio of measurement equipment is huge and the results aren't comparable. To improve the comparability, one has to attach the information regarding the uncertainty of the measurement to the measurement data. The primary goal of this study was to determine the uncertainty in Elektrobitt's display laboratory's measurement process.</p> <p>This thesis comprises of a theoretical and a practical part. In the theoretical part, the most important topics include light, measurement of light, display technology, measurement equipment and measurement procedures. Also the basic theory and most essential methods for uncertainty analysis have been covered. Based on the study conducted in theoretical part the VESA FPDmV2 measurement standard and ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement-guide were chosen as the central guidelines for this thesis.</p> <p>In the practical portion of the thesis the uncertainty in Elektrobitt's measurement process for luminance and color coordinate measurements was determined. The uncertainty of luminance measurements was also determined for low luminance levels. This was made to clarify the difference in uncertainties resulting from differing brightness levels. The information was used to find out the feasibility of low level measurements with the current equipment. In addition to the uncertainty, the study covered the repeatability of the equipment and the stability of the process over a period of one month. Repeatability is one of the requirements set by VESA in its standard for measurement equipment.</p> <p>Uncertainty analysis was carried through by the methods presented in ISO guide. This was done by isolating each error source and determining their unique uncertainties. The uncertainties were covered by using either a Type A or Type B evaluation. The resulting uncertainties were then combined to a total uncertainty, which was expanded with a factor of two. The uncertainties for the low level luminances were used to determine a total uncertainty for contrast measurements.</p> <p>As a result, the uncertainty of luminance was 2,81 % and the uncertainties of color coordinates u' and v' were $0,0003 + u_{cal,u'}$ ja $0,0007 + u_{cal,v'}$, where u_{cal} stands for a wavelength dependant calibration uncertainty. The uncertainties for contrast measurements were found to be 3,54% and 14,3% with the tested displays A and B. Repeatability of the equipment was 0,05 % and also the long term stability was found to follow the repeatability requirements of VESA standard.</p> <p>Keywords: mobile displays, display technology, display measurement, repeatability, uncertainty, colorimetry</p>	

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Elektrobitin näyttölaboratorioon ja tästä mahdollisuudesta saan kiittää Mikko Miettistä ja Jani Lainetta. Kiitokset teille että annoitte tilaisuuden päästä käyttämään vuosien saatossa kerrytettyjä oppeja mielenkiintoisen aiheen parissa. Lisäkiitos Mikolle kuuluu myös työni ohjaamisesta ja mittauksissa tarvittujen välineiden järjestämisestä. Kiitoksia myös ohjaajalleni Professori Pirkko Oittiselle rakentavasta kritiikistä sekä opeista, joita olet vuosien varrella jakanut.

Yhtälailla haluaisin antaa ison kiitoksen veljilleni, kavereilleni ja Reetalle siitä, etteivät ajatukseni missään vaiheessa jumiutuneet täysin työntekoon, vaan virkistystoimintaa piisasi aina tarpeen tullen. Tasapaino työn ja vapaa-ajan välillä on ollut teidän avullanne helppo löytää.

Viimeisenä, muttei suinkaan vähäisimpänä haluaisin kiittää vanhempiani mahdollisuudesta kasvaa, harrastaa, käydä koulua ja näköjään jopa valmistua niin hyvissä puitteissa kuin vain toivoa saattaa. Kotoa saatu opastus ja kannustus ovat olleet korvaamattomia tekijöitä tielläni omaan elämään.

Kiitos!

Espoossa 9.10.2007

Janne Jaakkola

1	JOHDANTO.....	1
2	TAUSTAT JA TAVOITTEET.....	2
	2.1 Tausta.....	2
	2.2 Tutkimuksen tavoitteet	2
3	VALO.....	4
	3.1 Valon ominaisuudet	4
	3.2 Valon havaitseminen.....	5
	3.3 Värit	7
4	VALON MITTAAMINEN	13
	4.1 Mittasuureet	13
	4.2 Mittalaitteet.....	18
	4.2.1 Luminanssimittari.....	18
	4.2.2 Kolorimetri	19
	4.2.3 Spektroradiometri.....	20
	4.2.4 Kvanttavat menetelmät.....	22
	4.3 Mittalaitteiden virhelähteet.....	24
	4.3.1 Optiikka.....	24
	4.3.2 Sensori	26
	4.3.3 A/D-muunnin.....	28
5	MITTAUSPROSESSIN ARVIOINTI	29
	5.1 Käsitteet	29
	5.1.1 Virhe.....	29
	5.1.2 Toistettavuus vs Uusittavuus.....	30
	5.1.3 Epävarmuus	30
	5.2 Epävarmuusanalyysi	31
	5.2.1 Tyypin A tarkastelu	32
	5.2.2 Tyypin B tarkastelu	33
	5.2.3 Yhdistetty standardiepävarmuus	33
	5.2.4 Laajennettu epävarmuus.....	34
	5.3 Muita menetelmiä	35
	5.3.1 VESA FPDm2	35
	5.3.2 ISO 5725-2	36
	5.3.3 NIST/SEMATECH Engineering Statistics Handbook	37
	5.3.4 Analysis of Variance, ANOVA	38
	5.4 Virhelähteet.....	39
	5.5 Aiempia tutkimuksia.....	40
6	NÄYTTÖTEKNIikka	43
	6.1 Käyttötarkoitus.....	43
	6.2 Nestekidenäyttö, LCD	43
	6.2.1 Nestekide	43
	6.2.2 LCD-näytön rakenne	44
	6.3 OLED.....	48
7	MITTAUKSET	50

7.1	Menetelmät ja standardit.....	50
7.2	Olosuhteet	51
7.3	Laitteisto	52
7.4	Testinäytöt	53
7.5	Mittausasetelma	54
8	TULOKSET	56
8.1	Toistettavuus	56
8.2	Pitkän aikavälin vakaus	57
8.3	Epävarmuus	61
	8.3.1 Mittaajan aiheuttama virhe	61
	8.3.2 Mittausetäisyys	63
	8.3.3 Integrointiaika	64
	8.3.4 Kirkkausalueen vaikutus	66
	8.3.5 Linssihäikäisy	67
	8.3.6 Kalibrointi	69
8.4	Yhdistetty epävarmuus	71
8.5	Luotettavuusanalyysi	73
9	JOHTOPÄÄTÖKSET	74
	LÄHDELUETTELO	76
	LIITTEET	80

SYMBOLI- JA TERMI LUETTELO

λ	aallonpituus [nm]
θ	aperaatiokulma
μ	aritmeettinen keskiarvo
ω	avaruuskulma
x, y	CIE 1931-värikoordinaatit
u, v	CIE1960-värikoordinaatit
u', v'	CIE 1976-värikoordinaatit
L^*	CIELab-väriavaruuden luminanssikomponentti
a^*	CIELab-väriavaruuden vastavärikomponentti puna-vihreä
b^*	CIELab-väriavaruuden vastavärikomponentti kelta-sininen
d	mittausetäisyys
G	gamut
D	halkaisija
\bar{q}	keskiarvo
σ_L	keskihajonta
s	kokeellinen keskihajonta
s^2	kokeellinen varianssi
U	laajennettu epävarmuus
L	luminanssi [cd/m^2]
A	pinta-ala
X_n, Y_n, Z_n	referenssivalkeisen tristimulusarvot
$V(\lambda)$	silmän herkkyysfunktio
φ_λ	säteilyspektrin aallonpituusjakauma
Φ_λ	säteilyn intensiteetti aallonpituudella λ
$x(\lambda), y(\lambda), z(\lambda)$	tristimulusfunktiot
X, Y, Z	tristimuluskomponentit
k	vakiokerroin 683 lm/W
Φ	valovirta [lm]
u_c	yhdistetty epävarmuustekijä

LYHENTEET

AM	Active Matrix
ANOVA	Analysis of Variance
ANSI	American National Standards Institute
ASTM	American Society for Testing and Materials
CCD	Charge-Coupled Device
CCT	Correlated Colour Temperature
CIE	International Commission on Illumination
CR	Contrast Ratio
DUT	Display Under Test
FPDM	Flat Panel Display Measurements
GUM	ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement
ISO	International Organization for Standardization
IR	Infrared
JND	Just Noticeable Difference
LCD	Liquid Crystal Display
LED	Light-Emitting Diode
NIST	National Institute of Standards and Technology
NPL	National Physical Laboratory
NTSC	National Television Standards Committee
OLED	Organic Light-Emitting Diode
PM	Passive Matrix
QE	Quantum Efficiency
RGB	Red-Green-Blue
RSS	Root-Sum-Square
SBM	Suite of Basic Measurements
SNR	Signal-to-Noise Ratio
SPWG	Standard Panels Working Group
SRF	Spectral Responsivity Function

TCO	Tjänstemännens Centralorganisation
TFT	Thin-film Transistor
UV	Ultraviolet
VESA	Video Electronics Standard Association

1 JOHDANTO

Näyttötekniikan kehittyessä näyttöjen kustannukset ovat laskeneet ja suorituskyky parantunut. Kehityksen seurauksena näyttöjen käyttö on yleistynyt erilaisissa kannettavissa laitteissa ja valmistajat ovat alkaneet vaatia yhä laadukkaampia näyttöjä toteuttaakseen visioitaan kannettavalle medialle. Kannettavat multimedialaitteet toistavat nykyään musiikin lisäksi myös videoita ja kuvia. Videot ja värikuvat hyötyvät suuresta resoluutiosta ja täyteläisistä väreistä aiempia sovelluksia enemmän. Samoin vaatimukset vasteajan ja katselukulmien osalta kasvavat.

Kysyntä ja tarjonta ajavat toisiaan eteenpäin ja näyttöjen kehitys on jatkuvaa. Kehitystyön yksi tärkeä osa-alue on näyttöjen mittaaminen. Ilman mittauksia ei saada tietoa näytön suorituskyvystä eikä täten voida tietää täyttääkö näyttö sille asetetut vaatimukset, miten sen suorituskyky vertautuu kilpaileviin tuotteisiin ja ovatko kehitystavoitteet täyttyneet. Mittaustyötä on siis tehtävä läpi tuotteen elinkaaren aina tuotekehityksestä laadunvalvontaan.

Jotta mittausten tuloksista olisi hyötyä, on mittausprosessi tunnettava hyvin. Ilman tietoa mittausten epävarmuudesta ja virhelähteistä, mittaustulokset eivät ole vertailukelpoisia eivätkä luotettavia. Tämän työn tarkoituksena on tutkia Elektrobittin näyttölaboratoriossa käytettyä näyttöjenmittausprosessia ja selvittää prosessin mittausepävarmuus. Tutkimus on rajattu näyttöjen optisen suorituskyvyn mittausprosessiin ja näin ollen kaikki sähköiset ja mekaaniset mitaukset on jätetty alueen ulkopuolelle. Optisen suorituskyvyn mittareiksi työhön on valittu tumman ja vaalean ruudun luminanssit sekä värikoordinaatit. Näiden suureiden avulla voidaan ilmoittaa valtaosa näytön optiselle suorituskyvylle oleellisista ominaisuuksista. Esimerkkinä työssä esitellään kontrastisuhteen epävarmuuden laskeminen luminanssi-mittausten epävarmuustuloksia hyödyntämällä.

Työ jakautuu teoria- ja kokeelliseen osioon. Teoriaosiossa on aluksi käyty läpi valo-opin perusteita kuten valon aaltoluonne, valon havaitseminen ja valon mittaaminen. Mittauksia käsittelevässä luvussa esitellään mittausten menetelmät, mitattavat suureet sekä tehdään yleiskatsaus markkinoilta löytyviin näyttömittalaitteisiin. Lisäksi teoriaosiossa käsitellään mittauksiin liittyvät epävarmuudet. Teoriaosio antaa tarvittavan pohjatiedon tutkimuksessa tehtävän epävarmuusanalyysin ymmärtämiseen ja siitä saatavien tulosten tulkitsemiseen.

Tutkimuksen kokeellisessa osiossa selvitetään käytetyn mittausten toistettavuus sekä epävarmuus käytännön mittausten avulla. Toistettavuudella tarkoitetaan mittalaitteiston kykyä toistaa sama mittaus ja tulos uudestaan ja uudestaan lyhyellä aikavälillä. Toistettavuutta tutkitaan toistamalla samat mitaukset 10 kertaa ja laskemalla tuloksista toistettavuuden tunnusluvut eli keskihajonta ja suhteellinen keskihajonta. Epävarmuutta tutkitaan yksilöimällä useita virhelähteitä ja tutkimalla niiden vaikutuksia mittaustuloksiin. Kaikkien virhelähteiden aiheuttamat epävarmuudet yhdistään lopuksi yhdistetyksi epävarmuudeksi, joka kertoo mittausten kyvykkyydestä.

Epävarmuusanalyysin lisäksi tutkimuksessa tarkkaillaan pitkän aikavälin käyttäytymistä kuu-kauden ajan päivittäisillä kontrollimittauksilla. Tulokset selvittävät mittausmenetelmän va-kautta pidemmällä aikavälillä. Olosuhteiden säilymistä tarkkaillaan lämpö- ja kosteusmittarilla ja muiden olosuhteiden vaikutusta on pyritty minimoimaan rutiininomaisilla toimintamalleilla, jotta mittaustilanteet pysyisivät mahdollisimman muuttumattomina läpi tutkimuksen.

2 TAUSTAT JA TAVOITTEET

2.1 Tausta

Näyttöjen mittaustuloksien suurin hyöty saadaan vertailemalla mittauksista saatuja tuloksia referenssinä käytettyjen näyttöjen jo tiedossa oleviin suorituskykyarvoihin. Jos muiden näyttö-
jen arvot on saatu jonkin muun tahon mittaamana, on näiden arvojen vertailu ilman luotetta-
vuusanalyysia turhaa. Tuloksien väliset erot saattavat johtua yhtä hyvin mittauspaikasta tai
mittauksen suorittajasta kuin itse näyttöjen välisistä suorituskykyeroista. Jotta mittaustuloksis-
ta saataisiin mahdollisimman suuri hyöty, on mittausprosessin kyvykkyys tunnettava. Näyttö-
jen mittaustulokset ovat hyödyttömiä ilman tietoa mittausprosessin luotettavuudesta sillä pel-
kät numerot vailla virhearviota ovat harhaanjohtavia ja virheellisiä.

Tässä työssä tutkitaan Elektrobittin näyttömittausprosessia ja siinä olevia virhelähteitä. Tehtävä
karakterisointi parantaa laboratorion mittaustuloksien luotettavuutta sekä käytettävyyttä. Tu-
loksiin liitetty epävarmuusinformaatio mahdollistaa myös arvioinnin mittausprosessin sovel-
tuvuudesta eri tarkoituksiin. Mittauksia suoritetaan tuotannon eri vaiheissa ja vaatimukset mit-
tausten tarkkuudelle vaihtelevat suuresti riippuen siitä, mikä tuloksien lopullinen käyttötarkoi-
tus on.

2.2 Tutkimuksen tavoitteet

Tutkimuksen ensisijainen tavoite on tuottaa mittauksille lisäarvoa liittämällä niihin tieto epä-
varmuudesta. Epävarmuutta tutkitaan työssä eristämällä oleellisimpia virhelähteitä muista vir-
helähteistä ja näin määrittämällä kullekin virhelähteelle sen vaikutusta kuvaava epävarmuus-
tekijä. Yksilöityjen epävarmuustekijöiden avulla mittausprosessia on jatkossa myös helpompi
kehittää, koska tiedetään mitkä virhelähteet kasvattavat epävarmuutta suhteessa eniten.

Varsinaisten virhelähteiden lisäksi työn tarkoituksena on selvittää myös eri näyttötekniikoiden
vaikutusta mittausepävarmuuteen. Eri tekniikoilla toteutetut näytöt tuottavat valon ja värit toi-
sistaan poikkeavilla menetelmillä. Näköhavainnossa samalta näyttävät värit voivat tällöin
koostua täysin erilaisista valon aallonpituuskomponenteista. Näyttötekniikan vaikutusta epä-
varmuuteen pyritään selvittämään kahden tekniikaltaan hyvin erilaisen näytön avulla. Kokeen

tarkoituksena on selvittää mittausprosessiin liitetyn epävarmuuslukeman soveltuvuus kun mittavana näytönä käytetään eri tekniikoihin pohjautuvia näytöjä.

Kolmas tavoite on luoda riittävä ohjeistus mittaajille, jotta kuka tahansa voi suorittaa halutut mittaukset saaden vertailukelpoisia tuloksia. Usean mittaajan mittaustulosten pohjalta voidaan tarkastella ohjeistuksen riittävyttä ja siinä ilmeneviä puutteita.

Yllä esitettyjen lähtökohtien pohjalta työlle asetettiin seuraavat tutkimuskysymykset:

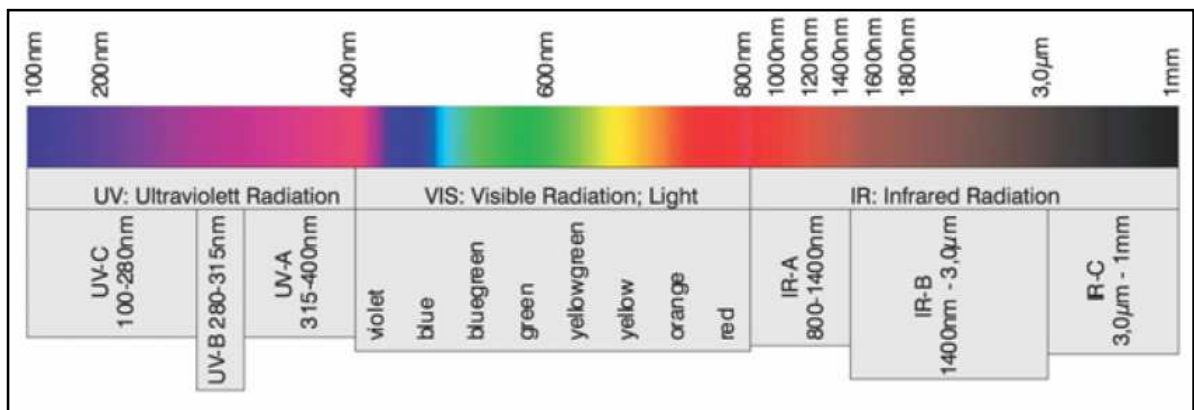
- Mikä on mittausprosessin epävarmuus?
- Säilyykö mittausten toistettavuus läpi intensiteettialueen?
- Onko mittausympäristö vakaa pidemmällä aikavälillä?
- Onko mittaajalla merkittävä vaikutus tuloksiin?
- Onko mittausmenetelmässä joitain kriittisiä heikkouksia?

3 VALO

3.1 Valon ominaisuudet

Valo on sähkömagneettista säteilyä. Sähkömagneettinen säteily kattaa kuitenkin laajan skaalan aallonpituuksia metrien mittaisista radioaalloista aina mikroskooppisiin kosmisiin säteisiin /28/. Optinen säteily, johon valokin kuuluu, rajoittuu määritelmän mukaan aallonpituuksille 100nm-1mm. Muusta sähkömagneettisesta säteilystä optisen säteilyn erottaa se, että se noudattaa geometrisen optiikan lakeja. /17/

Optinen säteily koostuu näkyvän valon lisäksi infrapuna- (IR) ja ultraviolettisäteilyistä (UV). Näkyvän valon muista optisen säteilyn alueista erottava tekijä on ihmisen näkökyky, sillä valoksi luetaan vain ne aallonpituudet jotka ihmissilmä kykenee havaitsemaan. Näkyvän valon tarkka aallonpituusalue vaihtelee lähteestä riippuen, mutta eräs paljon käytetty määritelmä ilmaisee valon kattavan sähkömagneettisen säteilyn aallonpituudet välillä 400-800nm. Optisen säteilyn aallonpituusalueet on esitelty tarkemmin kuvassa 1. /17/

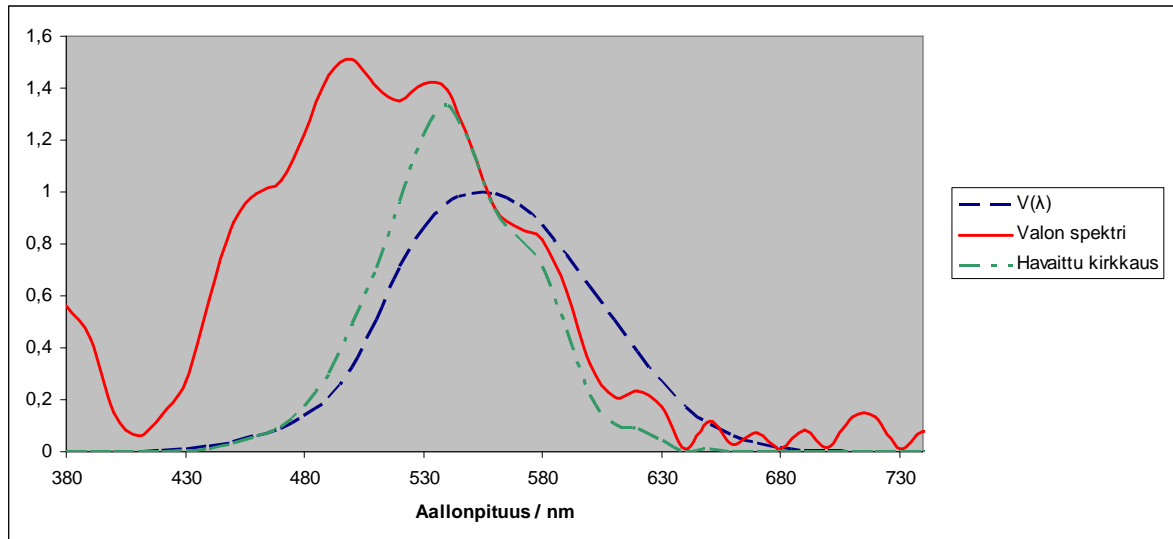


Kuva 1. Optisen säteilyn spektri /17/

Luonnossa esiintyvä valo sisältää aina useita aallonpituuksia. Kullakin aallonpituudella on intensiteettinsä ja niiden summana valolle muodostuu aallonpituusjakauma eli spektri. Optisen säteilyn mittausta perustuu spektrin mittaamiseen joko sellaisenaan tai jakaumasta integroituun skalaarisuureeseen. Tieteenalaa, joka keskittyy sähkömagneettisen säteilyn mittaamiseen, kutsutaan *radiometriaksi*. Radiometriassa ollaan kiinnostuneita puhtaasti säteilyenergiasta ottamatta kantaa siihen kuinka ihminen sen kokee eli säteilyä mitataan sellaisena kuin se on.

Ihmisen havaintokyky on aallonpituusriippuvainen eivätkä radiometriset mittaukset siten kerro kuinka ihminen valon havaitsee. Silmän toimintaa on pyritty mallintamaan aallonpituusriippuvaisilla herkkyysfunktioilla, jotka pohjautuvat 1920-luvulla koehenkilöillä tehtyihin kokeisiin. Herkkyysfunktioiden tarkoituksena on jäljitellä mahdollisimman tarkasti ihmissilmän siirto-

funktiota. Kun mitattavan valon aallonpituusjakaumaa painotetaan ihmissilmän herkkyyssfunktiolla, $V(\lambda)$, saadaan tuloksena ihmisen havaitsema kirkkaus. Esimerkki spektrin painottamisesta silmän herkkyyssfunktiolla on esitetty kuvassa 2. Tieteenalaa, joka tutkii ihmisen havaitsemaa optista säteilyä, kutsutaan *fotometriaksi*. /17/



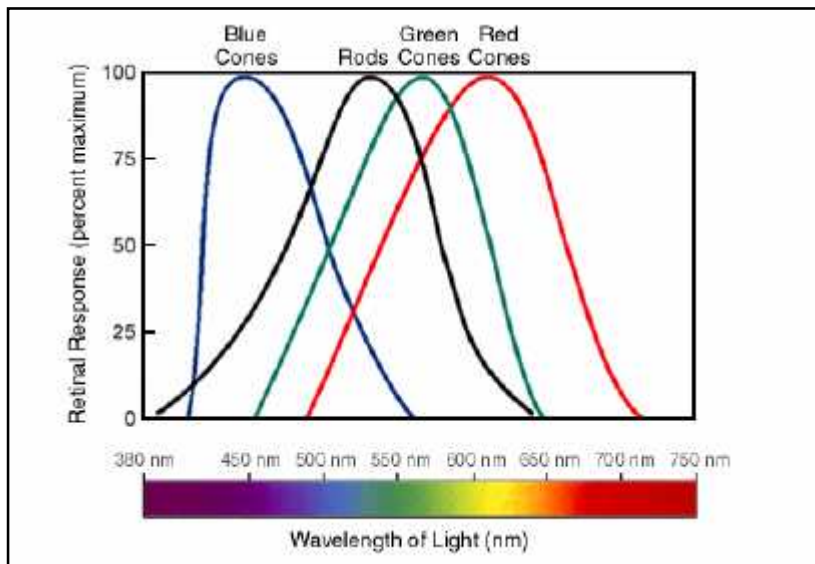
Kuva 2. Valon spektrin painottaminen silmän herkkyyssfunktiolla $V(\lambda)$

3.2 Valon havaitseminen

Ihmissilmä havaitsee valon silmän sisällä olevien aistinsolujen avulla. Solut ovat levittyneet silmän verkkokalvolle eli retinalle, joka peittää silmämunan sisäpintaa. Silmään saapuva valo ohjataan linssin avulla verkkokalvolle, jossa se toimii ärsykkeenä aistinsoluille. Ärsyke synnyttää soluissa sähköisen signaalin, joka on riippuvainen sekä valon aallonpituusjakaumasta että signaalin synnyttäneen solun tyypistä. Syntynyt signaali välittyy näköhermojen kautta aivoille, jossa signaali prosessoidaan ja prosessoinnin tuloksena aivot muodostavat varsinaisen näköhavainnon. /28/

Silmässä on kahden tyyppisiä aistinsoluja, tappi- ja sauvasoluja. Tappisolut vastaavat näkemisestä kirkkaassa valossa eli *fotooppisesta näöstä*, ja sauvasolut puolestaan hämäränäöstä eli *skotooppisesta näöstä*. Tappisoluja on silmässä 6-10 miljoonaa ja sauvasoluja noin 120 miljoonaa kappaletta. Solut ovat jakautuneet verkkokalvolle epätasaisesti. Tappisolut ovat keskittyneet silmän verkkokalvon keskustaani eli foveaan, joka vastaa ihmisen tarkasta näöstä. Tarkan näön alue on halkaisijaltaan alle millimetrin ja se kattaa noin 2° ihmisen näkökentästä /19/. Sauvasolut ovat puolestaan sijoittuneet pääasiassa fovean ympärille eikä niitä ole juuri lainkaan fovean keskellä. /42/ /28/ /50/

Tappisoluja on silmässä kolmenlaisia: lyhyen, keskipitkän ja pitkän aallonpituusalueen soluja ja ne ovat herkimmillään kukin omalla aallonpituudellaan eli 420nm, 535nm ja 565nm. Monimuotoisuutensa ansiosta tappisolut kykenevät välittämään aivoille tietoa myös havaitun valon aallonpituusjakaumasta. Tarkemmin aistinsolujen suhteelliset herkkyydet aallonpituuksien funktiona on esitetty kuvassa 3. /42/



Kuva 3. Silmän tappisolujen suhteelliset herkkyydet /17/

Sauvasoluja on silmässä vain yhdenlaisia ja ne ovat huomattavasti herkempiä kuin tappisolut. Ne aktivoituvat vasta alhaisilla valaistustasoilla ja herkkyytensä ansiosta sauvasolut toimivatkin parhaiten hämärässä. Koska sauvasoluja on vain yhdenlaisia, on ihmisen hämäränäkö monokromaattista eli yksiväristä ja värienhavaitseminen jää täysin tappisolujen varaan. Valtaosa sauvasoluista sijaitsee fovean ulkopuolella eli ääreisnäön alueella. Tämä käy hyvin ilmi hämärässä, jossa ihmisen on vaikea nähdä esineitä joihin katse on kohdistettu. /28/ /51/

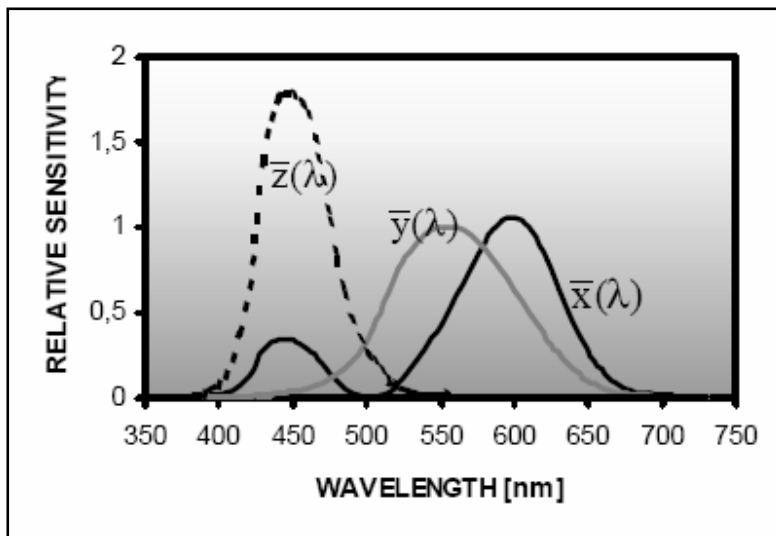
Näyttömittausten yhteydessä puhutaan yleensä vain fotooppisesta näöstä sillä transmissiiviset ja transflektiiviset näytöt tuottavat itse niin kirkkaan valon, että se voidaan jo havaita tappisolujen avulla. Skotooppinen näkö voi tulla kyseeseen ainoastaan ääriolosuhteissa passiivisilla näyttötekniikoilla, jotka eivät itse tuota valoa vaan käyttävät kuvan muodostukseen ympäristöstä saapuvaa valoa. Tässä tutkimuksessa kirkkautta on kuitenkin käsitelty puhtaasti fotooppisen näön kannalta, sillä valtaosa tämän hetkisistä mobiilinäytöistä on joko transmissiivisiä tai transflektiivisiä.

3.3 Värit

Värihavainto syntyy aivoissa, jossa kunkin tappisolutyypin tuottamat signaalit yhdistetään yhdeksi näköhavainnoksi. Näköhavainnon sisältämä väri-informaatio on vahvasti riippuvainen nähdyn valon aallonpituusjakaumasta. Esimerkiksi 680nm aallonpituuden omaava valo synnyttää signaalin vain pitkän aallonpituusalueen soluissa. Prosessoitu signaali koetaan punaisena värihavaintona ja tästä syystä pitkän alueen soluja kutsutaan usein ”punaisiksi tapeiksi”. Yhtä lailla lyhyen aallonpituusalueen soluja kutsutaan ”sinisiksi” ja keskipitkän alueen ”vihreiksi tapeiksi” /17/. Havaittu väri on tulosta erityyppisten tappisolujen tuottamien signaalien summasta ja keskinäisestä suhteesta. /31/

Ensimmäisen kerran osavärien summautuminen kävi ilmi W. David Wrightin ja John Guildin 1920-luvun lopulla tekemissä testeissä, joissa koehenkilöiden avulla tutkittiin värien muodostumista. Testeissä koehenkilölle näytettiin 2° levyistä kohdetta, joka jakautui kahteen värilliseen valaistuun alueeseen. Toinen alue edusti referenssiväriä ja toinen alue oli vapaasti käyttäjän säädeltävissä. Koehenkilöiden säätämä valo muodostettiin kolmen erivärisen valonlähteen yhdistelmänä. Säädettävät valot edustivat päävärejä, jotka oli muodostettu yksittäisistä aallonpituuksista seuraavasti: $\lambda_{\text{blue}} = 435,1\text{nm}$, $\lambda_{\text{green}} = 546,1\text{nm}$ ja $\lambda_{\text{red}} = 700\text{nm}$. Testin tuloksista havaittiin että valtaosa väreistä voitiin esittää näiden kolmen valonlähteen avulla. Niissä tapauksissa joissa tämä ei onnistunut, voitiin referenssiväriin lisätä yhtä osaväriä edustamaan negatiivista intensiteettiä ja näin saatiin esitettyä myös loput värit kolmen värin summana. /14/

Saadut tutkimustulokset johtivat useaan CIE:n vuonna 1931 julkaisemaan standardiin, joista valtaosa on vielä tänä päivänäkin käytössä. Keskeisimpiä näistä ovat muun muassa RGB sovituskäytännöt, standardivalonlähteet A, B ja C, tristimuluskomponentit X, Y ja Z sekä niiden sovituskäytännöt $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ ja $\bar{z}(\lambda)$ eli tristimulusfunktiot. Tristimulusfunktiot on esitetty kuvassa 4. /14/



Kuva 4. CIE1931-standardin tristimulusfunktiot /17/

Standardissa esitellyt tristimuluskomponentit tarjoavat menetelmän esittää väreit kolmen muuttujan avulla. Tristimuluskomponentit voidaan laskea havaitun valon spektristä painottamalla sitä CIE:n tristimulusfunktioilla kaavojen 1, 2 ja 3 mukaisesti:

$$X = k \int_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \times \bar{x}(\lambda) d\lambda \quad (1)$$

$$Y = k \int_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \times \bar{y}(\lambda) d\lambda \quad (2)$$

$$Z = k \int_{\lambda} \phi_{\lambda}(\lambda) \times \bar{z}(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

, joissa

X, Y ja Z ovat laskettavat tristimulusarvot,
k on vakio 683 lm/W,
 ϕ_{λ} on mitattavan säteilyn spektrijakauma ja
 $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ ja $\bar{z}(\lambda)$ ovat tristimulusfunktiot.

Tristimulusarvot vaihtelevat suuresti mitattavan valon intensiteetin mukaan ja arvoja on vaikea vertailla. Eräs paljon käytetty tapa tulkita värejä on normalisoida mitatut X, Y ja Z arvot, jolloin arvot ovat aina nollan ja yhden välillä ja niiden vertaileminen helpottuu. Normalisoinnin tuloksena saadaan x, y ja z arvot joiden summa on 1.

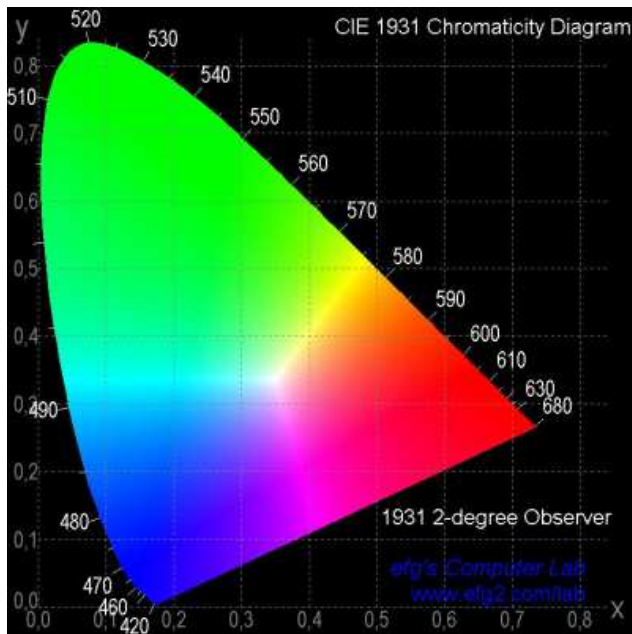
$$x = \frac{X}{X + Y + Z} \quad (4)$$

$$y = \frac{Y}{X + Y + Z} \quad (5)$$

$$z = \frac{Z}{X + Y + Z} \quad (6)$$

$$x + y + z = 1 \quad (7)$$

Kaava 7 sisältää kolme positiivista arvoa ja se voidaan muuntaa muotoon $z = 1 - x - y$. CIE:n esitystavassa tämä yhtälö on projisoitu xy-tasoon, jossa se rajaa kaksiulotteiseen koordinaatistoon kolmion, joka sisältää kaikki mahdolliset x:n ja y:n arvot /51/. Koordinaatisto on nimetty standardointiorganisaation ja -vuoden mukaisesti CIE 1931-värikoordinaatistoksi ja se on esitetty kuvassa 5. Koordinaatistoon on yleensä piirretty myös hevosenkengän muotoinen alue, joka kuvaa ihmisen näkemän alueen väriavaruudesta. Alueen keskeltä löytyy valkoinen väri ja värien saturaatio kasvaa kohti alueen reunoja.

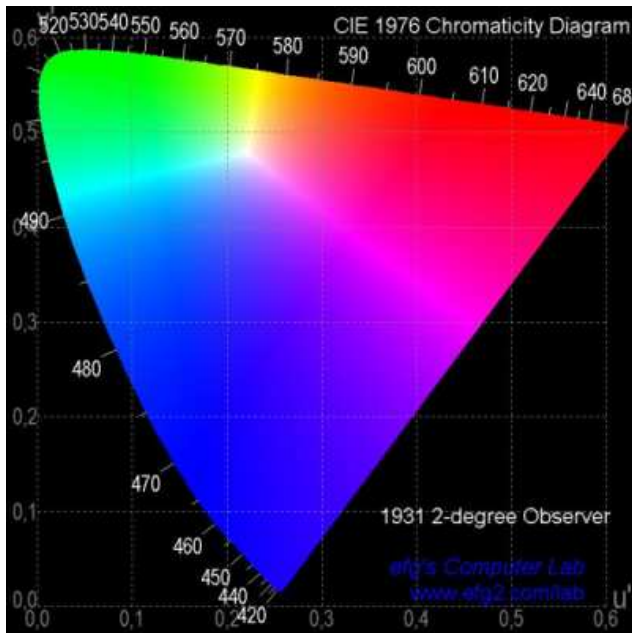


Kuva 5. CIE 1931-värikoordinaatisto /18/

CIE 1931 -koordinaatistossa pystytään esittämään minkä tahansa ihmisen näkemän värin kro-maattisuus kahdella koordinaatilla /51/. Koordinaatiston suurin vahvuus on värien yhdistelyssä, sillä kahden värin yhdistelmänä syntyvä väri sijaitsee CIE 1931:ssa aina näiden värien välisellä janalla. Lisäksi tulovärin etäisyys yhdistelmän tuottavista väreistä on suoraan laskettavissa niiden osuuksista yhdistelmässä. /28/

CIE 1931 ei kuitenkaan mallinna kovin hyvin ihmisen näköä ja sen epälineaarisuutta. Tämä koordinaatiston heikkous ilmenee parhaiten värien muutoksissa, sillä juuri ja juuri havaittava muutos, (JND, eng. *Just-Noticeable Difference*), vaatii hyvin erisuuruiset siirtymät koordinaatiston eri osissa. Kyseinen ongelma johti koordinaatiston kehitystyöhön jonka tuloksena julkaistiin CIE 1976 värikoordinaatisto. /28/

CIE 1976-värikoordinaatisto on pohjimmiltaan sama kuin CIE 1931-värikoordinaatisto, mutta sitä on kutistettu ja venytetty lineaarisin muunnoksien vastaamaan paremmin ihmisen silmän toimintaa. Tulos on samankaltainen koordinaatisto kuin CIE 1931, joka kuitenkin huomioi ihmisen silmän ominaisuudet paremmin ja siinä esiintyvät siirtymät vastaavatkin ihmisen havaitsemaa muutosta väriä. Muunnoksien seurauksena CIE 1976 ei kuitenkaan enää pysty esittämään väriyhdistelmien tulosta suoraviivaisesti CIE 1931:n tapaan. Eriävien ominaisuuksiensa ansiosta molemmat koordinaatistot ovat säilyneet ja ovat päivittäisessä käytössä vielä tänä päivänä. CIE 1976 on esitetty kuvassa 6. /28/



Kuva 6. CIE 1976-värikoordinaatisto /18/

CIE 1976 koordinaatisto on jaettu u' - ja v' -koordinaattiakseleihin. Nimet u' ja v' on valittu, jotta välttyttäisiin sekaannuksilta vanhemman CIE 1960-värikoordinaatiston kanssa, jonka koordinaattiakseleiden nimet ovat u ja v . Molemmat koordinaatistot edustavat tasajakoisia koordinaatistoja, joissa värierot vastaavat ihmisen havaitsemaa eroa väreissä mutta CIE 1960-koordinaatistoa käytetään tänä päivänä kuitenkin selvästi harvemmin.

CIE 1976:n koordinaatit, u' ja v' , saadaan laskettua suoraan mitatuista tristimulusarvoista, X , Y ja Z kaavoilla 8 ja 9.

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad (8)$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (9)$$

CIE 1960 värikoordinaatiston koordinaatit u ja v saadaan puolestaan laskettua suoraan u' - ja v' -koordinaateista kaavoilla 10 ja 11.

$$u = u' \quad (10)$$

$$v = \frac{2v'}{3} \quad (11)$$

Tämän työn käsittelemän näyttölaboratorion päällimmäisenä tarkoituksena on selvittää näyttöjen soveltuvuutta ihmiskatselijalle ja tästä syystä värien mittauksissa on käytetty nimenomaan u' - ja v' - koordinaatteja. Etenkin tutkittaessa väriavaruuksien laajuutta, muutokset avaruuksien kärjissä ovat havainnollisempia CIE 1976-koordinaatistossa jossa koordinaattien erot kertovat paremmin ihmisen havaitsemasta värierosta.

Yllä mainittujen CIE-väriavaruuksien merkittävänä puutteena on luminanssin huomiotta jättäminen. Eriteltyt värikoordinaatit johdetaan kolmesta tristimulusarvosta, joista Z-arvo jätetään kuitenkin pääosin huomioimatta. Tuloksena syntyy kaksiulotteinen projektio värikoombinaatioista, joka käsittää ainoastaan värien kromaattisuudet. Jotta koko väriavaruus voitaisiin kattaa värikoordinaatein, on koordinaatistoon lisättävä kolmas ulottuvuus kuten XYZ-väriavaruudessa. Kolmiulotteisella värikoordinaatistolla on mahdollista esittää kaikki ihmisen näkemät värit ja tähän tarkoitukseen onkin kehitetty useita väriavaruuksi kuten esimerkiksi CIELab. /20/

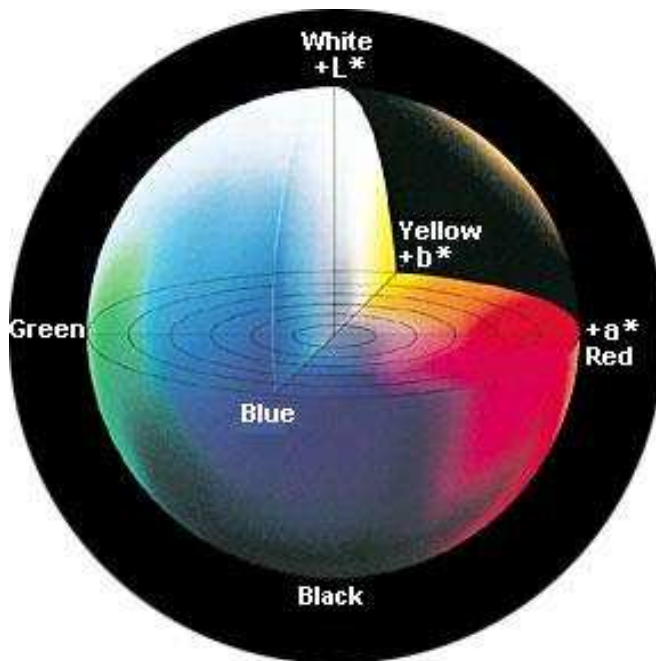
CIELab-väriavaruuden suurimpana etuna XYZ avaruuteen nähden on se, että se on havainnollisesti tasavälisempi kuin XYZ-avaruus. Tämä tarkoittaa sitä, että samansuuruiset muutokset värikoordinaateissa avaruuden eri osissa tarkoittavat yhtäsuurina havaittuja värieroja. CIELab koordinaatiston komponentit ovat luminanssikomponentti (L^*) sekä vastaväreihin perustuvat kromaattisuuskomponentit puna-vihreä (a^*) ja kelta-sininen (b^*). Koordinaattien arvot saadaan laskettua tristimulusarvoista ja referenssivalkoisesta (X_n , Y_n ja Z_n) kaavoilla 12, 13 ja 14 avulla/51/.

$$L^* = 116(Y / Y_n)^{1/3} - 16 \quad (12)$$

$$a^* = 500((X / X_n)^{1/3} - (Y / Y_n)^{1/3}) \quad (13)$$

$$b^* = 200((Y / Y_n)^{1/3} - (Z / Z_n)^{1/3}) \quad (14)$$

CIELab muodostaa siis kolmiulotteisen koordinaatiston, joka on muodoltaan pallon muotoinen. Pallon yläreunassa on valkoinen ja alhaalla musta. Värien saturaatio kasvaa mentäessä pysty akselilta pois päin. Tarkempi kuvaus koordinaatiston värijakaumasta käy ilmi kuvasta 7.



Kuva 7. CIELab-värikoordinaatisto /32/

4 VALON MITTAAMINEN

4.1 Mittasuureet

Näyttöjen optisen suorituskyvyn esittämiseen on olemassa lukematon määrä erilaisia mittareita ja tunnuslukuja. Valtaosa näistä tunnuslukuista pohjautuu kuitenkin muutamiin yksinkertaisiin mitattaviin suureisiin. Luminanssi ja värikoordinaatit ovat näyttömittausten perussuureita, joista voidaan erilaisin menetelmin johtaa lukuisia muita suureita. Esimerkiksi toistamalla luminanssimittaukset sopiville kohteille sopivista mittapisteistä ja sopivissa olosuhteissa, voidaan tulosten avulla ilmaista muun muassa näytön kontrastisuhde, gamma, tasaisuus ja reflektiivisyys. Tässä luvussa on esitelty tarkemmin luminanssi ja värikoordinaatit sekä niistä johdettavat muut tutkimuksessa käytetyt suureet kuten kontrastisuhde ja gamut.

Luminanssi, L , on suure, joka kertoo kuinka kirkkaalta jokin pinta katselijalle näyttää. Tarkkaan ottaen se kertoo pinnan valovoiman tiheyden katselusuuntaan. Määritelmän mukaan luminanssi mittaa siis ihmisen havaitsemaa kirkkautta ja on näin ollen fotometrinen suure. Luminanssi saadaan laskettua valovirrasta, Φ , kaavojen 15 ja 16 avulla ja sen yksikkö on $\text{cd/m}^2/51$. Kaavasta voidaan nähdä, että mitattaessa täysin tasaisesti valaistua pintaa samasta suunnasta, ei etäisyydellä ole vaikutusta saatuun luminanssi-arvoon. Etäisyysriippumattomuus on seurausta siitä, että etäisyyden kasvaessa sekä pinta-ala että mittapäähän saapuvan valovirran osuus kasvavat neliöllisesti ja näin ollen luminanssi pysyy muuttumattomana.

$$\Phi = K \int_{380nm}^{780nm} V(\lambda) \Phi_{e,\lambda} d\lambda \quad (15)$$

, jossa

Φ on valovirta,

$V(\lambda)$ on ihmissilmän herkkyysfunktio ja

$\Phi_{e,\lambda}$ on kohteen säteilyteho aallonpituudella λ .

$$L = \frac{d^2\Phi}{d\omega dA \cos\theta} \quad (16)$$

, jossa

ω on avaruuskulma ja

$dA \cos\theta$ on valonsäteiden katselukulmasta, θ , katsotun projektiopinnan pinta-ala.

Värikoordinaatit, (x, y) ja (u', v'), ovat toinen perussuure, jota näyttömittauksissa usein käytetään. Värikoordinaattien avulla voidaan esittää ihmisen näkemien värien kromaattisuus kahden luvun avulla. Yleisimpiä näyttöjen värimittauksen kohteita ovat päävärit sekä valkoinen. Niistä saatujen tulosten avulla voidaan tutkia muun muassa näytön värientoistokykyä sekä väriämpötilaa ja sen vakautta eri intensiteeteillä. /28/

Värikoordinaatit mitataan painottamalla mitatun kohteen spektriä tristimulusfunktioilla. Tuloksena mittauksista saadaan mitatun valon tristimulusarvot, joiden avulla voidaan laskea värikoordinaattien arvot halutussa väriavaruudessa. Laajimmassa käytössä olevien CIE1931 ja CIE1976 väriavaruuksien värikoordinaatit saadaan laskettua tristimulusarvoista kaavojen 4, 5, 8 ja 9 avulla. Värit ja värikoordinaatit on esitelty tarkemmin luvussa 3.3.

Kontrastisuhde kertoo näytön dynaamisen alueen eli kyvyn toistaa tummia ja vaaleita alueita. Korkea kontrastisuhde parantaa näytön luettavuutta ja kuvanlaatua. Kontrastisuhde on kuitenkin vain yksi tapa määrittellä kontrastia. Menetelmiä on olemassa lukuisia ja jo yhdessä standardissa voidaan esitellä kuusikin erilaista tapaa näytön kontrastin esittämiseen. Tässä työssä on noudatettu mittauksissa VESA FPDMv2 standardia, jonka mukaan kontrastisuhde lasketaan valkoisen ja mustan ruudun kirkkauksien suhteena kaavalla 17. /28/ /62/

$$CR = \frac{L_w}{L_b} \quad (17)$$

,jossa

L_w on valkoisen ruudun luminanssi ja

L_b on mustan ruudun luminanssi.

Näytön väriavaruuden laajuus eli gamut on suure, jolla voidaan kuvata näytön värientoistokykyä. Koska valtaosa nykypäivän värinäytöistä tuottaa värit kolmen osaväriin summana, voidaan näytön gamut rajata kaksiulotteiseen värikoordinaatistoon kyseisten osavärien värikoordinaattien avulla. Osavärien värikoordinaatit rajaavat väriavaruuteen kolmion, joka sisältää kaikki värit, jotka osavärien yhdistelminä voidaan muodostaa. Näin ollen kolmion pinta-ala kertoo näytön väriavaruuden laajuuden eli gamutin. Todellisuudessa gamut on kolmiulotteinen, mutta näyttömittauksilla yleistynyt käytäntö jättää luminanssiakselin huomioimatta. Markkinoilta löytyy myös näyttöjä, jotka muodostavat värit neljän osaväriin avulla ja tällöin näytön gamut määritellään osavärien muodostaman nelikulmion pinta-alan mukaan.

Näyttömittauksille on tyypillistä, että suureet ja niiden määritelmät poikkeavat joskus suurestikin toisistaan riippuen lähteestä ja näin on myös gamutin kohdalla [13]. Tässä työssä noudatettu VESA FPDMv2 määrittelee gamut-alueen näytön väriavaruuden laajuuden ja koko CIE1976-väriavaruuden suhteena. Gamut-alue on yksi uudistuksista, jotka lisättiin VESA FPDM:n versioon 2 vuonna 2001, eikä se ole vielä saavuttanut suurta suosiota näyttömittauksissa. VESA:n määritelmän mukainen gamut-alue lasketaan kaavalla 18.

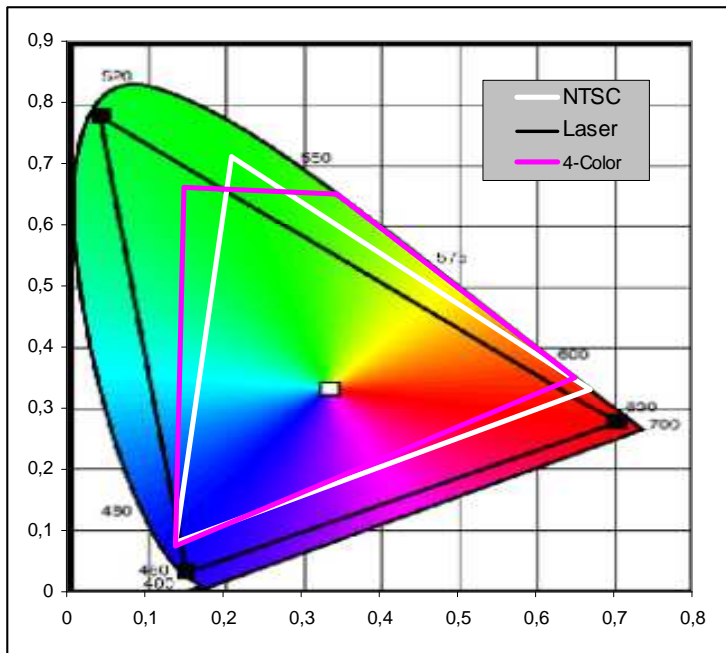
$$A = \frac{256,1}{|(u'_R - u'_B)(v'_G - v'_B) - (u'_G - u'_B)(v'_R - v'_B)|} \quad (18)$$

Toinen, huomattavasti suositumpi, menetelmä on verrata näytön gamuttia NTSC:n määrittelmien osavärien muodostamaan väriavaruuteen. Suure lasketaan suoraan näiden väriavaruuksien pinta-alojen suhteena kaavan 19 mukaisesti. NTSC-Ratio suuretta käytetään laajasti markkinoilla näyttöjen spesifikaatioissa ja markkinointimateriaaleissa.

$$NTSCRatio = \frac{Measured_color_gamut_area}{NTSC_specification_gamut_area} \times 100\% \quad (19)$$

NTSC-Ratio:n heikkous johtaa juurensa historiasta, jolloin näyttöjen värientoistossa oli rajallinen ja kaikki värit mahtuivat NTSC:n määrittelemän avaruuden sisään. Kaava 19 ei nimittäin ota kantaa siihen sisältyvätkö näytön toistamat värit NTSC-väriavaruuteen vai eivät, vaan se ilmaisee ainoastaan väriavaruuksien pinta-alojen välisen suhteen. Pahimmillaan näyttö voi kattaa esimerkiksi vain 90 % NTSC-väriavaruuden väreistä, mutta omalta silti yli 100 % NTSC-ratioon.

Tällainen tilanne voisi tulla kyseeseen esimerkiksi näytöllä, joka tuottaa värit neljän osaväriin avulla, jolloin jokin NTSC-kolmion kärjistä jää toistamatta. Vastaava tulos voidaan saavuttaa myös laser- ja LED-näytöillä, jos niiden dominoiva aallonpituus ei vastaa täysin NTSC:n osavärien aallonpituuksia. Kyseiset tilanteet on esitetty kuvassa 8, josta käy ilmi kuinka yli 100 % NTSC-Ration omaavat näytöt eivät välttämättä kuitenkaan pysty toistamaan kaikkia NTSC-gamutin värejä.



Kuva 8. NTSC-avaruus sekä laser- ja neliväri näyttöjen gamutit CIE1931-väriavaruudessa

Suure on siis osittain harhaanjohtava ja siinä mielessä parempi menetelmä olisikin verrata vain gamutin NTSC-avaruuteen kuuluvan osan pinta-alaa NTSC-avaruuden pinta-alaan. Näin laskettu NTSC-% kertoisi tarkalleen kuinka suuren osan NTSC-väriavaruudesta näyttö kykenee toistamaan. Suure voidaan laskea kaavalla 20.

$$NTSC - \% = \frac{A(NTSC \cap G)}{A(NTSC)} \times 100\% \quad (20)$$

,jossa

$A(x)$ on x :n pinta-ala ja

G tutkitun näytön gamut.

Kääntöpuolena tällä menetelmällä on NTSC:n ulkopuolelle jäävien värien huomiotta jättäminen. Tämä on yksi syy siihen etteivät näyttövalmistajat ole olleet innostuneita muuttamaan menetelmiään, sillä ehdotetulla menetelmällä näytön NTSC-% on parhaimmillaankin vain yhtä suuri kuin nykyisellä menetelmällä eikä arvo voi koskaan ylittää 100 %:a. Ehdotetulla menetelmällä olisi hyvin mahdollista se, että näytön gamut laskisi nykyisestä arvosta ja sitä vuorostaan olisi vaikeampi markkinoida potentiaalisille asiakkaille.

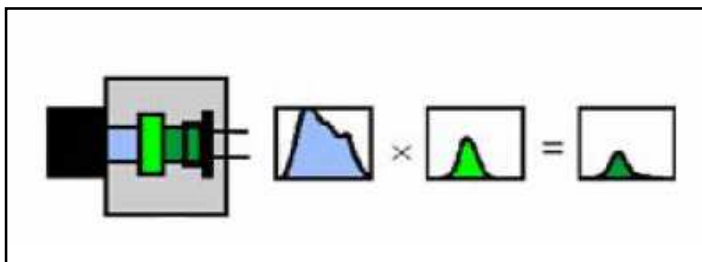
4.2 Mittalaitteet

Valo koostuu fotoneista ja valon mittaaminen perustuu näiden fotoneiden keräämiseen. Kerääminen suoritetaan siihen suunnitelluilla valoherkillä sensoreilla. Erilaisia sensoritekniikoita on vuosien varrella tullut ja mennyt, mutta tämän hetken yleisin sensoryyppi on fotodiodi. Fotodiodiin saapuvat fotonit aiheuttavat diodissa elektronin irtoamisen ja synnyttävät sensoriin näin varauksen. Syntynyt varaus muunnetaan tämän jälkeen jännitteeksi, joka vahvistetaan ja muutetaan lopulta tulokseksi digitaaliseen muotoon. Fotodiodin vahvuuksia ovat muun muassa pieni koko, herkkyys, hinta, vakaus sekä laaja dynaaminen alue. Heikkona puolena fotodiodeilla on kohtuullisen suuri kohina, joka lisääntyy lämpötilan myötä. Tästä johtuen matalien valaistustasojen mittaukseen käytetään edelleen usein valomonistinputkia (*eng. photomultiplier Tube*), joilla vastaavaa ongelmaa ei ole. /56/

Yleisimpiä näyttömittauksissa käytettyjä mittalaitteita ovat luminanssimittarit, kolorimetrit ja spektroradiometrit. Laitteet eroavat toisistaan niin toimintaperiaateiltaan kuin käyttötarkoituksiltaan. Suurimmat erot syntyvät kustannuksissa, mittaustarkkuudessa ja käytettävyydessä. Halvat kolorimetrit kykenevät vain suuripiirteisiin mittauksiin kun taas kaksoismonokromaattoriin perustuvat spektroradiometrit yltyvät äärimmäisiin tarkkuuksiin. Myös mittauksista saatava informaatio riippuu käytetystä mittalaitteesta ja siksi laitehankintojen yhteydessä on ensisijaisen tärkeää määrittellä ensin käyttötarkoitus.

4.2.1 Luminanssimittari

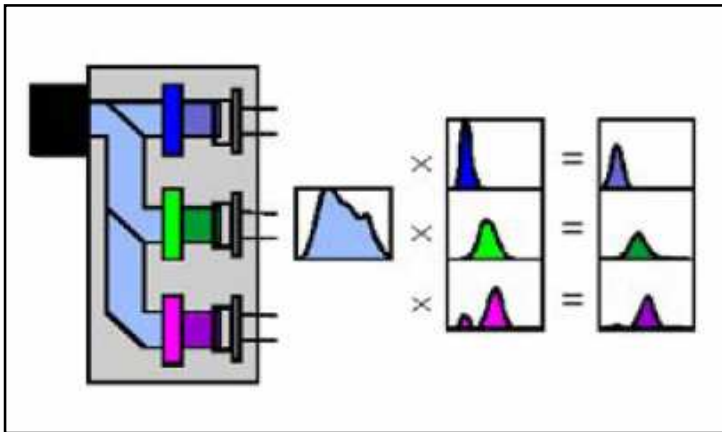
Luminanssi-mittari on suunniteltu puhtaasti valon kirkkauden mittaamiseen eikä sillä saada mitattua lainkaan kromaattista informaatiota. Mittarin keskeisin komponentti on valoherkkä sensori, joka kerää kohteesta saapuvat fotonit ja mittaa siten valon intensiteetin. Jotta mittauksista saataisiin tuloksena luminanssiarvoja, on mitattavan valon aallonpituusjakaumaa painotettava ihmissilmän herkkyysfunktiolla. Luminanssimittarin sensori tuottaa ainoastaan skalarisuureen, joten painotus on tehtävä ennen sensoria. Yleisin menetelmä painotuksen toteuttamiseen on lisätä fotooppinen linssi sensorin eteen. Fotooppinen linssi omaa silmän herkkyysfunktion kaltaisen siirtofunktion. Se siis painottaa mitattavaa valoa $V(\lambda)$ -funktiolla ja antaa tuloksena luminanssiarvoja kuten kuvasta 9 käy ilmi.



Kuva 9. Luminanssimittarin toimintaperiaate /27/

4.2.2 Kolorimetri

Näyttöjen kromaattisuus-mittauksissa käytetään usein värimittaria eli kolorimetriä. Kolorimetrillä voidaan tutkia kuitenkin ainoastaan värikoordinaatteja, jolloin valon spektraalinen jakauma jää mittaamatta. Värit erotetaan kolorimetrissa toisistaan värisuotimien avulla. Mitattavan kohteen tuottama valo mitataan kunkin suotimen läpi joko yhdellä sensorilla ja vaihtuvilla suotimilla tai useammilla sensoreilla joiden edessä on kiinteät suotimet. Värisuotimien tavoitteena on mallintaa mahdollisimman tarkasti tristimulusfunktioita $\bar{x}(\lambda)$, $\bar{y}(\lambda)$ ja $\bar{z}(\lambda)$, jolloin mittauksien tuloksina saadaan X, Y ja Z tristimuluskomponentit. Kolorimetrin toiminta on esitelty tarkemmin kuvassa 10.



Kuva 10. Kolorimetrin toimintaperiaate /27/

Saaduista tristimuluskomponenteista voidaan johtaa suoraan värikoordinaatit muissa avaruuksissa, kuten esimerkiksi CIE 1931 x, y ja CIE 1976 u', v' kaavoilla 4, 5, 8 ja 9. Luminanssimittaukset suoritetaan värimittauksen yhteydessä, sillä niissä käytetyn vihreän alueen $\bar{y}(\lambda)$ -suodatin on identtinen ihmisen silmän herkkyysfunktion, $V(\lambda)$, kanssa /17/.

Kolorimetrillä voidaan mitata näytöltä myös muita suureita käyttämällä sopivanlaisia suodattimia. Tristimulussuodattimien lisäksi kolorimetreissa voi olla omat suodattimet esimerkiksi skotooppiselle luminanssille, infrapuna-alueelle sekä täysin suodattamattomalle valolle /60/. Mittauksissa voidaan käyttää linssin edessä myös polarisaattoreita kun halutaan informaatiota valon polarisaatiosta ja tasaisesti eri aallonpituuksia vaimentavia neutraalidensiteettisuodattimia kun halutaan kasvattaa mittalaitteen dynaamista aluetta. /17/

Kolorimetrien heikkous on niille luonteenomainen suodattimien epäideaalisuus. Värimittauksen tarkkuus on suurelta osin kiinni siitä, kuinka hyvin värisuotimet on onnistuttu sovittamaan CIE:n herkkyysfunktioihin. Suodattimet ovatkin suurin virheen aiheuttaja kolorimetri-mittauksissa ja juuri tästä syystä spektrometrejä pidetään tarkempina mittalaitteina kuin kolorimetrejä /6/. Ongelmaa on pyritty ratkomaan niin mekaanisin kuin myös laskennallisin menetelmin.

Ensimmäisissä kolorimetreissä kullekin tristimuluskomponentille oli varattu vain yksi suodatint. Kolmella suodattimella on kuitenkin vaikea toteuttaa X-kanavan kahta huippua, jotka ilmenevät tristimulusfunktioiden kuvaajista kuvassa 4. Tästä johtuen uudemmissa kolorimetreissa käytetään yleensä neljää tai jopa viittä suodatinta. Suodattimista kaksi mallintaa X-kanavaa ja toteutuksesta riippuen myös Y-kanavalle voidaan käyttää kahta suodatinta. Halvimmissa malleissa väriensuodatus saatetaan edelleen toteuttaa kolmella suodattimella ja silloin X-komponentin mittauksessa voidaan hyödyntää Z-komponentin mittaustuloksia, sillä X-komponentin pienempi huippu vastaa muodoltaan läheisesti Z-komponentin jakaumaa. /36/

Toinen tapa pienentää kolorimetrien tarkkuusongelmaa on mittaustulosten jälkikäsitteily. Suodatinsovituksesta aiheutuva virhe on suurelta osin systemaattista ja sitä on mahdollista kompensoida jälkikäteen kun virhelähde tunnetaan. Kolorimetrissa käytettyjen suodattimien spektraaliset herkkyysfunktiot, SRF (*eng. Spectral Responsivity Function*), voidaan selvittää monokromaattorin avulla. Kun suodattimien SRF:t tunnetaan, voidaan laitteen tuottamille mittaustuloksille laskea korjausmatriisi jolla kerrottujen tulosten virheet ovat huomattavasti pienemmät kuin ilman korjausta. Menetelmä on sikäli kömpelö, että korjausmatriisit ovat voimassa vain kyseisellä näyttötyypillä eli kolorimetrille joudutaan ratkaisemaan uusi korjausmatriisi erikseen jokaiselle näyttötyypille. /6/ /45/ /46/

Kolorimetrin suurin puute on sen tulostulosten rajoittuminen pelkkiin värikoordinaatteihin. Monissa käyttötarkoituksissa myös spektraalinen informaatio on tärkeätä ja sitä ei kolorimetrilla voida mitata. Kolorimetrit ovat yleensä kuitenkin selvästi halvempia ja mittaaminen on nopeampaa kuin spektroradiometreillä. Kolorimetrit soveltuvatkin hyvin mittauksiin joissa värikoordinaatti-informaatio riittää ja joissa ei vaadita äärimmäistä mittaustarkkuutta.

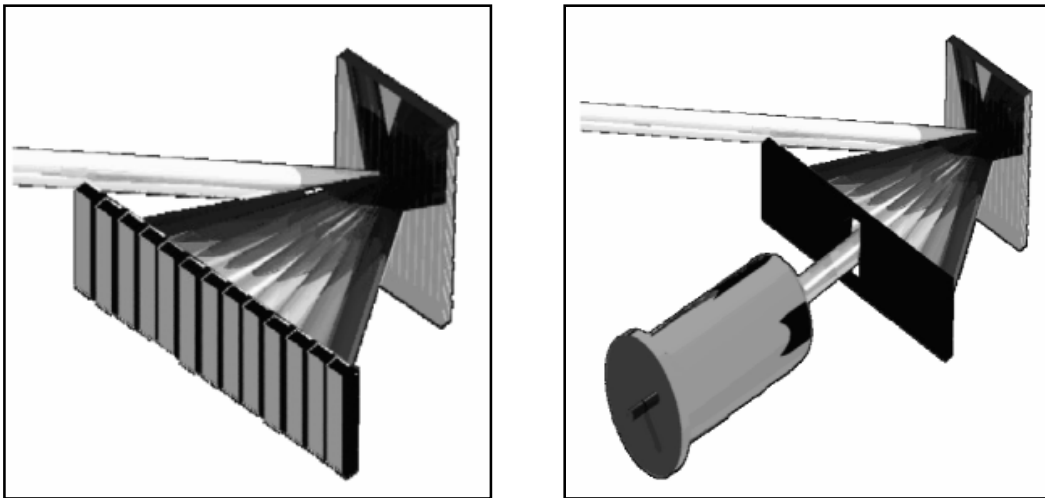
4.2.3 Spektroradiometri

Spektroradiometri on laite, jolla voidaan mitata valon aallonpituusjakauma eli spektri. Spektrikomponenttien mittaaminen onnistuu hajottamalla valo aallonpituuskomponentteihin hilaan tai prisman avulla. Hilaan perustuva spektroradiometri taittaa kunkin valon aallonpituuskomponentin erilailla hajottaen näin yhtenäisen valonsäteen erivärisiin säteisiin eli spektrikomponentteihin. Sama lopputulos saavutetaan myös prisman avulla, jossa eri aallonpituudet taittavat lasin pinnoilla erilailla jolloin valo myös hajoaa.

Hajotetun valon komponenttien intensiteetit mitataan erikseen valoherkillä sensoreilla. Valon keräykseen spektrometreissa käytetään ainakin kahta periaatteiltaan toisistaan poikkeavaa asetelmaa. Vaihtoehtoista halvempi ja nopeampi menetelmä on monikanavainen spektroradiometri /63/. Monikanavainen spektroradiometri mittaa kaikki spektrikomponentit kerrallaan monikanavaisen sensorin avulla kuten kuvassa 11. Sensorina käytetään CCD-kennoa, jonka kukin alkio kerää valoa vain tietyltä aallonpituusalueelta. Mittauksen jälkeen tuloksista voidaan rekonstruoida mitatun valon spektri. Kennon alkioden lukumäärä asettaa rajat spektro-

diometrin resoluutiolle, minkä lisäksi valon hajottava mekanismi heikentää resoluutiota epäideaalisuuksien ansiosta.

Toinen tapa spektrin tutkimiseen on mitata valoa skannaamalla, jolloin kukin valon aallonpituuskomponentti mitataan erikseen yksi kerrallaan kuten kuvassa 11. Skannaavia menetelmiä edustaa monokromaattori (*eng. mono-chromator*), joka hajottaa valon prisman tai hilan avulla niin että aina vain yksi aallonpituuskomponentti osuu valoherkälle sensorille kerrallaan /10/. Tähän tapaan komponentit mitataan peränjälkeen ja tuloksena saadaan mitatun valon spektrikomponentit. Toimintaperiaatteensa ansiosta monokromaattoria pidetään tarkempana menetelmänä kuin monikanavaisia spektrometrejä /26/.



Kuva 11. Monikanavainen(vas) ja skannaava(oik) spektrometri /63/

Tavoiteltaessa äärimmäistä tarkkuutta voidaan käyttää kaksoismonokromaattoria, jossa kaksi monokromaattoria on sijoitettu peräperään. Siinä ensimmäisen monokromaattorin hajottama valo ohjataan toiseen monokromaattoriin, joka hajottaa säteen edelleen kapeampiin aallonpituuskaistoihin. Kaksoismonokromaattorilla voidaan saavuttaa jopa vain 0,05nm epävarmuus aallonpituusmittauksissa. Ylivertaisen tarkkuutensa ansiosta monokromaattorit ovat suosittuja muun muassa kansallisissa kalibrointilaboratorioissa kuten Englannin NPL:ssa ja Yhdysvaltojen NIST:ssa /16/ /10/. Skaannaavat spektrometrit ovat kuitenkin kalliita valmistaa ja ne ovat huomattavasti hitaampia kuin monikanavaiset spektrometrit /63/.

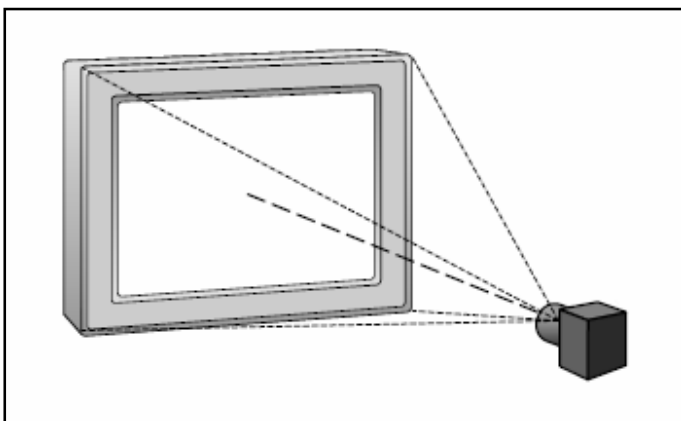
Spektrometrien tuloksena antamasta spektristä voidaan laskea halutut suorituskyky-suureet kuten luminanssi ja värikoordinaatit. Suureiden laskeminen vastaa signaalin painottamista suodattimilla, mutta se tehdään laskennallisesti ja vasta itse mittauksen jälkeen. Spektrometrillä tehdyistä mittauksista saadaan siis radiometrisiä tuloksia, joista voidaan johtaa fotometriset vastineet tarpeen vaatiessa.

Spektroradiometrit ovat yleensä kalliita ja käytettävyydeltään kömpelömpiä kuin kolorimetrit sekä luminanssi-mittarit. Ne tuottavat kuitenkin merkittävän määrän lisäinformaatiota ja ovat tarkkuudeltaan kertaluokkaa parempia. /63/

4.2.4 Kvantavat menetelmät

Perinteisesti näyttömittaukset on totuttu suorittamaan pistemittauksina, joissa mitataan vain yhtä pientä aluetta kerrallaan. Pistemittaukset ovat tarkkoja, mutta erittäin työläitä jos mittapistettä on runsaasti. Näin on muun muassa näytön tasaisuusmittauksissa, joissa mittapisteitä voi olla standardista riippuen 13 tai jopa 25 kappaletta /13/ /29/. Hitauden lisäksi mittapisteiden rajallisuus vääristää tuloksia kun koko näytön tasaisuutta estimoidaan muutaman yksittäisen pisteen perusteella. Vaihtoehtoinen menetelmä on suorittaa koko näytön pinta-alan kattavat mittaukset kerrallaan kuvantavalla mittalaitteella.

Kvantava mittalaite, kuvassa 12, on käytännössä kalibroitu digikamera, jolla otetaan valokuva mitattavasta kohteesta. Kuva sisältää tavallisen valokuvan tapaan intensiteetti- ja spatiaaliseksi mahdollisesti väri-informaation kohteesta. Kvantava menetelmä soveltuu siis sekä luminanssi- että värillisyyssmittauksiin. Menetelmästä ja laitteistosta riippuen kuvia voidaan ottaa yhdestä aina kymmeneen per mittaus. Yksittäinen kuva sisältää yleensä vain monokromaattisen informaation hyvin pienellä dynaamisella alueella, mutta kuvien määrää kasvattamalla informaation määrää voidaan lisätä. Dynaamista aluetta voidaan laajentaa yhdistämällä usean mittauksen tuloksia yhdeksi kuvaksi. Mittaukset tehdään eri integrointiajoilla, jolloin kohteesta saadaan tarkkaa informaatiota niin hämäriltä kuin kirkkailtakin alueilta. Värimittausten osalta kuvantava mittalaite toimii kolorimetrin tavoin ottaen erilliset kuvat kunkin värisuotimen läpi. Poikkeuksena tähän ovat värimatriisia hyödyntävät kolorimetrit, jotka ovat toistaiseksi hyvin epätarkkoja ja näyttömittauksissa harvinaisia. /60/ /25/



Kuva 12. Kvantava menetelmä /29/

Värisuodinmatriisina käytetään valokuvakameroista tuttua Bayerin matriisia, jossa kukin neljän pikselin alue koostuu yhdestä punaisesta ja sinisestä pikselistä sekä kahdesta vihreästä pikselistä. Suodatinmatriisi on sijoitettu suoraan mittalaitteen kennon päälle, jolloin kukin pikseli tallentaa informaation vain yhdestä osaväristä. Mittauksen jälkeen tulokuvan jokaiselle pikselille lasketaan sen todellinen arvo interpoloimalla naapuripikseleiden väridatasta. /55/

Suosittu menetelmä on käyttää perinteisistä kolorimetreista tuttua väripyörää, jolla suodinta voidaan vaihtaa mittausten aikana. Jokainen mittausta toistetaan kaikkien värisuotimien läpi, mikä vie aikaa ja vaatii sen, että mitattava kohde on aivan liikkumatta. Väripyörään sijoitetut suotimet ovat kuitenkin helpompia valmistaa ja tästä syystä niiden tarkkuus on merkittävästi parempi kuin värisuodinmatriisilla. /49//60/

Kuvantavan menetelmän etuna on sen hyvä käytettävyys ja nopeus. Yhdellä napin painalluksella saadaan mitattua luminanssit ja värikoordinaatit koko näytön alalta sekä näytön tasaisuutta kuvaavat suureet. Tulokset ovat myös visuaalisesti informatiivisempia kuin pistemittauksista saadut numeroarvot. Lisäksi pistemittaukset tehdään usein esimerkiksi yhdeksästä pisteestä, joka on hyvin rajoittunut otos koko näytön pinta-alasta. /25/

Kuvantavalle menetelmälle luonteenomainen ongelma on sensorin epätasaisuus ja se on huomioitu myös VESA FPDMv2 standardissa, joka asettaa kuvantavalle mittalaitteelle tasaisuusehdoksi 2 % /62/. Tällöin mitattaessa täysin tasaista pintaa, tulisi mittapisteiden minimiarvon olla vähintään 98 % maksimiarvosta. Tasaisuusehtoa ylläpidetään jatkuvilla kalibroinneilla, joissa kennon tasaisuus tarkistetaan tasaisella valonlähteellä, kuten integroivalla pallolla, ja kennon kompensointiin käytettävää korjausmatriisia päivitetään. Kalibrointi tulee tehdä erikseen jokaiselle käytetyistä objektiiveista ja jos objektiivissa on säädettävä polttoväli, on kalibrointi tehtävä lisäksi kaikille käytetyille polttoväleille.

Muita kuvantavan menetelmän haasteita ovat muun muassa kosini-vaimentuma, katselukulmien vaikutus tasaisuusmittauksissa sekä katselukulmien mittausta.

Kosini-vaimentuma tarkoittaa ilmiötä joka aiheutuu siitä, että mittausalueen reunoilta tehdyt mittaukset eivät tapahdu kohtisuoraan ja mittaustasaisuus on suurempi kuin optisella akselilla. Tällöin samankokoinen alue mittausalueen reunalla näkyy mittalaitteelle pienempänä kuin miltä se näyttäisi keskellä mittausaluetta. Vaimentuman seurauksena luminanssi-mittauksen arvot putoavat $\cos^4\theta$ -suhteessa aperaatiokulman, θ , kasvaessa /29/. Kehittyneemmissä mittalaitteissa on valittavana kosini-kompensointi, joka kumoaa kosini-vaimentuman vaikutuksen mittaustuloksista.

Kuvantavissa mittalaitteissa objektiivien aperaatiokulmat ovat tyypillisesti luokkaa 4-10°. Tämä tarkoittaa siis sitä, että pahimmassa tapauksessa näytön reunoja mitataan 10 ° kulmasta näytön normaaliin nähden. Litteillä näytöillä kirkkaus voi laskea useita prosentteja katselukulman kasvaessa 10°. Onkin suositeltavaa että näyttömittauksissa käytettäisiin pidemmän polttovälin linsejä, joiden katselukulmat ovat 2-4°. Toisaalta ISO 13406-2 standardin tasaisuusmittaus suoritetaan nimenomaan näytön keskipisteen normaalilta, jolloin katselukulmien vaikutus tuloksiin on asiaankuuluva tekijä /13/ /23/.

Katselukulmamittauksiin kuvantavat kamerat soveltuvat huonosti ilman lisälaitteita. Kun kameraa käännetään suurempiin kulmiin, muuttuvat sekä mitta-alueen koko että muoto ja tulokset vääristyvät. Kuvantavilla menetelmillä ongelma on ratkaistu tarkoitukseen suunnitellulla optiikalla. Matriisimuotoisilla sensoreilla katselukulmat voidaan mitata Fourier-optiikalla, joka suorittaa valolle optisen fourier-muunnoksen. Muunnoksen tuloksena valo muodostaa sensorille spatiaaliesityksen sijaan katselukulmaesityksen, joka osoittaa näytön katselukulmariippuvuuden visuaalisessa muodossa. /41/

4.3 Mittalaitteiden virhelähteet

Optiset mittaukset ovat periaatteeltaan yksinkertaisia point-and-shoot mittauksia. Valitaan kohde jota mitataan, kerätään siitä valoa sensorille halutun pituinen aika ja luetaan tulos näytöltä. Yksinkertaisuudesta huolimatta mittasysteemistä löytyy lukuisia häiriötekijöitä. Jo pelkässä mittalaitteessa virheitä syntyy sen jokaisessa komponentissa kuten optiikassa, sensorissa, A/D-muuntimessa ja signaalin jälkikäsittelyssä. Tässä kappaleessa on esitelty kukin komponentti sekä käyty läpi niiden heikkouksia ja virhelähteitä.

4.3.1 Optiikka

Optiikalla tarkoitetaan mittalaitteen osaa, jossa valo kulkee ennen kuin se muunnetaan sähköiseksi signaaliksi. Sen tehtävänä on ohjata valoa mitattavalta kohteelta mittalaitteen sensorille halutulla tavalla. Optiikan avulla valo voidaan joko keskittää yhdelle tai hajottaa usealle sensorille. Mittalaitteessa sensoreita voi olla yksi tai useampia ja ne on voitu sijoittaa matriisiin, jolloin kennolle syntyy kuva mitattavasta kohteesta. Optiikasta riippuen tuloskuva voi esittää aallonpituusjakaumaa, perinteistä valokuvaa tai fourier-muunnosta eli katselukulmaesitystä mitattavasta kohteesta.

Optiikan osia ovat muun muassa objektiivi, suodattimet, peilit, hilat ja prismat. Kukin optiikan komponentti aiheuttaa lisää epävarmuutta epäideaalisuusiensa ansiosta. Epäideaalisessa linssissä tapahtuu heijastuksia, suodattimien sovitus ei vastaa täysin tavoiteltua ja valon polarisatioosuunta vaikuttaa hilojen toimintaan.

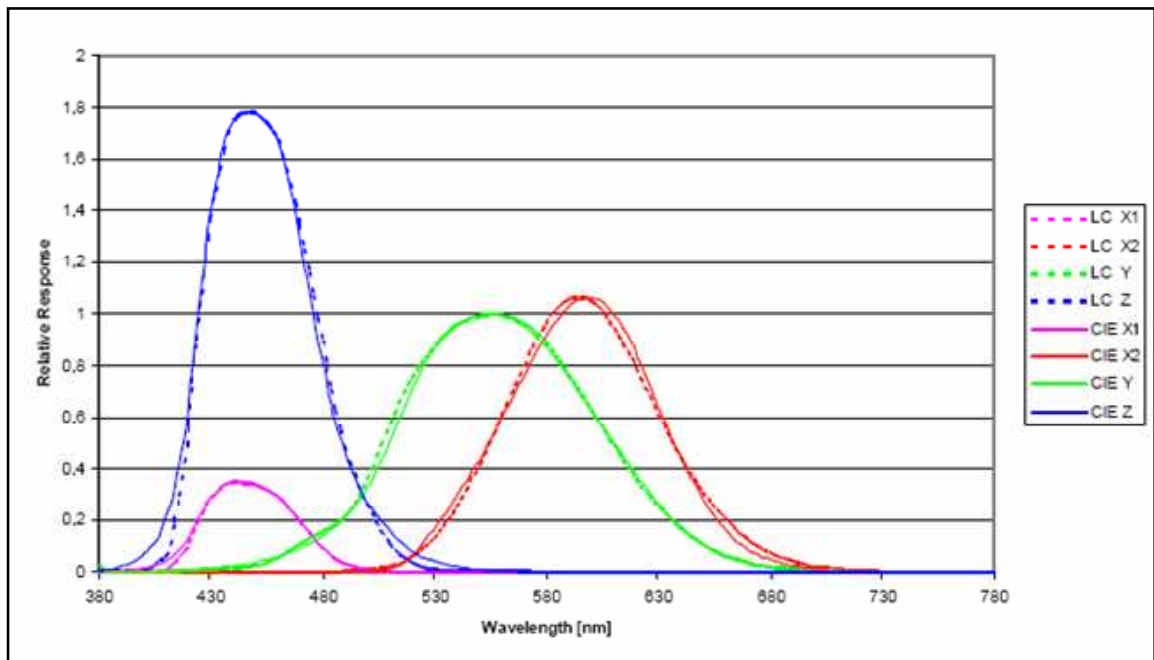
Linssin epäideaalisuuksista aiheutuvalla harsohäikäisyllä tarkoitetaan tilannetta, jossa mitta-pistettä ympäröivä hajavallo päätyy sensorille ja vääristää mittaustuloksia haalistamalla mitattavaa kuvaa tasaisesti koko kuva-alueella kuten kuvassa 13. Harsohäikäisy (eng. *Veiling glare*) aiheutuu linssin sisäisistä heijastuksista sekä linssillä olevista epäpuhtauksista. Kuvan haalistuminen ilmenee mittaustuloksissa kohonneina kirkkausarvoina ja pahimmillaan sen vaikutus on mitattaessa mustaa aluetta valkoisella taustalla. Tällöin kirkkaan ympäristön valo heijastuu tummalle alueelle minkä tuloksena musta väri haalistuu harmaaksi. Mittalaitteesta sekä mitattavasta kohteesta riippuen mittaustulos voi kasvaa heijastuksen ansiosta jopa 1200 % /29/. /62/



Kuva 13. Vasemmalta oikealle alkuperäinen kuva, harsohäikäisy ja linssihäikäisy /29/

Linssihäikäisy (*eng. Lens flare*) on harsohäikäisyn tapaan optiikan sisäisten heijastusten tulos. Myös linssihäikäisy on seurausta linssien välisistä heijastuksista, mutta se näkyy tuloskuvassa selvästi havaittavina heijastuskuvina. Heijastuskuvat näkyvät kirkkaina renkaina tai viivoina kuvan kirkkaiden kohtien ympärillä. Linssiheijastus ilmenee kuvattaessa kirkasta valonlähdettä kuten aurinkoa, eikä sitä näin ollen yleensä esiinny näyttömittausten yhteydessä. /62/

Valtaosassa mittalaitteista käytetään jonkinlaisia suodattimia. Suodattimet joko simuloivat jotain tunnettua herkkyyskäyrää tai suodattavat valoa tasaisesti kaikilla aallonpituuksilla. Myöskään suodattimet eivät ole koskaan täysin ideaalisia, vaan niiden siirtofunktiot poikkeavat tavoitelluista herkkyyskäyristä. Kuvassa 14 on esitelty erään kolorimetrimittauksen suodattimien aallonpituusjakaumat sekä CIE:n määrittelemät tristimulusfunktiot. Sovitusten välisen eron vaikutus on pieni mitattaessa laajakaistaisia valonlähteitä, kuten esimerkiksi hehkulamppuja. Tilanne muuttuu kuitenkin dramaattisesti kun mitattava valo koostuu kapeista spektripiikeistä, jotka sijoittuvat suotimien heikosti sovitetuille aallonpituusalueille. Esimerkiksi kuvan kolorimetri aiheuttaisi noin 25 % virheen punaisessa kanavassa mitattaessa 530nm aallonpituista valoa ja sinisessä kanavassa suhteellinen virhe olisi vielä suurempi. Kapeakaistaisia valonlähteitä ovat muun muassa LED-valot, joiden käyttö on yleistymässä myös näyttötekniikassa.



Kuva 14. Kolorimetrin suodattimet sekä CIE:n tristimulusfunktiot /21/

Spektrometreissa käytetään hiloja valon hajottamiseen. Hilat ovat kuitenkin alttiita polarisaatiolle, sillä polarisaatiosuunnalla on merkittävä vaikutus siihen kuinka valo hilassa taittuu. Erisuuntaisesti polarisoitunut valo taittuu siinä erilalla aiheuttaen epävarmuutta mittaustuloksiin. Tämä on erityisen tärkeä huomioida mitattaessa LCD-näyttöjä, sillä ne tuottavat toimintaperiaatteensa ansiosta vahvasti polarisoitunutta valoa. Polarisaation vaikutus luminanssimittausten tuloksiin voi olla jopa 2,5 % /33/.

4.3.2 Sensori

Mittalaitteen keskeinen komponentti on sen valoherkkä elementti eli sensori, joita voi mittalaitteessa olla yksi tai useita. Yksittäiset sensorit ovat kookkaampia kuin matriisiin yksittäiset elementit, mistä johtuen ne ovat huomattavasti herkempiä ja tarkempia. Etenkin äärimmäistä herkkyyttä vaativissa temporaalisissa mittauksissa, kuten vasteajan mittaamisessa, käytetään aina yksittäisiä sensoreita. Vaihtoehtona yksittäisille sensoreille toimii CCD-kenno, jossa on matriisiin sijoitettuna lukuisia CCD-elementtejä. CCD-elementin herkkyys, signaali-kohinasuhde (SNR, *eng. Signal-to-Noise ratio*), sekä dynaaminen alue ovat selvästi heikompia, mutta sillä saadaan yhdellä mittauksella kerättyä useita arvoja.

Yksi sensorin herkkyydelle olennaisimmista tekijöistä on sen kvanttitehokkuus (QE, *eng. Quantum Efficiency*) eli sensorin hyötysuhde. QE kertoo onnistuneesti luettujen ja varausta synnyttäneiden sekä sensorille saapuvien fotonien välisen suhteen. Varauksen syntyminen on riippuvainen saapuvan valon aallonpituudesta ja QE kuvataankin aallonpituusriippuvaisena herkkyyshätkänä. Mitä suurempi osa saapuvista fotoneista saadaan mitattua, sitä herkempi

sensori on ja sitä parempi SNR sillä saavutetaan. Herkkyys on ensisijaisen tärkeä ominaisuus mitattaessa hyvin matalia kirkkausarvoja tai kun mittaus on tehtävä erittäin lyhyessä ajassa kuten vasteaikamittauksissa. /56/

Toinen sensorille kriittinen ominaisuus on sen dynaaminen alue, joka määritellään maksimisignaalin ja kohinan suhteena. Fotodiodeilla dynaamiselle alueelle rajoittavana tekijänä toimii kohina, joka kasvaa signaalin vahvistuksen myötä. CCD kennolla taas rajoittavana tekijänä on sensorin varauskapasiteetti (*eng. Well Depth*), joka kertoo kuinka paljon varausta sensorin voi kerätä ennen kuin se saturoituu eli saavuttaa maksimiarvonsa. Mittalaitteen signaalin voimakkuutta voidaan säätää muuttamalla mittausajan eli integrointiajan pituutta. Aivan kuten valokuvauksessa, hämääriä kohteita mitattaessa käytetään pidempää integrointiaikaa kuin kirkkailla kohteilla. Suuri dynaaminen alue on erityisen tärkeä kuvantavissa mittalaitteissa, joissa yksi mittaus voi sisältää sekä kirkkaita että hämääriä alueita. Esimerkkinä voidaan mainita näyttömittauksista shakkilautakuvio, jossa puolet kuvan pinta-alasta on valkoista ja puolet mustaa. Tällöin ei mittausaikaa voida säätää erikseen kunkin alueen mukaan vaan on huomioitava koko kuva-alan kirkkausalue. Nyt mitä suurempi sensorin varauskapasiteetti on, sitä laajemman dynaamisen alueen se tarjoaa ja sitä suurempia kontrasteja yksittäisellä mittauksella voidaan mitata. /56/

Tyypistä riippumatta myös sensorit aiheuttavat virheitä ja ne on tiedostettava mittauksia tehdessä. Sensoreille tyypillisiä epäideaalisuuksia ovat pohjavirta, kohina ja epälineaarisuus. Pohjavirralla tarkoitetaan sensorin itsestään synnyttämää virtaa joka syntyy, vaikkei sitä valaistaisi lainkaan. Pohjavirran suuruus voidaan selvittää pimiössä etukäteen ja sitä voidaan kompensoida mittauksia tehdessä. Pohjavirran lisäksi sensoreilla esiintyy aina kohinaa, joka on luonteeltaan satunnaisesti vaihtelevaa. Satunnaisuutensa ansiosta kohinaa ei voida pohjavirran tapaan vähentää, mutta sen vaikutusta voidaan pienentää keskiarvoistamalla. Kohinan määrä korreloi vahvasti sensorin lämpötilan kanssa, minkä takia onkin tärkeitä seurata mittaustilan lämpötilaa ja kontrolloida sitä mahdollisuuksien mukaan.

Valoherkän sensorin toiminta perustuu varauksen synnyttämiseen, joka on seuraa fotonin törmäyksessä irtoavista elektroneista. Elektronien irtoaminen on kuitenkin epälineaarista ja sensorin QE riippuu sensorille tulevien fotoneiden määrästä eli mitattavan valon kirkkaudesta. Toisin sanoen sensorin vaste on epälineaarinen ja se tulee ottaa huomioon lineaarisuuskalibroinneilla. Kalibrointi on mahdollista suorittaa säädettävän valonlähteen tai neutraalidensiteetti-suodattimien avulla. /62/

4.3.3 A/D-muunnin

Mittalaitteen sensorin synnyttämä varaus muunnetaan digitaaliseksi signaaliksi sensorin ohjauspiirillä. Signaalien muunnoksissa syntyy väistämättä virheitä ja näin käy myös A/D-muunnoksessa. A/D-muunnoksessa syntyy aina kvantisointivirhettä (*eng. quantization error*) kun analogisen signaalin jatkuva intensiteettialue muunnetaan diskreetteihin digitaalitasoihin. Virhe aiheutuu muunnettavan signaalin todellisen arvon ja sitä lähimpänä olevan diskreetin tason välisestä erosta. Syntyvä virhe on suoraan riippuvainen digitaalisen signaalin bittisyvyydestä eli diskreettien tasojen lukumäärästä.

Lopuksi A/D-muunnoksen tuloksena saatu digitaalisignaali muunnetaan näytölle numeromuotoon. Tässä muunnoksessa syntyy sekä katkaisuvirhe (*eng. truncation error*) että pyöristysvirhe (*eng. round-off error*), kun näytöllä näytettävästä numerosta katkaistaan vähiten merkitsevä osa pois ja suoritetaan pyöristys. Signaalin muunnoksessa syntyvät virheet ovat merkityksellisiä ainoastaan hyvin pienillä luvuilla. Näyttömittauksissa kohina peittää yleensä niiden vaikutuksen luminanssi-tuloksissa, mutta esimerkiksi värikoordinaateissa myös näillä tekijöillä voi olla vaikutusta.

5 MITTAUSPROSESSIN ARVIOINTI

5.1 Käsitteet

Mittauksissa syntyy aina virhettä eikä täydellistä mittausprosessia ole olemassakaan. Prosessin suorituskyvyissä on kuitenkin eroja ja niitä on aikojen saatossa pyritty kuvaamaan lukuisin eri termein kuten toistettavuus, uusittavuus, tarkkuus, epätarkkuus, epävarmuus, oikeellisuus, vaihtelu ja kyvykkyys. Termistön runsaus aiheuttaa käyttäjissä sekaannusta, sillä termien määritelmät poikkeavat toisistaan ja ovat pahimmassa tapauksessa jopa ristiriidassa keskenään eri lähteiden välillä. Koska termistö on niin hajanainen, seurataan tässä työssä tiukasti ISO Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement, GUM, määrittelemää sanastoa ja menetelmiä.

Seuraavassa on käyty läpi keskeisimmät mittausprosessin arviointiin liittyvät termit, niiden määritelmät sekä epävarmuusanalyysi jolla GUM opastaa arvioimaan mittausprosessin suorituskykyä.

5.1.1 Virhe

Jokaiseen mittaukseen liittyvät mitattava kohde, mittausmenetelmä sekä mittaustulos. Mittaustulos ei vastaa koskaan tarkalleen mitattavan kohteen todellista arvoa vaan mittaustuloksissa on aina poikkeamaa eli virhettä. Virheen absoluuttista määrää ei voida tietää tarkalleen, voidaan vain arvioida kuinka lähelle oikeaa arvoa mittaustulos todennäköisesti osuu. Tätä arviota kutsutaan mittauksen epävarmuudeksi.

Mittauksessa syntyvä virhe koostuu systemaattisesta ja satunnaisesta virheestä. Systemaattinen virhe on aina joko vakiosuuruista tai säännönmukaisesti muuttuvaa. Se voi olla esimerkiksi vakiosuuruista kalibrointivirheestä johtuvaa tai intensiteetistä riippuvaa signaalin vahvistuksessa syntyvää virhettä. Systemaattinen virhe on selvitettävissä tarkkojen referenssien avulla ja sen vaikutus voidaan usein huomioida lopullisissa tuloksissa. Ilman kunnollisia välineitä systemaattinen virhe on kuitenkin mahdoton havaita ja se voi aiheuttaa järjestelmällisesti virhettä koko mittalaitteen eliniän. /34/

Satunnainen virhe taas on nimensä mukaisesti satunnaisesti vaihtelevaa ja yleensä myös normaalijakautunutta. Satunnaisvirhe on useiden tekijöiden summa ja yhtenä näistä tekijöistä voidaan mainita kohina. Optisissa mittalaitteissa kohinan määrä on usein lämpötilariippuvainen, mutta vakiolämpötilassa se on täysin satunnaista. Satunnaista virhettä ei voida mallintaa yhtä lailla kuten systemaattista virhettä, mutta sen vaikutusta voidaan pienentää keskiarvoistamalla toistomittausten tuloksia. /34/

5.1.2 Toistettavuus vs Uusittavuus

Usein mittauksien kyvykkyydestä puhuttaessa käytetään termejä toistettavuus ja uusittavuus. Erottavana tekijänä näillä on määritelmien laajuus, sillä toistettavuus kertoo mittalaitteen kyvystä toistaa mittaus tarkasti kun taas uusittavuus kertoo koko mittausprosessin kyvykkyydestä. Nämä tiedot ovat kuitenkin tärkeitä tulkittaessa laboratorion sisäisiä sekä useamman laboratorion välisiä mittaustuloksia. Tässä yhteydessä on hyvä muistaa, että nämä suureet kertovat mittausten välisestä vaihtelusta mutta eivät ota kantaa mittauksessa syntyvään virheeseen. Virhe voi siis olla suurikin, vaikka toistettavuus ja uusittavuus olisivat pieniä.

Toistettavuus (*eng. repeatability*) kuvaa mittalaitteiston kykyä toistaa sama mittaus ja saada sama mittaustulos samoissa olosuhteissa lyhyellä aikavälillä. Toistettavuutta tutkitaan toistokokein, joissa toistojen määrä on vähintään kymmenen. Näytteistä lasketaan mittausten keskihajonta, jota käytetään toistettavuuden tunnuslukuna. Toistettavuus ilmoitetaan suhteellisena osuutena kirkkausarvoille ja absoluuttisena poikkeamana värikoordinaateille. VESA FPDmV2 standardi asettaa luminanssi-mittausten toistettavuudelle raja-arvoksi $\pm 0,5\%$, mutta värimittauksille vastaavaa raja-arvoa ei standardissa anneta /62/. Tässä tutkimuksessa toistettavuus laskettiin 10 mittauksen toistokokeen tuloksien pohjalta kaikille tutkittaville suureille.

Uusittavuus (*eng. reproducibility*) kuvaa mittausprosessin kykyä toistaa sama mittaus ja saada sama mittaustulos erilaisissa olosuhteissa. Uusittavuutta tutkitaan toistamalla sama mittaus muuttuvissa olosuhteissa, joissa kutakin olosuhdemuuttujaa voidaan kontrolloida mahdollisimman hyvin. Olosuhteen muutos voi olla esimerkiksi muuttunut mittausmenetelmä, mittaja, paikka, aika tai mittalaite. Uusittavuus kertoo siis koko mittausprosessin toimivuudesta ja sen perusteella voidaan arvioida laboratorion mittausprosessia ja siinä ilmeneviä puutteita. /22/

5.1.3 Epävarmuus

GUM:n mukaan epävarmuus voi tarkoittaa eri yhteyksissä joko yleistä epävarmuuskäsitettä tai tarkkaa kvantitatiivista epävarmuuden määrää. Epävarmuudelle on siis olemassa kaksi käyttö-tarkoitusta, jotka on tärkeä erottaa toisistaan. Ensimmäisellä määritelmällä epävarmuudella tarkoitetaan epäilyä mittaustuloksia kohtaan yleisessä mielessä. Jälkimmäisellä määritelmällä puolestaan tarkoitetaan mittausmenetelmän kvantitatiivista arviointia, jota voidaan esittää esimerkiksi keskihajonnan avulla. /22/

Koska mittaustulos on aina vain arvio todellisesta suureesta, täytyy tulokseen liittää tieto siitä kuinka hyvä tämä arvio on. Mittaustulosten tarkkuuden arviointiin käytetään termiä epävarmuus. Mittaukseen liittyvän epävarmuuden GUM määrittelee seuraavasti: ”Epävarmuus on mittaustuloksiin liittyvä parametri, joka karakterisoi hajonnan joka voidaan perustellusti yhdistää mittaustulokseen.”/22/. Epävarmuutta voidaan analysoida perehtymällä mittausprosessin virhelähteisiin. Lähteet on pystyttävä yksilöimään ja eristämään mittaustuloksissa, jolloin kunkin lähteen vaikutus voidaan selvittää erikseen tarkoitukseen sopivalla tarkastelulla. Lopuksi yksittäisten tekijöiden epävarmuudet voidaan yhdistää edustamaan koko mittausprosessin epävarmuutta. GUM:ssa on annettu tarkat ohjeet epävarmuusanalyysin suorittamiseen.

5.2 Epävarmuusanalyysi

GUM:n pääpaino on epävarmuuden selvittämisellä ja datan analysoinnilla. Se antaa ohjeistuksen epävarmuusanalyysin läpi viemiseen sekä kerätyn mittausdatan käsittelyyn ja analysointiin. GUM määrittelee standardiepävarmuuden yhden keskihajonnan suuruiseksi ja se on siis kvantitatiivinen epävarmuuden tunnusluku. Yksinkertaisimmillaan epävarmuus ratkaistaan tekemällä toistokoe ja laskemalla tuloksena saatujen arvojen keskihajonta. Näyttömittausten epävarmuusanalyysi on kuitenkin hyvin harvoin näin yksinkertainen. Mitattava kohde voi olla usean tekijän summa, joilla voi kullakin olla useita virhelähteitä.

Menetelmän lähtökohtana on määritellä mitattava kohde, Y , sen tekijöiden, X_i , funktiona, f , kuten kaavassa 21. Esitystapa luo selkeän esityksen mitattavasta kohteesta ja kaikista siihen vaikuttavista tekijöistä. Esityksen pohjalta on helppo lähteä selvittämään mittausprosessin eri vaiheiden epävarmuuksia.

$$Y = f(X_1, X_2, \dots, X_N) \quad (21)$$

Kaavassa esiintyvät tekijät ovat tarkkoja arvoja eikä niitä ole käytännössä koskaan saatavilla. Analyysi tehdään yleensä mittauksista saatavien tulosten avulla, jotka ovat ainoastaan funktiossa ilmenevien tekijöiden estimaatteja. Kohteen Y estimaatti merkitään y :llä ja tekijän X_i estimaatti x_i :llä ja näin ollen mittaukset voidaan ilmaista estimoidussa muodossa kaavan 22 esittämällä tavalla.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_N) \quad (22)$$

Funktion käytöstä voidaan antaa esimerkki näyttömittauksista. Näytön kontrastisuhdetta ei voida mitata suoraan yhdellä mittauksella, vaan se on laskettava jälkikäteen kahden erillisen mittauksen tuloksista. Kontrasti saadaan valkoisen, L_w , ja mustan, L_b , ruudun luminanssien suhteena kaavan 23 mukaan ja ne toimivat tässä tapauksessa funktion f parametreina.

$$CR = f(L_w, L_b) \quad (23)$$

Kaavassa 21 esiintyvät tekijät X_i kattavat kaikki suureet, joiden arvo tai epävarmuus vaikuttaa välittömästi mitattavaan kohteeseen Y . Kaavassa esiintyvät suureet voivat siis olla itsessään jo aiempien mittausten avulla johdettuja suureita. Kullekin kaavan suureelle ratkaistaan suurekohtaiset epävarmuustekijät, jotka puolestaan voivat koostua useasta virhelähteestä. Virheläh-

teiden vaikutus suureen epävarmuuteen ratkaistaan yksi kerrallaan kuhunkin virhelähteeseen parhaiten sopivalla tarkastelulla. GUM:ssa tarkastelumenetelmät on jaoteltu tyyppin A ja tyyppin B tarkasteluihin, joiden käyttötarkoitus riippuu tutkittavan virhelähteen luonteesta.

5.2.1 Tyyppin A tarkastelu

Tyyppin A tarkastelu suoritetaan tilastollisin menetelmin tutkimalla toistomittausten tuloksena muodostettua todennäköisyysjakaumaa. Tarkastelun tuloksena saadaan laskettua kokeellinen keskihajonta, joka kuvaa GUM:ssa virhelähteen aiheuttamaa epävarmuutta. GUM tekee määritelmässä sen oletuksen, että mittausmenetelmään on jo tehty tarvittavat korjaukset esimerkiksi kalibrointien sekä korjauskertoimien avulla. Korjauksien jälkeen tulee laskennassa huomioida kertoimien aiheuttama epävarmuus, sillä kertoimien ja referenssien tarkka määrittäminen on mahdotonta. Näin voidaan eliminoida tarkastelusta kaikki tunnetut systemaattiset virheet. /22/ /44/

Tässä työssä tyyppin A tarkastelu on suoritettu eristämällä kukin virhelähde mahdollisuuksien mukaan ja toistamalla kullakin asetelmalla samat mittaukset. Mittauksen tuloksista on ratkaistu mittaussarjan keskihajonta, joka ilmaisee virhelähteen aiheuttaman epävarmuuden. Koska mittausten avulla ratkaistut tunnusluvut ovat vain todellisten tunnuslukujen estimaatteja, kutsutaan tällä menetelmällä ratkaistua keskihajontaa kokeelliseksi keskihajonnaksi. Kokeellinen keskihajonta saadaan laskettua mittaussarjasta kaavojen 24, 25 ja 26 avulla.

Keskiarvo:

$$\bar{q} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n q_k \quad (24)$$

Kokeellinen varianssi:

$$s^2(q_k) = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (25)$$

Kokeellinen keskihajonta:

$$s(q_k) = \sqrt{s^2(q_k)} = \frac{1}{n-1} \sum_{k=1}^n (q_k - \bar{q})^2 \quad (26)$$

,joissa

n on mittausten lukumäärä ja
q_k on mittaussarjan k:s alkio.

5.2.2 Tyypin B tarkastelu

Tyypin B tarkastelu tehdään määritelmän mukaan muilla kuin tilastollisilla menetelmillä /22/. Tällaisia ovat muun muassa aikaisemmat mittaustulokset, aiempi kokemus mittaustuloksista, laitevalmistajien spesifikaatiot tai referenssinä käytettyjen mittausten epävarmuudet. Koska tyypin B tarkastelulla ilmenevät virhelähteet, eivät käy ilmi mittaustuloksista tilastollisin menetelmin, on mittaustulokset tunnettava hyvin jotta tyypin B tarkastelua voidaan tehdä. Oleellinen käytännön ero tyyppien A ja B tarkasteluissa on se, ettei tyypin B tarkastelulla löydetty epävarmuus muutu mittauksia toistamalla kun taas tyypin A epävarmuus pienenee keskiarvostuksen myötä. /34/

5.2.3 Yhdistetty standardiepävarmuus

Kun kaikkien tutkittavien virhelähteiden epävarmuustekijät on ratkaistu, on standardiepävarmuudet kerättävä yhteen yhdeksi epävarmuustekijäksi. Tämä yhdistetty standardiepävarmuus, u_c , ilmaisee koko mittaustuloksen epävarmuuden kattaen kaikki tunnetut mittaustuloksiin epävarmuutta tuovat tekijät. Siinä tapauksessa että tekijät ovat toisistaan riippumattomia, voidaan niiden epävarmuudet yhdistää laskemalla näiden tekijöiden neliöllinen summa (RSS, eng. *Root-Sum-Square*). Yhdistetty standardiepävarmuus saadaan näin ollen laskettua kaavalla 27.

$$u_c = \sqrt{\sum u_i^2} \quad (27)$$

,jossa

u_i on virhelähteen i aiheuttama keskihajonta.

Aina näin ei kuitenkaan ole, vaan tekijät saattavat olla toisistaan riippuvaisia. Tällaisissa tilanteissa on laskentaa yleistettävä ja riippuvuudet otettava huomioon painottamalla kunkin parametrin epävarmuustekijää funktion vastaavalla osittaisderivaatalla. Painotetut tekijät yhdistetään yhdistetyksi varianssiksi neliöllisellä summalla, joka on epävarmuuden neliö. Yleistetty yhdistetyn varianssin laskentakaava on esitetty alla.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (28)$$

Laskentaa voidaan nyt soveltaa esimerkkinä käytettyyn kontrastisuhteen epävarmuuteen, joka on riippuvainen sekä mustan että valkoisen ruudun luminanssista.

$$\begin{aligned}
 u_c^2(CR) &= \left(\frac{1}{L_b}\right)^2 u^2(L_w) + \left(-\frac{L_w}{L_b^2}\right)^2 u^2(L_b) \\
 &= \left(\frac{u(L_w)}{L_b}\right)^2 + \left(-\frac{L_w u(L_b)}{L_b^2}\right)^2 \\
 &= \frac{u(L_w)^2}{L_b^2} + \frac{L_w^2 u(L_b)^2}{L_b^4} = \frac{L_b^2 u(L_w)^2 + L_w^2 u(L_b)^2}{L_b^4}
 \end{aligned}$$

Varianssista saadaan laskettua epävarmuus eli keskihajonta laittamalla varianssi neliöjuureen.

$$u_c(y) = \frac{\sqrt{L_b^2 u(L_w)^2 + L_w^2 u(L_b)^2}}{L_b^2}$$

5.2.4 Laajennettu epävarmuus

Yllä laskettu yhdistetty standardiepävarmuus kattaa jakaumassa yhden keskihajonnan levyisen alueen tuloksen molemmiin puolin ja sitä kutsutaan luottamusväliksi. Käytännössä tämä tarkoittaa sitä, että mitattavan kohteen todellinen arvo sisältyy 68 % todennäköisyydellä epävarmuuden ilmaisemalle luottamusvälille kun oletetaan tulosten olevan normaalijakautuneita. 68 % on kuitenkin moneen tarkoitukseen liian pieni osuus, jolloin epävarmuustekijää on laajennettava.

Epävarmuustekijän laajentaminen tapahtuu kertomalla alkuperäinen epävarmuustekijä, u , kertoimella k . Kerroin k kertoo kuinka moninkertainen luottamusvälin leveys on standardiepävarmuuteen verrattuna ja sen arvo valitaan käyttötarkoituksesta riippuen yleensä lukujen kaksi ja kolme väliltä. Laajennettu epävarmuus, U , saadaan laskettua kaavalla 29.

$$U = k \cdot u \tag{29}$$

Normaalijakauman tapauksessa esimerkiksi kerroin $k=2$, tarkoittaa sitä, että mitattavan kohteen todellinen arvo asettuu laajennetun epävarmuustekijän määrittelemälle luottamusvälille 95 % todennäköisyydellä. Vastaavasti kun $k=3$, asettuu todellinen arvo luottamusvälille 99 % todennäköisyydellä. Yleensä mittalaittevalmistajat määrittelevät spesifikaatioissaan epävarmuuden kertoimella $k=2$, mutta se on varmistettava erikseen kultakin valmistajalta ennen tulosten arviointia. /44//22//62/

5.3 Muita menetelmiä

Mittausmenetelmien arvioinnissa on haastavana tekijänä menetelmien hajanaisuus. Erilaisia standardeja ja muita oppaita on olemassa lukuisia ja se aiheuttaa sekaannusta tuloksien tulkitsemisessa. Juuri tästä syystä tutkimuksessa on noudatettu ensisijaisesti ISO:n GUM oppaan esittämää termistöä ja menetelmiä, jotka on esitelty tarkemmin yllä. Mittauksia tehdessä on kuitenkin hyvä tiedostaa vaihtoehtoisten lähteiden olemassaolo ja tutustua niihin hieman tarkemmin, sillä muuten kirjallisuudessa esiintyvien termien kriittinen tarkastelu ei ole mahdollista.

Tässä luvussa on esitelty yleisimpiä lähteitä mittausprosessien arvioimiseen ja poimittu esiin niiden keskeisimmät termit sekä menetelmät mittausprosessin analysoinnissa. Lähteet sisältävät sekä standardeja että laajassa käytössä olevia oppaita. Sekaannusta lisäävät juuri nämä oppaat, kuten esimerkiksi GUM, jotka ylittävät suosiossaan viralliset mittausstandardit.

5.3.1 VESA FPDmV2 /62/

VESA FPDmV2 on ensisijaisesti litteiden näyttöjen mittaukseen suunniteltu standardi. Se sisältää kuitenkin huomattavan määrän tietoa myös mittauksen virhelähteistä ja niiden tutkimisesta. FPDmV2 -standardin epävarmuutta käsittelevä osio on tarkoituksella koottu useista laajassa käytössä olevista teoksista, joista merkittävimpinä voidaan mainita aiemmin luvussa 5.2 esitelty GUM sekä ANSI:n ja NIST:n julkaisut. Laajalla lähdemateriaalilla on pyritty perustelemaan valittua sanastoa, joka on aikaisemmin ollut sekavaa ja monimerkityksistä. FPDmV2:n epävarmuus osio nojaa siis vahvasti GUM:iin ja ne sisältäväkin käytännössä samat menetelmät epävarmuuden arviointiin. Tämän ansiosta FPDmV2:ssa esiteltyjä menetelmiä on hyödynnetty myös tässä työssä.

GUM:ssa esitelty epävarmuusanalyysi on hyvin yleistettävissä ja se voidaan suorittaa samaan tapaan riippumatta siitä minkä alan mittauksista on kyse. Haasteita tuottavat kuitenkin eri alojen mittausprosessien virhelähteiden tunnistaminen ja niiden selvittäminen. FPDmV2:n suurin arvo tulee siitä että se on tässä esitellyistä lähteistä ainoa, joka on suunnattu nimenomaan näyttömittauksiin. Alakohtaisuutensa ansiosta FPDmV2:ssä on voitu määritellä itse termien lisäksi spesifisiä virhelähteitä sekä menetelmiä niiden selvittämiseen. Standardissa mainittuja

virhelähteitä ovat muun muassa erilaiset linssiheijastukset, mittausalueen koko, integrointiajat, epälineaarisuus sekä polarisaatio.

Lisäksi FPDMv2 tarjoaa myös raja-arvoja epävarmuudelle ja toistettavuudelle, joita mittausjärjestelmän tulee noudattaa. Luminanssimittauksissa kertoimella kaksi laajennettu luminanssi-arvojen epävarmuus saa FPDMv2:n mukaan olla korkeintaa $\pm 5\%$ ja toistettavuus viiden minuutin aikajaksolla $\pm 0,5\%$. Värikoordinaatille kertoimella kaksi laajennettu epävarmuus on määrätty standardin mukaan olevan korkeintaan $\pm 0,002$.

FPDMv2-standardin mittaukset perustuvat oletukseen, että mittauksen toistettavuus on hyvä. Toistettavuus tarkistetaan toistomittauksella, joka voidaan suorittaa luminanssi-, illuminanssi- sekä värikoordinaattimittauksille. Mittaukset tehdään täysin valkoiselta ruudulta toistamalla sama mittaus 10 kertaa mahdollisimman nopeasti ja saaduista tuloksista lasketaan keskihajonta kaavan 26 avulla. Mikäli keskihajonta noudattaa annettua toistettavuusehtoa, todetaan systeemin olevan tältä osin riittävä eikä toistettavuusarvoa käytetä tämän jälkeen. Mikäli ehto ei täyty, tulee mittausjärjestelmä ottaa perusteellisempaan tarkasteluun ja selvittää mikä aiheuttaa huonon toistettavuuden. Mahdollisia tekijöitä, jotka voivat vaikuttaa toistettavuuteen ovat muiden muassa liian lyhyt warmup sekä laboratorion liian korkea lämpötila.

Toistettavuusehdon tarkistuksen jälkeen mittausprosessin epävarmuusanalyysi viedään läpi GUM:n ohjeiden mukaisesti. Virhelähteiden arviointiin käytetään FPDMv2:n esittämiä menetelmiä, sillä niistä saadut tulokset soveltuvat suoraan GUM:n epävarmuusanalyysiin. Tuloksena analyysistä saadaan yhdistetty mittausepävarmuus, jota voidaan laajentaa tarpeen vaatiessa.

5.3.2 ISO 5725-2 /24/

ISO 5725-2-standardi määrittelee perusteellisen menetelmän standardoidun mittauksen toistettavuuden ja uusittavuuden selvittämiseen. Menetelmä kattaa laajan otoksen tutkimukselle oleellisimmista tekijöistä kuten tutkittavat virheparametrit, ennakkovaatimukset, henkilöstön, mittauskohteiden valmistelut ja perusteellisen tulosanalyysin. Se kattaa siten huomattavista laajemman alueen mittauksen arviointiprosessista kuin muut tässä työssä mainitut menetelmät, mutta toisaalta se ei tuota yhtä yksityiskohtaisia tuloksia.

Standardin pääpaino on laboratorioden välisen toistettavuuden selvittämisessä ja parantamisessa. Yksittäisen laboratorion hyvyttä tutkitaan vain toistettavuuden avulla, joka selvitetään yksinkertaisen toistokokeen avulla. Tutkimukseen osallistuvien laboratorioden tulokset yhdistetään yhteen taulukkoon, jonka avulla lasketaan globaalille mittausmenetelmälle tunnusluvut. Tulosanalyysiin on sisällytetty vuokaavio, jonka perusteella tulosdatasta karsitaan poikkeavuuksia. Tapauksesta riippuen, kaavio opastaa pudottamaan niin yksittäisiä tuloksia kuin kokonaisia laboratorioitakin.

ISO 5725-2 standardi lähestyy laboratorioden välisen näkökulmansa ansiosta mittausvirhettä muista lähteistä poikkeavalla tavalla. Se esittää mitatun arvon kolmen tekijän summana kaavan 30 mukaisesti.

$$y = m + B + e \quad (30)$$

,jossa

m on mittauksien keskiarvo,
b on laboratoriokohtainen poikkeama ja
e on satunnaisvirhe.

ISO 5725 standardissa määritellään kaava kaikki laboratoriot kattavan mittausprosessin varianssille. Varianssi lasketaan laboratorioden välisen varianssin ja laboratoriokohtaisten varianssien keskiarvon neliöllisenä summana kaavan 31 mukaisesti.

$$s_R^2 = s_L^2 + s_r^2 \quad (31)$$

,jossa

s_R on mittauksen toistettavuus varianssi,
 s_L on laboratorioden välinen varianssi ja
 s_r on laboratoriokohtaisten varianssien aritmeettinen keskiarvo.

5.3.3 NIST/SEMATECH Engineering Statistics Handbook /44/

NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods on National Institute of Standards:n (NIST) ja SEMATECH:n yhteistyönä julkaisema opas tilastolliseen analyysiin tutkijoille ja insinööreille. Se kattaa laajan alueen teollisuuden tuotantoprosessin vaiheiden tilastollisista menetelmistä ja tarjoaa siten lukijalle työkalut prosessin karakterisointiin ja tehostamiseen.

Kirjan toinen luku käsittelee mittausprosessin karakterisointia. Luku sisältää mm. mittausprosessin karakterisoinnin, kalibroinnin ja epävarmuusanalyysin, joista epävarmuusosio vastaa laajuudeltaan GUM:a sisältäen menetelmät toistettavuuden, uusittavuuden sekä epävarmuuden määrittämiseen. Oppaassa esitellyt menetelmät noudattavat suurilta osin GUM:ssa esitetyjä menetelmiä, mutta etenkin toistettavuuden määritelmä poikkeaa GUM:n vastaavasta.

GUM:ssa toistettavuus määritellään peräkkäisten mittausten yhtenevyytenä samoissa olosuhteissa ja lyhyellä aikavälillä. NIST:n opas puolestaan suosittelee mittaussarjojen uusimista monta kertaa päivässä, monena eri päivinä ja eri mittakohteilla. Jälkimmäinen menetelmä tuottaa oppaan mukaan luotettavamman arvion mittaustulosten toistettavuudelle. GUM:n lyhyt aikaväli on perusteltu valinta, sillä pitkällä aikavälillä on mahdotonta pitää mittauksiin vaikuttavat muuttujat vakioina. Esimerkiksi olosuhdemuuttujat muuttuvat väistämättä päivien välillä, jolloin toistettavuus ei enää kuvaa pelkän mittalaitteen kykyä toistaa mittauksia vakaasti.

5.3.4 Analysis of Variance, ANOVA /64/

ANOVA on puhtaasti tilastotieteellinen menetelmä erilaisten toistokokeiden ja mittausarvojen analysointiin. Sitä on käytetty jo 40-luvulta asti psykologian tutkimuksessa, mutta myöhemmin sen käyttö on laajentunut myös muille aloille. ANOVA:lla voidaan tutkia yksittäisen muuttujan vaikutusta saatuun mittaustulokseen keräämällä useita mittausarvoja eri muuttujan arvoilla ja tutkimalla sarjojen tilastollista käyttäytymistä.

ANOVA:lla tehty analyysi alkaa nollahypoteesin määrittämisellä, jonka mukaan muuttujalla ei ole vaikutusta tuloksiin. Hypoteesin pitäessä paikkansa, tulisi mittausarvojen keskiarvojen olla kaikilla muuttujan arvoilla lähellä toisiaan. Jos näin ei ole, voidaan nollahypoteesi todeta paikkaansapitämättömäksi.

ANOVA:n toiminta perustuu vaihteluiden tutkimiseen. Siinä verrataan usean sarjan sisäisiä vaihteluita sarjojen keskinäisiin vaihteluihin. Sarjojen sisäiset vaihtelut ajatellaan satunnaisen virheen aiheuttamaksi kun taas sarjojen välisille vaihteluille voidaan löytää syy sarjojen välisistä muuttujista. ANOVA antaa tuloksena F-arvon, joka kertoo näiden vaihteluiden keskinäisestä suhteesta. Jos sarjojen välinen vaihtelu on suhteessa suurta verrattuna sarjan sisäiseen vaihteluun, on F-arvo suuri. Näin ollen F-arvon ollessa suuri, voidaan sarjojen välisellä muuttujalla todeta olevan vaikutusta tuloksiin.

Koska F-arvo on yhtäläillä altis satunnaisen vaihtelun seurauksille, on sille määritelty erikseen arvon merkittävyyttä kuvaava suure, p-arvo. Jos p-arvo alittaa sovitun raja-arvon, voidaan todeta että F-arvon tuottama johtopäätös on merkittävä. Yleisesti käytetty raja-arvo p-arvolle on 0,05, mutta myös tiukempia rajoja tiedetään käytettävän.

5.4 Virhelähteet

Virhelähteitä ovat kaikki tekijät, jotka aiheuttavat poikkeamia mittaustuloksiin. Poikkeaman synnyttämä virhe voi olla joko satunnaista tai systemaattista. Satunnaista virhettä voidaan yleensä poistaa keskiarvoistamalla ja systemaattista virhettä laskennallisella tai kokeellisella kompensoinnilla. GUM:n menetelmän mukaisesti kutakin virhelähdettä tutkitaan joko tyyppin A tai tyyppin B tarkastelulla.

Tässä työssä pääpaino on tyyppin A tarkasteluissa, sillä tyyppin B tarkastelulla selviävät virheet ovat yleensä huomattavasti vaikeampia paikallistaa ja mallintaa ilman syvempää tuntemusta prosessista. Tyyppin B lähde tuottaa kiinteän virheen jokaiseen mittaukseen eikä sitä näin ollen voida havaita toistomittauksin, vaan se pitää tunnistaa ja kompensoida muilla menetelmillä [63]. Ohessa on esitetty tyyppillisiä esimerkkejä tyyppin A ja B virhelähteistä:

Tyyppin A tarkastelulla tutkittavia virhelähteitä ovat muun muassa:

- Vaihtuvat mittalaitteet
- Vaihtuvat mittaajat
- Vaihtuvat mittaasetelmat
- Vaihtuvat kirkkausalueet
- Ohjelmiston asetukset

Tyyppin B tarkastelulla löytyviä virhelähteitä ovat esim.:

- Poikkeavat kalibroitireferenssit
- Epätarkat vakiot laskukaavoissa
- Kiinteän mittalaitteen virheellinen asemointi
- Pohjasignaali joka mittauksiin tulee mitattavasta kohteesta riippumatta
- Hajavallo pimiössä

Virhelähteet on pyrittävä eristämään muista lähteistä mahdollisimman hyvin, jotta niitä voidaan kunnolla mallintaa eikä samaa virhelähdettä huomioida useaan kertaan. Tämä tapahtuu vakioimalla kaikki muut muuttujat ja muuttamalla vain tutkittavaa lähdeä. Tässä työssä tyyppin A virhelähteistä tutkitaan mittaajia, mittausetäisyyttä, integrointiaikaa, kirkkausalueita sekä linssihäikäisyä. Lisäksi tyyppin B tarkastelulla selvitetään kalibroinnin sekä polarisaation vaikutus mittaustuloksiin.

Mittaajien välisiä eroja mittaussuorituksissa tutkittiin ohjeistamalla tutkimuksen koehenkilöt kirjallisen mittaussoppan avulla. Opastuksen jälkeen mittaajat suorittivat mittaukset ohjeiden mukaisesti ja tulokset kirjattiin ylös. Ohjeet käsittivät koko mittaussuorituksen lähtien laitteiden lämmittelystä ja alustuksista aina itse mittauksen suorittamiseen. Tulosten pohjalta tutkittiin

mittaajan vaikutusta mittaustuloksiin sekä mahdollisia puutteita ohjeistuksessa. Erot mittaajien välisissä mittaustuloksissa voivat syntyä lukuisista eri tekijöistä, joita on vaikea yksilöidä erikseen. Tutkimalla mittaajien välisiä eroja, voidaan todeta tulosten kattavan useita tekijöitä kuten esimerkiksi eroavaisuudet näytön asettelussa, pimiön sulkemisessa, mittaussuopeudessa ja niin edelleen. Näitä seikkoja ei siis tarvitse enää tutkia erikseen, vaan mittaajan tuottama epävarmuus kattaa ne kaikki.

Tutkimuksessa käytettiin mitattavina näyttöinä kahta eri tekniikoihin perustuvaa näyttöä. LCD- ja OLED-näytöt tuottavat valon ja värit hyvin erilaisilla menetelmillä, minkä seurauksena näytön spektrit poikkeavat toisistaan suuresti vaikka värit näyttäisivätkin ihmissilmälle samankaltaisilta. Etenkin teräväpiikkiset spektrikomponentit, kuten OLED-näyttöjen värit, ovat haasteellisia mitattavia ja saattavat tuoda esiin heikkouksia mittalaitteissa.

Tyypin B tarkastelumenetelmiin lasketaan epävarmuustekijöiden selvittäminen ulkoisten tahojen avulla. Tällaisia tahoja ovat esimerkiksi mittalaitteiden valmistajat sekä kalibrointilaboratoriot, jotka tarjoavat omia epävarmuusarvioitaan mittaussuureille. Laitteelle on määriteltävä valmistajan toimesta jokin mittaustarkkuus, minkä lisäksi kalibroinnissa syntyy lisää epävarmuutta. Myös tällaiset epävarmuustekijät tulee huomioida analysoitaessa lopullista yhdistettyä epävarmuutta.

Tyypin A ja B tarkasteluiden lisäksi työssä seurattiin koko mittausprosessin pitkän ajan vakaudesta päivittäisillä kontrollimittauksilla. Laboratorion mittausolosuhteet on saatava pidettyä mahdollisimman vakioituina riippumatta säästä, kellonajasta ja muista tekijöistä, joihin ei voida vaikuttaa. Tavoitearvona kontrollimittauksille voidaan pitää haarukkaa, jossa mittausten arvot vaihtelevat mittalaitteen toistettavuusehdon puitteissa.

5.5 Aiempia tutkimuksia

Mittausepävarmuuden tutkiminen on tärkeä asia jokaiselle mittauslaboratoriolle. Se tehdään kuitenkin yleensä laboratorion oman henkilökunnan toimesta eivätkä sen tulokset ole kovin hyvin yleistettävissä muihin laboratorioihin. Tästä johtuen epävarmuusanalyysiin liittyviä tutkimuksia julkaistaan harvoin eivätkä samat menetelmät välttämättä sovellu muihin laboratorioihin. Ohessa on kuitenkin esitelty muutama näyttöjen mittaukseen liittyvä epävarmuusanalyysi, joista käy ilmi yleisimpiä näyttömittauksissa ilmeneviä epävarmuuksia.

Vuonna 2006 Samu Kallio tutki diplomityössään optisen mittaustarkkuuden parantamista kalibrointiprosessin ja epävarmuusanalyysin avulla. Työssä vertailtiin eri mittalaitteiden suorituskykyä, tutkittiin virhelähteiden ja kalibroinnin vaikutusta sekä selvitettiin mittausprosessin kokonaisepävarmuus luminanssille, kontrastille sekä värikoordinaateille. Virhelähteiksi työhön oli valittu mittalaite, vahvistus, saturaatio, putkien ja aukkojen koot ja asennot sekä polarisaatio. Lisäksi Kallio selvitti prosessissa käytettyjen kalibrointilähteiden vaikutusta mit-

tausepävarmuuteen. Kertoimella $k=2$ laajennetuksi kokonaisepävarmuudeksi tutkimuksen mitausprosessille saatiin $\pm 2,26\%$ luminanssille, $\pm 3,19\%$ kontrastille sekä spektristä riippuen väliltä $\pm 0,0005$ ja $\pm 0,0047$ värikoordinaateille. /26/

Tutkimuksessa kontrastin epävarmuus johdettiin luminanssimittausten epävarmuudesta kaavan 27 mukaan. Siinä ei kuitenkaan huomioitu matalilla kirkkauksilla korostuvien epävarmuuksien vaikutusta luminanssi- ja kontrastimittauksiin. Tekijät kuten pohjavirta, kohina, kvantisointi- ja pyörästysvirheet korostuvat nimenomaan matalilla kirkkausarvoilla ja ne olisi syytä selvittää erikseen.

Juha Nieminen tutki diplomityössään nestekidenäyttöjen karakterisointia. Työ käsitteli valoopin ja näyttötekniikan lisäksi näyttömittalaitteita sekä niissä esiintyviä epävarmuuksia. Mittalaitteena Nieminen käytti työssään Konica Minolta CS-1000 spektroradiometriä ja sen suorituskykyä arvioitiin sekä luminanssi- että aallonpituusmittausten epävarmuuksien avulla.

Luminanssimittauksille tutkimuksessa tehtiin lineaarisuuskoee, jossa mitattiin integroivaan palloon sijoitettua lampua neljällä eri kirkkaudella. Sama mittaus toistettiin neljän kuukauden jälkeen. Tuloksia verrattiin kalibroidun referenssimittarin tuloksiin ja vertailun pohjalta luminanssiarvoille määriteltiin korjauskertoimeksi 1,002. Työssä esitettyjen tulosten perusteella oikea kerroin on kuitenkin $1/1,002$, sillä tutkitun mittarin ja referenssimittarin tulosten välinen suhde, $L_{CS-1000}/L_{Reference}$, sai kaikilla kirkkauksilla arvon 1,002. Näin ollen kertomalla tutkitun mittarin tulokset korjauskertoimella $1/1,002$ saadaan tulokseksi referenssimittarin antamat arvot.

Luminanssimittausten epävarmuus selvitettiin yhdistämällä referenssimittalaitteen epävarmuus sekä mittalaitteen ja referenssilaitteen välisen toistettavuuden arvot yhdeksi epävarmuustekijäksi. Referenssilaitteen epävarmuus, $0,5\%$, oli otettu valmistajan tarjoamista teknisistä tiedoista ja laitteiden välinen toistettavuus, $0,3\%$, saatiin tehtyjen mittausten tuloksena. Näin ollen kertoimella kaksi laajennetuksi luminanssimittausten epävarmuudeksi saatiin loppujen lopuksi $1,2\%$.

Aallonpituusmittausten tarkkuutta oli tarkasteltu kuuden spektriipiikin avulla. Kunkin piikin aallonpituudet mitattiin tutkittavalla laitteella ja tulosten pohjalta kehitettiin kolmannen asteen polynomikorjausfunktio. Funktion avulla korjatuille tuloksille saatiin suurimaksi virheeksi $0,07\text{nm}$, jonka pohjalta Nieminen määritteli kertoimella 2 laajennetuksi epävarmuudeksi $0,14\text{nm}$. Menetelmä poikkeaa Kallion esittelemästä menetelmästä, jossa kaikki mitatut aallonpituudet vaikuttivat epävarmuusanalyysiin. Voidaankin sanoa, että Niemisen analyysi edustaa enemmän worst-case-scenario -tilannetta kuin todellista mittaasepävarmuutta. Värikoordinaattien epävarmuuksiksi Nieminen sai $0,0009$ ja $0,0006$ koordinaateille x ja y .

Katselukulmien epävarmuusanalyysissä Nieminen yhdisti orientaatiosta syntyvän epävarmuuden luminanssimittausten epävarmuuteen. Orientaatiosta syntyvän epävarmuuden suuruuden arvioitiin olevan 1° ja $1,2\%$ epävarmuus luminanssimittauksissa johti $0,5^\circ$ epävarmuuteen kat-

selukulmamittauksissa. Tekijöiden yhdistetyksi epävarmuudeksi Nieminen sai näin ollen 2,2°. Työn kaikki epävarmuudet oli määritelty laajennettuina kertoimella $k=2$. /43/

Vuonna 2001 NIST, julkaisi epävarmuusanalyysinsä liittyen laitoksen spektrometriiden ja kolorimetriiden kalibrointilaitteistoon. Epävarmuus oli selvitetty referenssinä pidetyille spektrometriille, jonka toiminta perustui monokromaattoriin. Laitteen epävarmuus oli jaettu osatekijöihin joiden yhteisvaikutuksena selvitettiin yhdistetty mittausepävarmuus. Osatekijöinä tutkimuksessa olivat aallonpituustarkkuus, kaistanpäästön vaihtelut, hajavalo, polarisaation vaikutus, lämpötilariippuvuus sekä kohina. Kullekin tekijälle määriteltiin kertoimella kaksi laajennetut epävarmuustekijät. Koenäyttöinä tutkimuksessa käytettiin CRT- ja LCD-näyttöjä joiden spektraalisen jakaumat poikkesivat huomattavasti toisistaan. Tuloksena kokeesta saatiin spektrometriin laajennetuksi epävarmuudeksi 1% luminanssille sekä 0,001 x- ja y-värikoordinaateille. /38/

Niemisen ja NIST:n tutkimukset tuovat hyvin esille epävarmuusanalyysin yhden kompastuskiven. Tutkimuksen tuloksien perusteella Helsingin yliopiston valaistustekniikan laboratorion monikanavainen spektrometri on värimittauksissa tarkempi kuin yhdysvaltojen kansallisen standardointilaboratorion skannaava referenssispektrometri. Tulokset johtavat harhaan siitä syystä että epävarmuusanalyysit on suoritettu aivan erilailla.

Yhdistetty epävarmuus lasketaan virhelähteiden synnyttämien epävarmuustekijöiden neliöllisenä summana. Näin ollen jokainen uusi tutkittu virhelähde vain kasvattaa lopullista mittausepävarmuutta. Toisinsanoen, rajallisin resurssein tehty epävarmuusanalyysi voi hyvin antaa heikommalle mittarille selvästi pienemmän epävarmuuden kuin perusteellisesti tehty analyysi tarkemmalle laitteelle. Tästä syystä olisi syytä luoda standardoitu epävarmuusanalyysi, joka on suunnattu erityisesti näyttöjenmittalaitteille. Tällöin eri laboratorioiden väliset epävarmuusluokat olisivat vertailukelpoisia ja siten huomattavasti informatiivisempia.

6 NÄYTTÖTEKNIikka

6.1 Käyttötarkoitus

Näyttöjä käytetään nykypäivänä lukuisissa toisistaan selvästi poikkeavissa sovelluksissa ja käyttötarkoituksesta riippuen myös niiltä vaadittavat ominaisuudet vaihtelevat huomattavasti. Näytöt voivat olla kooltaan millimetreistä aina metrien mittaluokkaan ja resoluutiot vaihtelevat muutamista sadoista aina miljooniin pikseleihin. Tärkein tekijä näyttövalinnoissa on siis näytön käyttötarkoitus ja tässä työssä painopisteenä ovat mobiilit näytöt.

Nykypäivän mobiileissa laitteissa tärkeimpiä ominaisuuksia ovat pieni koko ja vähäinen virrankulutus, mutta myös multimedian toistolle oleelliset ominaisuudet nousevat jatkuvasti suurempaan rooliin. Parhaiten tällä hetkellä yllä mainitut ehdot voidaan täyttää LCD- ja OLED-näytöillä. Molemmat ovat litteitä tekniikoita ja pienet pikselikoot sopivat erinomaisesti kannettaviin laitteisiin, joissa halutaan mahdollistaa mahdollisimman paljon informaatiota pienelle näytölle.

6.2 Nestekidenäyttö, LCD

Tämän hetken yleisin näyttötekniikka kannettavissa laitteissa on nestekidenäyttö (LCD, *eng. Liquid Crystal Display*), joka on kilpailijoihin verrattuna vanha ja kypsytynyt teknologia. Se on nyt yli 40 vuoden kehitystyön tuloksena pisteessä, jossa se pystyy vastaamaan markkinoiden asettamiin vähimmäisvaatimuksiin niin mekaanisten, sähköisten kuin optisten ominaisuuksien puolesta. Ominaisuuksien lisäksi tekniikan kypsyys on johtanut hyvin tunnettuihin ja luotettaviin valmistusmenetelmiin, joiden avulla näyttöjä voidaan valmistaa kustannustehokkaasti ja tasalaatuisesti.

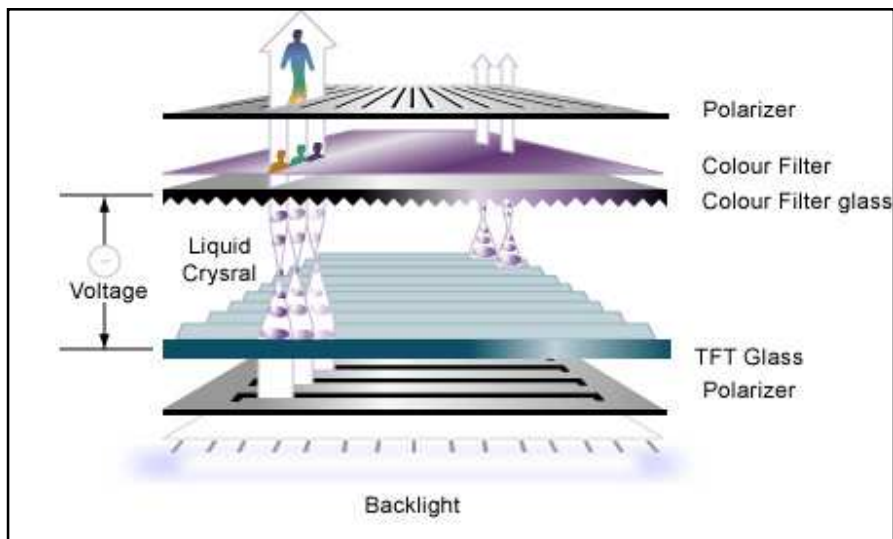
6.2.1 Nestekide

LCD-näyttö perustuu nimensä mukaisesti nestekidekerrokseen, jolla moduloidaan näytettävää valoa. Nestekide tarkoittaa aineen olotilaa, jossa se on nesteen ja kiinteän aineen välimaastossa. Tässä tilassa aine on koostumukseltaan juoksevaa, mutta kiteillä on kuitenkin järjestyksenmukainen orientaatio. Nestekiteinen materiaali on anisotrooppista, mikä tarkoittaa sitä että sen optiset, magneettiset sekä sähköiset ominaisuudet ovat suunnasta riippuvaisia. /5/ /15/

Anisotrooppisuudella on kaksi tärkeää seurausta nestekiteen ominaisuuksiin ja sitä kautta sen käyttöön näyttötekniikassa. Ensinnäkin nestekiteet ovat sähköisiä dipoleja, mikä mahdollistaa kiteiden kääntelemisen sähkökentän avulla. Nestekiteillä on kiinteän aineen tapaan olemassa suunta, mutta sitä voidaan vaihtaa säätämällä nestekiteille tuotua sähkökenttää. Toisekseen eriasennoissa olevat nestekiteet reagoivat elektromagneettiseen säteilyyn kuten valoon erilalla. Suuntariippuvaiset optiset ominaisuudet määrittävät kuinka nestekiteelle saapuva valo taittuu, hajoo tai heijastuu kiteessä /5/.

6.2.2 LCD-näytön rakenne

Perinteinen LCD-paneeli on transmissiivinen eli se ei itsessään tuota valoa vaan ainoastaan säätelee sitä kuinka sille tuotu valo kerroksessa etenee. Paneeli tarvitsee siten toimiakseen ulkoisen valonlähteen, joka voi olla tarkoitukseen kehitetty taustavalo tai ympäristöstä välittyvää hajavaloa. Perinteiset pöytä- ja mobiilinäytöt hyödyntävät taustavaloa, jonka eteen LCD-paneeli on sijoitettu. Nestekiteet eivät kuitenkaan yksin pysty säättämään taustavaloa vaan LCD-näyttö koostuu useista kerroksista. Yleinen rakenne nykyaikaisessa LCD-näytössä on esitetty tarkemmin kuvassa 15.



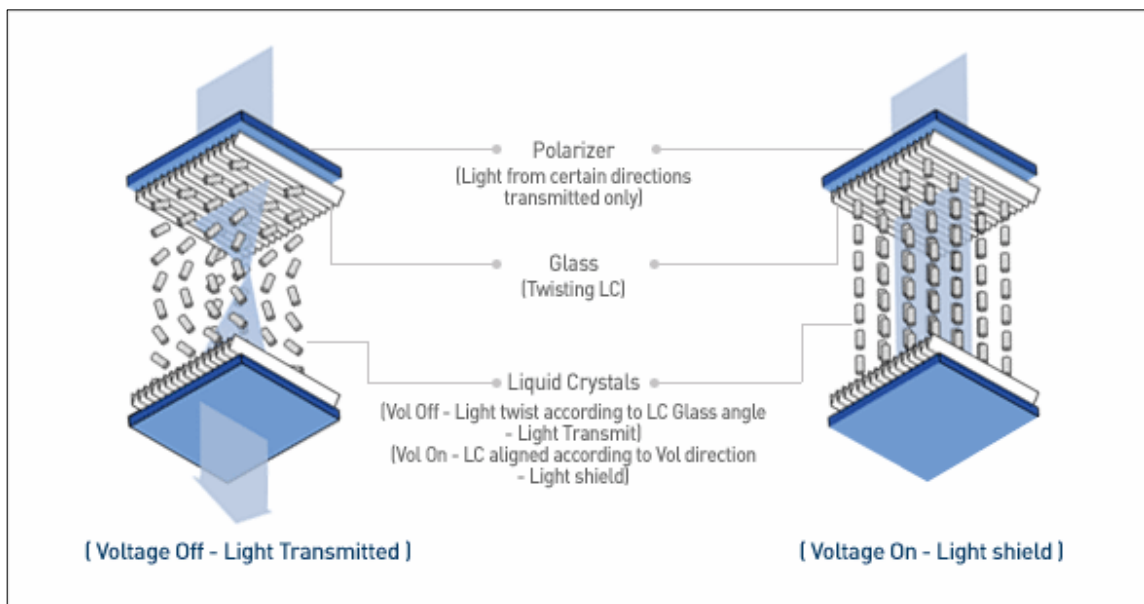
Kuva 15. LCD-näytön kerrosrakenne /59/

Pinon alimmaisena on taustavalo, jolla valaistetaan nestekidekerrosta. Taustavalon edessä on polarisaattori, jolla taustavalo polarisoidaan ennen kuin se viedään nestekiteille. Nestekidekerros on sijoitettu kahden lasilevylle ladotun elektrodin väliin. Elektrodien tehtävänä on säädellä nestekiteiden orientaatiota, minkä seurauksena kiteille saapuvan valon polarisaatio suuntaa voidaan säädellä. Nestekidekerroksen edessä on toinen polarisaattori, jonka polarisaatio suunta on kohtisuorassa taaempaan polarisaattoriin nähden. Lisäksi värinäytöissä pinon on lisätty värisuotimet kullekin osavärille, jotka päästävät lävitseen vain kyseisen värin aallonpituusalueen valoa.

Taustavalo on siis LCD-näytölle keskeinen elementti ja se onkin yksi jatkuvan kehityksen kohteista. Taustavalona voidaan käyttää muun muassa katodisädeputkia, valodiodeja, LED:jä tai OLED-paneelia. Taustavalon tärkeimpiä ominaisuuksia ovat spatiaalinen tasaisuus sekä laaja aallonpituusalue. Tasaisuus näkyy näytöllä kirkaustasojen vaihteluina ja sitä voidaan parantaa diffuusoreiden ja valonohjainten avulla. Valon aallonpituusjakauma puolestaan asettaa rajat näytön värientoistolle, sillä LCD-näytöissä värit muodostetaan suodattamalla taustavalosta pois muut paitsi halutut aallonpituudet. Mitä lähempänä tavoiteltuja aallonpituuksia taustavalon aallonpituushuiput ovat, sitä kirkaampaan kuvaan ja parempaan värientoistoon

näyttö kykenee. Mobiilinäyttöissä yleisin menetelmä on käyttää LED:jä, joita voidaan sijoittaa näytön taakse yksi tai useampia. LED:ien suurin etu on niiden pieni virrankulutus, mikä on yksi tärkeimmistä tekijöistä mobiililaitteita suunniteltaessa.

Itse kuva tuotetaan LCD-näyttöissä moduloimalla polarisoidun taustavalon polarisaatiosuuntaa. Esimerkkinä voidaan käyttää suosittua *twisted nematic*-tekniikkaa, jossa nestekiteet ovat kiertyneet nestekidekerroksessa spiraalin muotoon. Kiertyneisyyden ansiosta nestekiteet kääntävät taustavalon polarisaatiosuunnan, jolloin valo läpäisee myös jälkimmäisen polarisaattorin ja tuottaa kirkkaan kuvan. Kun kerrokseen tuodaan tarpeeksi suuri jännite, kääntyvät nestekiteet sähkökentän suuntaisiksi eikä valon polarisaatiosuunta enää muutu. Nyt kun valo saapuu jälkimmäiselle polarisaattorille, on sen polarisaatiosuunta kohtisuorassa polarisaattoriin nähden. Tämän seurauksena valo suodattuu polarisaattorissa lähes täysin tuottaen tuloksena tumman kuvan. Harmaasävyt tuotetaan LCD-näytöllä kääntämällä nestekiteitä niin, että taustavalon polarisaatio kääntyy vain osittain. Tällöin jälkimmäinen polarisaattori päästää lävitseen vain sen osan valosta, jonka polarisaatiosuunta on polarisaattorin hilan suuntaista. LCD-näytön toimintaperiaate on esitetty kuvassa 16.

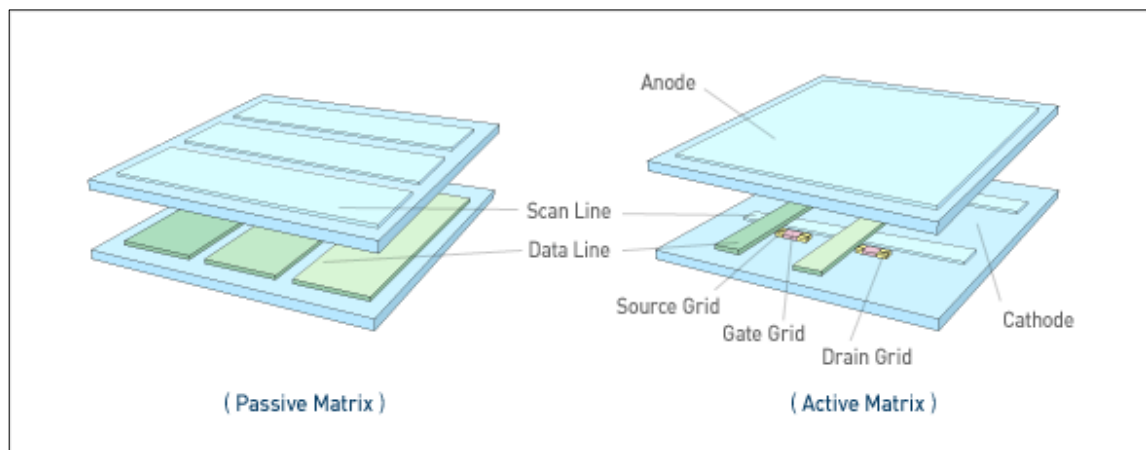


Kuva 16. LCD-näytön toimintaperiaate /52/

Nestekiteitä ohjataan sähkökentällä, joka muodostetaan erikseen kullekin osapikselille. Sähkökentän voimakkuus määrää kentässä olevien nestekiteiden asennon ja siten myös näytettävän alkion kirkkauden. Tätä kutsutaan LCD:n ohjaamiseksi ja se voidaan toteuttaa kahdella tavalla, aktiivi- tai passiivimatriisilla. Ensimmäiset LCD-näytöt toteutettiin passiivimatriisi ohjauksella, jossa nestekidekerros on sijoitettu johdinmatriisiin ja sarakeohjainten väliin. Johdinten avulla jännite tuodaan erikseen kullekin pikselille, jossa signaalia on pidettävä niin kauan että kite on kääntynyt haluttuun asentoon. Kun signaali siirtyy seuraavaan pikseliin, katoaa pikseliin tuotu jännite ja kiteet palaavat hiljalleen alkuasentoon. Pikselit käydään läpi yksi kerrallaan skannaamalla pikselit rivi riviltä. Passiivimatriisit ovat helppoja ja halpoja

valmistaa, mutta ne ovat toiminnaltaan hitaita ja johtimien välillä esiintyy ylikuulumista (*eng. cross talk*). /28/

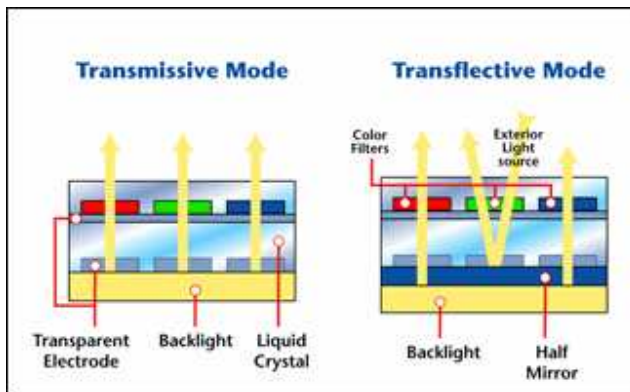
Tuorempi menetelmä näytön ohjaukseen on aktiivimatriisi, jossa kullakin pikselillä on oma kytkimenä toimiva transistori. Transistori kytkee vastaavaan pikseliin ohjaussignaalin mukaisen jännitteen ja säilyttää sen kun ohjaussignaali etenee seuraavaan pikseliin. Pikselikohtaisten transistorien ansiosta pikselit voidaan päivittää nopeammin eikä naapuripikseleiden välillä ilmene ylikuulumista. Näin ollen aktiivimatriisi mahdollistaa nopeamman kuvan muodostuksen sekä terävemmän kuvan kuin passiivimatriisi. Kuvassa 17 on kuvattu tarkemmin yllä esitellyt ohjausmenetelmät. /28/



Kuva 17. Vasemmalla passiivi- ja oikealla aktiivimatriisiohjaus /52/

Värintoisto on toteutettu LCD-näytöillä lisäämällä näytölle värisuodinmatriisi, joka sisältää suodattimet kullekin päävärille. Matriisissa osavärit on koottu yleensä siten, että yksi pikseli sisältää yhden kutakin pääväriä eli kolme osapikseliä. Suodattimet päästävät lävitseen ainoastaan kyseisen osapikselin mukaisia aallonpituuksia, jolloin muut aallonpituudet suodatetaan pois. Tämä tarkoittaa käytännössä sitä että kukin värisuodin suodattaa yli puolet taustavalosta pois heikentäen näytön hyötysuhdetta. Mobiileissa laitteissa virrankulutus on suuri tekijä ja yksi suurimmista virrankuluttajista on näytön taustavalo. Näytön läpäisevän valon osuus on haluttu tästä syystä maksimoida ja yksi tapa tehdä se on ollut laajentaa värisuotimien kaistanleveyttä. Tuloksena saadaan parempi läpäisy, mutta kääntöpuolena värien saturaatio kärsii ja sen seurauksena väriavaruuden laajuus pienenee.

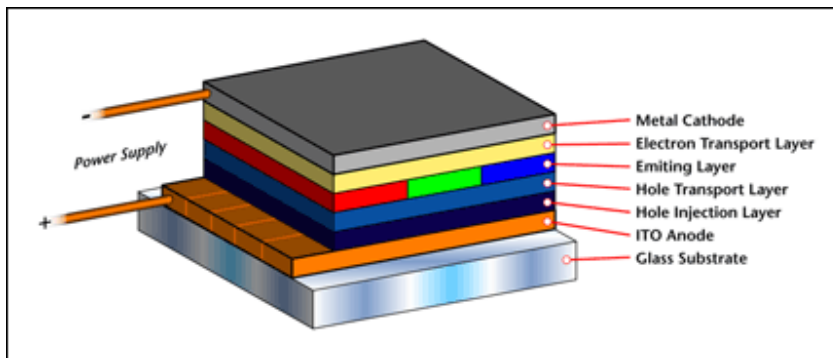
Mobiilinäytöille poikkeuksellista on niiden käyttöympäristö eli monista muista näytöistä poiketen niitä käytetään usein kirkkaissa ulkotiloissa. Ympäristön kirkkauden rinnalla näytön tuottama kirkkaus on hyvin matala ja heijastuva valo laskee näytön kontrastin alas. LCD-näytöillä ongelmaan on löydetty ratkaisu transflektiivisistä näytöistä. Niissä käytetään näytön oman taustavalon lisäksi myös ympäristön valoa näytön valaisemiseen. Näyttöihin on lisätty nestekidekerroksen taakse heijastavia alueita, jotka heijastavat ympäristön valon nestekidekerrokseen ja osallistuvat siten kuvan tuottamiseen. Transflektiivisen näytön toimintaperiaate on esitetty tarkemmin kuvassa 18. Heijastavat alueet peittävät osan taustavalosta ja laskevat näin näytön taustavalon huippukirkkautta, mutta kompromissi on välttämätön hyvän luettavuuden säilyttämiseksi myös ulkotiloissa. /30/



Kuva 18. Transmissiivinen ja transflektiivinen LCD-näyttö /4/

6.3 OLED

Toistaiseksi LCD-tekniikan kovin haastaja mobiilinäytöissä on orgaaninen LED (OLED, *eng. Organic Light Emitting Diode*). OLED on nimensä mukaisesti emissiivinen tekniikka, joka perustuu orgaanisiin aineisiin jotka emittoivat valoa kun niihin tuodaan sähköjännite. OLED:t on toteutettu pinoamalla useita ohuita orgaanisia kerroksia kahden elektrodin väliin. Pino kasataan kerros kerrallaan substraatille, joka on yleensä lasia. Myös muovia sekä metallifoliota on kokeiltu tähän tarkoitukseen ja ne ovatkin potentiaalisimmat ehdokkaat tulevaisuuden taipuisille OLED-näytöille. Substraatille tulevan anodin päälle ladotaan ensiksi orgaaniset kalvot ja niiden päälle katodi. Yksinkertaisimmillaan orgaanisia kerroksia on pinossa kaksi, johtava- ja emittoiva kerros /3/. Nykyaikaisessa OLED:ssa erilaisia kuljetuskerroksia on kuitenkin lisätty toiminnan tehostamiseksi. Eräs kirjallisuudessaakin paljon käytetty OLED-näytön rakenne on esitetty kuvassa 19. /37/



Kuva 19. OLED-näytön pinorakenne /4/

OLED-tekniikassa valon tuottamiseen tarvittava jännite tuodaan kerroksille elektrodien avulla ja ne synnyttävät pinoon sähkövirran. Virta kulkee anodilta katodille tuoden elektroneja emissiiviseen kerrokseen ja toisaalta vieden niitä pois johtavalta kerrokselta. Elektronien poistaminen johtavalta kerrokselta synnyttää kerrokselle positiivisesti varautuneita aukkoja, joita emissiivisen kerroksen negatiivisesti varautuneet elektronit vetävät puoleensa. Aukot siirtyvät vetovoiman ansiosta emissiiviselle kerrokselle, jossa elektroni putoaa aukkoon synnyttäen samalla fotonin eli valoa. Reaktion esiintymistiheyttä voidaan säädellä virran suuruudella, sillä virtaa kasvatettaessa elektronien liike lisääntyy, aukkojen määrä kasvaa ja fotoneja eli valoa syntyy enemmän.

Emissiivisyys tuo mukanaan monta etua verrattuna transmissiivisiin tekniikoihin. Sen ansiosta OLED:lla on mahdollista tuottaa erittäin tumma musta sävy, sillä mustan pikselin ei tarvitse tuottaa lainkaan valoa kun taas transmissiivisessä tekniikassa taustavalo palaa tasaisesti koko ajan eikä sitä pystytä nykytekniikoilla täysin suodattamaan. Tumma musta johtaa korkeisiin kontrastiarvoihin, jotka parantavat näytön luettavuutta sekä hämärässä että kirkkaammassakin ympäristöissä. Toinen merkittävä etu on pieni virrankulutus, joka on seurausta siitä että näytön virrankulutus on suoraan verrannollinen näytön tuottaman valon määrään. LCD-näytöissä

taustavalo kuluttaa aina tasaisesti saman määrän virtaa näytettävästä kuvasta riippumatta. OLED ei myöskään tarvitse polarisaattoreita valon suodattamiseen toisin kuin LCD. Polarisattorin vaikutus hyötysuhteeseen on merkittävä, sillä ne voivat ainakin teoriassa syödä jopa 50 % LCD-näytön valotehosta kun taaempi polarisaattori suodattaa kaiken itseensä nähden kohtisuoraan polarisoituneen valon pois.

Värienmuodostus on toteutettu OLED:issa erilaisten orgaanisten aineiden avulla, joista kukin synnyttää valoa vain tietyllä aallonpituusalueella. Koska näiden aineiden molekyyliä on helppo muokata, on OLED-näyttöjen värientoistoa mahdollista säädellä suhteellisen helposti /37/. Sininen väri aiheuttaa kuitenkin tutkijoille edelleen päänvaivaa, eikä se ole vielä toivotulla tasolla. Ongelmana ovat sinisen valon tuottamiseen käytetyt ainesosat, sillä ne eivät kykene tuottamaan yhtä puhdasta väriä kuin muiden värien kohdalla minkä lisäksi myös sinisen värin elinikä on muita heikompi. Värien eripituiset eliniät vääristävät valkoista väriä ja pitemmällä aikavälillä sinisen haalistuminen johtaa kuvan kellertymiseen. Tämä ongelma korostuu erityisesti kuvioilla, joita näytetään näytöllä toistuvasti /47/. Yksi tapa ratkaista ongelma, on käyttää valkoista OLED:a ja värisuodinmatriisiä. Tällöin valon haaleneminen ei vääristä värejä vaan se tapahtuu tasaisesti koko aallonpituusalueella. Nykypäivän markkinoilla olevien näyttöjen sinisen värin elinikä on suuruusluokkaa 10 000 tuntia kun muilla väreillä se on lähempänä 30 000 tuntia /12/. /1/

OLED-näyttöjä ohjataan LCD-näyttöjen tapaan joko aktiivi- tai passiivimatriiseilla. Ensimmäiset OLED:t olivat passiivimatriiseilla ohjattavia yksivärisiä näyttöjä. Niitä on käytetty mobiilisovelluksissa pääasiassa toissijaisina näyttöinä, sillä passiivimatriisi asettaa rajoja niin näytön koolle kuin myös suorituskyvyille. Toissijaisella näytöllä näytetään yleensä vain hyvin yksinkertaista informaatiota, kuten kellonaikaa, joka ei vaadi näytöltä paljoa. OLED sopii tähän tarkoitukseen erityisen hyvin, sillä siinä valtaosa ruudusta voidaan pitää täysin pimeänä ja pitää virrankulutus näin minimissään.

Jotta OLED voisi kilpailla LCD:n kanssa tasapäisesti, on niissäkin siirrytty käyttämään aktiivimatriisiohjausta. Aktiivimatriisi-OLED eli AMOLED vastaa ohjaukseltaan täysin LCD-näytön vastaavaa, sillä LCD:n tapaan AMOLED:ssa ohjaus suoritetaan TFT-matriisiin sijoitettujen erillisten transistorien avulla. AMOLED:n suurimmat haasteet tulevat valmistustekniikasta, joka on vielä toistaiseksi heikolla tasolla. Valmistus on kalliimpaa, hävikki suurempaa ja laatu heikompaa kuin mitä aktiivimatriisi-LCD-näytöillä /47/.

7 MITTAUKSET

7.1 Menetelmät ja standardit

Näyttömittausprosessille ensisijaisen tärkeä ominaisuus on sen hyvä uusittavuus. Se on oleellista sillä mittaustuloksia halutaan usein verrata joihinkin jo olemassa oleviin referenssiarvoihin. Nämä arvot taas ovat usein syntyneet mittausten tuloksena, jotka on voitu suorittaa eri laitteilla eri laboratorioissa ja jopa eri maissa. Jatkuvien kalibrointien lisäksi uusittavuuteen voidaan vaikuttaa yhtenäistämällä mittausten menetelmiä ja juuri tähän on pyritty julkaisemalla maailmanlaajuisia mittaustandardeja, jotka ohjeistavat eri tahoja mittausten tekemisessä.

Näyttöjen mittaukseen kehitetyistä standardeista parhaiten tunnettuja ovat ISO 13406-2 ja VESA FPDmV2, jotka lähestyvät näyttöjen karakterisointia hieman eri näkökulmista. ISO 13406-2 -standardi määrittelee näytön kuvanlaadulle tarkat vaatimukset, jotka näytön tulisi täyttää. Annetut vaatimukset on suunnattu suunnittelijoille, jotka voivat hyödyntää niitä näyttöjen kehitystyössä ja niiden arvioinnissa. Standardi antaa suunnittelijalle joustovaraa tarjoamalla vaihtoehtoisia ergonomialuokkia, jotka on suunnattu eri käyttötarkoituksiin ja poikkeavat siten vaatimustasoiltaan. VESA:n standardi taas on vain lista mittauksia ja niiden toteuttamishojeita, joista käyttäjä voi valita omaan käyttöönsä sopivimmat. Valintaa helpottaakseen, VESA on koonnut mittauksista keskeisimmät Suite of Basic Measurements (SBM) mittapaketiksi. Standardi ei ota kantaa mittaustulosten numeroarvoihin eikä mitattavan näytön soveltuvuuteen eri tehtäviin vaan toimii ainoastaan opaskirjana näyttömittausten suorittamiselle. /54/

ISO 13406-2 ja VESA FPDmV2 standardit sisältävät samankaltaiset mittaukset näyttöjen yleisimmille optisille suorituskykyarvoille. Molemmat standardit sisältävät mm. luminanssi-, kontrasti-, kromaattisuus-, katselukulma-, vasteaika- ja hajavalomittaukset. Mittausmenetelmissä on kuitenkin selkeitä eroja, mistä johtuen mittaaajan tulisi aina valita standardeista yksi eikä sotkea niitä keskenään.

ISO:n ja VESA:n standardien lisäksi myös useat muut organisaatiot ovat julkaisseet omia mittaustandardejaan litteiden näyttöjen mittaukseen, jollaisia ovat muun muassa TCO:n ja SPWG:n standardit. TCO '03 litteille näytöille tarjoaa ISO 13406-2:n tapaan suunnittelijoille raja-arvoja, jotka näyttöjen tulee täyttää noudattaakseen TCO '03:a. Standardin noudattaminen oikeuttaa TCO '03 merkin käyttöön tuotteissa. SPWG 3.5 standardi vastaa vuorostaan enemmän VESA FPDmV2-standardia tarjoten valikoiman mittausten menetelmiä näytön optisten ja mekaanisten parametrien selvittämiseen. /13/ /58/ /57/

Standardit eroavat lähtökohdiltaan toisistaan, mikä ilmenee erilaisina mittausvalikoimina ja referenssiarvoina. Vain keskeisimmät mittaukset löytyvät kaikista standardeista. Huomion arvoista on kuitenkin näiden keskeisten mittausten toteutukset, jotka myös vaihtelevat keskenään. Esimerkiksi luminanssin tasaisuuden mittaaminen on toteutettu erilailla jokaisessa neljästä standardista. Eroja löytyy niin mittauspisteistä ja -suunnista kuin tulosten käsittelystä.

Juuri tästä syystä onkin tärkeää, että mittaukset toteutetaan vain yhtä standardia noudattaen ja käytetyn standardin tulee käydä ilmi raportista väärinkäsitysten välttämiseksi. /13/

Tässä työssä mittaukset on tehty noudattaen VESA FPDMv2-standardia. Standardin mittauksista tutkimukseen valittiin täyden mustan ja valkoisen ruudun keskipisteen luminanssit, valkoisen ruudun värikoordinaatit sekä kontrastisuhde. Mittaukset on esitelty standardissa luvuissa 302-1, 302-2 ja 302-3 /62/.

7.2 Olosuhteet

Mittalaitteissa käytetyt valoherkät sensorit ovat alttiita ympäristön olosuhdemuutoksille. Etenkin sensoreiden kohinan lämpötilariippuvuus on merkittävä tekijä ja se on otettava huomioon mittauslaboratorion suunnittelussa. Lämpötila vaikuttaa mittalaitteen kohinan lisäksi myös mittattavan näytön käyttäytymiseen, mikä kasvattaa mittauksista saatujen tulosten heittelyä. Myös ilmanpaine ja kosteus voivat vaikuttaa sensoriin sekä näyttöön. Kussakin aiemmin mainituista standardeista on tarkat raja-arvot mittausympäristön sallituille olosuhteille. Määrittely on välttämätöntä vertailukelpoisten mittausten mahdollistamiseksi. Ohessa on esitelty VESA FPDMv2-standardin määreet olosuhteille, joita mittauksissa pyrittiin noudattamaan /62/.

- Lämpötila: $20^{\circ}\text{C}\pm 5^{\circ}\text{C}$
- Ilmanpaine: 86kPa – 106kPa
- Ilmankosteus: 25 % - 85 %
- Pimiöehto: ≤ 1 lux

Mittauslaboratorion olosuhteita tarkkailtiin jatkuvasti koko mittausten ajan. Ympäristömuuttujia seurattiin lämpö- ja ilmankosteusmittarilla ja pimiöehto tarkistettiin jokaisen mittauksen yhteydessä mittaamalla hajavalon määrä valkoisen heijastusstandardin pinnalta. Standardin reflektivisyys oli 99 %, jolloin VESA:n määrittelemä pimiöehto 1 lux vastaa noin $0,32 \text{ cd/m}^2$ luminanssia standardin pinnalla /62/. Ilmanpainetta ei mitattu mittausten aikana lainkaan, mutta Ilmatieteen laitos toimitti nämä tiedot mittausten ajalta.

Standardin asettamat olosuhdevaatimukset täyttyivät valtaosassa kokeita. Poikkeuksena oli ilmankosteus, joka laski pitkän aikavälin seurannassa alle VESA:n suositusarvon. ISO:n standardi asettaakin kosteuden raja arvot matalammalle sallien kosteusprosentit välillä 10–85 % /iso/. Varsinaisissa epävarmuusmittauksissa kosteusprosentti pysyi kuitenkin sallittujen rajojen sisällä.

7.3 Laitteisto/39/

Mittaukset suoritettiin Microvisionin näyttöjen mittaukseen tarkoitetulla SS230-mittalaitteistolla. SS230 on täydellinen näyttöjen mittaukseen kehitetty kokonaisuus, joka sisältää SS50-kohdistusyksikön, PC-tietokoneen, SS200-ohjelmiston sekä SS210- ja SS220-mittapäät. Molemmat mittapäät pitävät sisällään saman spektrometrin, minkä lisäksi SS210 sisältää myös CCD kameran sekä vasteajanmittausyksikön. Laboratorion ensisijainen mittalaite on kuitenkin molemmista laitteista löytyvä spektrometri, joten mittaukset suoritettiin ainoastaan SS220:lla.

SS220 on goniometriin kiinnitetty spektrometri. Sen toiminta perustuu hilarakenteiseen spektrometriin, jossa mitattava valo hajotetaan hilan avulla 2048 valoherkälle sensorille. Kukin sensori tallentaa tietyn aallonpituusalueen intensiteetin tallentaen näin spektriinformaation. Laitteen aallonpituuksien mittaussalue kattaa aallonpituudet väliltä 380-700nm ja sen resoluutio on 7nm. Laitteen mittapäänä on halkaisijaltaan 12,5mm laaja kollimoiva linssi, jolta valo tuodaan spektrometrille optisella kuidulla. Linssin aperaatiokulma, eli kulma josta linssi vielä vastaanottaa valoa, on 1,5°. Mittapään kokoa voidaan säätää lisäämällä linssin eteen erikokoisia aukkoja. Tässä tutkimuksessa tutkittiin laitteen käyttäytymistä 5mm aukon kanssa.

Hilarakenteiset spektrometrit ovat alttiita polarisaation vaikutuksille mittauksissa. Hilalle saapuva valo taittuu erilalla riippuen sen polarisaatiosuunnasta, mikä aiheuttaa epävarmuutta mittaustuloksiin. Ongelmaa on pyritty minimoimaan Microvisionin mittalaitteissa lisäämällä optiikan eteen kvartsi-depolarisaattori, joka tasoittaa valon polarisaatiosuuntaa pienentäen näin polarisaatiosuunnan vaikutusta mittaustuloksiin. Depolarisaattorin ansiosta mittalaitteen polarisaatiosta aiheutuva epävarmuus on korkeintaan 1 % /2/.

Kaikille valosensoreille yhteinen ongelma on pohjavirta eli bias. Microvisionin mittalaitteiden alustusrutiineihin kuuluu osana bias-kalibrointi, jolla minimoidaan pohjavirran vaikutusta mittaustuloksiin. Kalibrointi suoritetaan siis jokaisen mittauksen alussa minkä lisäksi ohjelma ilmoittaa jos kalibrointia tarve uusien kesken mittausten.

Valmistaja on luvannut laitteen spesifikaatioissa standardivalonlähde A:lla luminanssimittausten tarkkuudeksi 3 % ja toistettavuudeksi $L < 0,5$ %. Värikoordinaateille mittalaitteen tarkkuus on $x, y < 0,005$ ja toistettavuudeksi $x, y < 0,001$. Arvot noudattavat VESA FPDMv2-standardissa asetettuja raja-arvoja /62/.

Mittalaite tarjoaa käyttäjälle paljon vaikutusmahdollisuuksia erilaisten asetusten muodossa. Mittaaja voi säätää muun muassa integrointiaikaa ja näytteiden lukumäärää. Integrointiajan valinta voidaan jättää myös ohjelmiston vastuulle, jolloin aika säädetään niin että sensorin saturaatio on n. 50 %. Tässä tutkimuksessa käytettiin automaattista integrointiajan valintaa ja mittaustulokset laskettiin laboratorion yleisen toimintamallin mukaisesti kolmen näytteen keskiarvona, jollei toisin ole mainittu.

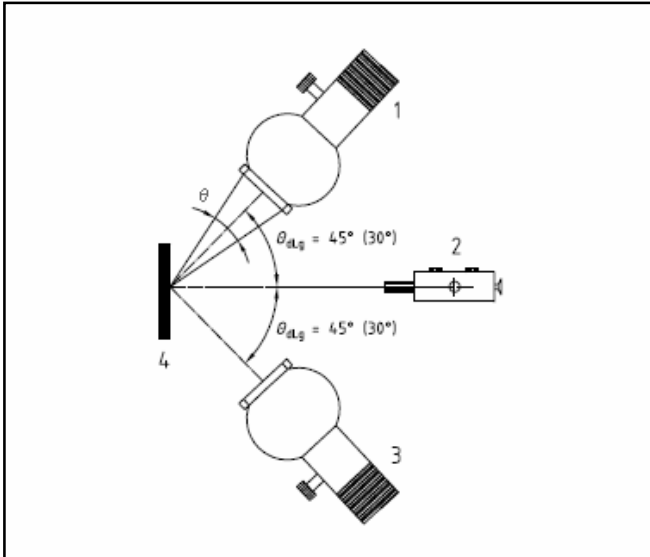
7.4 Testinäytöt

Testinäyttöinä tutkimuksessa toimivat kaksi matkapuhelimiin suunnattua näyttöä. Näytöt ovat suunniteltu saman kohderyhmän puhelimiin ja ovat siitä johtuen suorituskyvyiltään vertailukelpoisia. Ne perustuvat kuitenkin hyvin erilaisiin tekniikoihin, minkä ansiosta niiden optisissa suorituskykyparametreissa on suuria eroavaisuuksia. Yksi tutkimuksen tavoitteista oli selvittää mittausprosessin soveltuvuus eri näyttötekniikoille ja sitä on pyritty selvittämään toistamalla osa mittauksista sekä LCD- että OLED-näytöillä.

Näyttö A on 2,1” aktiivimatriisi-LCD-näyttö ja sen aktiivinen alue on kooltaan 35 x 41 mm. Näytön resoluutio on 176 x 208 ja se pystyy toistamaan 262k väriä. Näyttö on tekniikaltaan transflektiivinen eli osa sen näyttöpinta-alasta on peitetty heijastavalla osalla, jonka avulla ympäristön valoa voidaan hyödyntää näytön valaisemisessa. Transflektiivisyys näkyy yleensä näytöissä heikentyneenä kirkkautena pimiöolosuhteissa. Näyttöä ohjataan puhelimen käyttöliittymän kautta ja sen asetukset on säädetty normaali-katselutilaan.

Näyttö B on 2,0” aktiivimatriisi-LED-näyttö ja sen aktiivinen alue on puolestaan kooltaan 31x39mm. Näytössä on 176x220 resoluutio ja se pystyy toistamaan 262k väriä. Näyttö on puhtaasti transmissiivinen eli siinä ei ole heijastavaa osaa. OLED-näyttöjen tuottama kirkkaus on riippuvainen koko ruudun keskimääräisestä kirkkaudesta. Tästä johtuen mitattaessa täysin valkoisen ruudun kirkkautta voi näytön huippukirkkaus olla heikompi kuin esimerkiksi shakkilautakuviota mitattaessa.

Näyttöjen lisäksi mittauksia tehtiin valkoiselta heijastusstandardilta. Käytetty standardi oli Labspheren valmistama SRS-99-020 heijastusstandardi, jonka reflektanssi on 99% /35/. Standardia valaistiin Schott-Fostec DCR II-valonlähteellä, joka sisältää volframihalogeenihevku-lampun. Valo tuodaan lampulta standardille optisen kuidun avulla, joka välittää sen kahdelle pyöreälle valonlähteelle. Valonlähteiden halkaisija on noin 12,5 mm ja ne on sijoitettu 45° kulmaan standardiin nähden kuvan 20 mukaisesti. Valmistaja on ilmoittanut valonlähteen lyhyen ajan vakaudeksi <0,5 %, kun valo on lämminyt yli 40 minuuttia /53/.



Kuva 20. Schott-Fostec DCR II-valonlähteen asettelu /23/

7.5 Mittausasetelma

VESA FPDMv2 antaa tarkat ohjeet kunkin mittauksen suorittamiseen ja osana ohjeistusta se asettaa vaatimuksia myös mittausasetelmalle. Optisten mittalaitteiden monimuotoisuudesta johtuen standardin vaatimukset eivät voi määrittää tarkasti koko mittausasetelmaa vaan ne koskevat lähinnä tiettyjä osia mittausjärjestelmästä. Standardi muun muassa vaatii, että mittaukset, muutamaa poikkeusta lukuunottamatta, suoritetaan mitattavan näytön keskipisteestä ja näyttöpinnan normaalilta. Mittalaitteen aperaatiokulma saa olla korkeintaan 2° , mikä tarkoittaa sitä että mittalaitteen lukupää vastaanottaa valoa korkeintaan 2° kulmasta mittapään pintaan nähden. Lisäksi mittalaitte tulee asettaa mitattavaan näyttöön nähden sellaiselle etäisyydelle, että mittausalue kattaa vähintään 500 pikseliä mutta korkeintaan 1 % näytön pinta-alasta.

Tutkimuksessa käytetyn Microvision SS220-spektroradiometrin valmistaja suosittelee mittausetäisyydeksi 55,8 mm /2/. Laitteen mittapää on halkaisijaltaan 12,5 mm, mutta mittausalueen kokoa voidaan säätää lisäämällä mittapään eteen irrotettava aukko. Laitteen mukana on toimitettu kaksi aukkoa, jotka ovat halkaisijoiltaan 5 mm ja 2 mm. Kun lisäksi tiedetään, että mittapään aperaatiokulma on $1,5^\circ$ voidaan mittausalueen halkaisija laskea kaavalla 31.

$$D_M = D_L + 2d \tan\left(\frac{\theta_A}{2}\right) \quad (31)$$

, jossa

D_L on mittapään halkaisija,

d on mittausetäisyys ja

θ_A mittapään aperaatiokulma.

Kaavan 31 avulla on laskettu kaikkien mittapäiden kattamat mitta-alueet sekä absoluuttisesti että suhteutettuina testinäyttöihin A ja B. Tulokset on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Mittapäiden tuottamat mitta-alueet

Mittapää (mm)		12,5	5	2
Mitta-alue (mm)		14	6,5	3,5
Testinäyttö A	Pikseliä	3962	842	248
	% pinta-alasta	10,7%	2,3%	0,67%
Testinäyttö B	Pikseliä	4898	1055	306
	% pinta-alasta	12,7%	2,7%	0,80%

Taulukosta nähdään, ettei mikään mittapäyhdistelmä toteuta kaikkia FPDMv2-standardin asettamia vaatimuksia mitta-alueen koolle. Tapauksia, joissa mitta-alueen koolle asetettuja ehtoja ei voida täyttää, tulee FPDMv2-standardin mukaan käsitellä yksilöllisesti ja valita sopiva aukko tilanteen mukaan. Liian iso mitta-alue vääristää tuloksia näyttöpinnan epätasaisuuden takia kun taas liian pienellä aukolla mitattavien pikselien lukumäärä mitta-alueen reunoilla vaihtelee mittauskohdan muuttuessa.

Aiempien mittausten pohjalta laboratorioissa on päädytty käyttämään 5mm aukkoa mitattaessa tämän kokoluokan näyttöjä. Käytännön kokeissa on havaittu että mitta-alueen kattaessa alle puolet vaadituista 500:sta pikselistä, kuten testinäytöllä A, kasvaa pikselien lukumäärän vaihtelu mitta-alueella näytön tasaisuutta suuremmaksi tekijäksi.

8 TULOKSET

8.1 Toistettavuus

VESA FPDMv2 tekee mittausohjeissaan oletuksen, että mittalaite täyttää standardin mittalaitteille asettaman toistettavuusehdon ja sen ensimmäinen mittaus onkin tarkoitettu toistettavuuden toteamiseen. Standardin mukaan toistettavuus määritellään luminanssille toistamalla sama valkoisen ruudun luminanssimittaus kymmenen kertaa ja laskemalla tuloksista keskihajonta. Samalla menetelmällä voidaan selvittää myös muiden mittausten toistettavuudet. Luminanssimittauksille FPDMv2 asettaa toistettavuuden maksimiarvoksi 0,5 %, mutta värikoordinaateille vastaavia vaatimuksia ei ole. /62/

Tässä tutkimuksessa toistettavuutta tutkittiin standardin mukaisilla toistomittauksilla, jossa sama mittaus toistettiin mahdollisimman nopeasti 10 kertaa. Luminanssit mitattiin sekä testinäytöiltä A ja B että valkoisen heijastusstandardin pinnalta. Testinäytöillä näytettiin täysin valkoista ruutua ja heijastusstandardille tuotiin tasainen valaistus Schott-Fostec DCR II valonlähteellä. Toistettavuus tutkimuksen mittaustulokset on esitetty taulukossa 2.

Taulukko 2. Toistettavuusmittauksen tulokset

Testinäyttö A				
	Lw	Lb	u'	v'
Ave	121,04	0,6199	0,1938	0,4410
std	0,058	0,006	0,00005	0,00008
std %	0,05%	0,90%	0,03%	0,02%
Testinäyttö B				
	Lw	Lb	u'	v'
Ave	164,20	0,0379	0,1948	0,4465
std	0,094	0,003	0,00005	0,00005
std %	0,06%	7,34%	0,03%	0,01%
Heijastusstandardi				
	L	u'	v'	
Ave	77,68	0,2512	0,5304	
std	0,040	0,00003	0,00004	
std %	0,05%	0,013%	0,008%	

Näytteistä vakaimmalla eli heijastusstandardilla toistettavuus noudattaa reilusti laitteen valmistajan antamia arvoja, sillä luminanssimittausten toistettavuudeksi saatiin 0,05 % ja värikoordinaattien <0,0001. Luminanssimittausten toistettavuus täyttää siten standardin asettamat vaatimukset ja värikoordinaattimittausten toistettavuus taas on parempi kuin mittalaitteen esitystarkkuus. Mittalaite esittää värikoordinaatit neljän desimaalin tarkkuudella, jolloin viidennessä desimaalissa tapahtuvat vaihtelut ovat hyvin pieniä.

Mustan ruudun toistettavuudet selvitettiin korostamaan matalien kirkkaustasojen poikkeavan suurta epävarmuutta. Etenkin OLED-näytöllä toistettavuus laski huomasti, mikä on suoraa seurausta poikkeuksellisen matalasta kirkkaudesta. Mittalaitteen lisäksi tulokseen vaikuttaa suuresti myös mitattavan näytön epävakaus pienillä kirkkauksilla. Kirkkaalla ruudulla vastaavaa eroa näyttöjen välillä ei löytynyt.

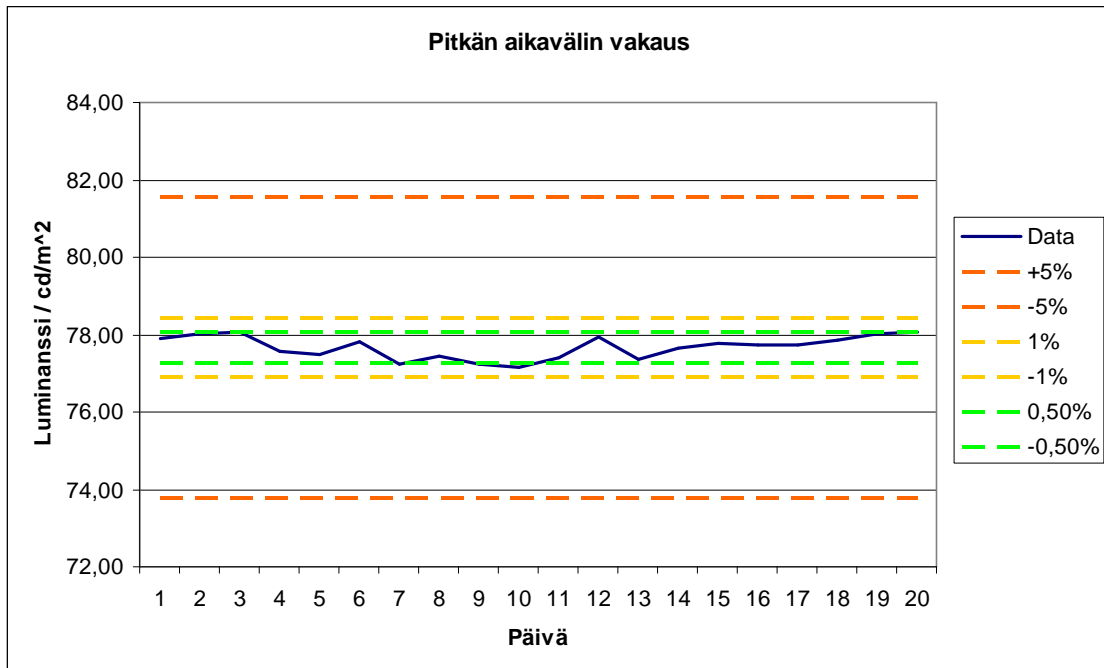
8.2 Pitkän aikavälin vakaus

Toinen tekijä, joka on selvitettävä ennen varsinaista epävarmuusanalyysiä, on mittausprosessin vakaus pitkällä aikavälillä. Tässä tutkimuksessa on tutkittu mittausprosessin virhelähteitä ja niiden vaikutusta, mutta kunkin virhelähteen analyysit on tehty hyvin lyhyellä aikavälillä ja toisaalta eri virhelähteitä on tutkittu eri ajankohtina. Analyysit kertovat siis virhelähteen vaikutuksen vain kyseisellä ajanhetkellä ja vallitsevissa oloissa. Jotta tuloksia voitaisiin yleistää laajempaan käyttöön, on mittausprosessin vakaus tunnettava pidemmällä aikavälillä ja muuttuvissa olosuhteissa. Paras tapa selvittää olosuhteiden vaikutusta tuloksiin olisi säädellä ympäristömuuttujia ja tutkia niiden vaikutuksia, mutta tähän ei tämän tutkimuksen puitteissa ollut mahdollisuuksia.

Laboratorio, jossa tutkimus suoritettiin, on ilmastoitu ja olosuhteet ovat siten kontrolloituja, mutta niiden tarkka säätäminen on mahdotonta. Tästä syystä vakautta tutkittiin toistamalla samat mittaukset päivittäin kuukauden ajan, jolloin nähdään kuinka paljon olosuhteet vaihtelevat ja kuinka vaihtelut vaikuttavat mittaustuloksiin. Tuloksien pohjalta voidaan arvioida laboratoriotilojen riittävyttä ja antaa perusteita mahdollisille lisäinvestoinneille kosteus- ja ilmastointilaitteistoon.

Olosuhteet laboratorion ulkopuolella vaihtelivat mittausten aikana suuresti. Ilmatieteen laitoksen toimittamien tietojen mukaan ulkolämpötila vaihteli välillä $-21 - +2$ °C, ilmankosteus välillä 64 - 94 % ja ilmanpaine välillä 99,6 - 103,8 kPa /48/. Olosuhteiden muutokset näkyivät myös laboratoriossa, mutta vaihtelu oli huomattavasti hillitympää. Lämpötila laboratoriossa pysyi mittajakson aikana välillä 23,2 - 25,1 °C, mutta kosteusarvot vaihtelivat jopa välillä 4,7 - 18,8 %. Suurehkot muutokset ulkotilojen olosuhteissa edustavat siis hyvin erilaisia säätiloja ja tuovat siten esille mittausprosessin vakauden myös pidemmällä aikavälillä.

Olosuhteiden muutoksien vaikutusta mittaustuloksiin tarkasteltiin mittaamalla kirkkaus sekä testinäyttö A:n pinnalta että heijastusstandardilta, jota valaistiin Schott-Fostec DCR II valonlähteellä. Heijastusstandardilta tehtyjen mittausten tulokset on esitetty kuvassa 21.



Kuva 21. Pitkän aikavälin luminanssismittausten tulokset heijastusstandardilta

Aika-akselille piirretyt tulokset antavat hyvän kuvan mittausprosessin vakaudesta. Olosuhteiden muutoksista huolimatta tuloksissa ei ole havaittavissa merkittäviä poikkeamia ja kaikki arvot sijoittuvat ± 1 % sisään. Lisäksi keskihajonta on alle 0,5 %, joka on VESA-standardin asettama vaatimus mittausten toistettavuudelle/62/. Tulos on hyvä kun huomioidaan, että toistettavuudella tarkoitetaan mittausten vaihtelua korkeintaan 5 minuutin aikavälillä.

Vakaudelle laskettiin myös tilastolliset tunnusluvut, jotka on esitetty taulukoissa 3 ja 4.

Taulukko 3. Vakausmittausten tilastolliset tunnusluvut testinäyttö A:lta

	Testinäyttö A			
	Lw	Lb	u'	v'
Mean	121,57	0,604	0,1942	0,4415
std	0,754	0,038	0,00030	0,00059
std %	0,62%	6,21%	0,15%	0,13%

Taulukko 4. Vakausmittausten tilastolliset tunnusluvut heijastusstandardilta

	Heijastusstandardi		
	L	u'	v'
Mean	77,68	0,2518	0,5308
std	0,295	0,00012	0,00012
std %	0,38%	0,05%	0,02%

Taulukkojen 3 ja 4 tuloksista käy ilmi kaksi tärkeää seikkaa. Ensinnäkin luminanssimittaukset ovat suhteellisen vakaita myös pidemmällä aikavälillä. Käytetyn valonlähteen vaihtelu oli valmistajan mukaan korkeintaan 0,5 % ja siitä huolimatta tuloksien keskihajonta oli vain 0,38 %. Tästä hajonnastakin suuri osa voi siis johtua valonlähteestä. Toinen havainto on testinäyttö A:n kasvanut epävakaus niin kirkkaalla kuin tummalla ruudullakin.

Keskeisimmät muuttujat pitkän aikavälin vakaudessa ovat ympäristömuuttujat kuten laboratorion lämpötila sekä ilmankosteus. Ympäristömuuttujia seurattiin läpi mittausten ja jokaisen mittauksen yhteyteen liitettiin tieto mittaushetkellä vallinneista olosuhteista. Kerätystä informaatiosta selvitettiin syy-seuraus -suhteita varianssianalyysin (ANOVA) avulla.

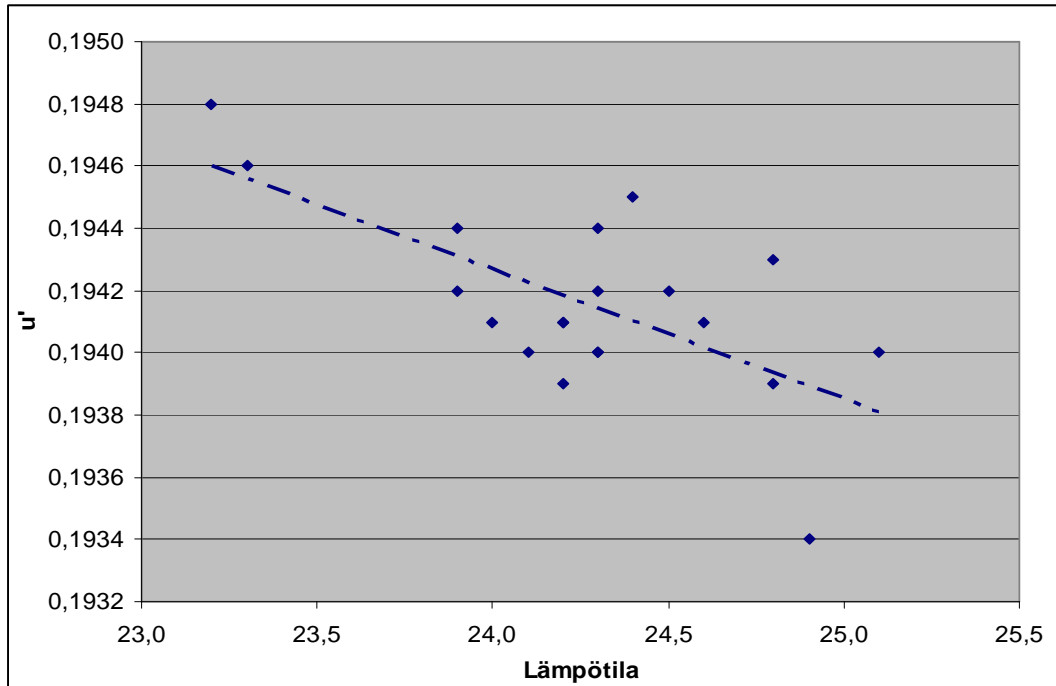
ANOVA:n tuloksena saadaan tieto eri muuttujien välisistä yhteisvaikutuksista. Yhteisvaikutuksia pyrittiin löytämään kirkkaus-lämpötila-, kirkkaus-kosteus-, värikoordinaatti-lämpötila- sekä värikoordinaatti-kosteus -parien väliltä. p-arvo kertoo ANOVA-analyysissä muuttujien keskinäisen korrelaation merkitsevyydestä. Yllä mainittujen korrelaatioparien p-arvot on koottu taulukkoon 5.

Taulukko 5. Lämpötilan ja kosteuden p-arvot eri mittaustuloksille

	p-arvot	
	Lämpöt.	Kosteus
Lw	0,105	0,74
Lb	0,706	0,155
u'	0,001	0,541
v'	0,005	0,47
L_std	0,875	0,252
u'_std	0,299	0,051
v'_std	0,597	0,068

Paljon käytetyn määritelmän mukaan p-arvon tulee olla alle 0,05, jotta muuttujilla voidaan todeta olevan korrelaatiota /64//9/. Taulukosta nähdään, että ehto täyttyy ainoastaan testinäyttö A:lla u' - ja v' - värikoordinaattien ja lämpötilan välillä. On mahdollista että tulos on seurausta testinäytön toiminnan muuttumisesta eri lämpötiloissa, jolloin ongelma ei olisi mittalaitteessa. Tätä väittämää tukee heijastusstandardilta saadut mittaustulokset, joiden mukaan laboratorion lämpötilan muutoksilla ei olisi vaikutusta luminanssi- tai värikoordinaattimittauksiin. Korrelaatiota haluttiin kuitenkin tutkia tarkemmin.

ANOVA:lla saatujen tulosten lisäksi olosuhdemuuttujien jakaumaa ja niiden vaikutusta mittaus tuloksiin tarkasteltiin visuaalisesti graafisen esityksen avulla. Korrelaatiota tarkasteltiin piirtämällä mittausten tulokset kaksiulotteiseen koordinaatistoon, jossa akseleilla olivat mittaustuloksen arvo sekä olosuhdemuuttuja. Yllä mainittu u' -lämpötila -pari, jolla ANOVA-analyysin mukaan löytyy yhteys, on esitetty tarkemmin kuvassa 22.



Kuva 22. u' -värikoordinaattimittausten tulokset lämpötilan funktiona testinäytöllä A

Tuloskuvaajasta on mahdollista löytää trendi mittaustulosten ja lämpötilan väliselle suhteelle. Kuvaajan perusteella vaikuttaisi siltä, että lämpötilan laskiessa tarpeeksi, siirtyy näytön tuotaman valon väri lievästi punaiseen päin. Heijastusstandardilta saatujen tulosten mukaan tämä ei kuitenkaan johtuisi mittalaitteesta vaan syynä olisi nimenomaan muutos testinäytön käyttäytymisessä.

Myös muut mittaustulokset piirrettiin kaksiulotteiseen koordinaatistoon ympäristömuuttujien funktiona ja ne löytyvät liitteestä 1. Kuvaajat tukevat ANOVA:sta saatuja tuloksia, joiden mukaan mittaustulosten lämpötilalla tai kosteudella ei ole merkittävää vaikutusta mittaustuloksiin tutkimuksen kattamissa olosuhteissa, pois lukien testinäytöllä A:n värikoordinaatit. Tulos ei ole kovinkaan yllättävä kun muistetaan, että olosuhteet vaihtelivat pääasiallisesti FPDMv2-standardin sallimissa rajoissa. Esimerkiksi lämpötila vaihteli kahden celsiusasteen sisällä.

8.3 Epävarmuus

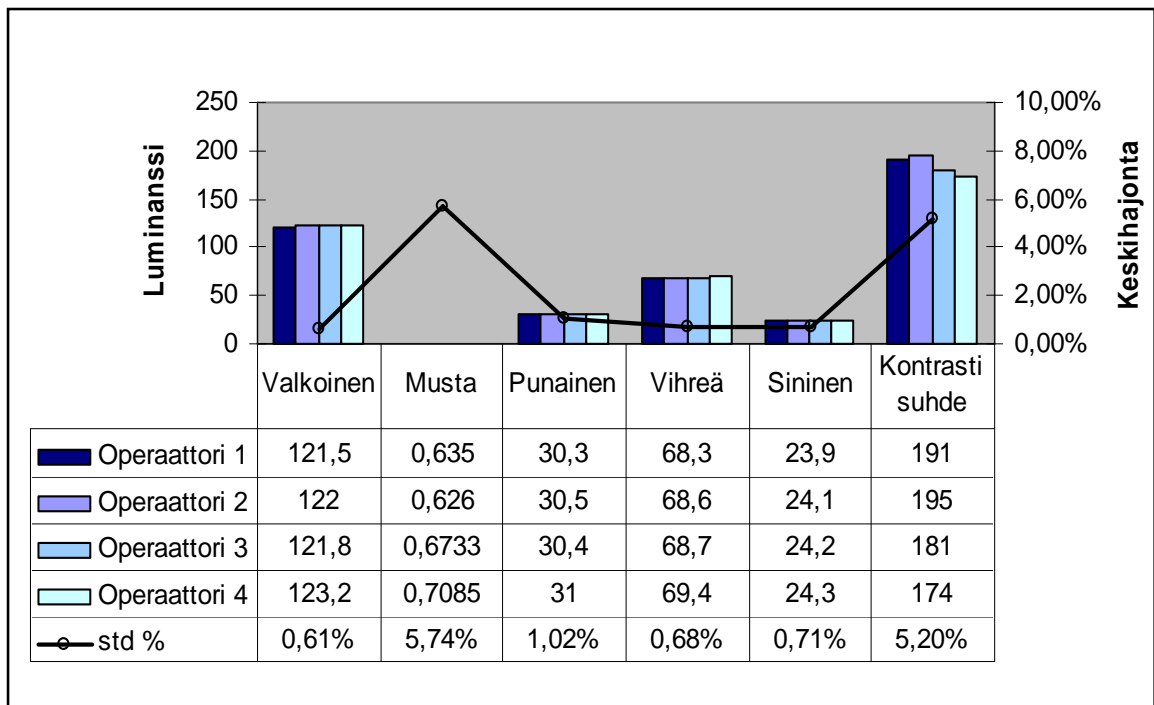
Tutkimuksen päätarkoituksena oli määrittää mittausprosessiin liittyvä epävarmuus. Kuten luvussa 5.2.1 mainittiin, tehdään tämä eristämällä yksittäiset virhelähteet muista muuttujista ja selvittämällä kyseisen lähteen tuottama epävarmuus. Tässä luvussa on esitetty tutkitut virhelähteet ja niille saadut epävarmuudet. Tutkimuksen piiriin on virhelähteiksi valittu mittaaja, mittausetäisyys, integrointi-aika, kirkkausalueet, linssihäikäisy, polarisaatio sekä kalibroinnit. Lopuksi yksittäisten virhelähteiden epävarmuuksista on ratkaistu koko mittausprosessin kattava yhdistetty epävarmuus.

8.3.1 Mittaajan aiheuttama virhe

Ihmisen ohjatessa mittalaitteita, on aina mahdollista, ellei jopa todennäköistä, että mittaajalla on vaikutusta mittaustuloksiin. Mittaajien välillä voi olla eroja mm. näytteen asemoinnissa, mittaussuorituksessa ja huolellisuudessa. Mittaajakohtaiset poikkeamat tuloksissa syntyvät usein tekijöistä, joihin voidaan vaikuttaa esimerkiksi yhtenäistämällä mittauksessa käytettyjä toimintamalleja ja parantamalla ohjeistusta. Näitä mittaajien välisiä poikkeamia selvitettiin toistokokeella, jossa neljä koehenkilöä toisti samat mittaukset.

Kokeessa kukin neljästä koehenkilöstä suoritti mittaukset samassa laboratoriossa ja hyvin samankaltaisissa olosuhteissa. Mittaukset suoritettiin kolmen päivän aikana, jolloin pienet vaihtelut mittaolosuhteissa olivat mahdollisia. Koehenkilöt opastettiin suorittamaan mittaukset mahdollisimman yhtenäisellä tavalla. Opastus tapahtui paperille tulostetun mittaohjeen avulla, joka löytyy liitteestä 2. Ohje kattaa koko mittauskäytännön lähtien laitteiden asemoinnista ja käynnistämiseen käyden läpi esivalmistelut, alustukset ja lopuksi itse mittaukset. Koehenkilöiden suoritusta tarkkailtiin läpi mittausten, jotta mahdolliset puutteet ohjeistuksessa voitiin havaita.

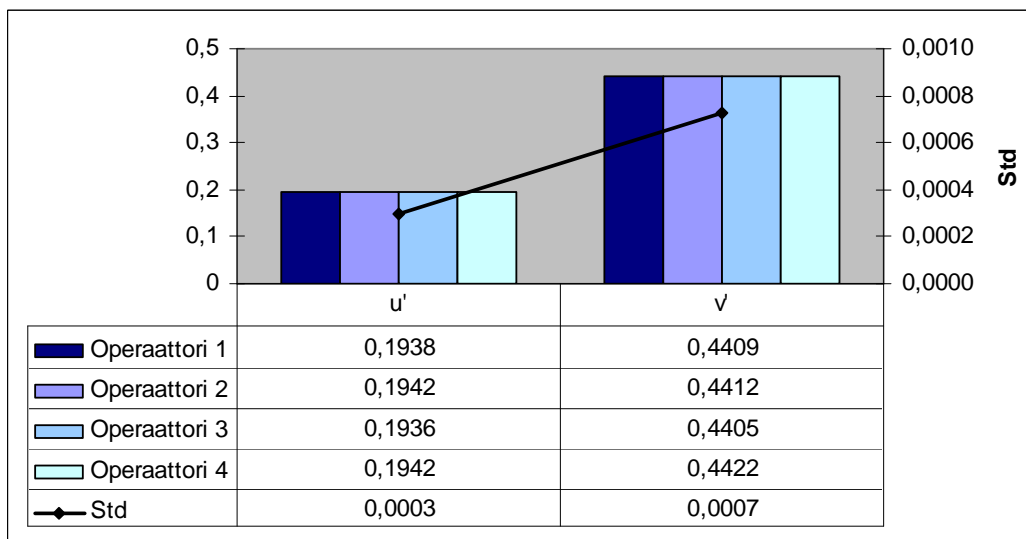
Koehenkilöiden tehtävänä oli suorittaa luminanssi- ja värillisuusmittaukset Microvision SS220-spektroradiometrillä ohjeistuksen mukaan. Mitattavana kohteena toimi testinäyttö A, jolla näytettiin täysin valkoista, mustaa, punaista, vihreätä ja sinistä ruutua. Mittalaitteen ohjelmisto asetettiin laskemaan mittaustuloksen 10 näytteen keskiarvona. Tällä pyrittiin minimoimaan muiden tekijöiden vaikutusta tuloksiin, jolloin vaihtelut johtuivat pääasiallisesti vain mittaajasta itsestään. Mittaajakohtaisten luminanssimittausten tulokset on esitetty kuvassa 23.



Kuva 23. Mittaajakohtaiset tulokset luminanssimittauksista

Tuloksien pohjalta mittaajien välisen eron voidaan todeta olevan pienekkö, sillä kun tuloksia verrataan pitkän aikavälin vakaustestissä saatuihin tuloksiin, nähdään että vastaava vaihtelu voi syntyä jo muuttuvien olosuhteiden seurauksena. Valkoisen ruudun luminanssin keskihajonta oli 0,61 % kun vakaustestissä se oli 0,62 %. Mustan ruudun luminansseilla vastaavat luekemat olivat 5,74 % ja 6,21 %.

Luminanssimittausten yhteydessä koehenkilöt mittasivat myös kohteiden värikoordinaatit. Valkoisen ruudun värikoordinaatit on esitetty kuvassa 24.



Kuva 24. Mittaajakohtaiset tulokset värikoordinaattimittauksista

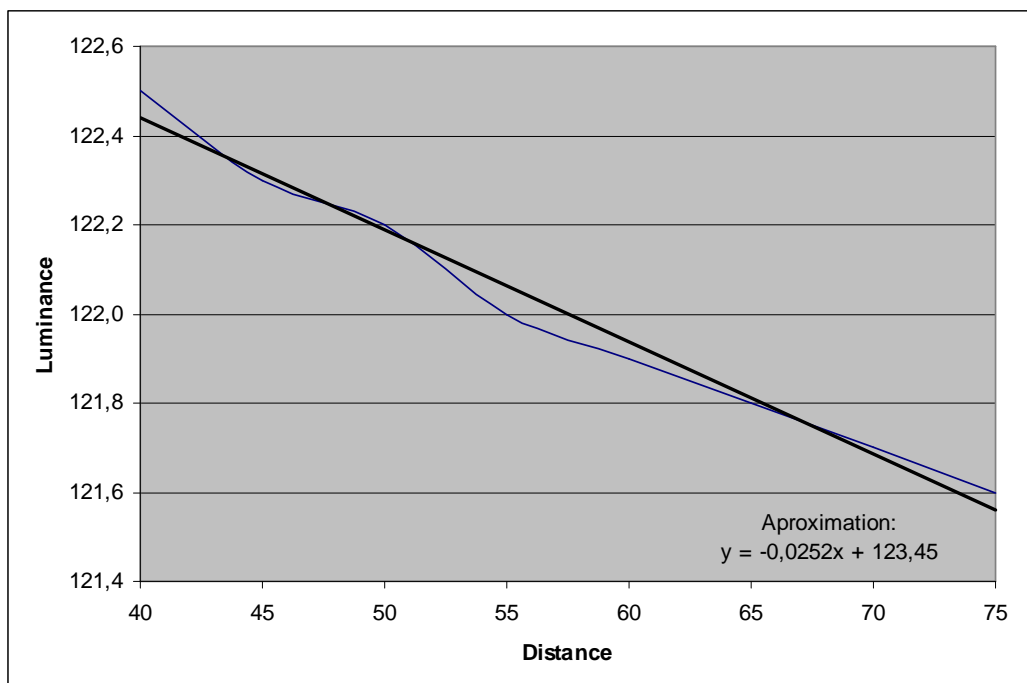
Värikoordinaattimittaukset noudattavat pitkälti luminanssimittauksia siinä mielessä, että vaihtelut eivät poikkea suuresti pitkän aikavälin vakaussmittausten tuloksista. u' -värikoordinaatin keskihajonta oli molemmissa testeissä sama eli 0,0003 ja v' -värikoordinaatin keskihajonta oli vain hieman suurempi eri koehenkilöiden välillä ollen 0,0007 kun vakaustestin vastaava lukema oli 0,0006.

Koska pitkän aikavälin vakautta ei erikseen sisällytetä epävarmuusanalyysin virhelähteisiin, ei vaukauten aiheuttamaa epävarmuutta huomioida moneen kertaan ja mittaajien välinen epävarmuus voidaan sisällyttää yhdistettyyn epävarmuuteen sellaisenaan.

8.3.2 Mittausetäisyys

Luminanssin yksikkö on cd/m^2 . Se voidaan kirjoittaa myös muotoon $\text{lm}/\text{sr}/\text{m}^2$, joka puolestaan tarkoittaa energiavuon tiheyttä katselukulmaa kohden. Yksiköstä voidaan nähdä, että mitattaessa täysin tasaisesti valaistua pintaa on tulos täysin riippumaton mittausetäisyydestä. Pinnan valovoima pinta-alaan nähden pysyy aina vakiona eikä teoriassa vaikuta luminanssimittausten tuloksiin. /63/

Näyttötekniikoiden epäideaalisuudesta johtuen, etäisyys saattaa kuitenkin vaikuttaa saatuihin tuloksiin. Luminanssimittausten etäisyysriippuvuutta tutkittiin mittaamalla testinäyttöä A kahdeksalta eri etäisyydeltä, ja muodostamalla mittausdatasta approksimaatio mittausten etäisyysriippuvuudelle. Etäisyyden vaikutus kirkkausmittauksiin on esitetty kuvassa 25.



Kuva 25. SS220-spektroradiometrin etäisyysriippuvaisuuden funktio

Mittalaitteen ohjelmisto mahdollistaa mittausetäisyyden säätämisen jopa 0,127mm tarkkuudella. Sillä ei kuitenkaan voida mitata absoluuttista mittausetäisyyttä, vaan se pitää mitata käsin. Mittausetäisyyden vaihtelua tutkittiin mittaamalla mittausetäisyys käsin 20 kertaa ja lukemalla mittalaitteen ohjelmistolta mitattujen etäisyyksien keskinäinen vaihtelu. Etäisyysvaihtelut kerättiin taulukkoon, jonka pohjalta laskettiin etäisyydelle keskihajonta, joka kerrottiin etäisyysriippuvuudella. Näin etäisyysvaihteluiden aiheuttamaksi epävarmuudeksi saatiin 0,01 %, mikä käy myös ilmi taulukosta 6.

Taulukko 6. *Luminanssin etäisyysriippuvuus testinäyttö A:lla*

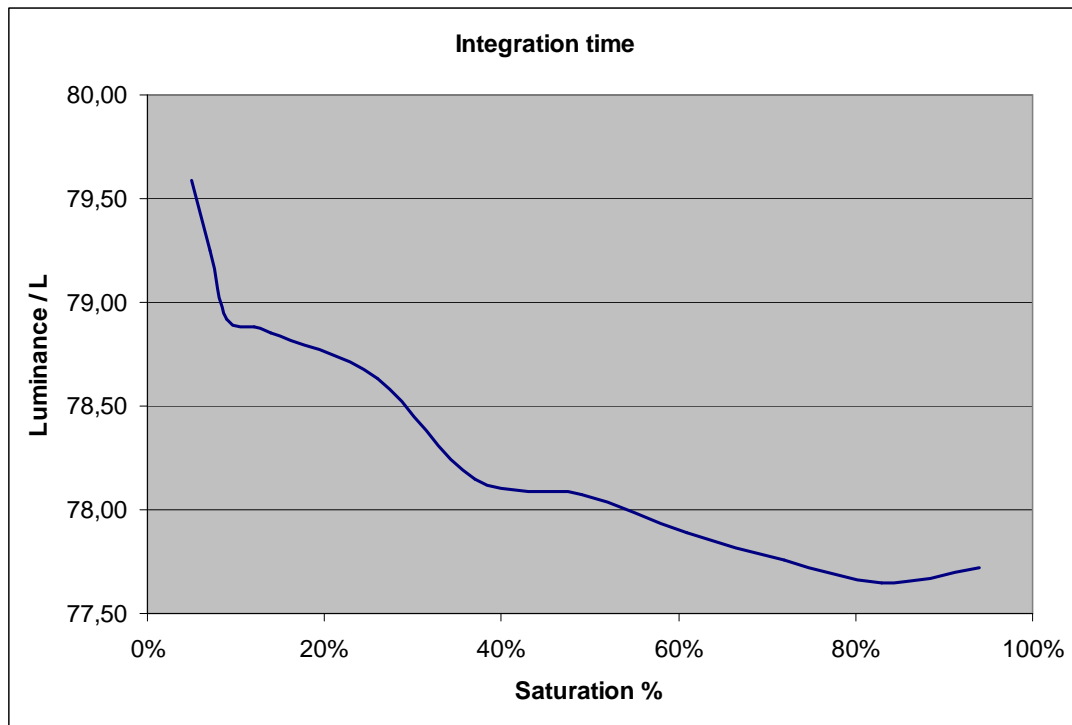
Luminanssin muutos / mm	0,025 cd/m ² /mm
Etäisyyden std	0,455 mm
Luminanssin std %	0,01 %

Etäisyydestä aiheutuu siis kyseisellä näytöllä 0,01 % epävarmuus luminanssimittauksissa. Lukema on huomattavasti pienempi kuin mittalaitteen toistettavuus, jolloin sen voidaan sanoa olevan merkityksetön. Testinäyttö A oli LCD-näyttö, joille näyttöpinnan kirkkauden tasaisuus on muihin näyttötekniikoihin verrattuna suuri ongelma. Tästä voidaan päätellä, että jos etäisyyden vaihtelu ei aiheuta epävarmuutta LCD-näytöillä, voidaan johtopäätös hyvin yleistää kattamaan myös muut näyttötekniikat.

8.3.3 Integrointi-aika

Microvision SS200-ohjelmisto tarjoaa mahdollisuuden valita vapaasti mittauksissa käytetty mittaus- eli integrointi-aika. Yleensä on toivottavaa että mittaukset voidaan suorittaa mahdollisimman nopeasti, jolloin muutokset mitattavassa kohteessa saadaan minimoitua. Toisaalta integrointi-aajan lyhentäminen johtaa väistämättä signaalin vahvistamiseen ja sitä kautta puolestaan SNR:n laskemiseen. Integrointi-aajan valinta on siis aina kompromissi, joka vaihtelee mittauslaboratorioiden preferenssien mukaan. Microvision suosittelee käyttöohjeissaan integrointi-aikaksi aikaa, joka aiheuttaa sensorilla 50 % saturaation.

Integrointiajan vaikutusta mittaustuloksiin tutkittiin kokeella, jossa valaistun heijastusstandardin kirkkaus mitattiin eri integrointiajoilla. Integrointiaikaa säädettiin 1:stä 50 näytteeseen, mikä vastasi testinäyttö A:n tapauksessa sensorin saturaatioarvoja 5-94 %. Mittaustulos on laskettu kolmen yksittäisen mittauksen keskiarvona ja ne on esitetty kuvassa 26.



Kuva 26. *Integrointiajan vaikutus luminanssimittauksiin*

Mittaustuloksien pohjalta laskettiin integrointiajan mittauksiin tuoma epävarmuus ja tulokseksi luminanssimittauksen keskihajonnalle saatiin 0,66 %. Tulokuvaajasta havaitaan kuinka mitatun kirkkauden arvo pienenee kun integrointiaikaa kasvatetaan. Ilmiölle voidaan löytää ainakin kaksi loogista selitystä.

Ensinnäkin pohjavirran vaikutus korostuu lyhyillä integrointiajoilla. Kun mittausaika on lyhyt, saapuu sensorille suhteellisen pieni määrä fotoneita ja signaalia joudutaan vahvistamaan huomattavasti. Vahvistus tehdään samalla kuitenkin sensorilla esiintyvälle pohjavirrälle, jonka suhteellinen osuus kasvaa merkittäväksi matalilla signaalitasoilla. Vahvistuksen jälkeen saatu arvo on siis vahvistetun signaalin ja vahvistetun pohjavirran summa.

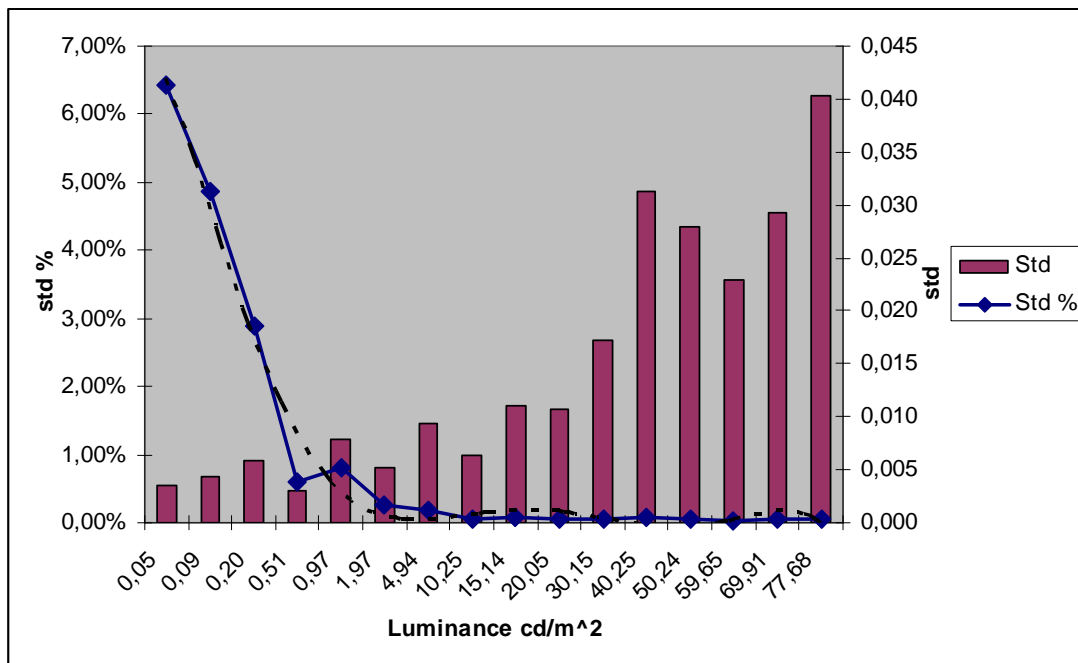
Toinen syy havaitulle käyttäytymiselle ilmenee suurilla saturaatio-arvoilla, joilla signaalin arvo on matalampi kuin mitatessa suositellulla 50 % saturaatiolla. Tämä voi olla seurausta sensorin osittaisesta saturaatiosta, joka johtaa sensorin QE:n heikkenemiseen. Madaltunut QE puolestaan tarkoittaa sitä, että osa mitattavista fotoneista jää laskematta. Ohjelmisto ei kuitenkaan huomioi vahvistusta tehdessään saturaation vaikutusta, minkä seurauksena lopputuloksena saatu mittaustulos on todellista arvoa pienempi.

8.3.4 Kirkkausalueen vaikutus

Microvision SS220-spektroradiometrin mittausalue on erittäin laaja ja se kattaa ilman neutraalidensiteettisuotimiakin kirkkaudet väliltä $0,1-1000 \text{ cd/m}^2$. Valoherkät elementit eivät toimi täysin lineaarisesti eri kirkkausalueilla, mutta se huomioidaan laitteen kalibrointivaiheessa. Microvision SS230-laitteiston kalibrointiprosessiin sisältyykin lineaarisuuskalibrointi, jossa muodostetaan seitsemännen asteen polynomiofunktio kompensoimaan epälineaarisuuden vaikutuksia. /40/

Se mitä kalibroinneillakaan ei voida estää, on mittaustulosten suhteellisen vaihtelun kasvu matalilla kirkkausalueilla. Tämä tieto on erityisen tärkeää mitattaessa kontrastisuhdetta sekä mustan ruudun kirkkautta. On harhaanjohtavaa tutkia mittaasepävarmuutta vain kirkkaiden tulosten avulla ja sitten yleistää tulokset kattamaan koko kirkkausalue.

Mittalaitteen käyttäytymistä eri kirkkauksilla tutkittiin Shcott-Fostec DCR II-valonlähteellä, jonka kirkkautta voidaan säätää manuaalisesti. Valonlähteellä valaistiin valkoista heijastusstandardia, jonka pinnalta heijastuneen valon luminanssi mitattiin mittalaitteella. Mittaukset toistettiin kullakin kirkkausetuksella kymmenen kertaa ja tuloksista laskettiin sekä keskihajonnat että suhteelliset keskihajonnat. Tulokset on esitetty kuvassa 27.



Kuva 27. SS220-spektroradiometrin mittaasepävarmuus eri kirkkauksilla

Tuloksista voidaan nähdä että mittalaitteen toiminta muuttuu merkittävästi mitattavan kohteen kirkkauden mukaan. Luminanssin absoluuttinen keskihajonta pienenee kirkkauden myötä, mutta suhteellinen keskihajonta käyttäytyy päinvastoin. Kirkkailla kohteilla ilmenevä suurehko keskihajonta on suoraa seurausta mittalaitteen toistettavuudesta, joka aiheuttaa automaattisesti noin 0,05 % vaihtelun luminanssimittauksiin. Näin ollen mitä kirkkaampaa kohdetta mitataan, sitä suurempi absoluuttinen keskihajonta tuloksilla tulee olemaan.

Oleellisempaa tuloksista on kuitenkin huomata mittausten suhteellinen keskihajonta, joka kasvaa kirkkauden pienenessä. Jo 5 cd/m^2 kirkkaudella mittaustulosten keskihajonta on nelinkertainen toistettavuuteen nähden. Kirkkauden pienenessä edelleen suhteellinen keskihajonta vain kasvaa ja kasvaa ollen jopa 6,4 % tutkitun kirkkausalueen alarajalla.

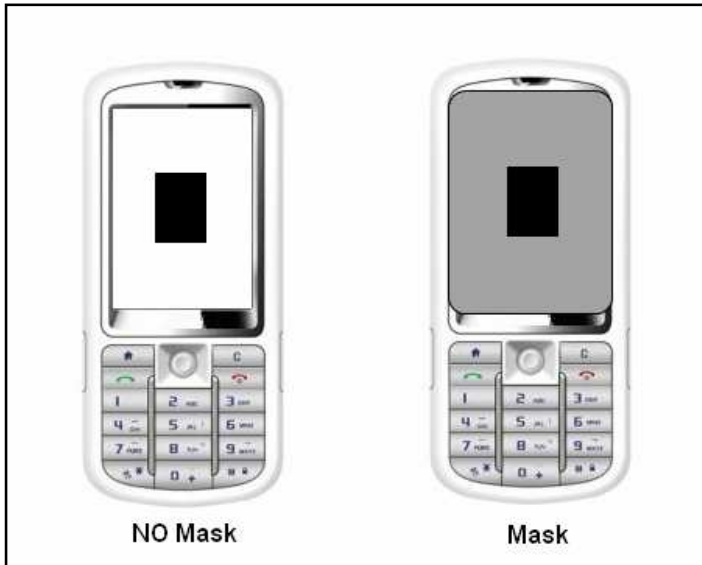
Myös tähän voidaan löytää useita syitä, joista merkittävimpana voidaan olettaa olevan sensorin kohina. Kuten sanottu, kohinan määrä on riippumaton mitattavasta kohteesta ja näin ollen sen vaikutus korostuu mitattaessa hyvin matalia kirkkausarvoja. Toisin sanoen kohinan suhteellinen osuus tuloksesta kasvaa kirkkauden laskiessa. Muita selittäviä tekijöitä voivat olla esimerkiksi lukuvirhe, pyöristysvirhe sekä näytteen epävakaus. Kaikki tekijät korostavat vääristymää erityisesti pienillä kirkkauksilla, mikä ilmenee juuri suurena suhteellisena keskihajontana.

Tutkimuksen yhtenä tutkimuskohteena oli epävarmuuden selvittäminen matalilla kirkkauksilla. Matalalana kirkkauteina voidaan tässä yhteydessä ajatella olevan mobiilinäytön minimikirkkauden. Testinäyttö A:lla tuo minimikirkkaus oli noin $0,6 \text{ cd/m}^2$ ja testinäyttö B:llä $0,038 \text{ cd/m}^2$. Kun tulosdatalle tehdään kuudennen asteen polynomisovitusfunktio, voidaan mittalaitteen epävarmuutta testinäyttöjen kirkkaustasoilla estimoida sen avulla. Sovitusfunktion tuloksena mittalaitteen epävarmuus testinäyttöjen tummilla sävyillä on noin 1 % ja 7 %. Värikoordinaatteja tummilta ruuduilta ei voida SS220-spektroradiometrillä mitata, sillä se vaatii vähintään 5 cd/m^2 kirkkauden värien mittaamiseen.

8.3.5 Linssihäikäisy

SS230-mittalaitteisto ohjaa mittausalueelta saapuvan valon valoherkälle sensorille optiikan avulla. Ideaalitapauksessa sensorille saataisiin tuotua kaikki tuolta alueelta saapuva valo eikä mitään muuta. Linseissä tapahtuu kuitenkin väistämättä heijastuksia, jotka mahdollistavat myös mittausalueen ulkopuolisen valon pääsyn sensorille. Tämä ylimääräinen valo kasvattaa mitattuja arvoja ja aiheuttaa siten virhettä tuloksiin.

Linssihäikäisyn vaikutusta tutkittiin säatelemällä ympäröivän valon pääsyä mittalaitteelle ulkoisen maskin avulla. Maskina käytettiin koko näytön peittävää mustaa kartonkia, johon oli tehty 7x8 mm kokoinen reikä keskelle. Testikuvina näytöillä näytettiin täysin valkoista ja mustaa ruutua sekä kuvaa, jossa valkoisen ruudun keskellä oli musta laatikko. Laatikon pinta-ala peitti kolmasosan koko näytön leveydestä ja korkeudesta. Kohteen keskipisteen kirkkaus mitattiin kullakin kuvalla ensin ilman maskia ja tämän jälkeen maskin kanssa. Linssiheijastusmittausten vaihtoehtoiset asetelmat on esitetty kuvassa 28.



Kuva 28. Linssihäikäisymittauksen mittausasetelmat

Linssihäikäisymittauksista saadut tulokset on esitelty taulukossa 7.

Taulukko 7. Linssihäikäisymittausten tulokset

Testinäyttö A				
	Täysi ruutu			Musta Laatikko
	Lw	Lb	CR	
Ruutu	121,6	0,665	183	1,392
Maski	120,9	0,645	187	0,84
Std %	0,58%	3,01%	-2,51%	39,66%

Testinäyttö B				
	Täysi ruutu			Musta Laatikko
	Lw	Lb	CR	
Ruutu	164,2	0,03	5473	1,65
Maski	164,2	0,037	4438	0,7
Std %	0,00%	-23,33%	18,92%	57,58%

Tuloksista ilmenee hyvin linssihäikäisyn käyttäytyminen. Linssin sisällä tapahtuvat heijastukset välittävät ympäristöstä tulevaa valoa sensorille kasvattaen mitattua kirkkautta. Ympäristön vaikutus on luonnollisesti suurimmillaan sen kirkkauden ollessa suuri ja toisaalta sen vaikutus mittaustulokseen on suhteessa suurin kun mitataan hämärää kohdetta. Tällainen tilanne esiintyy juuri mitattaessa mustaa laatikkoa valkoisella taustalla. Tuloksista nähdään että mittaustulos voi poiketa heijastusten takia jopa yli 50 %.

Samalla on muistettava että heijastusten vaikutus ei ole yhtä suuri mitattaessa täyden ruudun kohteita, kuten musta ja valkoinen ruutu. Mustan ruudun tapauksessa myös laatikkoa ympäröivä alue on pimeänä, jolloin vääristymät ovat minimaaliset. Valkoisella ruudulla taas mitattava arvo itsessään on niin suuri, ettei suhteessa pieni hajavalvo vaikuta tuloksiin suuresti. Esimerkiksi näytöllä B koko ruudun kohteilla mittaustulokset pysyivät käytännössä muuttumattomina maskista riippumatta.

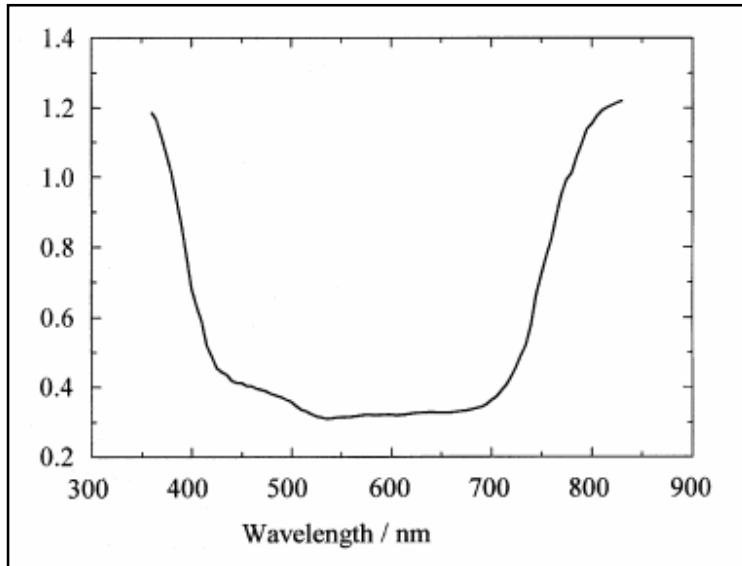
Linssiheijastusten olemassa olo on siis tärkeätä tiedostaa ja ymmärtää missä tilanteissa ne todella vaikuttavat tuloksiin. Tällöin näissä tilanteissa ongelmaan voidaan reagoida esimerkiksi käyttämällä maskia näytön edessä tai putkeä linssin ympärillä /29/.

8.3.6 Kalibrointi

Tutkimuksessa käytetyt mittalaitteet kalibroidaan kerran vuodessa. Kalibroinnit teetetään Helsingin Teknillisen Korkeakoulun Mittaustekniikan laboratoriossa, jonka referenssit ovat jäljitettävissä kansainvälisiin standardeihin. Kalibroinnit tehdään luminanssimittauksille sekä spektrimittauksille. Luminanssikalibrointi tehdään mittaamalla tunnettua valonlähdettä ja vertaamalla tuloksia referenssisensorin arvoihin. Laboratorio lupaa luminanssimittausten kalibroinneille kertoimella kaksi laajennetuksi epävarmuudeksi $\pm 0,8$ %.

Värimittausten kalibrointi suoritetaan spektraalisella kalibroinnilla, jossa verrataan tunnetun valonlähteen spektriä mittalaitteen tulosspektriin. Spektrien erotuksena saadaan ratkaistua mittalaitteelle spektraalinen korjausfunktio. Mittauksista saatuja spektrejä painotetaan aina korjausfunktioilla, jonka jälkeen mittaukset noudattavat viimeisintä kalibrointia.

Kalibrointilähteissä ilmenee kuitenkin myös epävarmuutta ja mittaustekniikan laboratorio ilmoittaakin valonlähteen epävarmuudet erikseen kullakin aallonpituudella välillä 290 - 800 nm. TKK:n spektraalisen kalibrointilähteen aallonpituusriippuvaiset epävarmuudet on esitetty kuvassa 29. /61/



Kuva 29. TKK:n spektraalisen kalibrointilähteen epävarmuus /61/

Mitatun kohteen tristimulusarvojen epävarmuudet saadaan nyt laskettua painottamalla ensin kalibrointiepävarmuuden aallonpituusjakaumaa mitatun kohteen spektrillä ja tämän jälkeen kullakin tristimulusfunktiolla. Tuloksena saadaan kullekin tristimulusarvolle epävarmuudet kyseisellä kohteella. Samu Kallio ratkaisi diplomityössään kyseiset värikoordinaattien u' ja v' epävarmuudet ja sai lopulta tulokseksi seuraavat kaavat: /26/

$$u_c^2(u') = \left(\frac{\partial u'}{\partial X}\right)^2 u^2(X) + \left(\frac{\partial u'}{\partial Y}\right)^2 u^2(Y) + \left(\frac{\partial u'}{\partial Z}\right)^2 u^2(Z) \\ + 2r_{xy} \frac{\partial u'}{\partial X} \frac{\partial u'}{\partial Y} u(X)u(Y) + 2r_{xz} \frac{\partial u'}{\partial X} \frac{\partial u'}{\partial Z} u(X)u(Z) + 2r_{yz} \frac{\partial u'}{\partial Y} \frac{\partial u'}{\partial Z} u(Y)u(Z)$$

$$u_c^2(v') = \left(\frac{\partial v'}{\partial X}\right)^2 u^2(X) + \left(\frac{\partial v'}{\partial Y}\right)^2 u^2(Y) + \left(\frac{\partial v'}{\partial Z}\right)^2 u^2(Z) \\ + 2r_{xy} \frac{\partial v'}{\partial X} \frac{\partial v'}{\partial Y} u(X)u(Y) + 2r_{xz} \frac{\partial v'}{\partial X} \frac{\partial v'}{\partial Z} u(X)u(Z) + 2r_{yz} \frac{\partial v'}{\partial Y} \frac{\partial v'}{\partial Z} u(Y)u(Z)$$

,jossa

$$r_{xy} = \frac{\sum E_i^2 x_i y_i}{\sqrt{\sum E_i^2 x_i^2 \sum E_i^2 y_i^2}}$$

$$r_{xz} = \frac{\sum E_i^2 x_i z_i}{\sqrt{\sum E_i^2 x_i^2 \sum E_i^2 z_i^2}}$$

$$r_{yz} = \frac{\sum E_i^2 y_i z_i}{\sqrt{\sum E_i^2 y_i^2 \sum E_i^2 z_i^2}}$$

x_i , y_i ja z_i ovat tristimulusfunktioiden aallonpituuskomponentti i :
ja E_i on kohteen tuottaman säteilyn aallonpituuskomponentti i .

Valitettavasti tämän tutkimuksen puitteissa spektraalisen kalibrointiepävarmuuden vaikutusta ei voitu siirtää värikoordinaatteihin, sillä mittalaitteen ohjelmistossa ilmenneen ongelman takia mittaustiedot ei sisältänyt aallonpituusjakauman numeerista esitystä.

8.4 Yhdistetty epävarmuus

Luvussa 8.3 on tutkittu montaa epävarmuuteen vaikuttavaa virhelähdettä. Kukaan lähde aiheuttaa tuloksiin epävarmuutta, mutta on hyvin epätodennäköistä että jokainen näistä tekijöistä tuottaisi maksimaalisen saman merkkisen virheen yhtä aikaa. Siitä johtuen ei ole tarpeellista summata epävarmuuksia suoraan yhteen vaan yhdistäminen tehdään kaavan 27 mukaisesti neliöllisellä summalla. Taulukossa 8 on esitelty tutkitut suureet, niihin vaikuttavat virhelähteet sekä mittaustulosten yhdistetty- ja laajennettu epävarmuus.

Taulukko 8. *Epävarmuusanalyysin tulokset*

EPÄVARMUUS	L	u'	v'
Mittaaja	0,61%	0,0003	0,0007
Etäisyys	0,01%	-	-
Integrointiaika	0,66%	-	-
Polarisaatio	1,00%	-	-
Kalibrointi	0,40%	$u_{\text{cal},u'}(\lambda_{\text{cal}}, \lambda_{\text{target}})$	$u_{\text{cal},v'}(\lambda_{\text{cal}}, \lambda_{\text{target}})$
Yhdistetty, u_c	1,40%	$0,0003 + u_{\text{cal},u'}$	$0,0007 + u_{\text{cal},v'}$
Laajennettu, U (k=2)	2,81%	$2 * u_{c,u'}$	$2 * u_{c,v'}$

Taulukosta nähdään että mittausprosessin laajennetuksi epävarmuudeksi luminanssimittauksille saatiin $\pm 2,81\%$ ja värikoordinaateille u' ja v' $\pm 0,0003 + u_{\text{cal},u'}$ ja $\pm 0,0007 + u_{\text{cal},v'}$, missä u_{cal} on kohteen aallonpituusjakaumasta riippuvainen kalibroinnin epävarmuustekijä.

Lisäksi tutkimuksessa oli tavoitteena selvittää mittauksiin liittyvä epävarmuus kun mitataan tummia kohteita kuten mustaa ruutua. Tutkimuksen tuloksista huomattiin, että matalilla kirkkaustasoilla epävarmuus nousee dramaattisesti. Jo keskiverto mobiilinäytön mustan tasolla luminanssimittausten toistettavuus kohosi ja tutkimuksen testinäytöillä se oli noin 1 % ja 7 %. Tämä on lisättävä luminanssimittausten epävarmuus laskentaa yhdeksi tekijäksi, jolloin laajennettu epävarmuus testinäyttöjen tummille kohteille oli 3,45 % ja 14,3 %.

Mustan ruudun luminanssia käytetään myös laskettaessa näytölle kontrastisuhdetta. Koska tässä tutkimuksessa on ratkaistu epävarmuudet erikseen vaaleille ja tummille kohteille, on se huomioitava myös laskettaessa kontrastisuhteen epävarmuutta. Monesta tekijästä riippuvaisille mittaustuloksille voidaan epävarmuus ratkaista kaavalla 28 ja kontrastisuhteelle kaava laskettiin luvussa 5.2.3. Kontrastisuhteen epävarmuus on nyt riippuvainen saaduista mittaustuloksista ja testinäyttö A:lla se lasketaan seuraavasti:

$$u_c(y) = \frac{\sqrt{L_b^2 u(L_w)^2 + L_w^2 u(L_b)^2}}{L_b^2}$$

$$u_c(y) = \frac{\sqrt{0,62^2 * (121 * 1,4\%)^2 + 121^2 * (0,62 * 1,72\%)^2}}{0,62^2} = \pm 4,33 = 2,2\%$$

Näin ollen testinäyttö A:n kontrastimittausten kertoimella kaksi laajennetuksi epävarmuudeksi saadaan 4,4 % ja testinäyttö B:llä vastaava lukema on jopa 14,6 %.

8.5 Luotettavuusanalyysi

Tehty tutkimus kattoi laajan teoriaosuuden, joka antoi hyvän pohjan epävarmuusanalyysin toteuttamiselle. Rajoitteita asettivat kuitenkin referenssien puutteet niin mittalaitteiden kuin mittaustarkkohteiden osalta. Tutkimusta voidaan jatkossa jatkaa parempien valonlähteiden ja referenssimittareiden avulla, jolloin on mahdollista tutkia myös sensorin lineaarisuutta, aallonpituuksien tarkkuutta sekä spektraalista tarkkuutta.

Saadut arvot eivät siis toimi lopullisina vastauksina laboratorion mittausepävarmuuteen. Ne sisältävät ainoastaan kaikista merkittävimmät vaikuttajat, joita voitiin tutkia ilman sen tarkempia referenssejä. Työssä on pyritty selvittämään eri tekijöiden tuottamaa hajontaa ja kiinnittää lopuksi tuo hajonta kiinteään referenssipisteeseen kalibrointi-informaation avulla.

Toinen merkille pantava tekijä on mittalaitteen kalibrointi, joka tulee tehdä kerran vuodessa. Edellisestä kalibroinnista on kuitenkin aikaa jo vuosi ja neljä kuukautta, joten kalibrointi olisi toistettava pikimmiten. Ennen uutta kalibrointia tutkimuksessa ratkaistu epävarmuus ei välttämättä pidä paikkaansa, koska epävarmuuteen liitetty kalibrointitieto on vanhentunutta.

9 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tutkimuksen päällimmäisenä tavoitteena oli selvittää käytetyn mittaussprosessin epävarmuus. Toisena tavoitteena oli tutkia prosessin virhelähteitä ja paikallistaa siinä ilmeneviä suurimpia heikkouksia. Tutkimuksen tavoitteiden voidaan sanoa täyttyneen, sillä tuloksena tutkimuksesta saatiin mittauserpävarmuudet luminanssille, tumman ruudun luminanssille, kontrastille sekä u' - ja v' -värikoordinaateille. Lisäksi tutkimuksen aikana mittaussprosessista tehtiin lukuisia positiivisia ja negatiivisia havaintoja.

Negatiivisena havaintona voidaan pitää sitä, että vertailtaessa luminanssimittauksen epävarmuustuloksia luvussa 5.5 esiteltyjen aiempien tutkimusten tuloksiin, voidaan huomata saatujen epävarmuuksien olevan verrokkeja korkeampia. Todellisen epävarmuuden lisäksi tähän vaikuttavat kuitenkin myös menetelmät, joilla epävarmuutta tutkittiin. Esimerkiksi merkittävimmän virhelähteen eli polarisaation vaikutus saatiin mittalaitteen valmistajan toimittamana. Virhe on poikkeavan suuri, mistä johtuen on syytä epäillä sen oikeellisuutta ja jatkossa tätä on syytä tutkia lisää.

Toisena tuloksista ilmenneenä heikkoutena voidaan pitää tummien kohteiden mittauksiin liittynyvää suurta epävarmuutta, joka ei käy ilmi laitteiden teknisistä tiedoista. Se on merkittävä tekijä mitattaessa esimerkiksi kontrastisuhdetta tai mustan ruudun luminanssia, jotka ovat keskeisiä suorituskyky arvoja nykynäytöillä. Suurin syy kohonneeseen epävarmuuteen oli todennäköisesti sensorin kohina. Kohina korreloi vahvasti lämpötilan kanssa, mutta koska laboratorion lämpötila säilyi läpi mittausten tavoitelluissa rajoissa, ei sitä ole syytä lähteä muuttamaan. Kaikki valosensorit kärsivät kohinasta eikä sitä ole koskaan mahdollista poistaa täysin. Toimenpide, jota tutkimuksen mittaustaliossa voitaisiin harkita, on useamman mittaustuloksen keskiarvoistaminen sillä se pienentää satunnaisten virheiden kuten kohinan vaikutusta. Keskiarvoistaminen vaatii kuitenkin taas useampien mittausten tekemistä ja sitä kautta myös mittaussprosessin hidastumista.

Kolmas merkittävä heikkous mittaussprosessissa on ollut linssiheijastusten huomiotta jättäminen. Heijastusten vaikutus on pieni mitattaessa koko ruudun kattavia kohteita, mutta muilla kohteilla tulokset muuttuvat dramaattisesti kun mittaukset suoritetaan mittausaluetta ympäröivän valon peittävän maskin läpi. Ilmiötä on syytä tutkia lisää, sillä esimerkiksi OLED-näyttöjen mittauksissa myös muiden kuin koko ruudun kohteiden mittaamisen merkitys kasvaa. Koska OLED-näytöillä maksimikirkkaus on riippuvainen koko näytön keskimääräisestä kirkkaudesta, on usein perusteltua suorittaa mittauksia esimerkiksi shakkikuviolta, jolloin linssiheijastusten vaikutus voi olla suurikin.

Lisäksi myös poikkeuksellisen matalaa kosteusprosenttia on syytä seurata jatkossa. VESA on standardissaan asettanut mittaustilan kosteudelle vähimmäismääräksi 20 %, mutta tutkimuksen aikana kosteusprosentti laski jopa alle 5 %:en. Mikäli matalalla kosteudella havaitaan jatkossa

olevan vaikutusta tuloksiin, on laboratorion ilmastointilaitteistoon perehdyttävä perusteellisemmin. Tämän työn aikana kosteudella ei kuitenkaan huomattu olevan korrelaatiota kirkkaus tai kromaattisuusmittausten kanssa.

Tuloksista löytyi myös paljon positiivisia asioita. Ensinnäkin mittalaitteisto on suhteellisen vakaa niin lyhyellä kuin pidemmälläkin aikavälillä. Toistettavuus oli vain kymmenesosan VESA:n minimivaatimuksesta ja myös kuukauden aikana saadut tulokset lähentelivät standardin toistettavuusehdon asettamia rajoja. Tämä on erinomainen suoritus kun huomioi että standardi määrittelee toistettavuuden 5 minuutin sisällä tehtyjen mittausten perusteella.

Vakauden lisäksi positiivisina havaintoina voidaan pitää mittausprosessin toimivuutta yleisesti. Mittausolosuhteet pysyivät valtaosan ajasta standardin vaatimissa rajoissa eikä normaalia matalammilla kosteusarvoilla todettu olevan suurta vaikutusta tuloksiin. Myös laboratorion mittausohjeistus todettiin riittäväksi, sillä neljän koehenkilön tekemien mittausten väliset erot olivat linjassa mittalaitteiston vakauden kanssa. Olosuhteet ja toimintamallit ovat sellaisia tekijöitä joihin olisi jälkikäteen mahdollista vaikuttaa, mutta näillä näkymin siihen ei ole tarvetta.

Myöskään tutkitun näytön tekniikalla itsellään ei tämän tutkimuksen puitteissa havaittu olevan suurta vaikutusta, vaan suurempia tekijöitä epävarmuudelle ovat tutkitun näytteen vakaus ja kirkkaustaso. Toisaalta OLED-näytöt pystyvät lähes poikkeuksetta LCD-näyttöjä tummempaan mustaan, minkä seurauksena epävarmuudet niiden luminanssi- ja kontrasti-mittauksissa ovat järestäen LCD-näyttöjen vastaavia suuremmat. Tätä ei kuitenkaan voida laittaa näyttötekniikan piikkiin vaan syynä ovat puhtaasti mittalaitteen asettamat rajoitteet eri kirkkausalueilla. Valitettavasti tarkempaa analyysiä värimittausten oikeellisuudesta ei tämän tutkimuksen puitteissa kyetty tekemään.

Työn teoriaosiossa käytiin läpi taustoja liittyen näyttöjen mittaukseen ja epävarmuuden tutkimiseen. Kun teorian optiikkaan ja tekniikkaan liittyneet osiot käsittelivät yksiselitteisiä ja selkeitä asioita, ei samaa voi sanoa mittausmenetelmiin ja epävarmuuteen keskittyneistä luvuista. Sekä mittausten tekemiseen että epävarmuuden selvittämiseen löytyi lukuisia lähteitä ja niiden sisältö poikkesi toisistaan yllättävän paljon. Heti kättelyssä kävikin selväksi, että on ensisijaisen tärkeätä valita menetelmänsä ennen työn aloittamista ja pysyä siinä loppuun asti. Tässä tapauksessa mittausstandardiksi valittiin VESA FPDm2 ja epävarmuusanalyysi toteutettiin ISO GUM-oppaan pohjalta. Valinnat ovat perusteltuja sillä molemmat teokset ovat maailmalla laajassa käytössä ja yleisesti hyväksytyjä.

Kokonaisuuten työ tarjoaa lukijalleen laajan katsauksen näyttömittaukselle oleellisimpiin tekijöihin. Se sisältää perustietoa valosta, valon havaitsemisesta ja mittaamisesta minkä lisäksi työstä löytyy myös tarkempaa tietoa laitteiston toiminnasta ja mittausepävarmuuksista. Lopuksi näitä tietoja on hyödynnetty käytännön kokeissa, joissa olla selvitetty Elektrobittillä käytetyn mittausprosessin epävarmuus.

LÄHDELUETTELO

- /1/ **Antoniadis H.** *Overview of OLED Display Technology*. Osram Optical Semiconductors, 2003, (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa: <URL:<http://www.ewh.ieee.org/soc/cpmt/presentations/cpmt0401a.pdf>>
- /2/ **Arnett B.** *Sähköposti 24.7.2007*. Microvision, Auburn, Kalifornia 2007
- /3/ **Aschenbrenner N.** *Brilliant Plastics*. Siemens, 2003.
http://www.siemens.com/index.jsp?sdc_p=t15cz3s5u20o1156373d1187140pFEn1126388flmi1126388&sdc_sid=20333128550&
- /4/ **AU Optronics.** *OLED, What is OLED*. AUO. n.d. (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa: <URL:<http://www.auo.com/auoDEV/technology.php?sec=OLED>>
- /5/ **Bahadur B.** *Liquid crystals: Applications and uses, Volume 1*. World Scientific Publishing Co., Singapore 1990.
- /6/ **Baribeau R.** *Spectral Characterization and Color Correction of Display Colorimeters*. Journal of SID 14(2006)11. s. 973-978.
- /7/ **Besuijen K. & Spenkeliink G.P.J.** *A Classification Framework for Visual Display and Image Quality*. Eurodisplay 2002, 1-4.10.2002. Nizza 2002. s. 795-798.
- /8/ **Boyd J.** *Photo Fine Chromarich Technology, Small Displays Make a Big Impact*. Epson. n.d. (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa: <URL:http://www.epson-imaging.com/e/technology/index_tnl0602.html>
- /9/ **Brace N., Kemp R. & Snelgar R.** *SPSS for Psychologists A Guide to Data Analysis using SPSS for Windows*, Second Edition. Lawrence Erlbaum Associates, Yhdysvallat 2003 399 s.
- /10/ **Brown S.W. & Ohno Y.** *NIST Reference Spectroradiometer for Color Display Calibrations*. IS&T/SID, The Sixth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications 6(1998). s. 62-64.
- /11/ **Cambridge Display Technology.** *Active and Passive Matrix*. n.d. (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa: <URL:<http://www.cdtltd.co.uk/technology/39.asp>>
- /12/ **Cambridge Display Technology.** *Cambridge Display Technology and Sumation Announce Strong Lifetime Improvements to P-OLED Material; Blue P-OLED Materials Hit 10,000 Hour Lifetime Milestone at 1,000 cd/sq.m*. Englanti 2007. (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa: <URL:http://www.cdtltd.co.uk/press/current_press_releases/602.asp>
- /13/ **Downen P.** *A Closer Look at Flat-Panel-Display Measurement Standards and Trends*. Information Display 22(2006)1. s.16-21.
- /14/ **Fairman H.S., Brill M.H. & Hemmendinger H.** *How the CIE 1931 Color-Matching Functions Were Derived from Wright-Guild Data*. Color Research & Application 22(1998)1, s. 11-23.
- /15/ **Demus D., Goodby J., Gray G.W., Spiess H.-W. & Vill V.** *Physical Properties of Liquid Crystals*. Wiley-VCH, Yhdysvallat 1999. 522 s.

- /16/ **Fatadin I.M.A., Wall C. & Taylor J.** *13.2: A Photon Counting Detector Used for Precision Measurement of Displays*. SID Symposium Digest of Technical Papers 35(2004)1. s. 188-191.
- /17/ **Gigahertz-Optik.** *Application & Product Guide 2004*. Gigahertz-Optik 2004. Saatavilla WWW-muodossa: <URL:<http://www.gigahertz-optik.de/pdf/catalogue/Tutorials.pdf>>
- /18/ **Glynn II E.F.** *Color projects*. efg's Computer Lab. Yhdysvallat 2001. (online) [viitattu 5.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa: <URL:<http://www.efg2.com/Lab/Graphics/Colors/Chromaticity.htm>>
- /19/ **Haataja J.**, *Digitaalisen Television Luettavuus*. Diplomityö, Teknillinen korkeakoulu, Puunjalostustekniikan osasto. Espoo 2002. 105 s.
- /20/ **Hoffmann G.** *CIE Color Space*. Emdenin ammattikorkeakoulun Professori Hoffmannin kotisivut. n.d. (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa: <URL:<http://www.fho-emden.de/~hoffmann/ciexyz29082000.pdf>>
- /21/ **Instrument Systems.** *LumiCam 1300, Imaging Photometer and Colorimeter*. Saksa. n.d. (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa: <URL:<http://www.instrument-systems.de/products/downloads/lumicame.pdf>>
- /22/ **ISO.** *Guide to the expression of uncertainty in measurement*, 1. painos. International Organization for Standards 1995. 101 s.
- /23/ **ISO 13406.** *Ergonomic requirements for work with visual displays based on flat panels, Part 2: Ergonomic requirements for flat panel displays*. International Organization for Standards 2001. 147 s.
- /24/ **ISO 5725-2:1994.** *Accuracy (trueness and precision) of measurement methods and results – Part 2*. International Organization for Standards 1994. 52 s.
- /25/ **Jenkins D.R., Beuzekom D.C., Kollman G., Wooley B. & Rykowski R.** *Digital imaging colorimeter for fast measurement of chromaticity coordinate and luminance uniformity of displays*. Proceedings of SPIE, (2001)4295, s. 176-187. (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa: <URL:http://www.infotek.com.tw/GB2312/support/support_03/IT-RadiantImaging/ORG/Digital%20imaging%20colorimeter%20for%20fast%20measurement%20of%20chromaticity%20coordinate%20and%20luminance%20uniformity%20of%20displays-ORG-2003%200723.pdf>
- /26/ **Kallio S.** *Improving optical measurement accuracy of small LCD panels by using advanced calibration process and uncertainty analysis*. Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Automaatio- ja systeemitekniikan osasto. Espoo 2006. 87 s.
- /27/ **Kallio S.** *Näyttöjen suorituskyvyn mittaaminen*, Kuvaus- ja näyttötekniikka Luento 4 / Osa II. Teknillinen korkeakoulu, Viestintätekniikan laboratorio, Kuvaus- ja Näyttötekniikka-kurssin luentokalvot. Espoo 2006.
- /28/ **Keller P.A.** *Electronic Display Measurement: Concepts, techniques, and instrumentation*, 1. painos. John Wiley & Sons, Inc., Yhdysvallat, 1997. 326 s.
- /29/ **Kelley E.F.** *Display Measurements for Flat Panel Displays*, Seminar A6. SID 2006 International Symposium, Seminar and Exhibition, 4-9.6.2006, San Francisco, California 2006. 76 s.
- /30/ **Kimmel J., Hautanen J. & Levola T.** *Display technologies for portable communication devices*. Proceedings of IEEE 90(2002)4. s. 581-590.
- /31/ **Konica Minolta.** *The Language of Light*. n.d. (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa:

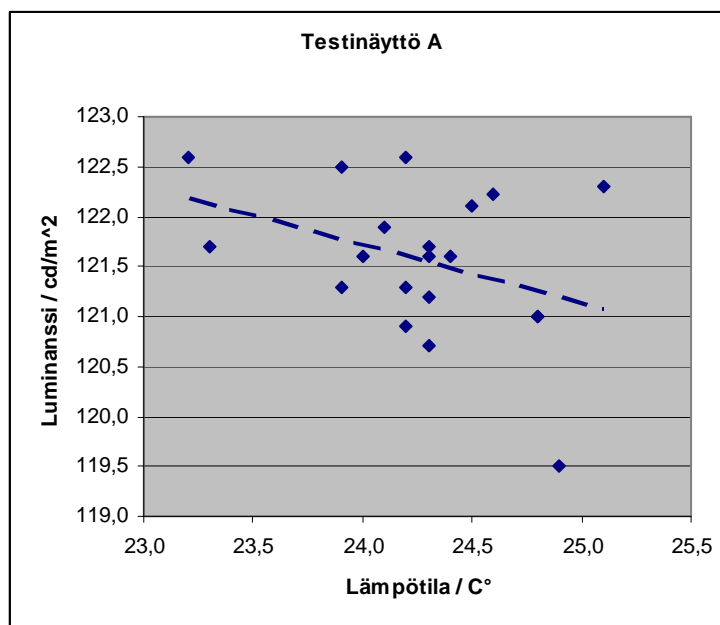
- <URL:http://www.konicaminoltaeurope.com/fileadmin/user_upload/Products/Industrial_Products/PDFs/en/Language_of_Light.pdf>
- /32/ **Konica Minolta.** *Precise color communication.* n.d. (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa:
<URL:<http://www4.konicaminolta.eu/pcc/en/part1/07.html>>
- /33/ **Kotamäki I.** *Study of Display Color Measurement Devices.* Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto. Espoo 2006. 53 s.
- /34/ **Kärhä P.** *Mittausepävarmuus,* Mittaustekniikan perusteet / Luento 7. Teknillinen korkeakoulu, MIKES TKK Mittaustekniikka, Mittaustekniikan perusteet A-kurssin luentokalvot. Espoo 2006.
- /35/ **Labsphere.** *Spectralon Diffuse Reflectance Standards.* Labsphere. n.d. (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa:
<URL:http://labsphere.com/data/userFiles/Diffuse%20Reflectance%20Standards%20Product%20Sheet_3.pdf>
- /36/ **Luet M., Leroux T., Curt J-N. & Horain D.** *P-108: Improving the Accuracy of Colorimeters for Display Measurement Applications,* Eurodisplay 2002, 1-4.10.2002. Nizza 2002. s. 799-802.
- /37/ **Mahon J.K.** *5.1 Invited Paper: History and Status of Organic Light Emitting Device (OLED) Technology for Vehicular Applications.* SID Symposium Digest of Technical Papers 32(2001)1, s.22-25.
- /38/ **Manoocheri F., Brown S.W. & Ohno Y.** *NIST Colorimetric Calibration Facility for Displays – Part 2,* SID Symposium Digest of Technical Papers 32(2001)1. s. 330-333.
- /39/ **Microvision.** *SS200 Series System Manual,* versio 1.67, Microvision, Yhdysvallat 2001. 332 s.
- /40/ **Microvision.** *SS200/300 Calibration procedure.* Microvision. n.d.
- /41/ **Moreau O., Noel J. & Leroux T.** *Contrast and colorimetry measurements versus viewing angle for microdisplays.* Eldim. Saksa. n.d. (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa:
<URL:<http://www.eldim.fr/library/eldim-publications>>
- /42/ **Myers R.L.** *Display Interfaces Fundamentals and Standards, 1. painos.* John Wiley & Sons Ltd, Englanti 2002. 299 s.
- /43/ **Nieminen J.** *Characterization of Liquid Crystal Display Devices.* Diplomityö. Teknillinen korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto. Espoo 2004. 79 s.
- /44/ **NIST/SEMATECH.** *e-Handbook of Statistical Methods.* NIST Information Technology Laboratory, 2006. (online) [viitattu 5.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa: <URL:<http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/>>
- /45/ **Ohno Y. & Brown S.W.** *Four-Color Matrix Method for Correction of Tristimulus Colorimeters – Part 2.* IS&T Sixth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications 6(1998), s. 65-68.
- /46/ **Ohno Y. & Hardis J.E.** *Four-Color Matrix Method for Correction of Tristimulus Colorimeters.* IS&T/SID The Fifth Color Imaging Conference: Color Science, Systems and Applications 5(1997), s. 301-305.
- /47/ **Peng D-Z., Hsu H-L. & Nishikawa R.** *Challenges for Small – and Medium-Sized AMOLED Display.* Information Display 23(2007)2, s.12-18.
- /48/ **Pohjanoksa H.** *Sähköposti 29.5.2007.* Ilmatieteen laitos, Ilmastopalvelu, Helsinki 2007.

- /49/ **Radiant Imaging.** *CCD Overview.* Yhdysvallat. n.d. (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa:
<URL:<http://www.radiantimaging.com/doccd.htm>>
- /50/ **Ryer A.** *The Light Measurement Handbook.* International Light Technologies, Yhdysvallat 1997. (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa:
<URL: <http://www.intl-lighttech.com/services/light-measurement-handbook>>
- /51/ **Saarelma H.** *Kuvatekniikan perusteet.* Otatieto, Helsinki 2003. 174 s.
- /52/ **Samsung SDI.** *LCD Structure & principle.* n.d. (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa:
<URL:<http://www.samsungsdi.com/contents/en/product/lcd/structure.html>>
- /53/ **Schott-Fostec.** *DCR II, DC Regulated Light Source, User's Manual and Technical Reference.* Schott-Fostec, Auburn, New York 2000.
- /54/ **Silvekoski V.** *Litteiden näyttöjen mittaussuoriteurien kehittäminen.* Diplomitöy. Teknillinen korkeakoulu, Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto. Espoo 2001. 98 s.
- /55/ **Skelley S., Kreysar D. & Chittim K.** *Imaging colorimeters give advanced options.* Optics & laser Europe (2007)148, s.25-28.
- /56/ **Spring K.R. & Davidson M.W.** *Electronic Imaging Detectors.* National High Magnetic Field Laboratory, Optical Microscopy Division. Yhdysvallat 2005. (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa:
<URL:<http://micro.magnet.fsu.edu/primer/digitalimaging/digitalimagingdetectors.html>>
- /57/ **SPWG Version 3.5.** *SPWG Notebook Panel Specification Version 3.5,* Standard Panel Working Group SPWG 2005.
- /58/ **TCO '03.** *TCO '03 Displays, Flat Panel Displays ver 3.0.* The Swedish Confederation of Professional Employees TCO 2005.
- /59/ **TEAC.** *How does an LCD work?.* TEAC Australia. n.d. (online) [viitattu 5.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa: <URL:
<http://www.teac.com.au/pages/howdoesanlcdwork>>
- /60/ **Techno Team.** *Techno Team Video Photometer prospectus.* Saksa. n.d. (online) [viitattu 7.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa:
<URL:http://www.technoteam.de/e898/e97/e286/e287/e332/LMK_2005_en_Web_eng.pdf>
- /61/ **Toivanen P., Hovila J., Kärhä P. & Ikonen E.** *Realization of the units of luminance and spectral radiance at the HUT.* Metrologia 37(2000). 527-530.
- /62/ **VESA FPDM 2.0.** *Flat Panel Display Measurement Standard.* Video Electronics Standards Association, Display Metrology Committee 2001. 321 s.
- /63/ **Wall C.** *Display Measurement and Evaluation.* National Physical Laboratory. Englanti. n.d. (online) [viitattu 5.9.2007] Saatavilla WWW-muodossa:
<URL:http://www.npl.co.uk/photonics/displays/display_eval.pdf>
- /64/ **Weiss D.B.** *Analysis of Variance and Functional Measurement: A Practical Guide,* Oxford University Press, Incorporated, Englanti 2005. 278 s.

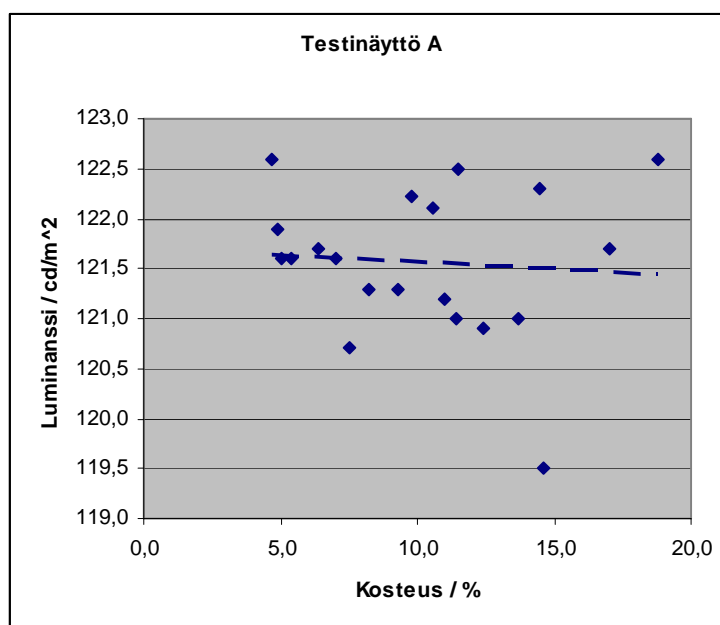
LIITTEET

1. Vakaustestin olosuhderippuvuudet
2. Mittausohjeet

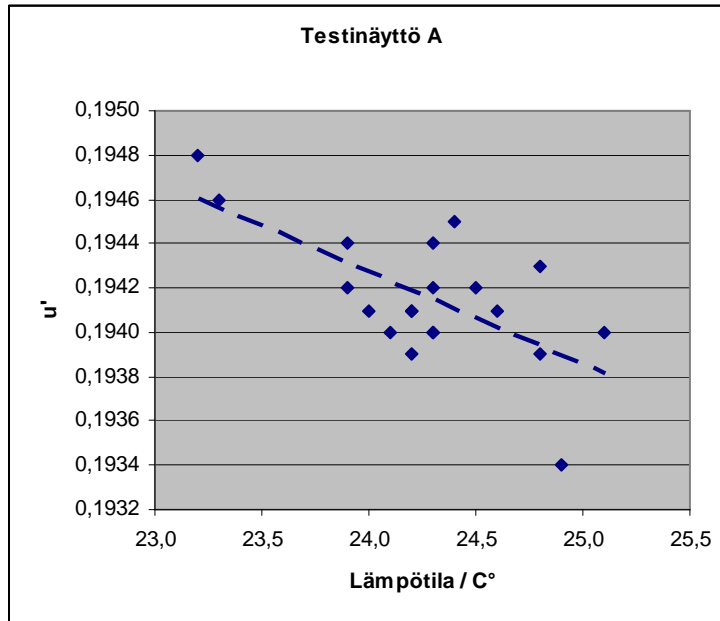
LIITE 1 – VAKAUSTESTIN OLOSUHDERIIPPUVUDET



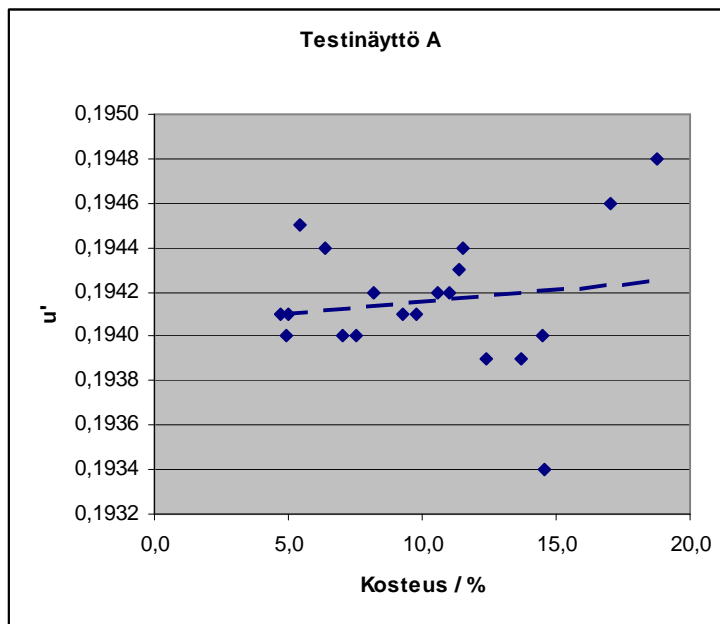
Kuva 30. Testinäyttö A:n lämpötila-luminanssi riippuvuus



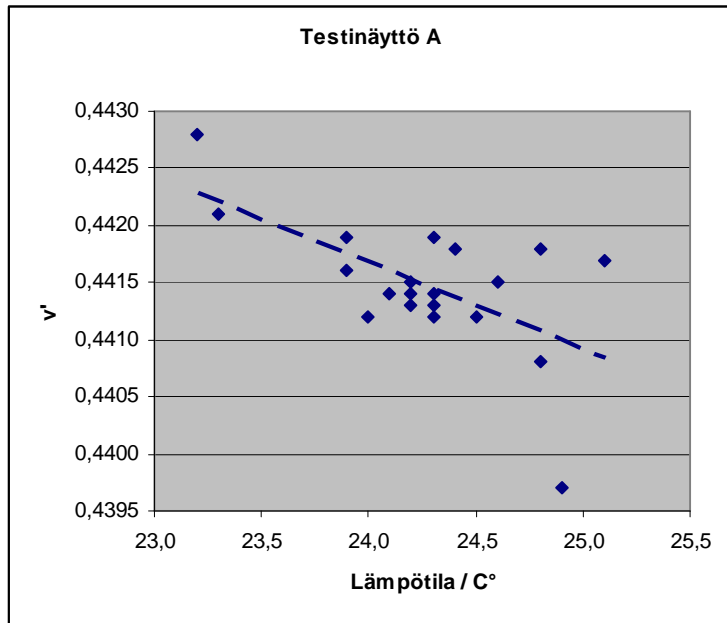
Kuva 31. Testinäyttö A:n lämpötila-kosteus riippuvuus



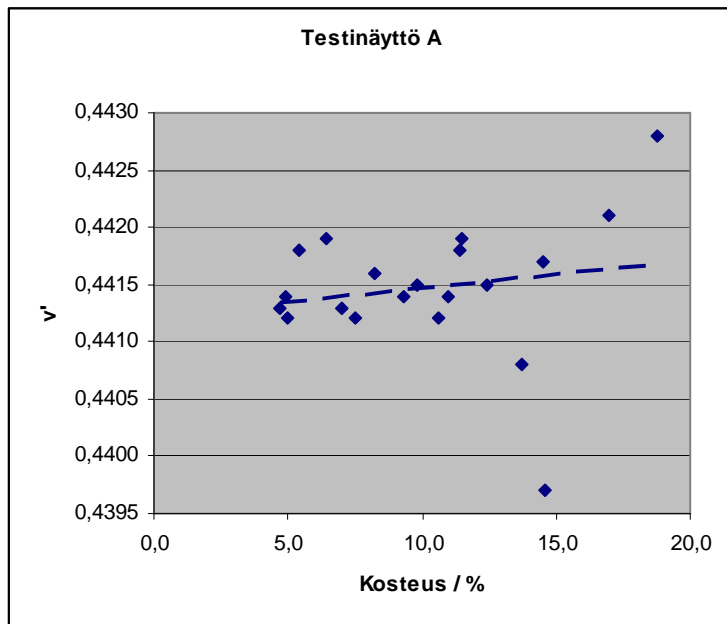
Kuva 34. Testinäyttö A:n lämpötila-u' riippuvuus



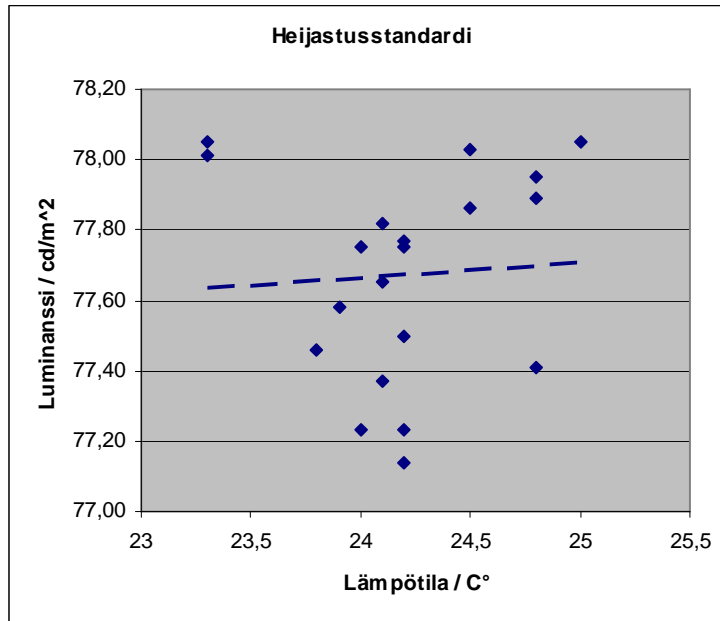
Kuva 35. Testinäyttö A:n lämpötila-luminanssi riippuvuus



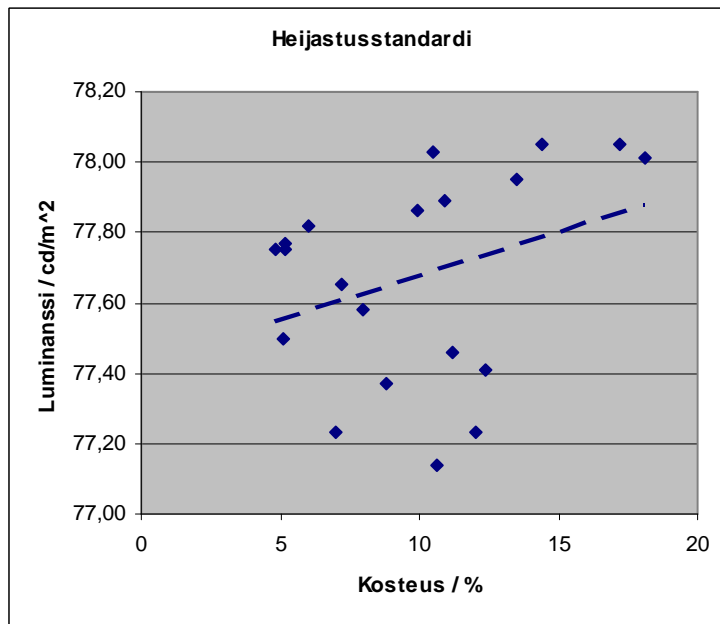
Kuva 36. Testinäyttö A:n lämpötila- v' riippuvuus



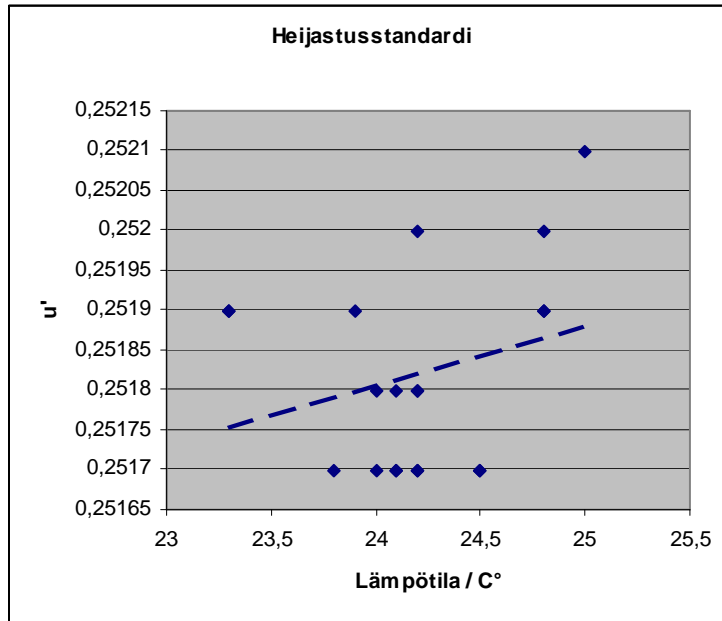
Kuva 37. Testinäyttö A:n kosteus- v' riippuvuus



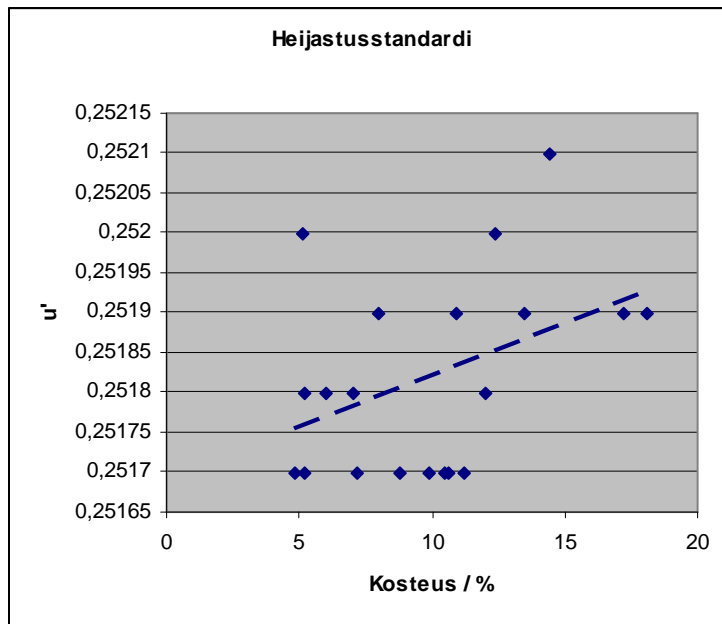
Kuva 38. Heijastusstandardin lämpötila-luminanssi riippuvuus



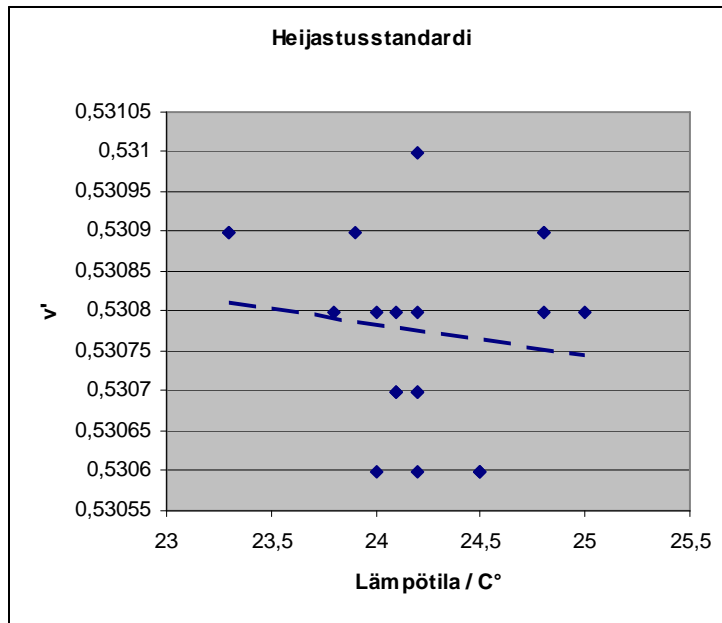
Kuva 39. Heijastusstandardin kosteus-luminanssi riippuvuus



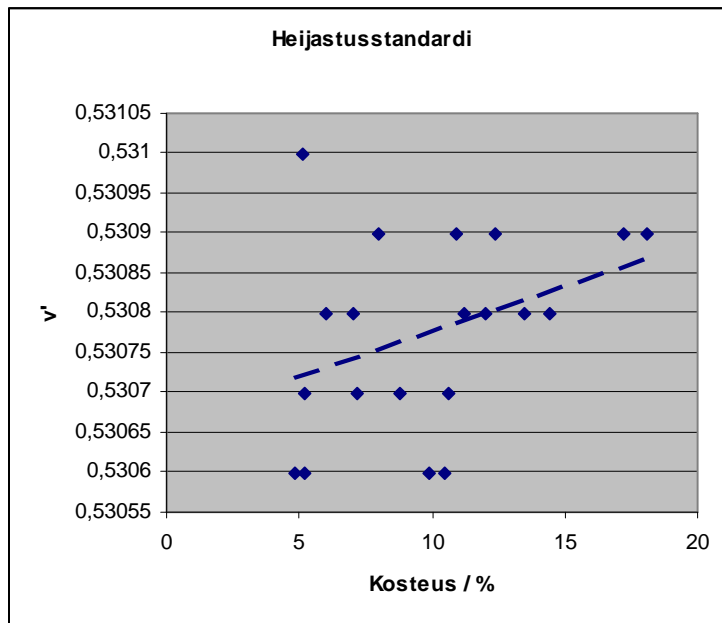
Kuva 40. Heijastusstandardin lämpötila-u' riippuvuus



Kuva 41. Heijastusstandardin kosteus-u' riippuvuus



Kuva 42. Heijastusstandardin lämpötila-v' riippuvuus



Kuva 43. Heijastusstandardin kosteus-v' riippuvuus

LIITE 2 - MITTAUSOHJEET

Mobiilinäyttöjen Mittausohjeet Mittalaitteistolle A

Espoossa 12.6.2007
Janne Jaakkola

1 JOHDANTO

Tämä ohje on kirjoitettu Janne Jaakkolan diplomityönään tekemää näyttömittausten toistettavuus tutkimusta varten. Dokumentti sisältää tarkan ohjeistuksen yksinkertaisimpien luminanssi- ja värillisuysmittausten suorittamiseen mobiileille näytöille. Ohjeiden avulla kokemattomankin käyttäjän on mahdollista saada mittauksista vertailukelpoisia tuloksia muiden käyttäjien tuloksien kanssa.

2 ESIVALMISTELUT

2.1 Lämmitys (Warm up)

Sekä mitattavan näytön, (display under test) DUT, että mittalaitteen on annettava lämmitä vähintään 20 minuuttia. Mitattavaa näyttöä tulee ajaa tämä aika täydellä teholla eli toisin sanoen sen tulee näyttää tämän ajan täysin valkoista ruutua. (Tarvittaessa myös hajavalonlähteen on lämmittävä vähintään 20 minuuttia)

2.2 Näytön valmistelu

Jotta mittaukset kuvastaisivat parhaiten näytön todellista suorituskykyä katselutilanteessa, on sen asetukset säädettävä kuvastamaan normaalikatselutilannetta. Säädot on pidettävä samoina läpi mittausten. Mikäli näytössä ei ole säätömahdollisuuksia mitataan se tehdasasetuksilla.

2.3 Mittausohjelmiston asetukset

Mittalaite A tarjoaa lukuisia asetuksia käyttäjän säädettäväksi. Asetukset ovat vakioidut eikä operaattorin tarvitse muuttaa niitä. Ainoa asetus joka on suositeltavaa muuttaa jokaiselle mittaukselle on kerättävän datan kohdehakemisto. Vaihda se sopivaksi kohdasta **SETUP**.

Data log directory = DATA\your_directory. Valitse tunnistettava nimi data-hakemistolle.

3 ALUSTUS

Ennen mittauksia mittalaitteisto tulee alustaa. Ohjelmisto tarjoaa alustukseen valmiit rutiinit eri tilanteisiin. Jos ohjelmisto voi itse ohjata mitattavaa näyttöä vga-johdon kautta, on alustus rutiini täysin automatisoitu. Mikäli näyttöä ei voida kiinnittää mittauskoneeseen on sitä ohjattava manuaalisesti. Tällöin käytetään manuaalista alustusrutiinia.

3.1 Näytön kiinnitys

Kiinnitä näyttö telineeseen vatupassia hyväksikäyttäen niin että se on kohtisuorassa mittalaitteistoon nähden. Tarkista myös että näyttö on pystysuorassa eli ylä- ja alareuna ovat lattian suuntaiset.

3.2 Goniometrin suuntaus

Suuntaa goniometri ohjelmiston siihen tarjoamilla työkaluilla. Työkalut löytyvät ohjelmistosta kohdasta **INIT -> Direct Positioning**.

- Käännä 'Roll'-akseli pystysuoraan niin että inkliinaatio kulma voi liikkua vain ylöspäin.
- Käännä 'Skew'-akseli alimpaan asentoon.
- Aseta tämä kohta ohjelmiston nollakohdaksi **INIT -> Direct Positioning -> ZSet**.

3.3 Alustus rutiinit

Manuaalinen alustus:

Alustaaksesi mittalaitteisto manuaalisesti tee seuraavaa:

- Aseta **SETUP -> UUT Init Functions = 15597**
- Aja UUT Init toiminto **INIT -> UUT Init** (kts. UUT init)
- Etsi näytön keskipiste. Tämä onnistuu asettamalla näytölle valkoinen '+'-risti mustalla taustalla ja etsimällä x- ja y-akselien luminanssimaksimit. Maksimit voidaan etsiä siirtämällä mittapäätä kohdasta **Direct Positioning plug-in** ja seuraamalla luminanssi arvoa **Luminance plug-in** moduulista.
- Aseta tämä kohta ohjelmiston nollakohdaksi **INIT -> Direct Positioning -> ZSet**

Automaattinen alustus:

Alustaaksesi mittalaitteisto automaattisesti tee seuraavaa:

- Aseta **SETUP -> UUT Init Functions = 5252**
- Aja UUT toiminto **INIT -> UUT Init** (kts. UUT init)
- Aseta tämä kohta ohjelmiston nollakohdaksi **INIT -> Direct Positioning -> ZSet**

UUT init:

'UUT init' tulee tehdä joka kerta kun mitattava näyttö vaihdetaan. 'UUT init' pyytää käyttäjältä näytön tietoja. Vastaa pyydettyihin tietoihin seuraavasti:

- Type = "Use Type Below"
 - "Custom"
- Active area = "Use Nominal Values Below"
 - Asetan näytön aktiivinen alue spesifikaatioiden mukaiseksi. Mikäli niitä ei ole saatavilla on mitat mitattava käsin.
- Feature Span = "Use Observed Values"

Tämän jälkeen paina **OK** ja 'UUT init' ajaa funktiot, jotka on määritelty kohdassa **SETUP -> UUT Init Functions**.

Bias:

'Bias' asettaa mittalaitteistolle nollatason. 'bias' kalibrointi tulee toistaa pitkien mittausten aikana. Ohjelma ilmoittaa kalibroinnin vanhenemisestä vilkuttamalla tekstiä 'BIAS UNCALIBRATED' ruudun oikeassa alakulmassa. Jos kalibrointi vanhenee on se uusittava välittömästi. 'Bias' kalibrointi sisältyy alustus rutiineihin.

- Paina **INIT -> Bias**
- Aseta musta korkki mittapähän ohjelmiston ohjeiden mukaan.

3.4 Spectrometrin herkkyuden asetus

Mittalaitteisto on suunniteltu skaalautumaan useille eri näyttötekniikoille ja siksi mm. sen herkkyyttä voidaan säätää manuaalisesti. Mittapään herkkyys säädetään seuraavalla tavalla:

- Säädä mittauksen integrointi aikaa ohjelmiston toiminnolla **INIT -> Spectrometer Plug-In -> Frames**. Oletusarvona on '-50'. Tämä asetus antaa ohjelman valita parhaan arvon integraatioajalle väliltä 1-50.
- Mikäli mittapään saturaatio, %FS oikeassa alakulmassa, on yli 50, tulee mittapähän asettaa neutraalidensiteettisuodatin. Suodattimia on läpäisyarvoilla 10, 25 ja 50%. Ilmoita ohjelmalle käytössä oleva suodatin kohdasta **INIT -> Spectrometer Plug-In -> Change calibration configuration**.

3.5 Näytteiden lukumäärä

Mittausohjelmisto mahdollistaa usean näytteen keskiarvoistamisen mittausten yhteydessä. Tämä parantaa mittaustulosten luotettavuutta. On suositeltavaa että tulos laskeaan vähintään kolmen mittauksen keskiarvona. Jos on mahdollista niin valitaan näytteiden määräksi 10. Valitse näytteiden lukumäärä kohdasta **INIT -> Spectrometer Plug-In -> Samples**.

3.6 Pimiöehdon tarkistus

VESA:n standardi asettaa pimiön hajavalolle maksimiarvoksi 1 lux:n. Tarkista tämä ehto mittaamalla valkoisen heijastusstandardin luminanssiarvo pimiössä. Käytetyn heijastustandardin reflektanssi on 99%. Mittaa heijastustandardin luminanssi seuraavalla tavalla:

- Siirrä mittapäätä 16mm (focus -16) pois päin mitattavasta näytöstä.
- Aseta heijastusstandardi mitattavan näytön päälle ja kiristä se kuminauhoilla.
- Pimennä pimiö
- Lue luminanssi standardin pinnalta ohjelman kohdasta **POSITION -> Real Time Display**.
- Kirjaa lukema ylös
- Pimiöehto täyttyy jos luminanssi on $<0,32 \text{ cd/m}^2$.

Pimiöehdon tarkistuksen jälkeen poista heijastusstandardi näytön päältä ja siirrä mittapää takaisin alkuasentoon.

4 MITTAAMINEN

Ohessa on ohjeet tarvittavien mittausten suorittamiseen:

1. Aseta mitattavan näytön ruutu täysin valkoiseksi
2. Kirjaa luminanssiarvo raporttipohjaan kohdasta **POSITION -> Real Time Display**
3. Kirjaa värikoordinaattien x ja y arvot raporttipohjaan.
4. Aseta mitattavan näytön ruutu täysin mustaksi

Kirjaa luminanssiarvo raporttipohjaan.