

TEKNILLINEN KORKEAKOULU

Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Ville Silvekoski

**Litteiden näyttöjen mittausproseduurien kehittäminen**

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

Espoossa 28.11.2001

Työn valvoja

Professori Pirkko Oittinen

Työn ohjaaja

Diplomi-insinööri Janne Laine

Tekijä, työn nimi

Ville Silvekoski

Litteiden näyttöjen mittausproseduurien kehittäminen

Päivämäärä: 28.11.2001

Sivumäärä: 98

Osasto

Sähkö- ja tietoliikennetekniikan osasto

Professuuri

AS-75 Viestintäteknikka

Työn valvoja

Prof. Pirkko Oittinen

Työn ohjaaja

DI Janne Laine

Litteiden näyttöjen yleistymisen myötä on kiinnostusta herännyt niiden visuaalisesti havaittavaa suorituskykyä kohtaan. Litteitä näyttöjä on sekä toimistokäytössä että pienten mukana kannettavien laitteiden näyttöinä. Erilaiset sovellukset asettavat toisistaan poikkeavia vaatimuksia näyttöjen suorituskyvylle. Tässä tutkimuksessa kehitettiin mittausmenetelmiä pohjautuen kahteen näyttöjen ergonomiastandardiin ISO 13406-2 ja VESA FPDM. Mittausten suorittamista ja luotettavuutta tutkittiin mittaamalla sekä pöytänäyttöjä että kämmentietokoneiden näyttöjä.

Kehittämisen kohteena oli Teknillisen korkeakoulun Viestintäteknikan laboratorion mitalaite Microvision SS230. Laitteella voidaan mitata valon luminanssi ja spektri ajan, paikan ja katselusuunnan funktiona. Standardien mukaiset mittaukset toteutettiin automaattisina mittausproseduureina, joiden tulokset käsiteltiin sähköisessä muodossa MS Excelissä ja Matlabissa. Mittalaitteen valmistajan tarjoamissa mittausproseduureissa havaittiin sekä ohjelmisto- että laitteistopohjaisia virheitä ja puutteita, joista osa korjattiin tämän tutkimuksen puitteissa. Kaikkia ei pystytty korjaamaan tämän tutkimuksen aikana.

Mittalaitteen toimintaa tutkittiin neljällä saman valmistajan pöytänäytöllä ja neljällä eri kämmentietokoneella. Kaikki näytöt olivat nestekidetekniikalla toteutettuja. Mittaukset suoritettiin kahdessa vaiheessa, joista ensimmäinen oli esimittausvaihe. Tällöin pyrittiin selvittämään kehitettäviä kohteita. Varsinaisissa mittauksissa tehtiin mittaukset toistettavasti ja luotettavasti. Pöytänäyttöjen suorituskyky oli keskenään samanlaista ja lähellä tyypillistä katodisädeputkinäyttöjen suorituskykyä. Kämmentietokoneiden osalta suorituskyky oli pöytänäyttöjä heikompaa. Erityisesti luminanssi- ja kontrastitaso olivat alhaisempia, väriavaruus pienempi sekä kulma-riippuvuus suurempaa.

Tutkimuksen puitteissa kehitettiin runsaasti mittausproseduureja ja raportointimenetelmiä litteiden näyttöjen suorituskyvyn tutkimiseksi.

Avainsanat: Litteät näytöt FPD, näyttöjen ergonomiastandardit, ISO 13406, VESA FPDM, nestekidenäyttö LCD.

Author, Name of the Thesis

Ville Silvekoski

The development of the measurement procedures for the flat panel displays

Date: November 28, 2001

Number of pages: 98

Department

Department of Electrical and  
Communications Engineering

Professorship

AS-75 Media Technology

Supervisor

Prof. Pirkko Oittinen

Instructor

M.Sc. Janne Laine

During the recent years, the flat panel displays have become more common in office environment and in handheld devices. As a consequence, visually perceived appearance has become an important factor in display research area. Different applications demand specific display performance quality metrics. In this study, measurement procedures were developed based on the two flat panel displays ergonomic standards: ISO 13406-2 and VESA FPD. To confirm the measurements execution and improve the reliability, both office displays and displays of handheld devices were measured.

The measurement procedures were programmed for Microvision SS230 display measurement system in the Laboratory of Media Technology at Helsinki University of Technology. The measurement device is calibrated to measure luminance and spectrum of light as a function of time, spatial position and inclination angle. Those measurements, which are based on the standards, were implemented as automatic procedures. The results were handled in external programs MS Excel and Matlab. Some mistakes and shortcomings were found in the measurement programs provided by the manufacturer of the measurement device. Some of them were corrected during this study. After all, some mistakes still remain.

Four office displays and four handheld devices were measured during this study. All the displays were based on liquid crystal technology. Pre-measurements were performed to find, which adequate measurement procedures should be developed. In the main phase the displays were evaluated based on the standards. The performance of the office displays was similar and close to traditional cathode ray tube displays. The luminance and contrast ratio were lower and the colour gamut was smaller in the handheld devices than in the office displays.

During this study many new measurement procedures and report forms were made to analyse the performance of flat panel displays.

Keywords: Flat panel displays FPD, ergonomic requirements standards, ISO 13406-2, VESA FPD, liquid crystal display.

## ALKUSANAT

Laadin diplomityöni Teknillisen korkeakoulun Viestintätekniiikan laboratoriolle osana näytönmittaustutkimusta. Haluan kiittää koko laboratorion henkilökuntaa saamastani tuesta ja avusta. Erityisesti kiitän valvojaani professori Pirkko Oittista saamastani luottamuksesta sekä työn ohjaajaa Janne Lainetta vinkeistä ja professori Hannu Saarelmaa taustatuesta. Tuukka Antikaista kiitän osuudesta mittausproseduurien käytännön toteutuksesta ja Fujitsu-Siemensin yhteyshenkilöä Jukka Pensolaa näyttöjen lainaamisesta tutkimuskäyttöön. Henri "Henkka" Ståhl, Tero Jankko ja Jiří Boldyš ansaitsevat kiitokset yhteisistä virkistyshetkistä työn puurtamisen lomassa. Tyttöystäväni Liisa Hännistä ja kotiväkeäni kiitän painostuksesta, mikä on edesauttanut työn loppuun saattamista.



Espoossa 28.11.2001

Ville Silvekoski

# SISÄLLYSLUETTELO

Tiivistelmä

Alkusanat

Sisällysluettelo ..... i

Symboli- ja termiluettelo ..... iii

Lyhenteet..... xi

**1 Johdanto..... 1**

**2 Litteät näytöt..... 3**

2.1 Yleistä ..... 3

2.2 Litteiden näyttöjen tunnusluvut ..... 4

2.3 Näyttötekniikat..... 6

2.3.1 Yleistä ..... 6

2.3.2 Nestekidenäytöt ..... 7

2.3.3 Plasmanäytöt ..... 12

2.3.4 Elektroluminesenssinäytöt ..... 14

2.3.5 Valodiodinäytöt ..... 14

2.3.6 Katodiluminesenssinäytöt ..... 15

**3 Litteiden näyttöjen ergonomiastandardit ..... 16**

3.1 Yleistä ..... 16

3.2 Taustaa ..... 16

3.2.1 Ihmisen näköjärjestelmä ..... 16

3.2.2 Fotometriset suureet..... 18

3.2.3 Kolorimetria..... 20

3.2.4 Näyttötekniisiä määritelmiä ..... 25

3.3 ISO 13406 -ergonomiastandardi ..... 27

3.3.1 Standardisarja..... 27

3.3.2 Mittauskohtien määrittäminen ..... 28

3.3.3 Mittaussuuntien määrittäminen..... 29

3.3.4 Kirjainmerkkien analyysi..... 32

3.3.5 Peittoprosentin määrittäminen ..... 33

3.3.6 Luminanssimittaukset ..... 34

3.3.7 Kromaattisuuden tasaisuuden mittaus ..... 39

3.3.8 Värierojen mittaus..... 39

3.3.9 Heijastusmittaukset..... 41

3.4 VESA FPDM -standardi ..... 44

3.4.1 Yleistä ..... 44

3.4.2 Mittausolosuhteet..... 44

3.4.3 Täyden näytön mittaukset keskipisteestä..... 45

3.4.4 Laatikkokuvion mittaukset keskipisteestä ..... 47

3.4.5 Vasteaika..... 50

3.4.6 Välkyntä..... 51

3.4.7 Luminanssin ja värillisyyden tasaisuus..... 52

3.4.8 Suorituskyky katselukulman suhteen..... 53

3.5 Standardien vertailu ja aikaisempia tutkimuksia ..... 54

<b>4 Mittauslaitteisto .....</b>	<b>56</b>
4.1 Johdanto .....	56
4.2 Kohdistusyksikkö .....	57
4.3 Spektrometri .....	57
4.4 Digitaalinen kamerayksikkö .....	60
4.5 Vasteajan mittausyksikkö .....	60
4.6 Valonlähde .....	61
<b>5 Mittaukset .....</b>	<b>63</b>
5.1 Yleistä .....	63
5.2 Mittausympäristö .....	64
5.3 ISO 13406-2:n suorittaminen SS230-mittauslaitteistolla .....	64
5.3.1 Esimittaukset .....	64
5.3.2 Esimittausten tulokset .....	67
5.3.3 Varsinaiset mittaukset .....	68
5.3.4 Varsinaisten mittausten tulokset .....	70
5.4 VESA FPD:n suorittaminen SS230-mittauslaitteistolla .....	78
5.4.1 Esimittaukset .....	78
5.4.2 Esimittausten tulokset .....	78
5.4.3 Hemianalyysin kehittäminen .....	87
5.4.4 Hemianalyysimittaukset ja tulokset .....	88
5.5 Mittaustulosten tarkastelu .....	94
<b>6 Johtopäätökset .....</b>	<b>96</b>
<b>Lähdeluettelo .....</b>	<b>99</b>
<b>Liite CD-rom</b>	

## SYMBOLI- JA TERMI LUETTELO

$\lambda$	aallonpituus [nm], (wavelength)
$\theta_A$	aperaatiokulma [°], (apertio-angle)
$\phi$	atsimuuttikulma [°], (azimuth angle)
$D$	halkaisija [mm], (diagonal)
$\omega$	avaruuskulma [sr], (solid angle)
$\bar{x}(\lambda), \bar{y}(\lambda), \bar{z}(\lambda)$	CIE:n vuoden 1931 spektriset kolmiväriarvot, (CIE 1931 colour-matching functions)
$X, Y, Z$	CIE:n vuoden 1931 tristimuluskomponentit [ $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ], (CIE 1931 tristimulus values)
$x, y, z$	CIE:n vuoden 1931 värinmittaukset standardijärjestelmä [1], (CIE 1931 standard colorimetric system)
$u, v$	CIE:n vuoden 1960 värikoordinaatit vastaavan värilämpötilan määrittämiseen [1], (CIE 1960 chromaticity coordinates for CCT determinations)
$L^*$	CIE:n vuoden 1976 $L^* u^* v^*$ -väriavaruuden vaaleus [1], (lightness of CIE 1976 colour space)
$\Delta E_{uv}^*$	CIE:n vuoden 1976 $L^* u^* v^*$ -väriavaruuden väriero [-], (CIE 1976 $L^* u^* v^*$ colour difference)
$L^* u^* v^*$	CIE:n vuoden 1976 $L^* u^* v^*$ -väriavaruus [1], (CIE 1976 colour space, CIELUV)
$u', v'$	CIE:n vuoden 1976 tasajakoiset värikoordinaatit [1], (CIE 1976 chromaticity coordinates)
$\rho_{STD}$	diffuusistandardin hajaheijastussuhde [1], (diffuse reflectance factor of the diffuse reflectance standard)
$q_{STD}$	diffuusistandardin luminanssikerroin [ $\text{sr}^{-1}$ ], (luminance coefficient of the diffuse reflectance standard)
$\gamma$	gammakerroin, (gamma value)
$\rho_d$	hajaheijastussuhde [1], (diffuse reflectance)
$R$	heijastusluku, (reflectance factor)
$R'$	heijastusmittarin lukema [ $\text{sr}^{-1}$ ], (reflectometer value)
$\rho$	heijastussuhde [1], (diffuse reflectance factor)
$H_{pitch}$	horisontaalinen pikselikoko [ $\mu\text{m}$ ], (horizontal pixel pitch)
$\theta$	inklinaatiokulma [°], (inclination angle)
$B(\theta_\nu, \phi_\nu, \theta_\rho, \phi_\rho)$	kaksisuuntainen heijastusjakaumafunktio, (bidirectional reflectance distribution function)
$C_m$	kontrastimodulaatio [1], (contrast modulation)
$C_R$	kontrastisuhde [1], (contrast ratio)
$h$	korkeus [mm], (height)
$r$	korrelaatiokerroin, (correlation coefficient)
$\phi_C$	kriittinen atsimuuttikulma [°], (critical azimuth angle)
$^\circ, ^\prime$	kulmakoko visuaalisen kohteen koolle määrättyllä katseluetäisyydellä [°] [ $'$ ], (the angular subtense of a visual target at a specified viewing distance)

$L$	luminanssi [ $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ], (luminance)
$q$	luminanssikerroin [ $\text{sr}^{-1}$ ], (luminance coefficient)
$\beta$	luminanssisuhde [1], (luminance factor)
$V(\lambda)$	näköherkkyyshäikä, (photopic spectral luminous efficiency function)
$D_{active}$	näytön aktiivisen alueen halkaisija [mm], (the diagonal of the active area)
$H_{view}$	näytön aktiivisen alueen korkeus [mm], (the height of the active area)
$W_{view}$	näytön aktiivisen alueen leveys [mm], (the height of the active area)
$Class_{Reflection}$	näytön heijastusluokka, (reflection class)
$\alpha$	näytön kallistuma [ $^{\circ}$ ], (screen tilt angle)
$Class_{Viewing}$	näytön katselusektoriluokka, (viewing direction range class)
$Class_{Pixel}$	näytön pikselivirheluokka, (pixel fault class)
$\phi_D$	näytön suunnitteluazimuuttikulma [ $^{\circ}$ ], (design azimuth angle)
$\theta_D$	näytön suunnitteluinklinaatiokulma [ $^{\circ}$ ], (design inclination angle)
$D_{designview}$	näytön suunnittelukatseluetäisyys [mm], (design viewing distance)
$\theta_{range}$	näytön suunnittelukatselusektori [ $^{\circ}$ ], (viewing direction range)
$E_S$	näytön suunnitteluvalaistusvoimakkuus [lx], (design screen illuminance)
$N_H$	pikseleiden lukumäärä horisontaalissa suunnassa, (number of pixels in horizontal dimension)
$N_V$	pikseleiden lukumäärä vertikaalissa suunnassa, (number of pixels in vertical dimension)
$f$	polttoväli [mm], (focal distance)
$Y_n$	referenssiluminanssi [ $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ], (reference luminance)
$\beta_{STD}$	suuntaheijastusstandardin luminanssisuhde [1], (luminance factor of the specular reflectance standard)
$K, K_m$	säteilyn valotehokkuus, (luminous efficacy of radiation)
$E$	valaistusvoimakkuus [lx], (illuminance)
$\Phi$	valovirta [lm], (luminous flux)
$I$	valovoima [cd], (luminous intensity)
$V_{pitch}$	vertikaalinen pikselikoko [ $\mu\text{m}$ ], (vertical pixel pitch)
$\Delta u'v'$	väriero [1], (colour difference)
$Tol$	toleranssi [1], (tolerance)
$T_c, CCT$	väriämpötila [ $^{\circ}\text{K}$ ], (colour temperature)
$h_{uv}$	värisävykulma [ $^{\circ}$ ], (hue-angle)



*Anisotrooppinen näyttö, (anisotropic display)*

Näyttö, joka täyttää anisotrooppisuuden ehdon (kts. optisesti anisotrooppinen pinta).

*Atsimuuttikulma  $\phi$ , (azimuth angle)*

Kolmiulotteisen polaarikoordinaatiston kulma, joka syntyy kiertyttäessä näytön pintaa pitkin vastapäivään positiivisesta x-akselista.

*Aukko (himentimen), (aperature)*

Mittalaitteen optiikassa oleva pyöreä aukko, jonka kokoa säätelemällä voidaan vaikuttaa optiikan läpi pääsevän valon määrään (kts. aukkoarvo).

*Aukkoarvo, f-luku, (f-number)*

Aukon koosta käytettävä asteikko. Aukon halkaisijan puolittuessa pienenee aukon pinta-ala ja täten sen läpi kulkevan valon määrä neljäsosaan. Vastaavasti valonmäärän puolittuessa aukon koko saadaan jakamalla neliöjuuri kahdella. Tästä saadaan seuraava käänteinen asteikko: 1; 1,4; 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22; ... Siirtyminen asteikolla seuraavaan suurempaan aukkoarvoon puolittaa valomäärän.

*Aukkokulma, (aperature angle)*

Aukon halkaisija kulmakokona katseluetäisyydeltä.

*Avaruuskulma  $\omega$ , (solid angle)*

Kulmiulotteinen kulmamitta. Yksikkö steradiaani [sr]. Kun pallon pinnalta erotetun alueen pinta-ala on yhtä suuri kuin pallon säteen neliö, niin vastaana avaruuskulma on yksi steradiaani.

*Diffuusistandardi, (diffuse reflectance standard)*

Ideaalista Lambertin pintaa jäljittelevä valkoinen pinta, jonka spektrijakauma tunnetaan.

*Ei-emissiivinen näyttö, (non-emissive display)*

Näyttötekniikka, jossa näyttö ei itse tuota valoa vaan moduloi ulkopuolista valoa.

*Emissiivinen näyttö, (emissive display)*

Näyttötekniikka, jossa näyttö tuottaa itse valoa eikä näin ollen tarvitse ulkopuolista valonlähdettä. Katodisädeputkinäytöt kuuluvat emissiivisiin näyttöihin.

*Gamma-arvo  $\gamma$ , (gamma)*

Elektro-optisen siirtofunktion kulmakerroin logaritmiasteikossa.

*Hajaheijastussuhde  $\rho_d$ , (diffuse reflectance factor)*

Kerroin, joka kertoo pinnan hajaheijastuskomponentin suuruuden. Luvun ollessa yksi, on pinta Lambertin pinta.

*Harsohäikäisy, (veiling glare)*

Kirkkaasta valosta linssiin aiheutuva tasainen vaalea alue.

*Heijastava näyttö, (reflective display)*

Ei-emissiivinen näyttötekniikka, jossa näyttöpinta toimii paperin tavoin heijastaen ulkopuolista valoa.

*Inklinaatiokulma  $\theta$ , (inclination angle)*

Kulma, joka syntyy näytön pinnalla olevasta pisteestä katselusuuntaan syntyvän janan ja näytön normaalin väliin.

*Isotrooppinen näyttö, (isotropic display)*

Näyttö, joka täyttää isotrooppisuuden ehdon (kts. optisesti isotrooppinen pinta).

*Katselukulma, katselusektori (viewing angle)*

Katselusuunnan ja näytön normaalin välinen kulma. Termiä käytetään ilmaisemaan, kuinka laajasta katselusektorista näyttöä voidaan katsoa. Ilmoitetaan usein erikseen vaaka- ja pystysuuntaan.

*Katselusuuntakartio, (viewing-angle cone)*

Katselukulman ja näytön pinnan normaalin muodostama kartio. Vaihtoehtoinen tapa ilmoittaa katselukulma. Näyttöä on tarkoitettu katsottavan kartion sisäpuolelta kohti kartion kärkipistettä.

*Kirkkaus, (brightness)*

Visuaalinen mitta pinnasta säteilevän valon intensiteetistä.

*Kontrasti, (perceptual contrast)*

Kahden tai useamman pinnan välillä havaittava ero kirkkaudessa, vaaleudessa tai värisävyssä samanaikaisesti tai ajallisesti peräkkäin.

*Kontrastimodulaatio  $C_m$ , (contrast modulation)*

Tarkastateltavan alueen suurimman ja pienimmän luminanssin erotuksen ja summan suhde.

*Kontrastisuhde  $C_R$ , (contrast ratio)*

Tarkasteltavan alueen suurimman ja pienimmän luminanssin välinen suhde.

*Konvergenssi, (convergency)*

Katodisädeputkinäytöissä ilmenevä osaväripixelien kohdistusvirhe, mikä näkyy kuvan epätarkkuutena ja värivirheinä.

*Kromaattisuus, (chromaticity)*

Värialaatu. Näytön toistamien värien tutkiminen.

*Kulmakoko, (angular subtense)*

Kohteen koko ilmoitettuna kulmana tietyltä etäisyydeltä katsottuna.

*Kuva-ala, aktiivinen kuva-ala, (area of the screen)*

Alue näytön pinnalla, joka on kykenevä informaation esittämiseen.

*Kuvasuhde, (aspect ratio)*

Kuva-alan leveyden suhde korkeuteen. Ilmoitetaan yleensä kokonaislukuina muodossa 4:3.

*Kylläisyys, saturaatio, (saturation)*

Visuaalinen havainto pinnan kromaattisuudesta suhteessa sen kirkkauteen.

*Lambertin laki, (Lambert's law)*

Jos valovirta, joka lähtee rajatulta alueelta pinnalta, on suhteessa pinnan normaalin välisen kulman kosiniin, noudattaa pinta Lambertin lakia ja sen sanotaan olevan Lambertin pinta eli täysin heijasta pinta.

*Lambertin pinta, (Lambertian surface)*

Täysin heijastava pinta. Pinnan valovirta noudattaa Lambertin lakia.

*Laskuaika  $T_{off}$ , (fall time)*

Aikajakso, joka kuluu pikselin sammuttamiseen. Määritetään 90 prosentin päällä tilasta 10 prosentin tilan saavuttamiseen. Yksikkö millisekunti [ms].

*Linssiheijastus, (lens flare)*

Linssissä ilmenevä voimakas virheellinen heijastus.

*Liteä näyttö, (flat panel display, FPD)*

Informaation esittämiseen tarkoitettu pinta, joka on selvästi ohuempi kuin katodisädeputkitekniikalla toteutettu näyttö.

*Luminanssi  $L$ ,  $L_v$ , (luminance)*

Pinnan valovoiman tiheys tiettyyn suuntaan. Yksikkö [ $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ].

*Luminanssikerroin  $q$ , (luminance coefficient)*

Pinnan luminanssin ja valaistusvoimakkuuden välinen suhde. Yksikkö [ $\text{sr}^{-1}$ ].

*Luminanssikuormitus, (luminance loading)*

Näytön kuormituksen vaikutus näytön toistamaan luminanssilukemaan.

*Luminanssisuhde  $\beta$ , (luminance factor)*

Pinnan luminanssin suhde täydelliseen hajaheijastukseen.

*Michelsonin kontrasti  $C_m$ , (Michelson contrast)*

Kts. kontrastimodulaatio.

*Mittausalue, (field of view)*

Mittapään näkemä ympyrän muotoinen alue, jolta mittaus suoritetaan.

*Nestekidenäyttö, (liquid crystal display, LCD)*

Nestekidetekniikalla toteutettu näyttölaite.

*Neutraalidensiteettisuodatin*

Suodatin, jolla voidaan vähentää sen läpi kulkevan valon voimakkuutta spektrin muodon säilyessä samana.

*Nousuaika  $T_{on}$ , (rise time)*

Aikajakso, joka kuluu pikselin sytyttämiseen. Määritetään luminanssin muuttuessa 10 prosentista 90 prosenttiin maksimiarvosta. Yksikkö millisekunti [ms].

*Näyttö, näyttölaite, (display device)*

Sähköinen laite, jolla esitetään dynaamista, digitaalista informaatiota.

*Näyttötila, (display mode)*

Näytön toimintatila, joka määräytyy pikselimäärän ja virkistystaajuuden mukaan. Ilmoitetaan muodossa 1076×768@60Hz, jossa ensin ovat pikselimäärät vaaka- ja pystysuuntaan ja @-merkin jälkeen virkistystaajuus. VESA on standardisoinut joukon näyttötiloja.

*Näytön halkaisija D, (diagonal size of the display)*

Näyttöpinnan vastakkaisten kulmien etäisyys. Ilmoitetaan yleensä tuumina [”].

*Optisesti anisotrooppinen pinta, (optically anisotropic surface)*

Optinen pinta, jonka säteily poikkeaa Lambertin pinnasta yli 10 % kaikkiin suuntiin.

*Osaväripikseli, (sub-pixel)*

Yksi valkoinen pikseli muodostuu osaväripikseleistä. Osaväripikseleitä on yleensä kolme, jokaista pääväriä kohden yksi. Additiivisen värinmuodotuksen perusteella ne tuottavat yhdessä väriavaruuden, joka tuottaa kaikki värit tietyllä tarkkuudella.

*Osoitettavuus, (addressability)*

Näytön pikseleiden lukumäärä näyttöpinnalla vaaka- ja pystysuuntaan. Ilmoitetaan muodossa pikseleiden lukumäärä vaakasuuntaan kertaa pystysuuntaan, esimerkiksi 1024×768. Termiä resoluutio käytetään usein virheellisesti tarkoittaessa osoitettavuutta.

*Peittoprosentti, (fill factor)*

Prosentuaalinen osuus pikselin viemästä pinta-alasta, jota käytetään dynaamisen informaation esittämiseen.

*Pikseli, (pixel)*

Informaatiopinnan pienin itsenäisesti ohjattava yksikkö.

*Pikselikoko  $H_{pitch}$ ,  $V_{pitch}$ , (pixel pitch)*

Litteän näytön kahden vierekkäisen pikselin samojen kohtien välinen etäisyys. Määritetään erikseen sekä horisontaali- että vertikaalisuunnissa.

*Pikselitiheys, (pixel-density)*

Pikselikoon käänteisluku.

*Pinta-alaluminanssi, (area-luminance)*

Alueen luminanssi, joka käsittää vähintään 10 pikseliä ja yksittäisen pikselin vaikutus luminanssiin on alle 2 %.

*Pistekoko, (dot pitch)*

Kuvaputkinäytön elektronisäteen kuvapinnalle aiheuttaman pisteen halkaisija. Litteille näytöille vastaava suure kuin pikselikoko.

*Pisteväli, (dot pitch)*

Ks. pistekoko.

*Planckin käyrä, (Planckian locus)*

Ideaalisen mustan säteilijän kromaattisuus CIE 1931 -koordinaatistossa.

*Päivitystaajuus, (update rate)*

Taajuus, jolla näytön informaatiota vaihdetaan.

*Resoluutio, (resolution)*

Mitta sille, kuinka hyvin ihminen voi erottaa kaksi kohdetta toisistaan. Termiä käytetään virheellisesti synonyyminä termille osoitettavuus.

*Steradiaani sr, (steradian)*

Avaruuskulman yksikkö.

*Suunnitteluatsimuuttikulma  $\phi_D$ , (design azimuth angle)*

Suunnittelukatselukulman atsimuuttisuuntainen kulma.

*Suunnitteluinklinaatiokulma  $\theta_D$ , (design inclination angle)*

Suunnittelukatselusuunnan inkliinaatiosuuntainen kulma.

*Suunnittelukatseluetäisyys  $D_{designview}$ , (design viewing distance)*

Etäisyys, jolta näyttöä on tarkoitettu katseltavan. Yleensä käytetään arvoa 500 mm. Vain erikoistapauksissa etäisyys voi olla 300 mm.

*Suunnittelukatselusektori  $\theta_{range}$ , (design inclination angle range)*

Valmistajan ilmoittama katselukulma-alue, jolta näyttöä on tarkoitettu katsottavan.

Lukema ilmoitetaan asteikolla 0–180°.

*Suunnittelukatselusuunta, (design viewing direction)*

Näytölle käyttötarkoituksen mukaan määräytyvä katselusuunta, joka ilmoitetaan pallokoordinaatistossa suunnitteluatsimuuttikulman ja -inkliinaatiokulman avulla. Näyttö optimoidaan toimimaan parhaiten tästä suunnasta katsottaessa.

*Suunnitteluvalaistusvoimakkuus  $E_S$ , (design screen illuminance)*

Näytölle ilmoitettu valaistustaso, jossa sen on tarkoitettu toimivan.

*Spektrisesti ääripään värit, (spektrally extreme colours)*

Väri, joka ylittää sinisen tai punaisen ääripään. Kynnysarvo siniselle värille on  $u' < 0,2$  ja punaiselle  $u' > 0,4$ .

*Suljin, (shutter)*

Kameran mekaaninen osa, joka kontrolloi valotusaikaa.

*Tasajakoinen väridiagrammi, (uniform-chromaticity-scale diagram)*

Kaksiulotteinen diagrammi, jonka asteikot on skaalattu siten, että ne vastaavat väriärsykeiden välistä eroa.

*Taustaluminanssi, (background luminance)*

Alueen luminanssi näytön pinnalla, joka esittää mustaa.

*Transmissiivinen näyttö, (transmissive display)*

Ei-emissiivinen näyttötekniikka, jossa näyttöpinnan takaa tulevaa valoa moduloidaan informaation esittämiseksi. Nestekidenäytöt ovat transmissiivisiä näyttöjä, kun niihin on asetettu taustavalo.

*Valaistusvoimakkuus  $E$ ,  $E_V$ , (illuminance)*

Pinnalle saapuvan valovirran tiheys. Yksikkö luks [lx].

**Valotusaika, (exposure)**

Aika, jonka mittalaitteen suljin on auki.

**Valovirta  $\Phi$ ,  $\Phi_V$  (luminous flux)**

Pistemäisestä valonlähteestä emittoitua valo avaruuskulman suhteen. Yksikkö lumen [lm]. Yhden lumenin suuruinen valovirta syntyy, kun valoa emittoituu yhden steradianin alueelta pistemäisestä valonlähteestä, jonka valovoima on yksi kandela.

**Valovoima  $I$ ,  $I_V$  (luminous intensity)**

Valonlähteestä tiettyyn suuntaan säteilevän valon voimakkuus. Yksikkö kandela [cd]. Yhden kandelan valovoima syntyy, kun valonlähde säteilee  $540 \cdot 10^{12}$  Hz:n taajuista säteilyä  $1/683 \text{ Wsr}^{-1}$ :n säteilyteholla.

**Varjokehä, (halation)**

Näytön pinnalla olevan mustaa aluetta ympäröivän valkoisen alueen vaikutus mustan alueen luminanssilukemaan.

**Vastaava väriämpötila  $T_{cp}$ , CCT, (correlated colour temperature)**

Planckin säteilijän lämpötila Planckin käyrällä, jonka havaittu värillisuus on lähimpänä tutkittavan värin värillisyyttä CIE 1960 -värikoordinaatistossa.

**Vasteaika  $T_f$  (response time)**

Nousuaika lisättynä laskuajalla. Termi kuvaa näytön temporaalista vastetta ohjaukselle. Yksikkö millisekunti [ms].

**Virkistystaajuus, (refresh rate)**

Näytön uudelleenkirjoitustaajuus. Yksikkö hertsi [Hz].

**Välkyntä, (flicker)**

Näytön kuvan nopea temporaalinen ei-toivottu vaihtelu.

**Väriämpötila, (colour temperature)**

Planckin säteilijän lämpötila Planckin käyrällä.

**Värimatriisinäyttö, (colour matrix display, CMD)**

Säännöllisestä kaksikulotteisesta matriisista kuvapikseleitä muodostuva näyttöpinta, joka pystyy toistamaan ihmisen havaitsemat värit rajatulla tarkkuudella.

**Värisyvyys, (bits per color)**

Näytön ohjattavissa olevien värien määrä. Ilmoitetaan bitteinä osaväriä kohden, esim. 5R, 6G, 5B.

**Värisävy, (hue)**

Visuaalinen aistimus, joka vastaa havaittua väriä, pääväriä punainen, keltainen, vihreä ja sininen tai näistä kahden yhdistelmiä.

## LYHENTEET

AFOV	Angular field of view
ALIS	Alternate lightning of surfaces
AMLCD	Active matrix liquid crystal display
BRDF	Birectional reflectance distribution function
CCD	Charged coupled device
CCFL	Cold-cathode fluorescent lamp
CCT	Correlated colour temperature
CEN	European Committee for Standardization
CIE	International Commission on Illumination
CL	Center luminance
CMD	Colour matrix display
CRT	Cathode ray tube
CSTN	Colour super twisted nematic
D65	Daylight 6500 °K
DCEL	Direct current electroluminescent
DSTN	Double-layer super twisted nematic
ECD	Electrochromic display
EIAJ	Electronics Industries Association of Japan
EL	Electroluminescent
EPID	Electrophoresis display
EUT	Equipment under test
EXT	Extended light source
FED	Field-emission display
FFT	Fast fourier transform
FPD	Flat panel display
FPDM	Flat panel display measurements
FSTN	Film super twisted nematic
HDTV	High-definition TV
HL	High luminance
HPA	High-performance addressing
HS	High state
IEC	International Electrotechnical Commission
IEL	Inorganic electroluminescent
IPS	In-plane switching
ISO	International Organization for Standardization
LCD	Liquid crystal display
LED	Light-emitting diode
LL	Low luminance

LS	Low state
MATL	Microvision automatic test language
MIM	Metal-insulator-metal
MLA	Multiple line addressing
MTF	Modulation transfer function
MVA	Multidomain vertical alignment
OLED	Organic light-emitting diode
PALC	Plasma-addressed liquid crystal
PDP	Plasma display panel
PLED	Polymer light-emitting diode
RTM	Response time module
SBM	Suite of basic measurements
SFS	Suomen Standardisoimisliitto
SML	Small light source
SMLLED	Small molecule light-emitting diode
STN LCD	Super twisted nematic liquid crystal display
TFEL	Thin-film electroluminescent
TFT	Thin-film transistor
UCS	Uniform colour scale
VA	Vertical alignment
VESA	Video Electronics Standard Association
VFD	Vacuum fluorescent display
VGA	Video graphics array



# 1 JOHDANTO

Viime vuosien aikana ihmiset ovat tottuneet kuljettamaan mukanaan matkapuhelinta. Muutaman vuoden kuluessa jokaisella odotetaan olevan mukanaan laite, jossa yhdistyy matkapuhelimen, kämmentietokoneen ja navigointilaitteen ominaisuuksia. Tällöin myös laitteen näytön tulee olla tarpeeksi laadukas monipuolisen informaation esittämiseen eli näytön tulee olla terävä, tarkka, kirkas, täysvärinen, sään- ja iskunkestävä sekä energian kulutukseltaan pieni. Ja tietysti näytön tulee olla myös halpa.

Tässä työssä kehitetään mittausten menetelmiä, joilla voidaan karakterisoida erityyppisiä näyttöjä. Kehityksen kohteena on Viestintäteknikan laboratorion mittalaite Microvision SS230. Mittalaitteella on mahdollista suorittaa luminanssi-, värillisyyss-, spatiaali- ja temporaalimittauksia. Se sisältää kattavasti valmistajan tekemiä toimistonäytöille tarkoitettuja mittaussuorituksia, joiden on kuitenkin havaittu olevan puutteellisia. Lisäksi näyttöjä, joita ei voida ohjata VGA-liitännällä, ei pystytä mittaamaan ilman erikoisjärjestelyjä.

Mittalaitte tarjoaa joustavan kehitysympäristön omien mittaussuorituksien tekemiseen. Mittaussuorituksia voidaan ohjelmoida C-kieleen perustuvalla MATL-ohjelmointikielellä (Microvision automatic test language). Graafinen käyttöliittymä toimii MS Windows 98 -ympäristössä, mikä mahdollistaa joustavan mittaustulosten käsittelyn muissa sovelluksissa kuten MS Excelissä, Adobe Photoshopissa ja Matlabissa.

Perinteisille katodisädeputkitekniikkaan perustuvilla toimistonäytöillä on laadittu kansainvälisiä ergonomiastandardeja, joilla on pyritty luomaan selkeät mittaussuoritusmenetelmät näyttöjen keskinäisen vertailun mahdollistamiseksi. Nämä standardit eivät kuitenkaan karakterisoi riittävästi litteitä näyttöjä, joiden toimintaperiaate poikkeaa katodisädeputkitekniikasta. Tämän vuoksi on laadittu uusia ergonomiamittaussuoritusstandardeja litteille näytöille. Näistä tärkeimmät ovat tällä hetkellä ISO 13406 ja VESA FPDM. Tämän työn tavoitteena on perehtyä näihin kahteen standardiin ja suorittaa standardeissa esitetyt monimutkaiset mittaussuoritusmenetelmät. Lisäksi laaditaan pienille litteille näytöille suunnattuja mittaussuoritusmenetelmiä, joilla voidaan karakterisoida niiden erityispiirteitä.

Työn kokeellisessa osassa suoritetaan erityyppisten näyttöjen karakterisointia. Mittauksia tehdään litteille toimistonäytöille, jotta saadaan selville mittalaitteen toimintavarmuus ja mittausten toistettavuus. Tämä antaa pohjan pienten litteiden näyttöjen mittauksille. Lisäksi kehitetään raportointimenetelmiä, joilla voidaan helposti ja nopeasti jalostaa mittaustuloksia havainnolliseen muotoon.

Mittauksiin valittiin vain litteitä värimatriisinäyttöjä. Litteä värimatriisinäyttö tarkoittaa tietojen esittämiseen tarkoitettua näyttöpintaa, joka koostuu säännöllisestä matriisista kuvapistejä. Katodisädetekniikalla toteutetut näytöt eivät täytä tätä vaatimusta, koska kuvapisteen sijainti kuvaputken pinnalla ei ole kiinteä. Lisäksi mittaukseen otettavilta näytöiltä vaadittiin täyttä värillisyyttä. Täydellä värillisyydellä tarkoitetaan sitä, että näyttö pystyy toistamaan kaikki päävärit useilla voimakkuuksilla ja näin muodostamaan ihmisen näköjärjestelmän havaitsemat värisävyt rajatulla tarkkuudella.

Markkinoilla olevat litteät toimistonäytöt on toteutettu nestekidetekniikalla. Nestekidetekniikka soveltuu myös pienten laitteiden näyttötekniikaksi ja on ollut sitä jo vuosikymmenten ajan. Selvästi suurempaa kokoluokkaa edustavat plasmatekniikalla toteutetut näytöt, jotka on suunnattu messu- ja viihdekeskuksien näyttölaitteiksi. Kalliin hintansa vuoksi plasmanäyttöjen yleistyminen on ollut kuitenkin hidasta. Kehitteillä on myös useita uusia lupaavia tekniikoita litteän täysvärinäytön toteuttamiseen, mutta nämä ovat vielä prototyyppeasteella. Teollisen valmistamisen aloittaminen vaatii suuria investointeja, mikä vaikuttaa olevan ylitsepääsemätön ongelma monille yrityksille.

Työssä käsitellään aluksi näyttötekniologioita (luku 2). Pääpaino on nestekideteknologiassa, koska se on litteiden näyttöjen valtateknologia. Litteiden näyttöjen tunnusluvut ja niiden määrittelyä käsitellään myös samassa luvussa. Kolmannessa luvussa käsitellään näytönmittauksen teoriaa ja käydään läpi kaksi standardia, ISO 13406-2 ja VESA FPD 1.0. Tämän jälkeen karakterisoidaan mittaustilasto ja arvioidaan sen suorituskykyä standardeihin nähden. Kokeellisessa osassa tehdään ensin esittauksia, joilla tutkitaan laitteen toimintaa ja arvioidaan kehitettäviä kohteita. Lopullisissa mittauksissa testataan laitteiston toimintaa ja arvioidaan sen soveltuvuutta erityyppisten näyttöjen karakterisoinniseksi ja vertailemiseksi.

Näyttöjen monimuotoistuksessa ergonomiakriteerit saavat entistä suuremman merkityksen. Nykyiset ergonomiastandardit eivät kata vielä kunnolla esimerkiksi virtuaali- ja projektionäyttöjä, joissa ei ole kiinteää näyttöpintaa. Stereo- ja hologramminäytöt niin ikään tuovat mukanaan uusia tunnuslukuja, jotka on otettava huomioon näyttöjen visuaalista laatua arvioitaessa. Tämän tutkimuksen puitteissa pystytään raapaisemaan vain pintaa siitä kaikesta, mitä näyttöjen visuaalisen ergonomian tulisi kokonaisuudessaan kattaa.

## 2 LITTEÄT NÄYTÖT

### 2.1 Yleistä

Tämän tutkimuksen puitteissa perehdytään värimatriisinäyttöihin (CMD, colour matrix displays). Ne koostuvat kiinteästä kaksiulotteisesta matriisista kuvapisteitä, jotka muodostavat diskreetin näytteenoton esitettävästä kuvasta. Kuvapiste eli pikseli on itsenäisesti ohjattava kokonaisuus. Sen valaistusvoimakkuus ja valon värisävy muuttuvat ohjauksen mukaan. Yksittäinen pikseli puolestaan koostuu osaväripikseleistä. Osaväripikseleitä on kolmea pääväriä kohden oman tyyppisensä. Additiivisen värinmuodostuksen mukaisesti näillä väripikseleillä saadaan muodostettua ihmisen havaitsemat värit rajatulla tarkkuudella. /41, 50/

Värimatriisinäyttöjä käytetään toimistoissa henkilökohtaisen tietokoneen näyttölaitteena perinteisen katodisädeputkinäytön korvaajana. Katosädetekniikka ei sovellu kannettaviin laitteisiin, jotka vaativat näytöltä pientä kokoa ja energian kulutusta sekä keveyttä. Niinpä kannettavien laitteiden näytöt ovat tällä hetkellä lähes kokonaan nestekidetekniikkaan perustuvia. Erityisesti tulevaisuuden matkapuhelinsovellukset vaativat näytöltä erityisominaisuuksia. Vaadittavia ominaisuuksia ovat muun muassa /44/:

- pieni koko ja massa
- pieni hukkatila näytön ympärillä
- joustava ohjauselektroniikan sijoitus
- tukeva kotelointi
- käyttöjännite 1,8–3,3 V
- tehonkulutus alle 1 mW
- lämpötilan sieto  $-30^{\circ}$  –  $+70^{\circ}$  C
- kontrasti ja kirkkaus riittävä päivänvaloon
- heijastukset minimoitu
- katselukulma laaja.

Nestekidetekniikka pystyy kohtuullisesti täyttämään nämä vaatimukset, mutta ei samanaikaisesti. Pystytään valmistamaan kirkas näyttö, mutta samanaikaisesti ei pystytä täyttämään tehonkulutusvaatimusta. Kehitteillä on useita lupaavia täysin uusia teknologioita, kuten emittoiviin valodiodeihin ja polymeereihin perustuvia. Teollisuuden sovelluksissa on jo käytössä elektroluminesenssitekniikkaan perustuvia näyttöjä, joiden lämpötilan sieto on nestekidetekniikkaa parempi. Plasmatekniikka soveltuu fyysisiltä mitoiltaan laajojen näyttöpintojen teknologiaksi, jolta ei vaadita pientä pikselikokoa ja pientä virran kulutusta. Uusien teknologioiden yleistymisen esteenä on usein kalliit valmistuskustannukset. Koska sekä nestekide- että katodisädeputkinäyttöjä on valmistettu pitkään, tunnetaan niiden valmistusprosessi hyvin ja näin ollen valmistuskustannukset ovat kohtuulliset. /2, 50, 75/

## 2.2 Litteiden näyttöjen tunnusluvut

Litteitä näyttöjä karakterisoivat tunnusluvut voidaan jakaa neljään ryhmään: spatiaali-, spektri-, luminanssi- ja temporaaliominaisuudet. Johtuen litteiden näyttöjen diskreetista luonteesta, ei kaikkia katodisädeputkinäyttöjen mittauksia ole järkevää ja mahdollista suorittaa litteille näytöille. Taulukossa 1 on nimetty litteille näytöille ominaisia tunnuslukuja. /57/

**Taulukko 1.** Litteiden näyttöjen tunnuslukuja /57/

Spatiaali	Spektri	Luminanssi	Temporaali
Osoitettavuus	Spektrijakauma	Maksimiluminanssi	Virkistystaajuus
Pikselikoko	Väriavaruus	Luminanssialue	Päivitystaajuus
Pikselin muoto	Kromaattisuus	Harmaatasot	Pikselin nousu- ja laskuaika
Pisteväli		Kontrastisuhde	
Osaväripisteiden järjestys		Luminanssin tasaisuus	
Viallisten pikseleiden lukumäärä		Katselukulma	
		Heijastussuhde	
		Varjokehä	

Spatiaalimittaukset kohdistuvat yksittäisen pikselin tutkimiseen. Koska pikselit ovat litteissä näytöissä staattisesti paikoillaan, eivät katodisädeputkinäytöille tyypilliset geometria- ja värinämittaukset ole tarpeellisia. Kuvan voidaan olettaa olevan täysin suorakulmisen muotoinen ja vääristymätön. Modulaation siirtofunktion (MTF) tutkiminen samalla tavalla kuin katodisädeputkinäytöissä ei ole mielekästä pikselien diskreetistä luonteesta johtuen. Osaväripikselien vikaantuminen on yleinen ilmiö litteille näytöille. /57/

Osoitettavuus ilmaisee näytön pikseleiden lukumäärän vaaka- ja pystysuuntaan, esim. 1024×768. Pikselimäärät määräytyvät näyttömoodejen mukaan. VESA on standardisoinut joukon kiinteitä näyttömoodeja. Kuitenkin näytönohjainten ja toisaalta näyttöjen valmistajat tarjoavat omia näyttömoodejaan, joiden pikselimäärät vaihtelevat. Litteiden näyttöjen pikselimäärä vaaka- ja pystysuuntaan valitaan vastaamaan tavallisimpien näyttömoodejen pikselimääriä, jotta vältetään yhteensopivuusongelmat näytönohjaimen ja käyttöjärjestelmän kanssa ja toisaalta saavutetaan paras mahdollinen kuvanlaatu. Taulukosta 2 ilmenevät yleisimmät näyttömoodeihin liittyvät pikselimäärät ja niiden lyhenteet. /4, 19, 71/

Termiä resoluutio käytetään usein tarkoittaessa todellisuudessa osoitettavuutta tai näyttömoodia. Kuitenkin resoluutio on suure, joka ilmaisee kuinka hyvin ihminen voi erottaa kaksi kohdetta toisistaan. Näytön pikselikoko (pixel pitch, dot pitch) ilmaisee resoluutioon verrattavan suureen. Peittoprosentti (fill factor, aperature ratio) puolestaan ilmaisee,

kuinka monta prosenttia näytön aktiivisen kuva-alueen pinta-alasta on pikseleiden peitossa. Aktiivinen kuva-alue on suorakulmainen ala, jota rajoittavat reunimmaisat pikselit. /15, 71/

**Taulukko 2.** Näyttömoodeihin liittyviä pikselimääriä ja kuvasuhde pikseleiden ollessa neliön muotoisia /4, 19, 70, 72/

Lyhenne	Pikselimäärä	Kuvasuhde
QUXGA-Wide (Wide Quad Ultra eXtended Graphics Array)	3840×2400	16:10
QUXGA (Quad Ultra eXtended Graphics Array)	3200×2400	4:3
QSXGA (Quad Super eXtended Graphics Array)	2560×2048	4:3
QXGA (Quad eXtended Graphics Array)	2048×1536	4:3
UXGA-Wide (Wide Ultra eXtended Graphics Array)	1920×1200	16:10
HDTV (High-Definition TV)	1920×1080	16:9
UXGA (Ultra eXtended Graphics Array)	1600×1200	4:3
SXGA-Wide (Wide Super eXtended Graphics Array)	1600×1024	16:10
SXGA (Super eXtended Graphics Array)	1280×1024	4:3
QVGA (Quad Video Graphics Array)	1280×960	4:3
XGA (eXtended Graphics Array)	1024×768	4:3
SVGA (Super Video Graphics Array)	800×600	4:3
VGA (Video Graphics Array)	640×480	4:3

Värisyvyys, joka on näytölle osoitettavien värien määrä, on näyttömoodiin liittyvä tekijä. Tyypillisiä värimääriä litteille näytöille ovat 16, 256, 32k, 64k ja 16M. Määrä riippuu siitä, kuinka monta bittiä on kutakin osaväriä kohden. Tyypillisesti näyttö pystyy toistamaan 256:n tasoinena jokaisen osaväriä eli yhtä osaväriä kohden on kahdeksan bittiä. Tällöin värien määrä on  $2^{24}$  eli noin 16 miljoonaa. /71/

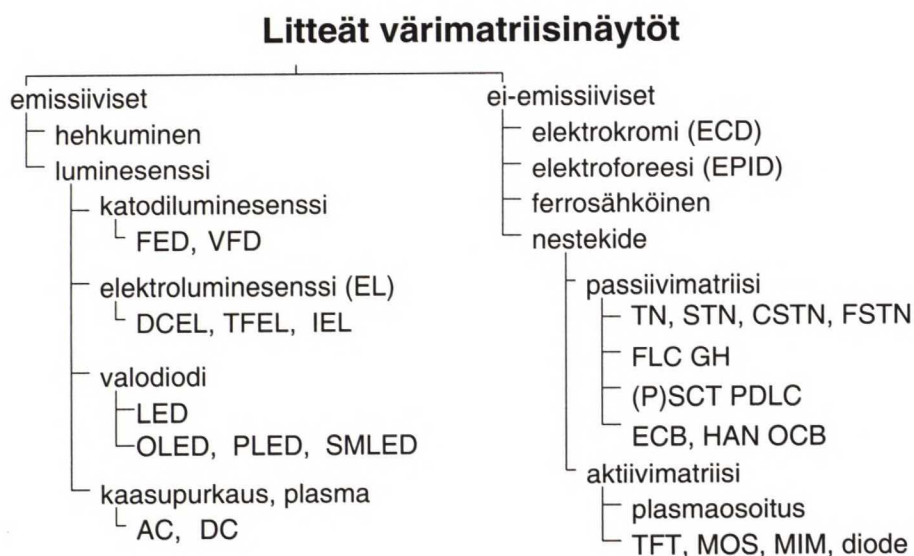
Katselukulmariippuvuus on litteissä näytöissä huomattavasti merkittävämpää kuin katodisädeputkinäytöissä. Luminanssin, kontrastin, harmaatasojen ja väriarvojen muutoksia katselukulman suhteen on mielekästä tutkia litteistä näytöistä, joista varsinkin nestekidenäytöille laajan katselukulman saavuttaminen on monimutkaista. Luminanssia tulee tarkastella suhteutettuna vallitsevaan valaistustasoon, mikä käytännössä tehdään heijastusmittauksilla. Pienillä valaistustasoilla luminanssin merkitys kasvaa suureksi verrattuna kontrastiin. Kontrastia voidaan tarkastella kontrastisuhteella ja kontrastimodulaatiolla. /39, 57/

Litteiden näyttöjen toimintaperiaate katodisädeputkinäyttöihin nähden aiheuttaa temporaalimittauksiin täysin erilaisen lähestymistavan. Litteiden näyttöjen temporaalinen vaste on selvästi hitaampi, eikä se riipu suoraan virkistystaajuudesta kuten katodisädeputkinäytöissä. Tällöin tulee tarkastella yksittäisen pikselin sytyttämiseen ja sammuttamiseen kuluvaa aikaa. Jos harmaasävyjen tuottamiseen käytetään ohjaussignaalin aikasidonnaista modulaatiota, aiheuttaa tämä nopeataajuista välkkymistä. /4, 39/

## 2.3 Näyttötekniikat

### 2.3.1 Yleistä

Näytöt voidaan jakaa valoa emissiivisiin ja ei-emissiivisiin näyttöihin (kuva 1). Emissiivinen näyttö tuottaa itse valoa ja on näin ollen valonlähde. Ei-emissiivinen näyttö puolestaan heijastaa siihen kohdistuvaa valoa tai suodattaa itsensä läpi kulkevaa valoa. Jälkimmäisessä tapauksessa näytöstä käytetään nimitystä transmissiivinen näyttö, koska se suodattaa taustavalon tuottamaa valoa. Kuvassa 1 on litteiden näyttöjen näyttötekniologia jaoteltuna ominaisuuksien ja toimintaperiaatteiden mukaisesti. /4, 68/



**Kuva 1.** Litteiden näyttöjen teknologioita jaoteltuna emissiivisiin ja ei-emissiivisiin näyttöihin. Emissiiviset näytöt ovat luminesenssiin tai hehkumiseen perustuvia. Ei-emissiivisistä suurimman ryhmän muodostavat nestekiteisiin perustuvat näytöt /68/

Kuluttajamarkkinoilla on tällä hetkellä lähes ainoastaan nestekide- ja plasmatekniikoilla toteutettuja näyttöpintoja. Katodisädeputkinäytöt (CRT, cathode ray tube), jotka eivät kuulu litteisiin näyttöihin, ovat pitkään olleet markkinajohtajia toimistokäytön näyttölaitteina. Viime vuosien aikana nestekidetekniikalla toteutetut näytöt ovat kehittyneet ominaisuuksiltaan vastaamaan toimistosovellusten vaatimuksia. Nestekidenäyttöjä on jo usean vuosikymmenen ajan käytetty pienenä mustavalkoisena näyttöpintana erilaisissa laitteissa. Toimistosovelluksissa näytöltä vaaditaan kehittyneitä väriominaisuuksia ja nopeaa temporaalista vastetta. Plasmatekniikka on puolestaan uusin massamarkkinoilla olevista tekniikoista. Sen sovellukset ovat tällä hetkellä viihde-elektronikan ja presentatiolaitteiston isona ja kirkkaana näyttöpintana. /41, 50/

Perinteinen katodisädeputkitekniikka perustuu lasiseen tyhjiöputkeen, jonka vastakkaisissa päissä sijaitsevat katodi ja anodi. Näiden väliin muodostuvalla sähkökentällä ammutaan elektroneja näyttöpinnalle, jotka aiheuttavat pinnan fosforikerroksessa fluoresenssin. Ohjaamalla säde maskin avulla tarkasti erityyppisille fosforeille, saadaan tuotettua värejä. Katodisädeputkinäytöt ovat emissiivisiä, mikä on perusta erinomaiselle katselu-

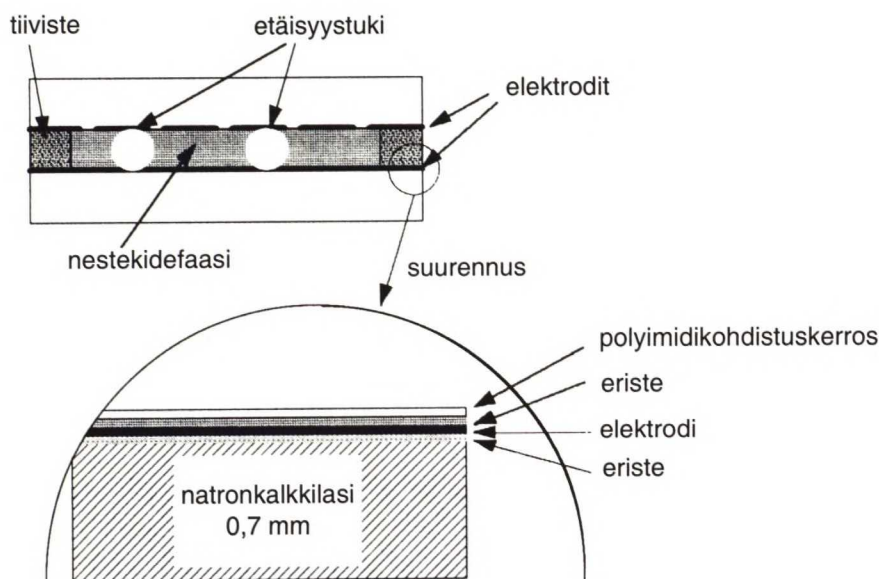
kulmalle. Muita tekniikan etuja ovat suuri kirkkaus ja kontrasti, nopea temporaalinen vaste sekä laaja väriavaruus. Ongelmia ovat konvergenssi, geometriavirheet ja välkyntä. Katodisädeputkinäyttöjen energian kulutus on suuri ja kuvaputki vaatii syvyysuunnassa tilan, joka on suoraan verrannollinen kuvapinnan fyysisiin mittoihin. /41/

Hehkulamppuja on käytetty erittäin suurissa ulkotiloihin tarkoitetuissa näytöissä, joissa vaaditaan erityisen korkeata luminanssitasoa ja jossa energiakulutus ei ole rajoittava tekijä. Elektrokromi- ja elektroforeesinäytöt eivät ole olleet merkittävän kehityksen kohteina. Muita taulukossa 1 esiintyviä näyttötekniikoita on käsitelty tarkemmin seuraavissa luvuissa. /50/

### 2.3.2 Nestekidenäytöt

Nestekiteiden käyttö näyttötekniikassa perustuu niiden erikoisiin kemiallisiin, sähköisiin, magneettisiin ja optisiin ominaisuuksiin. Kemiallisesti nestekiteillä on sekä kiinteän aineen että nesteen ominaisuuksia. Ne ovat jossain määrin järjestäytyneitä, mutta pystyvät liikkumaan rajoittuneesti. Sähköisesti ja magneettisesti ne ovat anisotrooppisia eli niiden käyttäytyminen muuttuu aaltorintaman suunnan mukaan. Nestekide on sähköinen dipoli, joka reagoi erittäin herkästi pieniinkin sähkökentän muutoksiin. Optisesti nestekide muuttaa valon polarisaation suuntaa riippuen siitä, missä suunnassa valo tulee kiteeseen ja kuinka paksu nestekidekerros on. /1, 38/

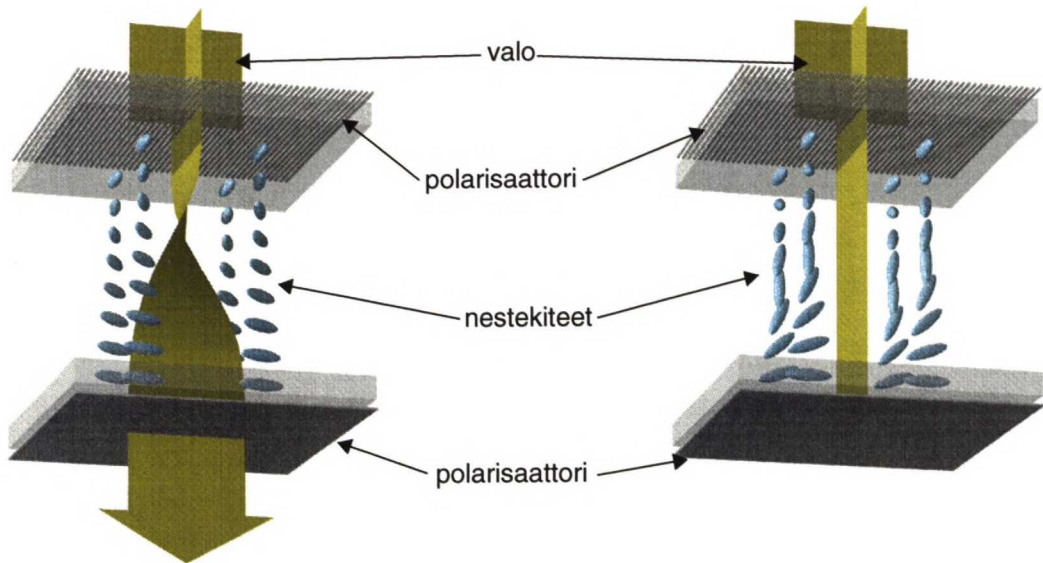
Kuvasta 2 on nähtävissä nestekidesolun poikkileikkauksen rakenne. Rakenne on eristetty kahden natronkalkkilasin väliin. Kuvapikselit erotetaan toisistaan tiivisteillä. Kerroksen paksuus varmistetaan pallonmuotoisilla etäisyystuilla, joiden halkaisija on 6  $\mu\text{m}$ . Näytön toiminnan kannalta on erittäin kriittistä, että nestekidekerroksen paksuus on tasainen. Nestekiteitä ohjataan läpinäkyvillä elektrodeilla, jotka on tavallisesti valmistettu indiumtinaoksidista (ITO). Polyimidistä valmistetuilla kohdistuskerroksilla annetaan nestekiteille esikiertokulma, joka on tyypillisesti 1–6°. Kulma vaikuttaa nestekidekerroksen elektro-optiseen käyttäytymiseen. Elektrodit on eristetty ympäröivistä kerroksista. Ulomalla kerroksella on värisuodattimet, joilla valkoinen väri suodatetaan yhdeksi kolmesta pääväristä, punaiseksi, vihreäksi tai siniseksi. /60/



**Kuva 2.** Nestekidenäytön kerroksellinen rakenne /60/

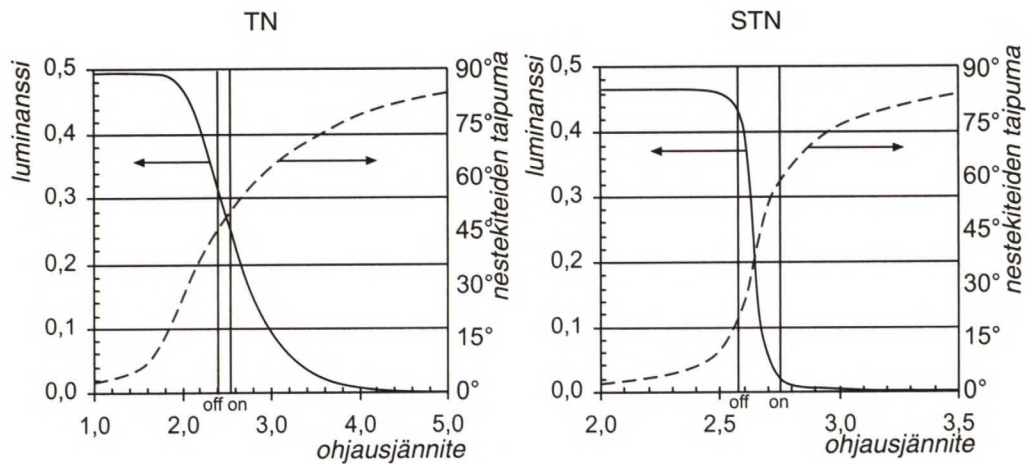
Useilla kemiallisilla yhdisteillä on todettu olevan nestekidemäinen tila. Molekyylit, jotka käyttäytyvät nestekiteen tavoin ovat tyypillisesti pitkiä, sauvamaisia ja niiden keskiosa on jäykkä päiden ollessa joustavia. Näyttötekniikassa käytetään yleisesti nestekiteitä nemaattisessa tilassa. Tekniikka tunnetaan lyhenteellä TN (twisted nematic). Tässä tilassa kiteet ovat järjestäytyneet kuvan 3 tavalla. Valo polarisoidaan lineaarisesti ensimmäisellä polarisaattorilla. Polarisoituneen valon vaihe kääntyy nestekidekerrosta läpäisessä. Tällä voidaan kontrolloida, läpäiseekö valo toisen polarisaattorin. Tähän perustuu informaation esittäminen nestekiteitä käyttämällä. Polarisaattorit voivat olla toisiinsa nähden saman suuntaisia tai  $90^\circ$ :n kulmassa riippuen siitä, kumman tilan halutaan olevan lepotila. Kuvassa 3 vasemmalla on lepotila ja oikealla nestekiteet ovat taipuneet sähkökentän vaikutuksesta. Kun kiteet ovat kääntyneinä  $0-90^\circ$ , läpäisee osa valosta pinnan. Tällöin esitetään harmaasävyjä. /1, 26, 38, 60/





**Kuva 3.** TN nestekidenäytön kaksi tilaa. Vasemmanpuoleisessa kuvassa kiteet muuttavat lineaarisesti polarisoituneen valon polariteettikulmaa siten, että valo läpäisee kummatkin polarit. Oikean puoleisessa kuvassa polariteettikulma ei muutu ja valo ei läpäise toista polaria

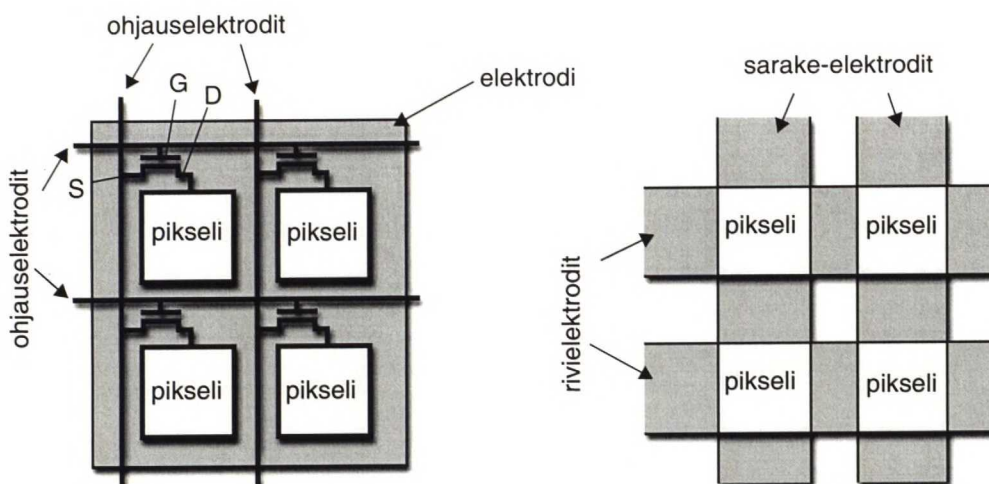
Edellä on kuvattu TN-näytön periaate, jossa nestekiteet taipuvat  $90^\circ$ . Parantamaan kiteiden vastetta sähkökentälle on kehitty STN-tekniikka (super twisted nematic), joka perustuu kiteiden kahtaistaittuvuuteen. Kiteet taipuvat selvästi suuremman kulman, tyypillisesti  $210\text{--}270^\circ$ . Kuvassa 4 on esitetty TN- ja STN-näytön elektro-optiset siirtofunktiot. Kuvaajasta haivaitaan, että STN-näytöllä voidaan erottaa suurempi kontrasti ON- ja OFF-tilojen välille. STN-tekniikassa ilmenee värisiirtymää. ON-tilassa pikselit ovat keltaisia ja OFF-tilassa sinertäviä. Tämä voidaan poistaa asettamalla toinen nestekidekerros, jossa kiteiden pyörimissuunta on vastakkainen. Tämä tekniikka tunnetaan D-STN-tekniikkana (double-layer STN). Tämä lisää kuitenkin näytön paksutta ja painoa. Tämänpä vuoksi nykyisin on pääasiassa käytössä FSTN-periaate (film STN), joissa ohuella polymeerikalvolla kompensoidaan värivirhe. Kalvon lisääminen tosin heikentää näytön läpi pääsevää valoenergiaa. CSTN (colour STN) nimitystä käytetään yleisesti värillisestä STN-tekniikalla toteutetusta näytöstä. /7, 38, 59/



**Kuva 4.** Katkoviiva kuvaa nestekiteiden kiertymistä ohjausjännitteen vaikutuksesta ja yhtenäinen viiva kerroksen läpäisevän luminanssin muutosta tyyppillisissä TN- ja STN-tekniikalla toteutetuissa näytöissä /60/

Perinteisesti nestekidetekniikan kompastuskivi on ollut huono katselukulma. Tämä johdetaan ensisijaisesti transmissioon perustuvasta toiminnasta. Emissiivisissä näytöissä valo emittoituu näytön uloimmasta kerroksesta ja täten pääsee vapaasti etenemään laajaan katselusuuntaan. Nestekidenäytöissä valo kulkee usean kerroksen läpi ja heikkenee voimakkaasti tämän seurauksena. Katselukulmaa voidaan parantaa lisäämällä näytön uloimpaan kerrokseen kalvo, joka sirottaa valoa laajalle katselukulmalle. Valoenergian häviötä voidaan pienentää kollimoimalla nestekidekerroksen läpi tuleva valo pinnan normaalin suuntaiseksi. /4, 59/

Passiivimatriisinäytön ohjaus on multipleksaalinen (kuvan 5 oikea puoli). Nestekidefaasin etu- ja takapuolella on läpinäkyvät elektrodit. Elektrodit muodostavat rivistön johtimia, jotka ovat suorassa kulmassa toisiinsa nähden nestekiteiden eri puolilla. Kerralla voidaan osoittaa yksi rivi pikseleitä asettamalla sarakkeisiin jännite-ero rivielektrodiin nähden. Koko näyttömatriisin osoittamiseen kuuluu yhden rivin osoittamiseen kuuluva aika kerrottuna rivien määrällä. Aikaa voidaan pienentää jakamalla näyttö kahteen osaan, joita voidaan ohjata erikseen (dual-scan-periaate). Näytön piirtonopeutta voidaan lisätä HPA- (high-performance addressing) ja MLA-menetelmillä (multiple line addressing), joissa ohjaussignaalin aaltomuotoa moduloimalla voidaan samanaikaisesti ohjata useampaa riviä. /59, 60/

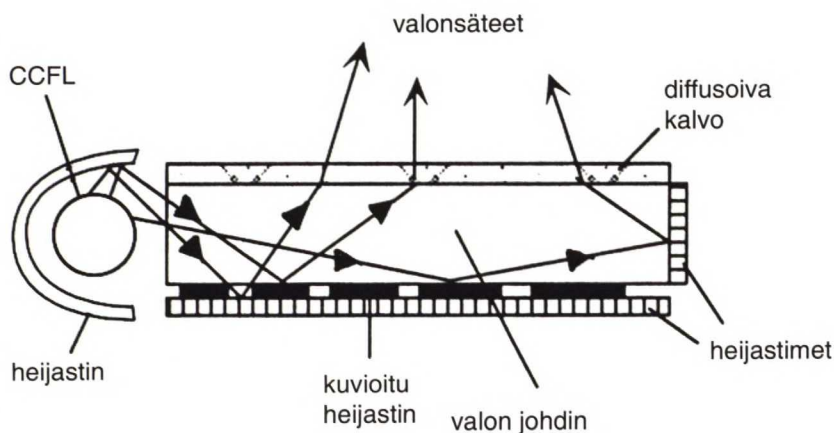


**Kuva 5.** Aktiivi- ja passiivimatriisiohjauksen periaate /60/

Aktiivimatriisinestekidenäytön tekniikka eroaa STN-tekniikasta siinä, että jokaista pikseliä ohjataan yhdestä neljään transistorilla. Aktiivimatriisinäyttöjä on pääasiassa kahta tyyppiä, ohutkalvotransistori eli TFT (thin film transistor) ja MIM (metal - insulator - metal). TFT:n transistorit ovat tyypiltään a-Si- (amorfinen pii), poly-Si- (monikiteinen pii), x-Si- (yksikidepii) tai CdSe-ohutkalvotransistoreja (kadmiumseleeni). MIM-tyypin näytön transistorit toimivat diodin tavoin. Aktiivimatriisitekniikassa käytetään tavallisesti 90°:n nestekiteiden kiertymiskulmaa. Pikselit osoitetaan vastaavalla menetelmällä kuin passiivimatriisitekniikassa (kuva 5), mutta koska jokaiseen nestekidepikseliin liittyy kapasitiivisesti toimiva transistori, voidaan osoittaminen tehdä nopeammin. Hilan (G) jännitteellä ohjataan kollektorin (D) virtaa, jolla synnytetään nestekiteitä ohjaava sähkökenttä. Transistorien käyttö lisää huomattavasti näytön energian kulutusta. Aktiivimatriisiohjauksen korvaajaksi on kehitetty plasmatekniikkaan perustuva PALC -menetelmä (plasma-addressed LC). Tässä plasmakerrosta, joka ei tuota näkyvää valoa, käytetään kytkimenä nestekidepikseleille. Plasmatekniikkaa on käsitelty tarkemmin luvussa 2.3.3. /38, 41, 50, 55, 60/

Koska nestekidenäytöt ovat transmissiivisiä, tarvitsevat ne taustavalon, jotta niitä voitaisiin käyttää pimeässä. Käytännössä lähes kaikkiin sovelluksiin tarvitaan itsevalaiseva näyttö. Taustavalon tulisi olla luminanssiltaan tasainen koko näyttöpinnan alueella ja sen luminanssia tulisi pystyä himmentämään sovelluksesta riippuen päivänvalon tai yövalaistuksen vaatimalle tasolle. Luminanssi ei saisi riippua lämpötilasta ja taustavalon tulisi olla ohut, kevyt ja energian kulutukseltaan pieni. Suosituin taustavalotyyppi koostuu yhdestä tai useammasta kylmäkatodiloisteputkilampusta (CCFL, cold-cathode fluorescent lamp). Lamput voivat sijaita näytön vieressä tai takana (kuva 6). Valoa tasoitetaan ohjaamalla ja heijastamalla sitä kuvan 6 esittämällä tavalla. Lamppujen valoa voidaan suunnata myös prismoilla. Toinen käytetty lamputyyppi on elektroluminesenssiin (EL) perustuva lamppu. Lamppujen valon temporaalinen käyttäytyminen on periodista. Taa-juus on kuitenkin tarpeeksi suuri, jotta siitä ei ole haittaa. Lamppu voidaan sijoittaa myös

näytön eteen. Tällöin loisteputkivalaisin on näyttöpinnan reunassa ja näyttöpinnan päällä on läpinäkyvä valonohjauskerros. Näytön takana on heijastin, joka heijastaa valoa takaisinpäin katselusuuntaan. /3, 4, 28, 52, 65, 78/



**Kuva 6.** Taustavalon rakenne. Näytön reunaan on sijoitetta loisteputkivalaisin, jonka valo ohjataan näyttöpinnalle /52/

Nestekidenäytön katselukulmaa on parannettu IPS-tekniikalla (in-plane switching). Nestekiteet on tavallisen pystysuunnan sijaan sijoitettu vaakasuuntaan tai vinoon. Tällöin niiden optiset ominaisuudet paranevat katselukulma-alueella. Transistorit sijaitsevat nestekidefaasin vierellä kummallakin puolella, joten yhdelle pikselille tarvitaan vähintään kaksi transistoria. VA-tekniikan (vertical alignment) toimintaperiaate on vastaava kuin IPS:n, mutta materiaalivalintojen ansioista on voitu luopua ylimääräisistä transistoreista. MVA-tekniikassa (multidomain VA) on edelleen kehitetty samaa periaatetta siten, että nestekidefaasi jaetaan osiin, joiden välillä nestekiteiden orientaatio vaihtelee. Tällä saavutetaan edelleen laajempi katselukulma. /4, 23, 40/

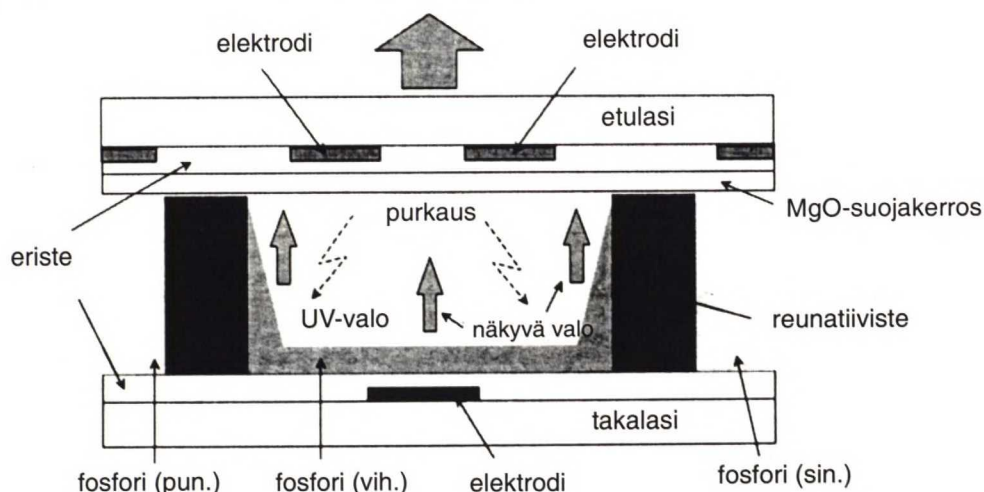
Valoluminesenssiin perustuvalla tekniikalla voidaan valmistaa emissiivinen nestekidenäyttö. Taustavalon tuottaa ultraviolettisäteilyä, joka läpäisee nestekidekerroksen. Näytön uloimpana oleva fosforikerros tuottaa näkyvää valoa ultraviolettisäteilyn vaikutuksesta. Tällä tekniikalla saadaan laaja katselukulma ja taustavalon energia voidaan hyödyntää tehokkaasti, koska ei tarvita valotehoa heikentäviä värisuodattimia. /52/

Tyypilliset markkinoilla olevat nestekidenäytöt ovat aktiivimatriisitekniikalla toteutettuja. Ne ovat kooltaan 15–18”<sup>2</sup>:n kokoisia ja niiden luminanssi on 100–200 cd · m<sup>-2</sup>. Kontrastisuhde yltää yli 300:1:n ja katselukulmaksi ilmoitetaan yli 140°. Nestekide-tekniikalla on toteutettu 22,2”<sup>2</sup>:n kokoinen 24-bitin värisyvyydellä toimiva näyttö, jonka pikselikoko on alle 130 μm ja pikselimäärä on 3840×2400 /10, 58/. Suurin valmistettu näyttö on 40”<sup>2</sup>:n kokoinen ja se pystyy 1280×768-näyttömoodiin. Sen kontrastisuhde on 600:1 ja luminanssi 500 cd · m<sup>-2</sup> /75/. /2/

### 2.3.3 Plasmanäytöt

Plasmanäyttöjen (PDP, plasma display panel) toimintaperiaate perustuu kaasupurkaukseen. Argonista, neonista tai ksenonista muodostuva kaasuseos suljetaan tiiviiseen tilaan katodin ja anodin väliin. Kun katodin ja anodin välille tuotetaan sähkökenttä,

alkaa kaasu ionisoitua. Ionien palautuessa takaisin lepotilaan vapautuu fotoneja. Muodostuva ultraviolettivalo muutetaan näkyvän aallonpituusalueen päävääreiksi fosforeilla, joilla kaasutilan seinämät on päällystetty. Kuvassa 7 on tyypillisen plasmanäytön rakenne. Elektrodeilla muodostetaan kaasutilaan sähkökenttä, joka muodostaa sähkövirran kaasutilan poikki. Virtaa ylläpitämällä saadaan kaasupurkaus jatkuvaksi. Plasma-näyttöä voidaan ohjata joko tasa- tai vaihtovirralla. /16, 51, 74/



**Kuva 7.** Plasmanäytön poikkileikkaus. Eristeet toimivat kondensaattoreina elektrodeille. Magnesiumoksidisuoja-kerros (MgO) estää katodipölynyönnäksen. Fosforeissa ultraviolettivalo aiheuttaa näkyvän valon emission /74/

Plasmanäyttö voi koostua yhtenäisistä pystysuorista kaistaleista, joissa osavärien kaasutilat on erotettu toisistaan, mutta ei päällekkäisten pikselien. Toinen periaate on erottaa pikselit toisistaan myös pystysuunnassa, mutta tämä nostaa valmistuskustannuksia, koska jokainen pikseli tulee käsitellä erikseen. Näytön kontrastia on lisätty käyttämällä värisuodattimia jokaiselle osavärielle erikseen kuten nestekidenäyttöissä. Tämä lisää myös valmistuskustannuksia. ALIS-menetelmällä (alternate lighting of surfaces) saadaan tuotettua lomitettu kuva ja samalla voidaan lisätä näytön tarkkuutta pystysuunnassa ja vähentää elektrodien määrää puoleen. Näytön värilämpötilaa on kasvatettu tekemällä sinisestä osaväripikselistä isompi kuin muista. Tällä menetelmällä on saavutettu yli 10 000 °K:n vastaava värilämpötila. /51, 74/

Harmaasävyt tuotetaan pulssikoodimodulaatiolla (PCM). Pikseliä ohjaavaa signaalia moduloimalla välkytetään pikseliä, jolloin sen päälläoloaika muuttuu. Koska välkkyminen on erittäin korkeataajuisia, ei ihmissilmä havaitse sitä. Tämä vaatii erittäin nopeaa pikselin vasteaikaa, mikä on ominaista plasmatekniikalle. Moduloinnista aiheutuu kuitenkin pikselivirheitä nopeata liikettä sisältäviin kuviin. Ongelmia ilmenee myös, jos näyttöä liikutellaan voimakkaasti, kuten esimerkiksi autoon sijoitetuissa näytöissä tai matkapuhelimissa. Modulointitekniikoita kehittämällä on pystytty korjaamaan näitä ongelmia. /50, 51/

Plasmanäytöistä pystytään valmistamaan isoja näyttöpintoja. Ne saavuttavat suuren luminanssin, jopa yli  $600 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  katselukulman säilyessä yli  $140^\circ$ . Kuva on välkkymätön ja tarkkuus on HDTV-standardin tasoinen. Suurin valmistettu plasmanäyttö on 63":n kokoinen /75/. Energian kulutus on suuri johtuen korkeasta ohjausjännitteestä. Lisäksi tummien harmaasävyjen toistaminen aiheuttaa ongelmia, koska pientä kaasupurkausta on vaikea pitää yllä ja lisäksi ohjaussignaalin digitaalinen luonne aiheuttaa kvantisointiportaita sävyntoistoon. /16/

### 2.3.4 Elektroluminesenssinäytöt

Elektroluminesenssinäytön (EL) voidaan ajatella olevan valoa emittoiva kondensaattori. Kahden elektrodin välissä on fosforia, joka emittoi valoa sähkökentän vaikutuksesta. Fosforin tyyppi määrää valon värin. Voimakasta sinistä valoa tuottavan fosforin valmistaminen on toistaiseksi ollut kompastuskivi täysvärillisen elektroluminesenssinäytön yleistymiselle. Tasavirralla toimivissa näytöissä (DCEL) käytetään loisteaineena pulveria, jonka käyttöjännite on 120–180 voltin jännite. Vaihtovirtanäytöissä käytetään ohutkalvopuolijohdetta (AC TFEL, alternating current thin-film EL), jota ohjataan 250 voltin vaihtojännitteellä. /16, 32, 41, 50/

Tasajännitteellä toimivalla tekniikalla saavutetaan näytön pidempi elinaika, mutta vaihtojännitteellä toimiva ohutkalvonäyttö on valmistusteknisesti helpompi ja edullisempi tehdä. Jälkimmäisellä saavutetaan myös huomattavasti parempi laatu kirkkauden, kontrastin, tarkkuuden ja katselukulman suhteen. Myös energian kulutus on pienempi. /41/

Täysvärillinen elektroluminesenssinäyttö voidaan valmistaa kahdella tavalla. Ensimmäinen on nestekidenäytöistä tuttu tekniikka, jossa tuotetaan tarpeeksi kirkasta valkoista väriä, jota suodatetaan värisuodattimilla. Ongelmia on kuitenkin aiheuttanut tarpeeksi kirkkaan valon tuottaminen. Toinen tapa on valmistaa kolmen tyyppisiä fosforeita, missä ongelmana on ollut sinistä väriä tuottavan fosforin valmistaminen. Epäorgaanisella elektroluminesenssitekniikalla (IEL, inorganic EL) voidaan ratkaista nämä ongelmat. Korvaamalla ohutkalvopuolijohde selvästi paksummalla materiaalilla voidaan parantaa huomattavasti sen kestävyttä ja tuottaa suurempaan kirkkauteen pystyviä pikseleitä, mikä parantaa varsinkin sinisen osavärin suorituskykyä. Teknologia skaalautuu myös suureen kokoon ohutkalvoteknologiaa paremmin. Epäorgaanisella elektroluminesenssiteknologialla on saavutettu luminanssiltaan  $350 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  yltävä täysvärinäyttö. Harmaasävyjä on pystytty toistamaan 256. Teknologialla arvellaan päästävän pian HDTV-tarkkuuden mukaisiin yli 30":n näyttöihin. Odotukset teknologiaa kohtaan ovat suuret, koska valmistusteknisesti sen etuja ovat, että materiaaleina ei ole nesteitä ja kaasuja eikä myöskään tyhjiä. /41, 73/

### 2.3.5 Valodiodinäytöt

Valoa emittoiva diodi (LED, light-emitting diode) on p-n-liitoksinen diodi, joka emittoi valoa. Kun liitoksen yli on positiivinen jännite, aukot virtaavat p-alueelta liitokseen ja myös elektronit virtaavat n-alueelta liitokseen. Liitoksessa aukot ja elektronit yhtyvät uudestaan, jolloin vapautuu fotoneja. Materiaalivalinnoilla voidaan vaikuttaa emittoituvan valon väriin. Valodiodi on korvannut hehkulampun elektronilaitteiden tiedonanto-

valona. Se toimii alle viiden voltin jännitteellä ja sen energian kulutus on pieni. Kuitenkin energian kulutus kasvaa, kun pikseleitä kootaan suuri joukko matriisin muotoon. Kulutus nousee tällöin selvästi yli nestekidenäytön. Sinisen valodiodin valmistaminen on hankalaa, koska silmän huonosta herkkyydestä siniselle valolle johtuen tulisi sinisen ledin olla erityisen kirkas. Teknisesti sen valmistaminen on myös hankalampaa kuin muiden osavärien. Tämän vuoksi sen yleistymisen näyttötekniologiassa on ollut hidasta. /41, 79/

Epäorgaanisista valodiodeista koostuvia näyttöjä käytetään vain erittäin suurissa ulko-käyttöön tarkoitetuissa näyttöpinnoissa. Orgaanisilla valodiodeilla (OLED) puolestaan pystytään valmistamaan toimistonäyttöjä ja pieniin laitteisiin soveltuvia näyttöjä. Teknologiasta on kaksi versiota, pieniin molekyyliin perustuva SMLED (small-molecule LED) ja polymeereihin perustuva PLED (polymer LED). Orgaanisessa valodiodinäyttötekniologiassa yhdistyvät emittoivien näyttöjen hyvät ominaisuudet, kuten laaja katselukulma ja hyvä kirkkaus, pieneen energian kulutukseen. Johdemateriaali voidaan valmistaa polymeeristä, mikä mahdollistaa näytön valmistamisen joustavalle alustalle. Näytöt ovat vielä prototyyppiasteella, mutta tuotteiden odotetaan ilmestyvän markkinoille pian. Teknologialla on toteutettu 800×600-näyttötilaan pystyvä 13” täysvärinäyttö, joka pystyy tuottamaan  $300 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  luminanssin /34, 75/. /41/

### 2.3.6 Katodiluminesenssinäytöt

Kenttäemissionäytöt (FED, field emission display) ja tyhjöfluoresenssinäytöt (VFD, vacuum fluorescent display) perustuvat samoihin periaatteisiin kuin katodisädeputkinäytöt ja niinpä niitä kutsutaan litteiksi katodisädeputkinäytöiksi (Thin CRT). Katodiluminesenssissa fotoneja emittoituu fluoresenssissa, kun fosforeita pommitetaan elektroneilla. Valon väri määräytyy fosforien ominaisuuksien mukaan. Kenttäemissionäytöissä elektronien emissio tuotetaan kylmällä katodilla, kun puolestaan katodisädeputki- ja tyhjöfluoresenssinäytöissä kuumentamalla katodia. Kenttäemissiolla päästään siten pienempään energian kulutukseen ja katodia voidaan myös käyttää pikselien osoittamiseen, koska johtuen sen kylmästä luonteesta sen temporaalinen vaste on nopea. Pikselit voidaan osoittaa yhdellä rivistöllä ja yhdessä sarakkeistolla elektrodeja, kun tyhjöfluoresenssinäyttö vaatii kolme elektrodia pikseliä kohden. /4, 50/

Kenttäemissioteknologialla on valmistettu 13,2”:n ja 5,3”:n kokoiset täysvärinäytöt. Näistä suurempi pystyy 800×600 pikselin näyttömoodiin  $800 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  luminanssilla ja pienempi 1280×960 pikselin näyttömoodiin  $1000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  luminanssilla. /75/

## 3 LITTEIDEN NÄYTTÖJEN ERGONOMIASTANDARDIT

### 3.1 Yleistä

Näyttöjen ergonomiastandardien tarkoituksena on harmonisoida mittausmenetelmät ja -kriteerit, jotta mittaukset olisivat keskenään vertailukelpoisia ja että voitaisiin luotettavasti arvioida toimintaperiaatteeltaan poikkeavia näyttöjä. Kansainvälisellä tasolla standardien laadinnasta vastaa ISON alainen tekninen komitea TC 159/SC4/WG2, IEC:n alainen SC 47C/WG2 ja CEN:n alainen TC122 sekä VESA. IEC:n työryhmä ja VESA ovat laatineet litteisiin näyttöihin liittyviä standardeja. Suomen Standardisoimisliitto (SFS) julkaisee Euroopan Unionin harmonioidut standardit. Metalliteollisuuden keskusliiton alainen ergonomiaseurantaryhmä koordinoi kansallista ergonomiastandardisoimista. /12, 42, 45, 62, 63, 71/

Seuraavissa luvuissa käsitellään kahta hyvin toisistaan poikkeavaa standardia ISO 13406 ja VESA FPDM 1.0. ISON standardi määrittää tarkasti kriteerit, jotka mitattavan näytön tulee täyttää. VESA puolestaan esittelee laajan kokoelman mittausmenetelmiä, joita voi soveltaa vapaasti. Se ei määritä tarkkoja kriteereitä, joita näytön tulisi täyttää. Kumpikin standardi sisältää ohjeita mittaustulosten raportoinnista mittauksen tilaajalle. Mittausraportin muoto on vapaa, kunhan siitä käy selvästi esille mittavan näytön identifiointi, mittalaitteiston tiedot, tehdyt mittaukset ja saadut tulokset. /64, 71/

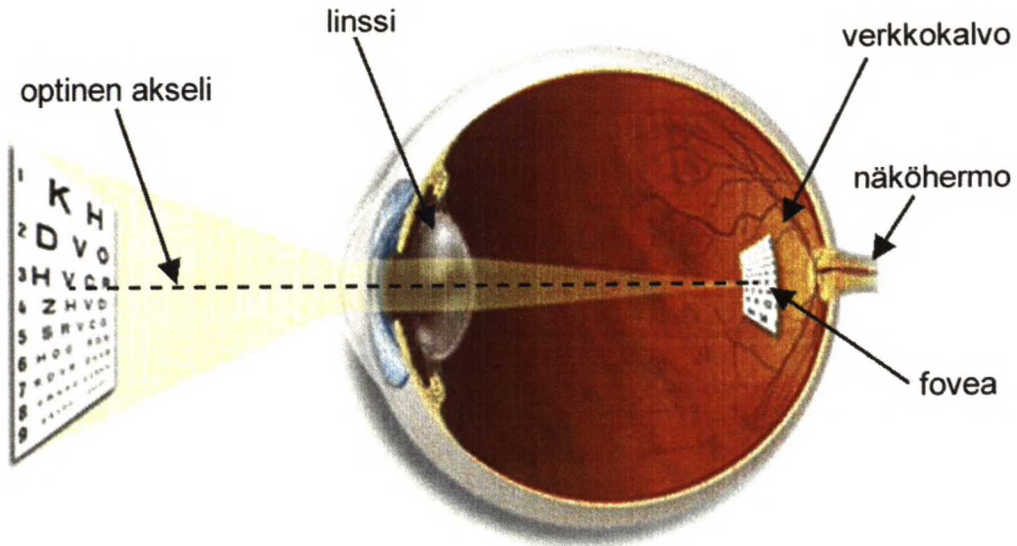
### 3.2 Taustaa

#### 3.2.1 Ihmisen näköjärjestelmä

Näyttöjen ergonomiamittausten tarkoituksena on selvittää näytön valotekninen suorituskyky siten kuin ihmissilmä sen näkee. Mitä tarkemmin tunnetaan ihmisen näköjärjestelmän toiminta, sitä paremmin osataan valmistaa näyttölaitteita, jotka hyödyntävät koko näköjärjestelmän suorituskyvyn. Näytöllä tarkoitetaan sähköistä näyttölaitetta, jolla esitetään digitaalista informaatiota. Se voi olla erillinen tai integroituna laitteeseen, joka sisältää tietokoneen tai sitä vastaavia toimintoja. Mittausten kannalta näytön toimintaperiaatteella ei ole suurta merkitystä, koska lopputuote, eli se minkä laatuisen kaksiulotteisen kuvan näyttö tuottaa, on tutkinnan kohteena.

Ihmisen näköjärjestelmä koostuu ensinnäkin optisesta linssistä, joka projisoi kaksiulotteisen kuvan verkkokalvolle (kuva 8). Verkkokalvon tappi- ja sauvasolut aistivat valokvantit. Hermojen välityksellä tieto aistitusta valosta siirtyy aivojen tulkittavaksi. Tappisoluja on kolmenlaisia siten, että ne ovat herkkiä eri aallonpituusalueille. Tämän informaation avulla aivoissa tulkitaan väriaistimus. Ihminen voi erottaa jopa miljoonia värejä. Koska tappisoluja on vain kolmenlaisia, voidaan näköjärjestelmän havaitsemat värit tuottaa kolmella väristimulilla. Näyttötekniikassa värit tuotetaan kolmella osaväripikselillä, joiden värit ovat punainen, sininen ja vihreä. Sauvasoluilla ei nähdä värejä. Ne vastaavat pääasiassa hämäränäkemisestä eli skotooppisesta näöstä. Näkyvän valon aallonpituusalue on noin 380–700 nm. /35, 53, 54/





**Kuva 8.** Poikkileikkauskuva ihmisen silmästä /30/

Tappisolujen määrä vaihtelee huomattavasti verkkokalvolla. Optisen akselin lähellä eli fovean kohdalla niitä on eniten ja tässä kohdin havaitaan kaikista tarkimmin yksityiskohdat. Selvännäkemisen etäisyydellä, joka on noin 25 cm, pienin havaittava kuva-alkion koko on noin 20  $\mu\text{m}$ . Näyttölaitteen suorituskyvyn kannalta yksittäisiä kuvapikseleiden teräviä reunoja ei tulisi havaita. Tällöin kuvapikselien koon tulisi olla alle 40  $\mu\text{m}$ , kun normaalikatseluetäisyys on 50 cm. Toisaalta informaation esittämiseen käytettävien kuvaelementtien, kuten fonttien ja kuvioden, koon tulisi olla riittävän suuri tarkan erottamisen vuoksi. /53/

Näköjärjestelmän hitaus aiheuttaa sen, että ihminen ei havainnoi yksittäisiä kuvia, jos niiden peräkkäinen esitysnopeus kasvaa tarpeeksi suureksi. Tyypillisesti nopeudeksi riittää 18–25 kuvaa sekunnissa. Tietokonenäytöissä esitetään staattista kuvaa piirtämällä kuva koko ajan uudelleen. Varsinkin vaaleista pinnoista havainnoidaan välkkymistä, jos kuvan piirtonopeus eli virkistystaajuus on alle noin 70 Hz. Näkökentän reunoilla olevia kohteita ei nähdä tarkasti, mutta liikkuvat kohteet havaitaan kuitenkin staattisia kohteita paremmin. Välkkymistä saatetaan havaita häiritsevästi näkökentän reuna-alueilla, vaikka suoraan katsottaessa näin ei olisikaan. Erot yksittäisten havainnoijien välillä voivat olla hyvinkin suuret. Iän mukana herkkyys välkkymisen havaitsemiseen heikkenee. Välkkyminen voi myös aiheuttaa epileptisia sairaskohtauksia. /24, 50, 54, 61, 64, 71/

Absoluuttisilla luminanssimittauksilla ei saada selville, kuinka kirkkaalle valo näyttää ihmisen kannalta. Silmä adaptoituu eli mukautuu vallitsevaan valaistustasoon silmän aukon eli pupillin koon muuttumisella ja reseptorien väriaineiden valokemiallisilla muutoksilla. Ihminen pystyy näkemään  $10^{-2}$ – $10^5$  lx:n valaistuksessa. Kontrastidaptaatiosta johtuen valkoinen pinta ymmärretään valkoiseksi ja musta mustaksi, vaikka niiden luminanssit hämärässä ja kirkkaassa valaistuksessa eroavat useita dekadeja. /5, 53/

### 3.2.2 Fotometriset suureet

Koska valo on sähkömagneettista aaltoliikettä, pätevät siihen radiometriset suureet. Kuitenkin tarkasteltaessa pelkästään näkyvän aallonpituusalueen sähkömagneettisia aaltoja eli valoa, käytetään fotometrisia suureita. Ero radiometrinen ja fotometrinen suureiden välillä on, että fotometrinen suureiden voimakkuus on painotettu näköherkkyyksifunktiolla  $V(\lambda)$ . Muutoin ne ovat analogisia. /25/

Fotometrian eli valonmittauksen suureet on yhtenäistetty kansainvälisesti SI-järjestelmän mukaisesti. Näytönmittauksen kannalta tärkeä suure on luminanssi, joka ilmaisee pinnan valovoiman tiheyden tiettyyn suuntaan. Kansanomaisesti voidaan sanoa, että luminanssi kertoo, kuinka kirkkaalle pinta näyttää tietystä tarkastelusuunnasta katsoen. Kirkkaus käsite sinällään on ihmisen havainnointiin perustuva termi, eikä sitä pidä sotkea fysikaalisiin suureisiin. Luminanssi  $L$  määritetään valovirrasta  $\Phi$  kaavalla 1 /32, 76/:

$$L = \frac{d^2 \Phi}{d\omega dA \cos \theta} \quad (1)$$

Kaavassa äärettömän pieni valovirta  $d\Phi$  kulkee äärettömän pienen avaruuskulman  $d\omega$  sisällä. Katselusuunnasta nähden  $dA \cos \theta$  on valonsäteiden projektiopinnan ala, jossa  $\theta$  on valon kulkusuunnan ja katselusuunnan välinen kulma. Luminanssin yksikkö on kandela neliömetrillä [ $\text{cd} \cdot \text{m}^{-2}$ ]. Tarkasteluetäisyys ei vaikuta luminanssin suuruuteen, koska kuten kaavasta 1 nähdään, luminanssi on kääntäen verrannollinen pinta-alan neliöön, joka puolestaan on kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön. /32, 71/

Avaruuskulma on kolmiulotteisessa koordinaatistossa määritetty kulmamitta. Sen yksikkö on steradiaani [sr]. Kun pallon pinnalta erotetun alueen pinta-ala on yhtä suuri kuin pallon säteen neliö, niin vastaan avaruuskulma on yksi steradiaani. Tällöin koko pallon avaruuskulma on  $4\pi$  sr. /32/

Valovirta on pistemäisestä valonlähteestä emittoituva valo. Sen yksikkö on lumen [lm]. Yhden lumenin suuruinen valovirta syntyy, kun valoa emittoituu yhden steradiaanin alueelta pistemäisestä valonlähteestä, jonka valovoima on yhden kandelan suuruinen. Valovoima  $I$  on valonlähteestä tiettyyn suuntaan säteilevän valon voimakkuus. Sen yksikkö on kandela [cd], joka on SI-järjestelmän perusyksikkö. Yhden kandelan valovoima syntyy, kun valonlähde säteilee  $540 \cdot 10^{12}$  Hz:n taajuisista säteilyä  $1/683 \text{ W} \cdot \text{sr}^{-1}$ :n säteilyteholla. Kun integroidaan valovoima avaruuskulman suhteen, saadaan valovirta eli valovoiman ja valovirran välinen yhteys on kaavan 2 mukainen /32, 46/:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega} \quad (2)$$

jossa,

- $I$  on valovoima,
- $\Phi$  on valovirta ja
- $\omega$  on avaruuskulma.

Valaistusvoimakkuus  $E$  on pinnalle saapuvan valovirran tiheys. Luminanssin ja valaistusvoimakkuuden välinen yhteys ilmaistaan kaavalla 3 /32/:

$$L = \frac{dE}{d\omega \cos \theta} \quad (3)$$

jossa,

- $L$  on ulkoisen lähteen luminanssi,
- $\omega$  on saapuvan valon avaruuskulma ja
- $\theta$  on valonsäteiden ja pinnan normaalin välinen kulma.

Valaistusvoimakkuuden yksikkö on lumenia neliömetrillä eli luksi [lx]. Valaistusvoimakkuus noudattaa neliölakia eli se on kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön. /32/

Heijastus voidaan jakaa haja- ja suuntaheijastuskomponenttiin. Täydessä hajaheijastuksessa pinta säteilee valoa Lambertin lain mukaan eli pinnasta heijastunut valovoima riippuu valonsäteiden kulmasta pinnan normaalin nähden (kuva 9). Lambertin laki on kaavan 4 mukainen /32/:

$$I_{\theta} = I_n \cos \theta \quad (4)$$

jossa,

- $I_n$  on valovoima pinnan normaalin suuntaan ja
- $I_{\theta}$  on valovoima kulman  $\theta$  verran sivussa pinnan normaalista.

Lambertin pinnan luminanssi on vakio tarkastelusuunnasta riippumatta, koska pinnan alan projektiio noudattaa myös Lambertin lakia. Lambertin pinnan luminanssin ja valaistusvoimakkuuden välinen riippuvuus ilmaistaan kaavalla 5 /32, 71/:

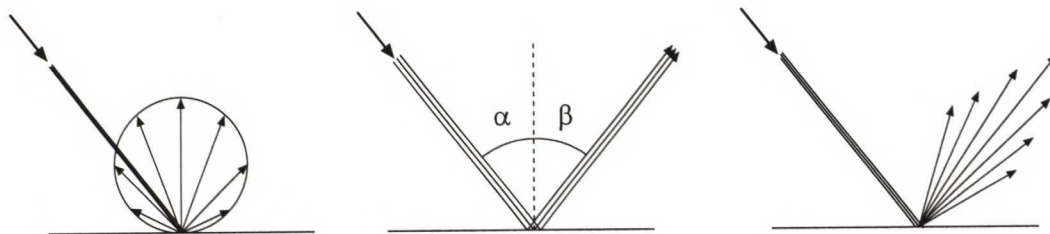
$$L = \frac{\rho}{\pi} \cdot E = qE \quad (5)$$

jossa,

- $L$  on luminanssi,
- $E$  on valaistusvoimakkuus,
- $\rho$  on heijastussuhde ja
- $q$  on luminanssikerroin.

Lambertin pinnalle  $\rho$  on yksi. Todellisille pinnoille voidaan määrittää heijastussuhde, joka on alle yhden suuruinen luku. Mitä lähempänä heijastussuhde on yhtä, sitä parempi hajaheijastava pinta se on. Luminanssikerroin on pinnan luminanssin ja valaistusvoimakkuuden välinen suhde. /25, 64/

Täydellisessä suuntaheijastuksessa pinta toimii peilin tavoin heijastaen kaiken siihen tulevan valon samassa lähtökulmassa pinnan normaalin nähden kuin mikä tulokulma on (kuva 9). Luminanssisuhde  $\beta$  on pinnasta heijastuneen luminanssin suhde ideaalisesti heijastavaan Lambertin pintaan. Luminanssisuhteen avulla voidaan tarkastella pinnan suuntaheijastusominaisuutta. /25, 32/



**Kuva 9.** Haja- (vasemmalla), suunta- ja huntuheijastus /32/

Heijastukseen kuuluu myös kolmas komponentti, joka on huntu (kuva 9). Se ilmenee yleensä peiliheijastuksen ympärillä vaaleampana epätarkkana alueena. Tyypillisesti näyttöjen peiliheijastusta pyritään poistamaan diffuuseilla päällystyskalvoilla, mutta nämä lisäävät huntukomponenttia. Huntuun tutkimiseen soveltuu kaksisuuntainen heijastusjakaumafunktio (BRDF, bidirectional reflectance distribution function), jonka määrittelmä on kaavan 6 mukainen /43, 71, 76/:

$$L_r(\theta_r, \phi_r) = B(\theta_i, \phi_i, \theta_r, \phi_r) dE_i(\theta_i, \phi_i) \quad (6)$$

$B$  on BRDF-funktio, joka on riippuvainen kahdesta kulmasta  $(\theta_r, \phi_r)$  ja  $(\theta_i, \phi_i)$ .  $E_i$  on valaistusvoimakkuus, joka saapuu pinnalle kulmassa  $(\theta_i, \phi_i)$ .  $L_r$  on pinnasta heijastunut luminanssi suuntaan  $(\theta_r, \phi_r)$ . Kun tunnetaan BRDF-funktio kaikilla kulmakombinaatioilla, tunnetaan näytön heijastusominaisuudet kaikkiin suuntiin. Menetelmä on monimutkainen toteuttaa käytännössä ja senpä vuoksi se ei ole mukana ergonomiastandardeissa. /43, 71/

### 3.2.3 Kolorimetria

Näyttöjen värintoisto-ominaisuuksia tarkasteltaessa tarvitaan standardisoitu menetelmä värien arviointiin, joka perustuu valtaväestön näköjärjestelmän toimintaan. Ihmisen havaitsemat värisävyt voidaan esittää CIE:n (International Commission on Illumination) kolmiväri- eli tristimuluskomponenttien  $X$ ,  $Y$  ja  $Z$  avulla. Tristimuluskomponentit määrittyvät kolmiväriefunktioista  $\bar{x}(\lambda)$ ,  $\bar{y}(\lambda)$  ja  $\bar{z}(\lambda)$ , jotka on määritetty sekä 2°:n että 10°:n kokoisille näkökentille. Kuvassa 10 on 2°:n kolmiväriefunktiot spektrin alueella 380–780 nm. /35, 76, 77/

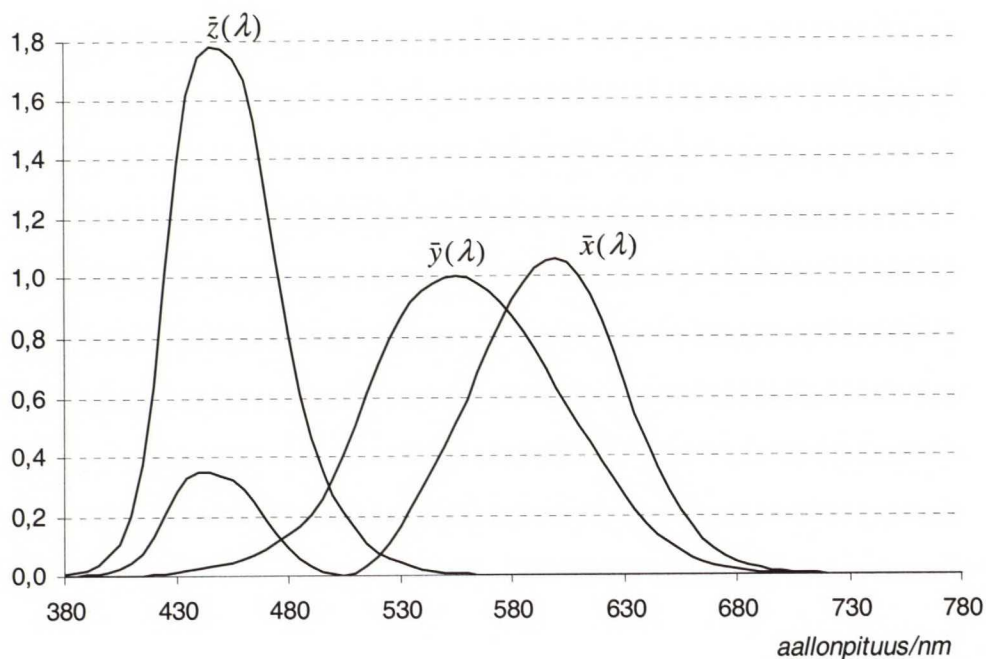
Kolmiväriefunktio  $\bar{y}(\lambda)$  on vastaava kuin silmälle ominainen näköherkkyysfunktio  $V(\lambda)$ , joka kuvaa silmän herkkyyttä valolle. Tristimuluskomponentit saadaan laskettua valoärsyksen spektristä  $L_s(\lambda)$  kaavoilla 7, 8 ja 9 /77/:

$$X = k \int_{\lambda} \bar{x}(\lambda) L_s(\lambda) d\lambda \quad (7)$$

$$Y = k \int_{\lambda} \bar{y}(\lambda) L_s(\lambda) d\lambda \quad (8)$$

$$Z = k \int_{\lambda} \bar{z}(\lambda) L_s(\lambda) d\lambda \quad (9)$$

$L_s$  on kapea kaista valoärsyksen spektrissä. Muuttuja  $k$  on vakio. Kun  $k$ :n arvoksi valitaan säteilyn valotehokkuus  $K_m = 683$  ja  $L_s$  on watteina steradiaania ja neliometriä kohden,  $Y$  on luminanssi kandeloina neliometrillä. Tällöin yleensä kolmivärikomponentteja merkitään symbooleilla  $X_L$ ,  $Y_L$  ja  $Z_L$ . /77/



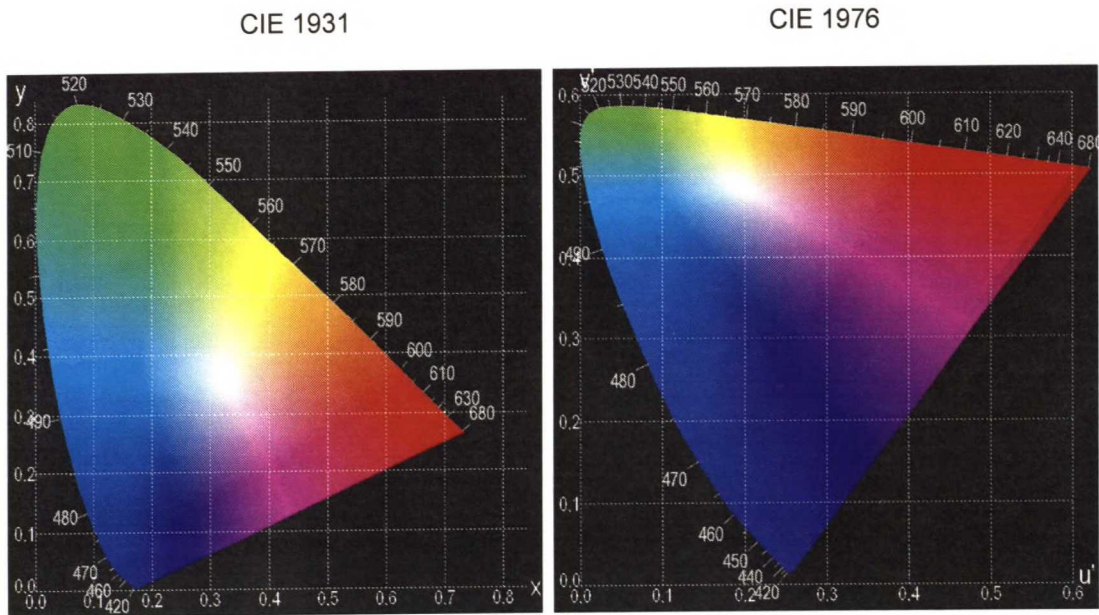
**Kuva 10.** Silmän näköherkkyyteen perustuvat kolmiväriefunktiot /42/

Kaavat 7, 8 ja 9 voidaan esittää diskreetissä muodossa (kaavat 10, 11 ja 12), jolloin spektrin laskeminen mittaustuloksista on mahdollista /35, 77/:

$$X = k \sum_{\lambda = \lambda_a}^{\lambda_b} L(\lambda) \bar{x}(\lambda) \Delta\lambda \quad (10)$$

$$Z = k \sum_{\lambda = \lambda_a}^{\lambda_b} L(\lambda) \bar{z}(\lambda) \Delta\lambda \quad (12)$$

Valoärsykkeiden värien sovitusta tarkasteltaessa tristimulusarvot eivät ole havainnollinen esitysmuoto. Senpä vuoksi CIE on määrittänyt tähän tarkoitukseen vuosien 1931-, 1960- ja 1976-värillisyyскоordinaatistot. Kuvassa 11 on CIE 1931- ja CIE 1976 -värikoordinaatistot. Niin kutsutun ”hevosenkengän” sisäpuolelle jäävät silmän havaitsemat värit. Täysin kylläiset värit sijaitsevat kaaren reunalla ja puhdas valkoinen keskellä. /35, 71/



**Kuva 11.** CIE:n 1931 ja 1976 -värikoordinaatistot CIE:n vuoden 1931 2<sup>o</sup> -havainnoijalla /31/

Kaavoilla 13, 14 ja 15 lasketaan CIE:n vuoden 1931:n x-, y- ja z-värillisyyssarvot /35, 71/:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (13)$$

$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (14)$$

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (15)$$

Näyttöteknisessä tutkimuksessa tarkastellaan yleensä näytön toistamaa väriavaruutta, jolloin tarkastellaan pelkästään x- ja y-akselien muodostamaa tasoa, josta nähdään kro-maattisuusarvot. Luminanssin tarkasteluun käytetään absoluuttista luminanssiarvoa  $L$ , joka on sama kuin tristimulusarvo  $Y$ . /64, 71/

Näyttötekniisessä tutkimuksessa tarkastellaan yleensä näytön toistamaa väriavaruutta, jolloin tarkastellaan pelkästään  $x$ - ja  $y$ -akselien muodostamaa tasoa, josta nähdään kromaattisuusarvot. Luminanssin tarkasteluun käytetään absoluuttista luminanssiarvoa  $L$ , joka on sama kuin tristimulusarvo  $Y$  /64, 71/

CIE:n vuoden 1960 ja 1976 tasajakoiset värikoordinaatit soveltuvat värierojen tarkasteluun. CIE 1976:ta käytetään yleisemmin. CIE 1960:tä käytetään nykyisin vain vastaavan värilämpötilan laskemiseen. Tasajakoisessa värikoordinaatistossa valoärsykkeiden väliset värierot voidaan määrittää etäisyyksinä koordinaatistossa, koska koordinaatistoon on tasattu kaikkien värien välinen ero vastaamaan silmän havainnoimaa värieroa. Muunnos tristimulusarvoista CIE 1976  $u'$  ja  $v'$  -arvoihin lasketaan kaavoilla 16 ja 17 /35, 77/:

$$u' = \frac{4X}{X + 15Y + 3Z} \quad (16)$$

$$v' = \frac{9Y}{X + 15Y + 3Z} \quad (17)$$

CIE 1960  $u$  ja  $v$  -arvot saadaan kaavoilla 18 ja 19 CIE 1976  $u'$  ja  $v'$  -arvoista:

$$u = u' \quad (18)$$

$$v = \frac{2v'}{3} \quad (19)$$

Kahden valoärsyksen  $u'_1, v'_1$  ja  $u'_2, v'_2$  välinen väriero  $\Delta u'v'$  CIE 1976  $u'v'$  -koordinaatistossa lasketaan kaavalla 20 /64, 71/:

$$\Delta u'v' \equiv \sqrt{(u'_1 - u'_2)^2 + (v'_1 - v'_2)^2} \quad (20)$$

Vastaavasti väriero CIE 1960 -koordinaatistossa lasketaan vaihtamalla  $u'$  - ja  $v'$  -arvojen tilalle  $u$ - ja  $v$ -arvot.

CIE:n vuoden 1976  $L^*u^*v^*$  -koordinaatistossa otetaan huomioon referenssivalkoinen valoärsyke  $Y_n, u'_n, v'_n$ . Kolmiulotteisen koordinaatiston origo määräytyy referenssivalkoisen mukaan. Koordinaatisto soveltuu värierojen määrittämiseen siten, että värisävyjen voimakkuus otetaan huomioon päinvastoin kuin CIE 1931  $x$   $y$ - ja CIE 1976  $u'v'$  -koordinaatistoissa. Luminanssi  $L^*$  muunnetaan epälineaariseksi, mikä vastaa ihmisen silmän toimintaa. Muunnos CIE 1976  $u'v'$  -koordinaatistosta CIE 1976  $L^*u^*v^*$  -koordinaatistoon suoritetaan kaavoilla 21–24 /35, 71/:

$$L^* = 116 \left( \frac{Y}{Y_n} \right)^{\frac{1}{3}} - 16, \text{ kun } \frac{Y}{Y_n} > 0,008856 \quad (21)$$

$$L^* = 903,3 \left( \frac{Y}{Y_n} \right), \text{ kun } \frac{Y}{Y_n} \leq 0,008856 \quad (22)$$

$$u^* = 13L^*(u' - u'_n) \quad (23)$$

$$v^* = 13L^*(v' - v'_n) \quad (24)$$

$Y_n, u'_n$  ja  $v'_n$  ovat referenssivalkoisen valoärsyksen arvoja. Väriero CIE 1976  $L^*u^*v^*$ -koordinaatistossa  $\Delta E_{uv}^*$  lasketaan kaavalla 25, joka määrittää vertailupisteiden välisen etäisyyden /35, 64/:

$$\Delta E_{uv}^* = \sqrt{(\Delta L^*)^2 + (\Delta u^*)^2 + (\Delta v^*)^2} \quad (25)$$

Väriero voidaan määrittää myös värisävykulmasta  $h_{uv}$ . Värisävykulma lasketaan kaavalla 26 /35, 64/:

$$h_{uv} = \text{atan} \left( \frac{v^*}{u^*} \right) \quad (26)$$

Väriämpötilaa  $T_c$  käytetään valonlähteen väriominaisuuksien kuvaamiseen. Näytöille voidaan yleensä asettaa valkoisen värin väriämpötila. Valonlähteen väriämpötila määrittyy Planckin säteilijän mukaan, joka koetaan saman värisenä kuin tietyn lämpötilan Planckin säteilijä. Planckin säteilijä on ideaalinen täysin musta säteilijä, jonka spektrijakauma riippuu säteilijän lämpötilasta. Lämpötilan ollessa 1000 °K on säteilijä punainen. Noin 6000 °K:n lämpötilassa on se neutraalin valkoinen ja vastaavasti lämpötilan kasvaessa 9000 °K:iin väri muuttuu sinertäväksi. Kuvaan 12 on piirretty Planckin käyrä, jota pitkin Planckin säteilijän arvot kulkevat. /25, 32, 35, 48/

Vastaava väriämpötila,  $T_{cp}$  tai CCT (correlated colour temperature) on Planckin säteilijän lämpötila, jonka koettu väri on lähimpänä valoärsykettä Planckin käyrällä samassa valaistuksessa ja tunnetuissa havainto-olosuhteissa. Se voidaan laskea CIE 1931 tai CIE 1960 -koordinaateista. Kaavoilla 27 ja 28 saadaan vastaava väriämpötila määritettyä kohtuullisella tarkkuudella arvoilla 2 000–10 000 °K /41, 48, 71/:



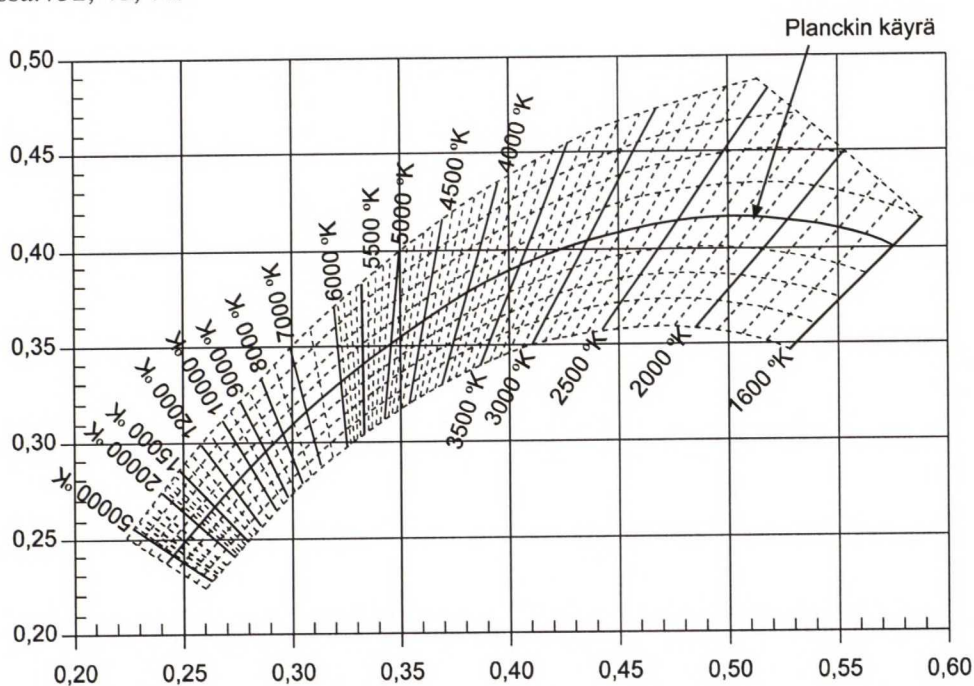
$$CCT = 437 \cdot n^3 + 3601 \cdot n^2 + 6831 \cdot n + 5517 \quad (27)$$

$$n = \frac{x - 0,3320}{0,1858 - y} \quad (28)$$

jossa,

$x$  ja  $y$  ovat CIE 1931 -värikoordinaatteja.

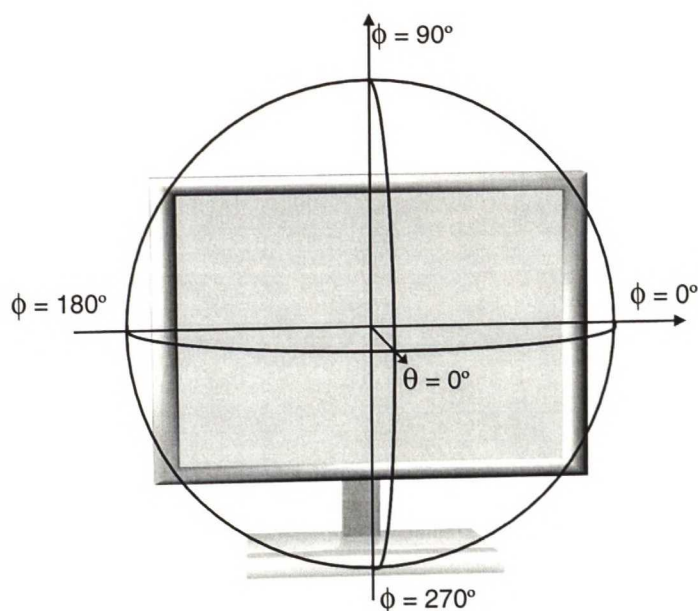
Kuvassa 12 on esitetty CIE 1931 -koordinaatistossa, kuinka vastaavan värilämpötilan arvot määräytyvät, kun ollaan sivussa Planckin käyrästä. Vastaavaa värilämpötilaa ei ole järkevää määrittää yli 0,01 yksikön etäisyydellä Planckin käyrästä CIE 1960 -koordinaatistossa. /32, 41, 71/



**Kuva 12.** Keskiosa CIE 1931 -koordinaatistosta, johon on piirretty Planckin käyrä ja vastaavan värilämpötilan viivat /32/

### 3.2.4 Näyttötekniisiä määritelmiä

Näyttömittauksissa käytetään yleisesti paikkakoordinaatistoa, joka on sidottu mitattavaan näyttöön. Kolmiulotteinen karteeminen koordinaatisto määräytyy siten, että x-akseli on näyttöön nähden horisontaalin akselin suuntainen ja positiivinen suunta oikealle katsottaessa näyttöä edestä päin (kuva 13). Y-akseli on vertikaalisuuntainen näyttöön nähden ja positiivinen suunta on ylöspäin näytöstä katsoen. Z-akseli on näytön normaalin suuntainen ja positiivinen suunta on eteenpäin näytön pinnasta. Origo on näytön keskipisteessä. /64, 71/



**Kuva 13.** Näyttöön sidottu karteeminen koordinaatisto ja pallokoordinaatisto

Kulmariippuvaisissa mittauksissa käytetään pallokoordinaatistoa. Tässä sijainti koordinaatistossa ilmoitetaan etäisyydellä  $r$  origosta ja kahdella kulmalla. Atsimuuttikulma  $\phi$  pyörii x- ja y-akselien muodostamassa tasossa. Nollakohta on positiivisessa x-akselissa ja kulma kasvaa kiertyttäessä z-akselia vastapäivään. Yleensä kulma ilmoitetaan lukuarvona  $0^\circ$ – $360^\circ$ . Inkliinaatiokulma  $\theta$  on näytön normaalin ja tarkastelupisteestä origoon syntyvän janan välinen kulma. Inkliinaatiokulma saa arvoja  $0^\circ$ – $90^\circ$ . Koordinaatistosta käytetään vain puolipallon kokoista aluetta, joka jää näytön etupuolelle. /64, 71/

Kulmakoko (angular subtense) ilmaisee spatiaalisen koon tietyllä etäisyydellä kulmaan perustuvana suureena. Kulmakoko asteina ja minuutteina määräytyvät kaavoilla 29 ja 30. Kaavat määräytyvät suorakulmaisesta kolmiosta, jonka toinen kateetti on kohteen koko ja toinen katseluetäisyys /64/:

$$\text{kulmakoko asteina} = 2 \cdot \text{atan}\left(\frac{h}{2 \cdot D_{\text{designview}}}\right) \quad (29)$$

$$\text{kulmakoko minuutteina} = 60 \cdot 2 \cdot \text{atan}\left(\frac{h}{2 \cdot D_{\text{designview}}}\right) \approx \frac{3438 \cdot h}{2 \cdot D_{\text{designview}}} \quad (30)$$

jossa,

$h$  on kohteen koko ja  
 $D_{\text{designview}}$  on normaalikatseluetäisyys.

Kulmakoolle minuutteina voidaan käyttää kaavan 30 mukaista likiarvoa. Kulmakoko voidaan ilmoittaa sekunteina, jolloin kulmakoko minuutteina jaetaan 60:llä. /64/

Aukkoarvo (f-luku) on mitta aukon koolle. Aukko eli himmennin on reikä, joka rajoittaa mittapäälle tulevaa valoa. Sen kokoa voidaan säädellä mekaanisella rakenteella. Aukkoarvo määrytyy kaavalla 31:

$$\text{aukkoarvo} = \frac{\text{polttoväli}}{\text{aukon läpimitta}} = \frac{f}{D} \quad (31)$$

Aukkoarvolle käytetään asteikkoa, joka on sidottu valonmäärään. Aukon läpimitan puolittuessa pienenee aukon pinta-ala ja täten sen läpi kulkevan valon määrä neljäsosaan. Vastaavasti valonmäärän puolittuessa aukon koko saadaan jakamalla se neliöjuuri kahdella. Yleisesti käytetään seuraavaa sovittua asteikkoa: 1; 1,4; 2; 2,8; 4; 5,6; 8; 11; 16; 22; ... Siirtyminen asteikolla seuraavaan suurempaan aukkoarvoon puolittaa valomäärän. Tällä menettelyllä voidaan aukon koon muutokset kompensoida helposti valotusaikaa muuttamalla. Samaten esimerkiksi valotusajan pidentäminen kaksinkertaiseksi valotusta muuttamatta onnistuu aukkoarvoa muuttamalla yhtä suuremmaksi. /33, 79/

### 3.3 ISO 13406 -ergonomiastandardi

#### 3.3.1 Standardisarja

ISO 13406 ergonomiset vaatimukset litteillä näyttöillä työskennellessä on jatkoa ISO 9241 (EN 29241) -ergonomiastandardisarjalle. Sarjan osat 3, 7 ja 8 ovat suunnattu katodisädetekniikalla toteutettujen näyttöjen arviointiin. Kolmas osa sisältää yleisiä näytön vaatimuksia, seitsemäs osa heijastusten vaatimuksia ja kahdeksas osa vaatimuksia näytön väreille. ISO 13406 käsittelee litteiden näyttöjen käyttöön liittyviä ergonomisia näkökohtia. Se perustuu samoihin ergonomisiin periaatteisiin kuin ISO 9241 -standardit, mutta johtuen litteiden näyttöjen erilaisista toimintaperiaatteista, katsottiin tarpeelliseksi laatia täysin uusi standardi. Litteiden näyttöjen erityispiirteitä, joita ISO 9241:ssä ei tule katetuksi, ovat näytön kulmariippuvaiset ominaisuudet, kuvapisteiden keskinäiden epä-jatkuvuus, hitaat temporaaliset ominaisuudet ja kuvaelementin heijastusominaisuudet. Lisäksi ISO 13406 soveltuu laajemmalle käyttö- ja sovellusalueelle kuin ISO 9241, jonka aihepiiriin ei kuulu pienten näyttöjen vaatimukset. /61, 63/

ISO 13406 osa 2 määrittää ergonomisia kuvanlaadun vaatimuksia litteiden näyttöjen suunnittelulle ja arvioinnille. Standardi hyväksyttäneen vuoden 2001 aikana kansainväliseksi standardiksi. Standardi määrittää termit, menetelmät ja ergonomiset periaatteet arvioitaessa litteiden näyttöjen suorituskykyä. Standardia voidaan soveltaa näytöille, joita käytetään toimistotehtävissä. Niiden tulee muodostua säännöllisistä rivistöistä kuvaelementtejä ja niiden tulee pystyä näyttämään latinalaisia, kyrillisiä ja kreikkalaisia merkkejä sekä arabialaisia numeroita ja aasialaisia kirjoitusmerkkejä. Näytön tulee pystyä toistamaan vähintään 40 latinalaista merkkiä. Standardia ei voida soveltaa näytöille, joiden kuvanmuodostaminen perustuu erikokoiseen projektioon kuvasta kuin varsinaisen kuvapinta. Myöskään näytöt, jotka pystyvät esittämään vain yksittäisiä viestejä tai segmenttimerkkejä eivät kuulu standardin aihepiiriin. /63, 64/

Tärkein kriteeri määritettäessä näytön visuaalista ergonomiaa on luettavuus ja värien erottaminen vallitsevissa valaistusolosuhteissa heijastusten vaikutusten alaisena. Näytön luminanssin tasaisuuden ei arvioida olevan yhtä merkittävä suure. Näytön päivitystaajuuden tulee joissain sovelluksissa olla nopea. Toisissa sovelluksissa puolestaan vaaditaan pientä energian kulutusta ja staattista kuvaa. Myöskin katselukulman suuruus voi sovelluksesta johtuen olla hyvinkin rajoittunut. Standardi ottaa nämä seikat huomioon siten, että valmistajan tai arvioijan tulee ilmoittaa, jos näytön suorituskyky on rajallinen johtuen sovellusten vaatimista ominaisuuksista. /63, 64/

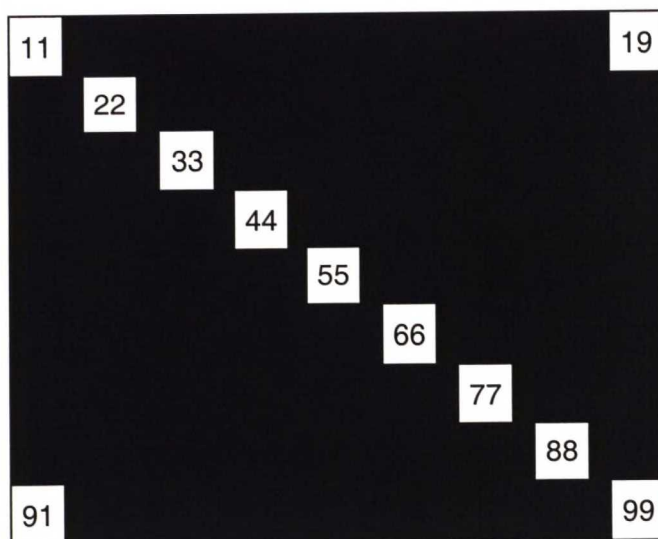
Standardi ei ota kantaa näyttöjen teknisiin toimintaperiaatteisiin. Kaikki mittausmenetelmät eivät sovellu heijastaville näyttöille. Standardia tultaneen laajentamaan tekniikan kehittyessä. /63/

Standardin ISO 13406 osa 1 on johdanto. Toinen osa sisältää varsinaiset ergonomiset vaatimukset. Standardi jakautuu lukuihin siten, että luvut yhdestä kuuteen sisältävät termien ja merkintöjen määritelmiä. Seitsemäs luku määrittää suunnitteluvaatimukset ja -suositukset. Kahdeksas luku sisältää ohjeet mittausten läpiviemiseen ja erityisesti luku 8.7 sisältää ohjeet seitsemännen luvun vaatimusten todentamiseen. /63, 64/

Seuraavissa luvuissa käydään läpi standardin erilliset mittaukset ja niihin liittyvät ergonomiset vaatimukset. Käsittelyjärjestys ei täysin vastaa standardin järjestystä. Vasteaika- ja välkyntämittaukset on käsitelty kokonaan VESA FDP:n yhteydessä, vaikka ISO 13406 sisältää ne myös. Käytännössä mittaukset vastaavat toisiaan.

### 3.3.2 Mittauskohtien määrittäminen

Tässä mittauksessa valitaan mittauskohdat, joita käytetään myöhemmissä mittauksissa. Mittauspisteiden valinnassa pyritään saamaan mahdollisimman hyvä otos näytön toiminnasta mahdollisimman pienellä määrällä mittauksia. Mittauskohtien valinta tehdään kuvan 14 mukaisella testikuvalla. Mittaus tehdään 11 kohdasta, jotka sijaitsevat kuvassa 14 esitettyjen valkoisten neliöiden keskipisteissä. Mittausten joukosta valitaan kolme mittauspistettä siten, että piste 55 valitaan aina keskipisteeksi (CL) ja jäljelle jäävistä pisteistä valitaan ne kaksi, joista on mitattu suurin (HL) ja pienin (LL) luminanssiarvo. Jos näytön pinnalla on alueita, jotka ovat visuaalisesti huonompia kuin 11 testipistettä, tulee ne valita myös mittauskohdiksi myöhempiä mittauksia varten. /64/



**Kuva 14.** Mittauskohtien sijainnit näytön pinnalla /64/

Kuvan 14 testikuvassa jokaisen valkoisen neliön sivun pituuden tulee olla vähintään 60 % suurempi kuin mittalaitteen mittausalueen halkaisijan. Mikäli mahdollista suositeltavaa on käyttää 85 % suurempaa neliötä. Mittalaitteen mittausalueen kulmakuon tulee olla 1°:n kokoinen suunnittelukatseluetäisyydeltä katsottaessa. Jos katseluetäisyys on 500 mm, on mittausalueen halkaisija 1°:n kulmakoolla noin 8,7 mm. Tällöin testikuvan neliön sivun pituuden tulee olla vähintään 14,0 mm. /64/

Edellä käsitelty mittauskohtien määritys soveltuu näytöille, joiden kuva-alan kulmakoko on vähintään 4,8° suunnittelukatseluetäisyydellä. Tätä pienempiä näyttöjä mitattaessa voidaan mittauspisteiden määrää vähentää. Mittauspisteet 19 ja 91 voidaan jättää pois ja muiden mittauspisteiden ei tarvitse olla päällekkäin yli 25 %. Kuitenkin kolme mittauskohtaa CL, HL ja LL valitaan edellä käsitellyllä tavalla. /64/

### 3.3.3 Mittaussuuntien määrittäminen

Mittaussuuntia määritetään kaikkiaan kahdeksan. Suunnat valitaan valmistajan antamien tietojen perusteella. Tällöin näytön kulmariippuvaiset ominaisuudet tulevat otettua huomioon suuntia valittaessa. Mittaussuunnat valitaan suunnittelukatselusuuntaan nähden. Mittaussuunta on kuvitellun katselusuuntakartion keskijana ja mittauspisteet valitaan kartion seinämien suuntaisesti. Taulukossa 3 on mittaussuunnat ja niiden laskemiseen käytettävät kaavat sekä kuvassa 15 esimerkki suuntien määräytymisestä. Laskuissa tarvitaan suunnitteluatsimuuttikulmaa  $\phi_D$ , suunnittelu- inkliinaatiokulmaa  $\theta_D$  ja suunnittelukatselusektoria  $\theta_{range}$ . Lisäksi tarvitaan kriittistäatsimuuttikulmaa  $\phi_C$ , joka lasketaan kaavalla 32 /64/:

$$\phi_C = \frac{360^\circ - 2 \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{W_{\text{view}}}{H_{\text{view}}}\right)}{4}, \text{ kun } 2 \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{W_{\text{view}}}{H_{\text{view}}}\right) > \frac{360^\circ}{5} \quad (32)$$

$$\phi_C = \frac{360^\circ}{5}, \text{ kun } 2 \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{W_{\text{view}}}{H_{\text{view}}}\right) \leq \frac{360^\circ}{5}$$

jossa,

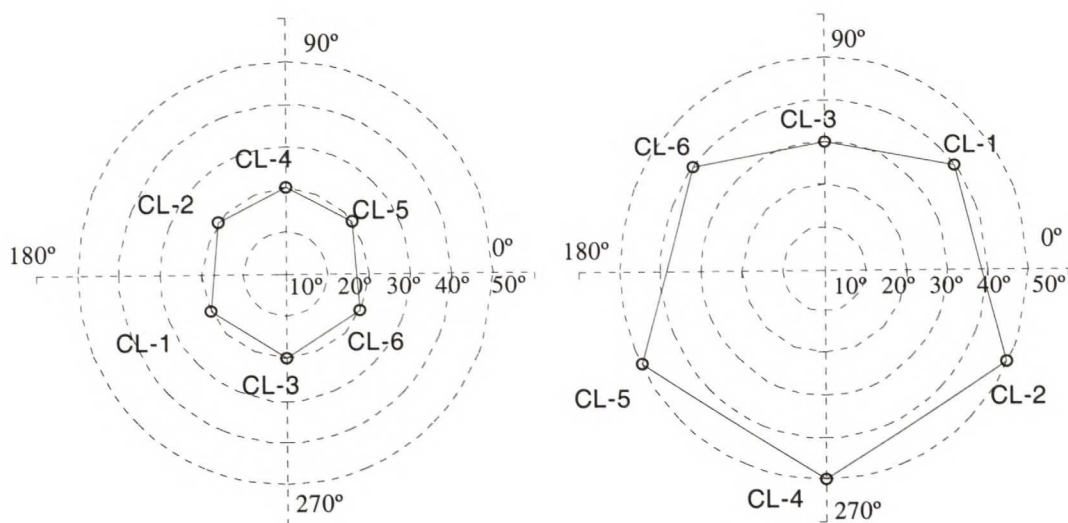
$W_{\text{view}}$  on näytön aktiivisen alueen leveys ja  
 $H_{\text{view}}$  on näytön aktiivisen alueen korkeus.

Kriittisen atsimuuttikulman määrittämisessä otetaan huomioon näytön kuvasuhde. Kuvasuhteen kasvaessa siirtyvät mittauskulmat lähemmäksi suunnitteluatsimuuttikulmaa. Kaavan ehto takaa, että kriittinen kulma ei ylitä  $72^\circ$ , jolloin atsimuuttisuunnassa mittaus suunnat jaetaan tasan katselusuuntakartion vaipalle. /64/

**Taulukko 3.** Kulmariippuvaisten mittausten kulmien määrittämiseen käytettävät kaavat. Kohdassa CL-0 atsimuuttikulma ei ole oleellinen, koska inkliinaatiokulma on nolla.  $\theta_{lm}$  on mittaussuunnan määräävä inkliinaatiokulma ja  $\phi_{EUT}$  atsimuuttikulma /64/

Kulman tunnus	$\theta_{lm}$	$\phi_{EUT}$
CL - 0	$0^\circ$	N/A
CL - 1	$\frac{1}{2}\theta_{range}$	$\phi_D + 2\phi_C$
CL - 2	$\theta_D + \frac{1}{2}\theta_{range}$	$\phi_D + \phi_C$
CL - 3	$\frac{1}{2}\theta_{range} - \theta_D$	$\phi_D - 180^\circ$
CL - 4	$\theta_D + \frac{1}{2}\theta_{range}$	$\phi_D$
CL - 5	$\theta_D + \frac{1}{2}\theta_{range}$	$\phi_D - \phi_C$
CL - 6	$\frac{1}{2}\theta_{range}$	$\phi_D - 2\phi_C$
CL - 7	$\theta_D$	$\phi_D$

Kuvassa 15 on kaksi esimerkkiä, kuinka mittaussuunnat määräytyvät. Näyttö on vaakasuuntainen ja sen kokosuhde on 4:3. Vasemmanpuoleisessa esimerkissä oletetaan, että näyttö on tarkoitettu katsottavaksi pinnan normaalin suuntaisesti. Oikeanpuoleisessa oletetaan, että näyttö katsotaan  $10^\circ$  pinnan normaalista alaspäin.



**Kuva 15.** Kuvassa on polaarikoordinaatistoesitys kahdesta kulmakokoonpanosta. Suunnittelukatselusuunta ja -katselusektori ovat vasemmanpuoleisessa kuvassa  $\theta_D = 0^\circ$  ja  $\theta_{range} = 40^\circ$  ja oikeanpuoleisessa puolestaan  $\phi_D = 270^\circ$ ,  $\theta_D = 10^\circ$  ja  $\theta_{range} = 80^\circ$

Kulmariippuvaiset mittaukset tehdään pääsääntöisesti näytön keskikohdasta (CL). Suunnitteluinklinaatiokulma ja -atsimuuttikulma määräävät suunnittelukatselusuunnan. Suunnitteluatsimuuttikulma voi saada vain arvot  $90^\circ$  ja  $270^\circ$  riippuen siitä, onko näyttö tarkoitettu katsottavaksi ylä- vai alapuolelta näytön normaaliin nähden. Suunnitteluinklinaatiokulma  $\theta_D$  ilmaisee erotuksen suunnittelukatselusuunnasta pinnan normaaliin nähden. Se on aina positiivinen ja sen tulee täyttää kaavan 33 mukainen ehto /64/:

$$\theta_D \leq 40^\circ - \frac{1}{2} \theta_{range} \quad (33)$$

jossa,

$\theta_{range}$  on suunnittelukatselusektori.

Ehdolla varmistetaan, että mittaussuunnat eivät ole  $80^\circ$ :n katselusuuntakartion ulkopuolella. Suunnittelukatselusektori määräytyy laitteen käyttötarkoituksen mukaan. Sen ei ole tarpeen olla yli  $80^\circ$ , koska tällöin näytöllä esitettävät merkit näkyvät lyhyempinä vinosta katselusuunnasta johtuen. Koska painettu materiaali kärsii samasta ongelmasta, ei laajempaa katselusektoria ole mielekäästä tutkia. /64/

Standardi jakaa näytöt neljään katselusektoriluokkaan  $Class_{viewing}$  riippuen laitteen käyttötarkoituksesta. Ensimmäinen luokka (luokka I) on kaikkein vaativin näyttötekniisiltä ominaisuuksiltaan. Näyttöä tulee pystyä katsomaan koko  $80^\circ$ :een katselusuuntakartion alueelta ilman, että näytön suorituskyky laskee huomattavasti. Tällöin suunnittelukatselusektorin  $\theta_{range}$  tulee olla  $80^\circ$ . Toisessa luokassa (luokka II) katselusektorin tulee olla kaksi kertaa minimiarvon  $\theta_{rangemin}$  suuruinen ja kolmannessa (luokka

III) vähintään minimiarvon suuruinen. Minimiarvo  $\theta_{rangemin}$  riippuu kuva-alan koosta ja katseluetäisyydestä kaavan 34 mukaisesti. Neljännen luokan (luokka IV) näyttöä arvioidaan pelkästään suunnittelukatselusuunnasta /64/:

$$\theta_{rangemin} = 2 \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{D_{active}}{2 \cdot D_{designview}}\right) \quad (34)$$

jossa,

$D_{active}$  on näytön kuva-alan halkaisija ja  
 $D_{designview}$  on suunnittelukatseluetäisyys.

### 3.3.4 Kirjainmerkkien analyysi

Nämä mittaukset ja määrytykset takaavat, että näytöllä esitettävät merkit ovat tarpeeksi hyvälaatuisia hyväksyttävän lukutapahtuman suorittamiseen. Toimistonäyttöjen kirjainten koot riippuvat sovellusohjelman ja käyttöjärjestelmän asetuksista. Tällöin arvioidaan kirjainten ominaisuuksia normaaleilla määrytyksillä loppukäyttäjän kannalta. Pienet laitteet sisältävät usein kiinteän kokoisen kirjaimiston, joka on määrätty laitteen käyttöjärjestelmällä, eikä asetuksia pysty juurikaan muuttamaan. Standardi soveltuu hyvin tällaisten laitteiden lukuominaisuuksien määrittämiseen. /64/

Arvioinnin kannalta tarvitaan näytön pikselikoko ja tieto kirjaimen pikselirakenteesta. Pikselikoko lasketaan erikseen horisontaali- ja vertikaalisuuntaan. Pikselikoko määritetään kahden vierekkäisen pikselin välisestä etäisyydestä siten, että kummastakin pisteestä valitaan sama kohta ja määritetään näiden kohtien välinen etäisyys. Mittaustarkkuuden parantamiseksi on syytä tehdä mittaus useamman pikselin yli jakamalla tulos väliin jäävien pikseleiden määrällä. Jos pikseli koostuu useasta aliväripikselistä, ei näitä oteta erikseen huomioon, vaan käsite pikseli tarkoittaa yhtä kuvapistettä, joka pystyy toistamaan kaikki näytön mahdollistamat värit. /64/

Pikselirakenteesta tarvitaan tieto kirjainten muodostamiseen tarvittavien pikseleiden määrästä vaaka- ja pystysuuntaan, kirjainten viivojen paksuus pikseleinä sekä kirjainten ja sanojen väliin jäävien pikseleiden määrä pysty- ja vaakasuuntaan. Arvioinnissa käytetään isoa H-kirjainta. Pikseleiden määrä saadaan valmistajan dokumentaatiosta tai havainnoimalla suurentavalla optiikalla näytön pinnalta. /64/

Kirjaimen korkeus lasketaan kertomalla pikselikoko pystysuuntaan pikseleiden määrällä. Latinalaista alkuperää olevan kirjaimiston merkin korkeuden tulee olla vähintään 16':n kulmakoon suuruinen suunnittelukatseluetäisyydeltä. Suositeltava kulmakoko on 20'–22'. Kaavan 30 mukaisesti kirjaimen korkeus suunnittelukatseluetäisyydellä on 2,3 mm, kun kulmakoko on 16' ja katseluetäisyys 500 mm. Minimivaatimus aasialaisille kirjainmerkeille on 25' ja suositus 30'–35'. /64/

Kirjaimen viivan paksuuden latinalaisille aakkosille tulee olla 8–20 % kirjaimen korkeudesta. Kirjainmerkkien välissä tulee olla vähintään kirjaimen viivan tai yhden pikselin suuruinen tyhjä tila, jos kirjaimella ei ole pääteviivoja. Muutoin etäisyyden tulee olla vähintään yhden pikselin suuruinen. Sanojen välisen etäisyyden tulee olla vähintään ison



H-kirjaimen levyinen tai jos näytöllä simuloidaan tulostuskirjaimia, riittää leveydeksi ison N-kirjaimen levyinen tyhjä tila. Rivien välissä tulee olla yhden pikselin suuruinen tyhjä tila, joka ei saa sisältää mitään kirjaimiin liittyvää informaatiota alleviivausmerkintöjä lukuunottamatta. /64/

Kirjaimen leveyden suhde korkeuteen tulee olla 0,5:1–1:1 latinalaisille kirjaimille ja aasialaisille 0,8:1–1,2:1. Latinalaisille kirjaimille suositus on 0,6:1–0,9:1. Merkin muodon tulee koostua vähintään 5×7 kokoisesta matriisista numeroita esitettäessä ja vastavasti kirjaimia esitettäessä tulee matriisin koon olla vähintään 7×9. Aasialaisille kirjainmerkeille minimivaatimus on 15×16 ja suositus 24×24. Mikäli käytettävä merkistö sisältää merkkejä, jotka vaativat enemmän tilaa ylä- tai alapuolelle, tulee matriisin olla tähän suuntaan vähintään 2 pikseliä suurempi. Ylä- ja alaviittauksille tulee olla vähintään 4×5 kokoinen matriisi. /64/

### 3.3.5 Peittoprosentin määrittäminen

Peittoprosentti ilmaisee prosentuaalisen osuuden näytön aktiivisen alueen pinta-alasta, jota käytetään todellisen informaation esittämiseen. Valmistusteknisistä syistä pikselit eivät ole aivan kiinni toisissaan, vaan niiden ympärillä on mustaksi värjätty kehikko. Peittoprosentti ilmaisee, kuinka suuri prosenttiosuus pinta-alasta on pikseleiden peittämää. /71/

Standardi määrittää kaksi tapaa täyttää peittoprosenttiehto, joista ainakin toinen tulee täyttää. Näytöllä tulee olla vähintään 30 pikseliä yhtä kulmakoon astetta kohti. Ehto voidaan tarkastaa kaavalla 35, joka on modifioitu kaavasta 29 /64/:

$$N_V > 60 \cdot \operatorname{atan}\left(\frac{H_{\text{view}}}{2 \cdot D_{\text{designview}}}\right) \quad (35)$$

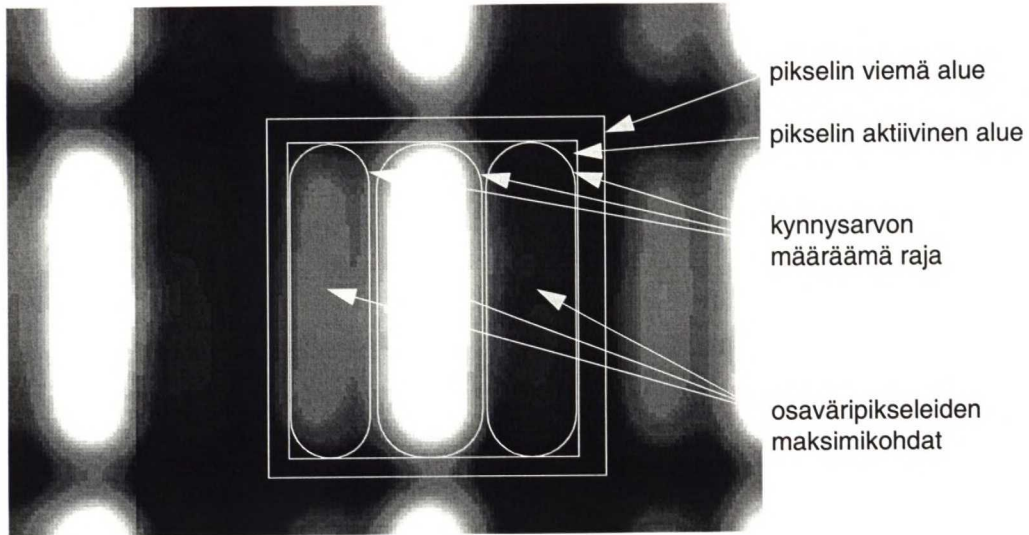
jossa,

$N_V$  on pikselirivien määrä pystysuunnassa,  
 $H_{\text{view}}$  on aktiivisen alueen korkeus ja  
 $D_{\text{design view}}$  on suunnittelukatseluetäisyys.

Jos tämä ehto ei täyty, tulee peittoprosentin olla vähintään 30 %. Peittoprosentin määrittäminen riippuu näytön teknisestä toteutuksesta. Jos näytön pikselirakenne on tasainen ja hyvin muodostunut, voidaan peittoprosentti määrittää geometrisesti. Näin on yleensä nestekidenäyttöillä, joiden taustalla käytetään mustaa maskia rajaamaan pikselit tarkasti suorakaiteen muotoisiksi. Peittoprosentti saadaan laskettua, kun tiedetään osaväripikseleiden koko ja niiden väliin jäävän alueen koko. Peittoprosentti on pikseleiden peittämän pinta-alan suhde koko pikselin viemän alueen pinta-alaan. /64/

Jos näytön pikseligeometria ei vastaa pikselin tuottamaa luminanssijakaumaa pinta-alan suhteen, joudutaan turvautumaan spatiaaliseen luminanssimittaukseen. Ruudulta otetaan kuva tyypillisestä valkoisesta pikselistä, josta erottuu sen luminanssijakauma (kuva 16). Jokaisesta osaväristä määritetään sen maksimiluminanssi sekä kohta, jossa luminanssi

saa pienimmän arvonsa. Jokaiselle osavärille määritetään erikseen raja, jossa luminanssi putoaa alle kynnsarvon. ISO asettaa kynnsarvoksi 50 %, VESAn suositus on 5 tai 10 %. Saatujen rajojen ympärille piirretään suorakaide, joka määrää pikselin aktiivisen alueen. Peittoprosentti on aktiivisen alueen suhde koko pikselin viemään alueeseen. /64, 71/



**Kuva 16.** Peittoprosentin määrittäminen osaväripikseleiden luminanssijakaumasta

Mittalaitteen luminanssiasteikon tulee olla lineaarinen ja spatiaalisen mittaustarkkuuden tulee olla vähintään kymmenesosa pikselikoosta. Osaväripikselin alueella luminanssi ei saa vaihdella yli 20 % keskiarvostaan ja tasaisen alueen tulee alkaa vähintään 10 %:n päästä osaväripikselin korkeudesta tai leveydestä. Nämä vaatimukset täyttyvät tyypillisesti aktiivimatriisinesitekidenäyttöille, joiden taustalla käytetään mustaa maskia rajamaan pikselit tarkasti suorakaiteen muotoisiksi. /64, 71/

### 3.3.6 Luminanssimittaukset

Luminanssimittauksissa määritetään näytön luminanssiin liittyviä parametrejä. Tätä mitausta käytetään standardin luvuissa 7.14, 7.15 ja 7.19 luminanssin ja kontrastin arvioimisessa. Mittauksessa otetaan huomioon valaistusolosuhteet, mistä johtuen mittaukset tehdään hajavalaistuksessa, joka korjataan laskutoimituksilla tunnettuun valaistustilaan. /64/

Hajavalaistuksen luomiseen mittaustilanteeseen voidaan käyttää integroivaa palloa, diffuusia puolipalloa tai kahta valonlähdettä, jotka ovat 45°:n tai poikkeuksellisesti 30°:n kulmissa pinnan normaaliin nähden. Kolmannessa tapauksessa approksimaation luotettavuus tulee määrittää toleranssilla. Valonlähteiden kulmakoon näytön pinnasta katsoen tulee olla vähintään 15°. Suositeltavaa on käyttää 30°:n kokoisia valonlähteitä. Valonlähteiden voimakkuuden tulee olla vähintään 2 000 cd · m<sup>-2</sup>. Kuvassa 17 on esitetty valonlähteiden sijoittelu mitattavaan näyttöön nähden. Kuvassa on myös myöhemmissä mittauksissa tarvittavien pienen ja ison valonlähteen sijoittelu. /64/

Diffuusistandardin luminanssikertoimen määrittäminen tehdään pienellä valonlähteellä 15, 30 ja 45°:n kulmilla. Standardin pinnasta mitataan luminanssi ja spektri kohtisuoraan. Tristimulusarvot määritetään myös 30°:n kulmalla. Niitä tarvitaan värieron määrittämisessä. Valonlähteen luminanssi tulee myös mitata samalta etäisyydeltä, mikä on yhtenlaskettu etäisyys mittapäästä diffuusistandardin pintaan ja edelleen valonlähteen pintaan. Luminanssikerroin lasketaan kaavalla 36 /64/:

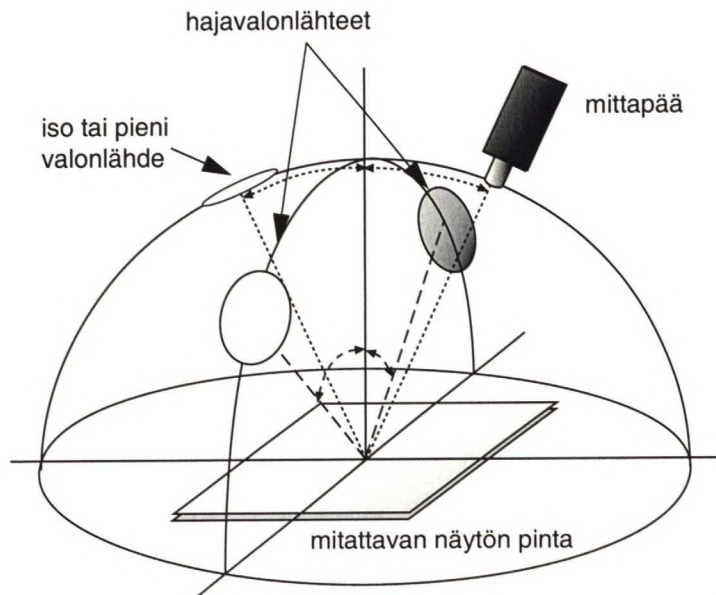
$$Q_{S-SML,dSTD(dSTD-nS15)} = \frac{Y_{S-SML,dSTD(dSTD-nS15)} \times (r^2 + z^2)}{\pi \times r^2 \times Y_{S-SML,S-SML(Lg)} \times \cos \theta_{dSTD}}, n = 0...7 \quad (36)$$

jossa,

$r$  on valonlähteen säde ja

$z$  on valonlähteen etäisyys.

Kulma  $\theta_{dSTD}$  on valonlähteen ja diffuusistandardin välinen inkliinaatiokulma, joka saa siis arvoja 15°, 30° ja 45°.  $Y_{S-SML,S-SML(Lg)}$  on valonlähteen luminanssi ja  $Y_{S-SML,dSTD(dSTD-nS15)}$  on diffuusistandardin pinnalta mitattu luminanssi. Vaihtamalla kaavaan 15°:n tilalle 30 ja 45°:n kulmilla mitatut luminanssit saadaan kaikki vaaditut tulokset. /64/



**Kuva 17.** Valonlähteiden sijoittelu mitattavaan näyttöön nähden. Hajavalonlähteet ovat 45° tai 30°:n kulmissa pinnan normaaliin nähden. Iso ja pieni valonlähde sekä mittapää ovat heijastusmittauksissa 15°:n kulmissa pinnan normaaliin nähden /64/

Luminanssimittaukset tehdään mittauskohdista CL, HL ja LL. Näiden määrittäminen käsiteltiin luvussa 3.3.2. Mittauskohdista CL-0, HL-0 ja LL-0 tehdään mittaukset ilman valonlähdettä HS- ja LS-tilassa. HS-tilassa näyttö on täydellä kuormituksella eli 100 %:n valkoisena ruutuna. LS-tilassa koko näyttöruutu on 0 %:n kuormituksella eli tilassa, jolla esitetään mustaa. Jos näyttössä on taustavalo, on se kummassakin tilassa päällä. /64/

Mittauskohdista CL-1–CL-7 tehdään mittaukset pimeässä ja hajavalossa. Jos näyttö on isotrooppinen, riittää mittaus pelkästään kohdasta CL-7. Jos näytöstä on mahdollisuus kytkeä taustavalo pois päältä siten, että kuitenkin näyttö saavuttaa informaation esittämiin tarvittavat tilat, mittauksia pimeässä ei tarvita. Tällöin näytöltä heijastunut luminanssi kummassakin tilassa,  $Y_{DIFF-HS-OFF(n)}$  ja  $Y_{DIFF-LS-OFF(n)}$  saadaan mitattua suoraan. Muutoin heijastunut luminanssi saadaan kaavoista 37 ja 38 /64/:

$$Y_{DIFF,HS-OFF(CL-n)} = Y_{DIFF,HS(CL-n)} - Y_{dark,HS(CL-n)}, n=1...7 \quad (37)$$

$$Y_{DIFF,LS-OFF(CL-n)} = Y_{DIFF,LS(CL-n)} - Y_{dark,LS(CL-n)}, n=1...7 \quad (38)$$

Alaviite *DIFF* tarkoittaa mittausta hajavalaistuksessa ja *dark* mittausta pimeässä. Heijastumittarin lukemaa  $R_{DIFF,HS-OFF(CL-n)}$  ja  $R_{DIFF,LS-OFF(CL-n)}$  vastaavat arvot lasketaan kaavoilla 39 ja 40 /64/:

$$R_{DIFF,HS-OFF(CL-n)} = q_{S-SML,dSTD(dSTD-n45)} \times \frac{Y_{DIFF,HS-OFF(CL-n)}}{Y_{DIFF,dSTD(CL-n)}}, n=1...7 \quad (39)$$

$$R_{DIFF,LS-OFF(CL-n)} = q_{S-SML,dSTD(dSTD-n45)} \times \frac{Y_{DIFF,LS-OFF(CL-n)}}{Y_{DIFF,dSTD(CL-n)}}, n=1...7 \quad (40)$$

Kaavoissa ovat diffuusistandardin heijastusominaisuuksiin perustuvat tekijät  $q_{S-SML,dSTD(dSTD-n45)}$  ja  $Y_{DIFF,dSTD(CL-n)}$ . Näistä ensimmäinen on diffuusistandardin luminanssikerroin määritettynä 45°:n kulmalla sen normaaliin nähden ja toinen diffuusi-valaistuksessa mitattu luminanssi diffuusistandardin pinnalta. Jos valonlähteet on sijoitettu 30°:n kulmiin, käytetään kaavoissa arvoa  $q_{S-SML,dSTD(dSTD-n30)}$ . /64/

Lopullinen valaistusolosuhteiden mukaisesti korjattu luminanssi saadaan kaavoilla 41 ja 42 /64/:

$$L_{Es,HS(CL-n)} = Y_{dark,HS(CL-n)} + R_{DIFF,HS-OFF(CL-n)} \times E_s, n=1...7 \quad (41)$$

$$L_{Es,LS(CL-n)} = Y_{dark,LS(CL-n)} + R_{DIFF,LS-OFF(CL-n)} \times E_s, n=1...7 \quad (42)$$

jossa,

$E_s$  on näytön suunnitteluvalaistusvoimakkuus.

Jos näytön toimintaperiaatteen perusteella on oletettavissa, että näytön toiminta on lineaarista näyttöpinnan eri kohdissa, voidaan luminanssin laskemiseksi kohdista HL ja LL käyttää CL-kohdasta mitattuja arvoja skaalaamalla ne spatiaalisten mittausten perusteella. Seuraavassa on kaavat lopullisen luminanssin laskemiseksi HL- ja LL-kohdista /64/:

$$L_{Es,HS(HL-n)} = Y_{dark,HS(CL-n)} \times \frac{Y_{dark,HS(HL-n)}}{Y_{dark,HS(CL-0)}} + R_{DIFF,HS-OFF(CL-n)} \times E_s \quad (43)$$

$$L_{Es,LS(HL-n)} = Y_{dark,LS(CL-n)} \times \frac{Y_{dark,LS(HL-n)}}{Y_{dark,LS(CL-0)}} + R_{DIFF,LS-OFF(CL-n)} \times E_s \quad (44)$$

$$L_{Es,HS(LL-n)} = Y_{dark,HS(CL-n)} \times \frac{Y_{dark,HS(LL-n)}}{Y_{dark,HS(CL-0)}} + R_{DIFF,HS-OFF(CL-n)} \times E_s \quad (45)$$

$$L_{Es,LS(LL-n)} = Y_{dark,LS(CL-n)} \times \frac{Y_{dark,LS(LL-n)}}{Y_{dark,LS(CL-0)}} + R_{DIFF,LS-OFF(CL-n)} \times E_s \quad (46)$$

Anisotrooppisille näytöille  $n = 1 \dots 7$  ja isotrooppisille  $n = 7$ . /64/

Luminanssin  $L_{Es,HS(n)}$  tulee täyttää kaavan 47 mukainen ehto:

$$L_{Es,HS(n)} \geq (1 + Tol) \times 20 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2} \quad (47)$$

Ehto tulee täyttää kaikkiin CL, HL ja LL suuntiin 1–7.  $Tol$  on diffuusistandardista mitattu toleranssi, joka määritetään neljällä mittauksella eri suunnista. Mittaussuuntien atsimuuttikulmat ovat nollija ja inkliinaatiokulmat  $0^\circ$ ,  $15^\circ$  ja  $\theta_D \pm \frac{1}{2}\theta_{range}$ . /64/

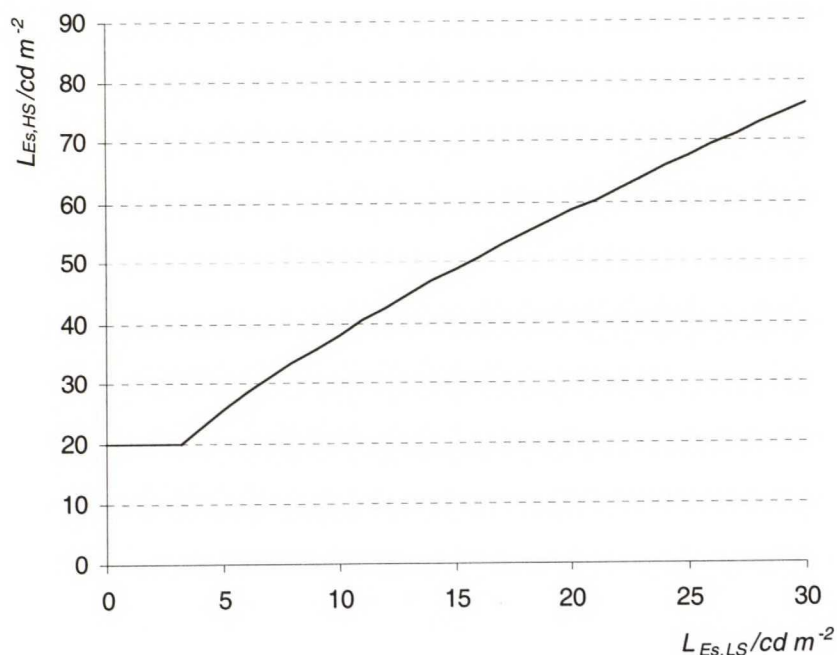
Kontrastin osalta kaavan 48 mukainen kontrastisuhteen ehto tulee täyttää tai sama kaavan 49 mukainen kontrastimodulaation ehto /64/:

$$C_R = \frac{L_{Es,HS(n)}}{L_{Es,LS(n)}} \geq 1 + 10 \cdot L_{Es,LS(n)}^{-0,55} \quad (48)$$

$$C_m = \frac{L_{Es,HS(n)} - L_{Es,LS(n)}}{L_{Es,HS(n)} + L_{Es,LS(n)}} \geq \frac{5 \cdot L_{Es,LS(n)}^{-0,55}}{1 + 5 \cdot L_{Es,LS(n)}^{-0,55}} \quad (49)$$

Toleranssi tulee myös ottaa huomioon tuloksia arvioitaessa. /64/

Kuvassa 18 on kontrastiehdon käyrä HS- ja LS-luminanssin suhteen. Alapäässä käyrää rajoittaa luminanssiehto. Käyrä on heikosti logaritminen tästä ylöspäin. LS-luminanssin ollessa tyypillisellä alueella  $0,1-3,0 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ , tulee HS-luminanssin täyttää vain luminanssiehto. Kuitenkin luminanssin ja kontrastin tarkastelu tehdään luminansseille, joiden suuruudessa on otettu huomioon näytön heijastusominaisuudet. Tällöin LS-luminanssi nousee helposti korkeammaksi, kuin se pimeässä mitattaessa olisi. /64/



**Kuva 18.** Kontrastiehdon mukainen käyrä. Vaaka-akselilla on kontrastimittauksen tulos mitattuna tummasta tilasta (LS) ja pystyakselilla vaaleasta tilasta (HS). Käyrää rajoittaa alapäässä luminanssiehto /64/

Luminanssin tasaisuuden ehto määräytyy testipisteiden keskinäisten etäisyyksien perusteella. Taulukossa 4 on testipisteiden etäisyyksien raja-arvot kulmakokoina ja niitä vastaavat kynnyksiarvot luminanssin tasaisuudelle. Tasaisuus ilmoitetaan suhteena arvioitavien luminanssien välillä. Tasaisuus arvioidaan saman suunnan välisten CL-, HL- ja LL-luminanssien kesken. /64/

**Taulukko 4.** Testipisteiden luminanssien suhteiden raja-arvot testipisteiden etäisyyksien perusteella määrättyinä /64/

Testipisteiden välinen etäisyys	Suurin sallittu suhde luminanssien välillä
$7^\circ \leq$ kulmakoko	1,7
$5^\circ \leq$ kulmakoko $< 7^\circ$	1,6
$4^\circ \leq$ kulmakoko $< 5^\circ$	1,5
$2^\circ \leq$ kulmakoko $< 4^\circ$	1,4
$1,1^\circ \leq$ kulmakoko $< 2^\circ$	1,3

### 3.3.7 Kromaattisuuden tasaisuuden mittaaminen

Tässä mittauksessa määritetään näytön toistamien värien tasaisuus eri kohdissa näytön pintaa. Tasaisuutta arvioidaan värierosta. Näytöllä toistetaan kerralla koko ruudun kokoinen yksivärinen testikuva. Värierojen tulee olla niin pieniä, että ne eivät tuota näytölle informaatiota, joka sekottaisi todellista informaatiota. /64/

Mittaus tehdään näytölle asetetuista oletusväreistä tai jos oletusvärejä ei ole asetettu, tehdään mittaukset pääväreistä. Päävärejä ovat näytön tuottamat sekoittamattomat värit punainen, vihreä ja sininen. Mittausta ei tehdä yksivärinäytöistä. Mittauspisteinä ovat luvussa 3.3.2 määritetyt pisteet CL-7, LL-7, HL-7 ja CL-1–CL-6. Mittaukset tehdään ilman valonlähteitä ja tulokset ilmoitetaan CIE 1976  $u'v'$ -värikoordinaatistossa. /64/

Mitatuista arvoista lasketaan värierot kaavalla 20. Jos näyttö on isotrooppinen tai kuuluu katselukulmaluokkaan IV, lasketaan vain spatiaalisten pisteiden CL-7, LL-7 ja HL-7 väliset kombinaatiot. Muutoin lasketaan kaikkien yhdeksän pisteen väliset kombinaatiot. Tuloksia kertyy kaikkiaan 36 yhtä väriä kohden. /64/

Jotta näyttö täyttäisi standardin vaatimuksen, tulee värierojen alittaa kynnyksisarvo. Kynnyksisarvo on 0,02, jos kaavan 50 tulos on alle 0,75 ja jos tulos on 0,75 tai ylittää sen, on kynnyksisarvo 0,03 /64/:

$$\frac{D_{active}}{D_{designview}} < 0,75 \Rightarrow \Delta u'v' = 0,02$$

$$\frac{D_{active}}{D_{designview}} \geq 0,75 \Rightarrow \Delta u'v' = 0,03$$
(50)

jossa,

$D_{active}$  on näytön halkaisija ja  
 $D_{designview}$  on suunnittelukatseluetäisyys.

Jos näytölle on asetettu oletusvärit, tulee ehto täyttyä kaikkien niiden osalta. Muutoin ehdon tulee täyttyä vain päävärien osalta. /64/

### 3.3.8 Värierojen mittaaminen

Värierojen mittaaminen tulee kysymykseen silloin, kun näytölle on määritetty oletusväripaletti. Näitä värejä käytetään oleellisen informaation esittämiseen, jolloin värien erottaminen toisistaan on keskeistä. Arvioinnissa otetaan huomioon vallitseva valaistusolosuhde, minkä vuoksi arviointi tehdään CIE 1976  $L^*u^*v^*$ -värikoordinaatistoa käyttäen. Värieron  $\Delta E_{uv}^*$  tulee täyttää kaavan 51 mukainen ehto /64/:

$$\Delta E_{uv}^* > 20$$
(51)

Mittaus tehdään pelkästään mittauskohdasta CL-7 mittaamalla valon spektri 400–700 nm:n alueelta 10 nm:n portain. Poikkeuksellisesti mittaukset voidaan tehdä CIE 1931 -tristimuluskoordinaatteja käyttämällä, mikäli on suoritettu huolellinen vertailu tristimulus- ja spektriarvojen välillä. Virhettä voi aiheuttaa kokoonpanon monimutkaisuus, joka käsittää valonlähteet ja mitattavan näytön ominaisuudet. Virhe tulee ilmoittaa mittausraportissa. /64/

Mittauksessa määritetään jokaisen oletusarvoisen värin spektri pimeässä  $L_{dark,colour-n(CL-7)}(\lambda)$  ja hajavalaistuksessa  $L_{DIFF,colour-n(CL-7)}(\lambda)$ . Valonlähteasetelma on sama kuin luminanssimittauksessa, joka käsiteltiin luvussa 3.3.6. Samassa hajavalaistuksessa määritetään myös diffuusistandardin spektri  $L_{DIFF,dSTD}(\lambda)$ . Diffuusistandardin luminanssikertoimen  $q_{STD}(\lambda)$  spektrin tulee olla tunnettu määritettynä pienellä valonlähteellä 30°:n kulmalla. /64/

Näytön pinnalta heijastuneen valon hajaheijastuskomponentti  $L_{DIFF,colour-n-OFF(CL-7)}(\lambda)$  lasketaan kaavalla 52, jossa aallonpituus  $\lambda$  saa arvoja 400–700 nm /64/:

$$L_{DIFF,colour-n-OFF(CL-7)}(\lambda) = L_{DIFF,colour-n(CL-7)}(\lambda) - L_{dark,colour-n(CL-7)}(\lambda) \quad (52)$$

Diffuusistandardin luminanssi tunnetussa valaistuksessa lasketaan kaavalla 53 /64/:

$$L_{Es,dSTD(CL-7)} = E_s \times q_{S-SML,dSTD(dSTD-4S30)}(\lambda) \quad (53)$$

jossa,

$E_s$  on näytön suunnitteluvalaistusvoimakkuus.

Lopullinen vallitsevan valaistusolosuhteen mukaisesti korjattu luminanssi lasketaan kaavalla 54 /64/:

$$L_{Es,colour-n(CL-7)}(\lambda) = L_{dark,colour-n(CL-7)}(\lambda) + L_{DIFF,colour-n-OFF(CL-7)}(\lambda) \times \frac{L_{Es,dSTD(CL-7)}(\lambda)}{L_{DIFF,dSTD(CL-7)}(\lambda)} \quad (54)$$

$L_{DIFF,dSTD(CL-7)}(\lambda)$  on hajavalaistuksessa mitattu spektri diffuusistandardin pinnalta. Summan ensimmäinen termi on luminanssi näytön pinnalta pimeässä ja toinen termi tunnetun valaistuksen aiheuttama luminanssi näytön pinnalta. /64/

Tämän jälkeen lasketaan CIE 1931-tristimulusarvot tunnetussa valaistuksessa spektrijakaumasta ja niistä edelleen CIE 1976  $L^* u^* v^*$ -arvot luvussa 3.2.3 esitetyllä tavalla. Referenssivalkeisena värikoordinaatteina  $u'_n$  ja  $v'_n$  käytetään yleensä jotain taulukon 5 vaihtoehtoista ja referenssiluminanssina  $Y_n$  kaavalla 55 laskettua arvoa /64/:

$$Y_n = \frac{E_s}{\pi} \quad (55)$$



jossa,

$E_s$  on näytön suunnitteluvalaistusvoimakkuus.

**Taulukko 5.** ISO 13406-2:ssa määritettyjä referenssivalikoisia /64/

Väriämpötila	$u'_n$	$v'_n$
5600 °K	0,204	0,479
6500 °K	0,198	0,468
9300 °K	0,189	0,446

Väriero lasketaan kaikkien värikombinaatioiden kesken ja niiden tulee täyttää kaavan 51 mukainen ehto. Väreistä lasketaan myös värisävyero  $h_{uv}$  kaavalla 26 ja tämän tulee erota värien kesken. Raja-arvot on määritetty erityisolosuhteissa, jotka on lueteltu ISO 13406-2:n liitteessä A. Ne perustuvat CIE:n 36, 1976 -standardiin. /64/

### 3.3.9 Heijastusmittaukset

Heijastusmittauksilla tutkitaan näytön kontrastia heijastusten vaikutusten alaisena sekä heijastusten näkyvyyttä. Heijastuksia simuloidaan kahdella valonlähteellä, isolla (EXT) ja pienellä (SML). Mittaukset tehdään näytön keskipisteestä CL. Jos on oletettavissa, että keskipisteestä mitattu luminanssi ei ole lineaarisesti riippuva HL- ja LL-kohdista mitatuista arvoista, täytyy mittaus tehdä myös näistä pisteistä. Kulma-asetelmia on kuusi CL-1S–CL-6S. Ne poikkeavat inkliinaatiokulman osalta aikaisemmissä mittauksissa käytetyistä siten, että inkliinaatiokulma on kaikissa asetelmissä 15°. Atsimuuttikulmat ovat samat kuin mittauskulmien määrittämisessä lasketut. /37, 64/

Heijastus eritellään haja- ja suuntaheijastuskomponentteihin. Kummallekin määritetään heijastusmittarin lukema  $R$ . Peiliheijastuskomponentti määritetään erikseen isolle ja pienelle valonlähteelle. Lopullinen kontrastin arviointi tehdään heijastusluokan  $Class_{Reflection}$  mukaan painotetulla kertoimella. Taulukossa 6 on määritelmät kolmelle heijastusluokalle. Näytön valmistajan tulee ilmoittaa, mihin heijastusluokkaan kyseinen näyttö kuuluu ja mikä on sen polariteetti. Luokka I vaatii, että luminanssisuhde  $\beta$  on määritetty sekä pienellä että isolla valonlähteellä. /64/

**Taulukko 6.** Näyttöjen heijastusluokat,  $Class_{Reflection}$  /64/

$Class_{Reflection}$	Heijastusmittauksissa käytettävien valonlähteiden luminanssi / $cd \cdot m^{-2}$	Valaistusolosuhteet
I	Sekä $L_{REFEXT-I} = 200$ että $L_{REFSML-I} = 2000$	Toimisto
II	Joko $L_{REFEXT-I} = 200$ tai $L_{REFSML-I} = 2000$	Sopiva useisiin, mutta ei kaikkiin toimisto-olosuhteisiin
III	Joko $L_{REFEXT-I} = 125$ tai $L_{REFSML-I} = 200$	Vaaditaan erityinen valaistusympäristö

Heijastusten mukaan painotettu luminanssi isolla ja pienellä valonlähteellä lasketaan kaavoilla 56 ja 57 /64/:

$$L_{Es+REFEXT_I,HS(CL-nS)} = L_{Es,HS(CL-nS)} + L_{REFEXT_I} \times R_{S-EXT,HS-OFF(CL-nS)}, n=1...6 \quad (56)$$

$$L_{Es+REFSML_I,HS(CL-nS)} = L_{Es,HS(CL-nS)} + L_{REFSML_I} \times R_{S-SML,HS-OFF(CL-nS)}, n=1...6 \quad (57)$$

$L_{Es,HS(CL-nS)}$  on hajavalaistuksessa mitattu luminanssi, joka määritetään diffuusistandardilla vastaavasti kuin luminanssimittauksissa kaavoilla 37–46. Jos näytön heijastusominaisuudet riippuvat näytön polariteetista, täytyy mittaukset tehdä sekä HS- että LS-tiloissa.  $L_{REFEXT}$  ja  $L_{REFSML}$  ovat heijastusluokan mukaan määräytyvät referenssiluminanssit.  $R_{S-EXT,HS-OFF(CL-nS)}$  ja  $R_{S-SML,HS-OFF(CL-nS)}$  ovat peiliheijastuksen heijastusmittarin lukemat isolla ja pienellä valonlähteellä. Ne määritetään myös erikseen sekä HS- että LS-tiloissa, jos näytön polariteetti vaikuttaa heijastusominaisuuksiin. Peiliheijastuksen heijastusmittarin lukemat määritetään kaavoilla 58 ja 59 /64/:

$$R_{S-EXT,HS-OFF(CL-nS)} = \frac{Y_{S-EXT,HS-OFF(CL-nS)} - Y_{S-EXT,dSTD(CL-nS)} \times \frac{R_{DIFF,HS-OFF(CL-nS)}}{q_{S-SML,dSTD(dSTD-nS15)}}}{Y_{S-EXT,S-EXT(Lg)}}, n=1...6 \quad (58)$$

$$R_{S-SML,HS-OFF(CL-nS)} = \frac{Y_{S-SML,HS-OFF(CL-nS)} - Y_{S-SML,dSTD(CL-nS)} \times \frac{R_{DIFF,HS-OFF(CL-nS)}}{q_{S-SML,dSTD(dSTD-nS15)}}}{Y_{S-SML,S-SML(Lg)}}, n=1...6 \quad (59)$$

$Y_{S-EXT,HS-OFF(CL-nS)}$  ja  $Y_{S-SML,HS-OFF(CL-nS)}$  ovat näytön pinnalta heijastuneet luminanssit isolla ja pienellä valonlähteellä valaistaessa. Jos näytön taustavaloa ei voida kytkeä pois päältä, tarvitaan mittaus sekä valoisassa että pimeässä ja tästä saadaan vähennyslaskulla käytettävä tulos. Mittaus pimeässä suoritetaan peittämällä valonlähde esimerkiksi mustalla kankaalla, jotta mittausasetelma säilyy täysin samana. /64/

$Y_{S-EXT,dSTD(CL-nS)}$  ja  $Y_{S-SML,dSTD(CL-nS)}$  ovat heijastuksen hajakomponentit, jotka mitataan isolla ja pienellä valonlähteellä diffuusistandardin pinnalta.  $R_{DIFF,HS-OFF(CL-nS)}$  on hajavalaistuksessa mitattu heijastusmittarin lukema. Diffuusistandardin luminanssikerroin  $q_{S-SML,dSTD(dSTD-nS15)}$  on määritetty pienellä valonlähteellä 15°:n kulmassa. /64/

Valonlähteiden luminanssit  $Y_{S-EXT,S-EXT(Lg)}$  ja  $Y_{S-SML,S-SML(Lg)}$  määritetään erikseen isolle ja pienelle valonlähteelle. Tämä tehdään joko suoralla mittauksella valonlähteestä tai käyttämällä peiliheijastusstandardia. Suoralla mittauksella mittausetäisyyden tulee olla sama kuin etäisyyden mittapäästä näytön pintaan lisättynä etäisyydellä näytön pinnasta valonlähteeseen. Standardia käytettäessä valaistaan sitä kuvan 17 mukaisella asetelmalla sekä isolla että pienellä valonlähteellä. Sekä valonlähde että mittapää ovat kumpikin 15°:n kulmassa standardin pintaan nähden peiliheijastuksen synnyttämiseksi. Mitta-

pää on tarkennettu valonlähteen peilikuvaan. Valonlähteiden voimakkuudet  $Y_{S-EXT,S-EXT(Lg)}$  ja  $Y_{S-SML,S-SML(Lg)}$  saadaan laskettua kaavoilla 60 ja 61, kun tiedetään peiliheijastusstandardin luminanssisuhde  $\beta_{STD}$  /64/:

$$Y_{S-EXT,S-EXT(Lg)} = \frac{Y_{S-EXT,sSTD(CL-0S)}}{\beta_{STD}} \quad (60)$$

$$Y_{S-SML,S-SML(Lg)} = \frac{Y_{S-SML,sSTD(CL-0S)}}{\beta_{STD}} \quad (61)$$

$Y_{S-EXT,sSTD(CL-0S)}$  on peiliheijastusstandardin pinnasta mitattu luminanssi isolla valonlähteellä ja  $Y_{S-SML,sSTD(CL-0S)}$  on peiliheijastusstandardin pinnasta mitattu luminanssi pienellä valonlähteellä. Vastaavasti peiliheijastusstandardin luminanssisuhde määritetään standardista heijastuneen ja valonlähteen luminanssin välisestä suhteesta. /64/

Ison valonlähteen tulee olla vähintään 15°:n kokoinen näytön pinnasta katsoen ja pienen valonlähteen noin 1°:n kokoinen. Mittausalueen koon tulee olla enintään puolet valonlähteen koosta, mutta kuitenkin niin suuri, että se kattaa vähintään 10 pikselin suuruisen ympyränmuotoisen alueen. Pienen valonlähteen voimakkuuden voi olla tarpeen olla 10–20 kcd · m<sup>-2</sup> suuruinen hyvän mittaustarkkuuden saavuttamiseksi. /64/

Standardin vaatimus kontrastin osalta heijastusten vaikutuksen alaisena on vastaava kuin luminanssimittausten kontrastivaatimus lisättynä heijastuskomponentilla. Kontrastin tulee täyttää kaavan 62 mukainen ehto heijastusten vallitessa /64/:

$$\frac{(L_{HS} + L_D + L_S)}{(L_{LS} + L_D + L_S)} \geq 1 + 10 \times (L_{LS} + L_D + L_S)^{-0,55} \quad (62)$$

jossa,

- $L_{HS}$  on luminanssi näytön ollessa päällä,
- $L_{LS}$  on luminanssi näytön ollessa pimeänä,
- $L_D$  on luminanssin hajaheijastuskomponentti ja
- $L_S$  on luminanssin peiliheijastuskomponentti.

Heijastusluokasta riippuen peiliheijastuskomponentin painoarvo vaihtelee. /64/

Toinen heijastusehto määrittää maksimikontrastin, jonka ei-toivottu heijastus saa aiheuttaa. Heijastusluokka määrää peiliheijastuskomponentin painoarvon. Positiivisen polariteetin näytöille kaavan 63 mukainen ehto tulee täyttää ja negatiivisen polariteetin näytöille kaavan 64 mukainen ehto /64/:

$$\frac{L_{HS} + L_D + L_S}{L_{HS} + L_D} \leq 1,25 \quad (63)$$

$$\frac{L_{HS} + L_D + L_S}{L_{HS} + L_D} \leq 1, 2 + \frac{1}{15} \times \frac{L_{HS} + L_D}{L_{LS} + L_D} \quad (64)$$

Kaavojen symbolit ovat samat kuin kaavassa 62.

### 3.4 VESA FPDM -standardi

#### 3.4.1 Yleistä

VESAn (Video Electronics Standards Association) litteiden näyttöjen mittaukset FPDM 1.0 (Flat Panel Display Measurements) tarjoaa mittausproseduureja litteiden näyttöjen suorituskyvyn karakterisoimiseksi. Standardi ei määrittele suorituskykykriteereitä tai vaatimuksia vaan yksityiskohtaisia mittausmenetelmiä, joilla litteiden näyttöjen suorituskyky saadaan luotettavasti ja toistettavasti selville. Kaikkia standardin mittauksia ei ole välttämätöntä suorittaa, vaan mittauksen joukosta voidaan valita käyttötarkoituksen perusteella soveltuvimmat. Lisäksi standardissa on käsitelty laajasti näyttöjen mittaamiseen liittyvää problematiikkaa ja valonmittaamiseen liittyvää teoriaa. /71/

Mittauksia voidaan soveltaa kaikkiin olemassa oleviin näyttötekologioihin. Kuitenkin emissiiviset ja ei-emissiiviset näytöt ovat pääasiallisin käsittelyn kohde, koska lähes kaikki markkinoilla olevat näytöt kuuluvat näihin ryhmiin. Mittauksia voidaan soveltaa soveltuvien osien esimerkiksi mustavalkoisiin ja epäsuorasti katsottaviin näyttöihin. /71/

Standardin mittauksen joukosta on valittu kaikista tärkeimmät niin kutsuttuun Suite of Basic Measurements (SBM) -kokonaisuuteen. Tästä on annettu myös raportointiesimerkki helpottamaan tulosten käsittelyä. Kuitenkaan standardin käyttäjiä ei ole sidottu tähän raportointimalliin. /71/

Seuraavissa luvuissa on käsitelty mittaukset, jotka ovat toteutettu mittalaitteeseen valmistajan toimesta tai jotka ovat potentiaalisia kehityskohteita mittalaitteen kannalta. Kaikkia SBM-mittauksia ei olla käsitelty, koska niitä kaikkia ei pystytä mittalaitteella toteuttamaan. VESA FPDM sisältää joukon heijastusmittauksia, mutta tässä niihin ei ole paneuduttu, koska ISO 13406:n yhdeydessä ne käsiteltiin tarkasti.

#### 3.4.2 Mittausolosuhteet

VESA FPDM määrittää tarkoin olosuhteet jokaiseen mittaukseen. Seuraavassa on lueteltu kymmenen vaatimusta, joista mittauksesta riippuen kaikki tai vain osa tulee täyttää: /71/

- Aina kun on mahdollista tulee käyttää ulkoista virtalähdettä. Akkua tulee käyttää vain, jos muuta mahdollisuutta ei ole.
- Mittaushuoneen lämpötilan tulee olla 15–25 °C, ilmanpaineen 860–1060 · 10<sup>2</sup> Pa ja suhteellisen ilmankosteuden 25–85 %.
- Näytön tulee olla lämmennyt vähintään 20 minuuttia. Näytön lämpenemistä voidaan seurata standardin luvussa 305-3 esitetyllä tavalla.

- Näytön säätöjä ei tule muuttaa kesken mittauksien ellei tämä kuulu mittauksen luonteeseen.
- Mittaushuoneen täytyy olla täysin pimeä. Valaistusvoimakkuus  $E$  näytön pinnalla ei saa olla yli 1 lx:n. Tämä vastaa täysin heijastavalta pinnalta mitattua luminanssiarvoa  $0,32 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Tehtaässä mittauksia luminanssilukemista, jotka ovat alle  $3 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  tulee ei-toivotun valaistuksen vaikutuksen mittauksiin olla alle kymmenesosa. Myöskään valoa heijastavia esineitä ei saa olla mitattavan näytön läheisyydessä, koska niistä voi aiheutua heijastuksia näytölle ja näin mittausvirhe kasvaa.
- Kohtisuorissa mittauksissa mittaussuunta täytyy saavuttaa  $0,3^\circ$ :n tarkkuudella. Kulmariippuvaisissa mittauksissa tulee kiinnittää erityistä huomiota oikeaan mittausetäisyyteen.
- Mittausalueen tulee kattaa vähintään 500 pikseliä, mutta se saa olla vain kymmenesosa näytön horisontaalisesta ja vertikaalista koosta sekä alle prosentin näytön pinta-alasta.
- Näytöstä päin katsoen mittapää ei saa olla yli  $2^\circ$ :n kokoinen. Jos mittapää ei operoi näytön välittömässä läheisyydessä, on suositeltavaa käyttää mittausetäisyyttä 500 mm. Tällöin mitta-alueen halkaisija on 17,5 mm. Jos mittalaite ei täytä näitä vaatimuksia, tulee raporttiin liittää tarkat tiedot mittalaitteesta.
- Mittauskohta täytyy saavuttaa 3 %:n tarkkuudella näytön halkaisijasta.
- Luminanssimittausten varianssin tulee olla alle 0,5 %.

### 3.4.3 Täyden näytön mittaukset keskipisteestä

Näissä mittauksissa (VESA FPDM 302) määritetään näytön suorituskyky luminanssin ja värien osalta näytön keskipisteestä kohtisuorasti. Mittalaitteeseen on toteutettu lukujen 302-1–7 mittaukset. Kaikkiin mittauksiin pätevät kaikki kymmenen olosuhdevaatimusta (luku 3.4.2). /71/

Ensimmäisessä mittauksessa (302-1) määritetään luminanssi ja värillisyydsarvot valkoiselta ruudulta. Toisessa (302-2) puolestaan mustalta ruudulta. Näiden perusteella lasketaan kolmannen luvun (302-3) mukaan kontrastisuhde valkoisesta ja mustasta luminanssista. Kontrastisuhde  $C_R$  lasketaan kaavalla 65, joka on vastaava kuin ISO 13406:n kaava 48. /71/

$$C_R = \frac{L_w}{L_b} \quad (65)$$

jossa,

$L_w$  on valkoisen ruudun luminanssi ja  
 $L_b$  on mustan ruudun luminanssi.

VESA suosittelee käyttämään kontrastisuhdetta, kun ilmoitetaan näytön kontrasti. Jos näytön kontrasti on mitattu jollain muulla menetelmällä, tulee tämä ilmoittaa täydellisesti. /71/

Neljännessä mittauksessa (302-4) määritetään näytön päävärien värikoordinaatit. Vaihtoehtoisesti voidaan myös määrittää toisiovärien värikoordinaatit. Värikoordinaatistona käytetään joko CIE 1931  $x$   $y$  tai CIE 1976  $u'$   $v'$ -koordinaatistoja. /71/

Viidennessä luvussa (302-5) määritetään näytön gamma-arvo  $\gamma$ . Gamma-arvo on näytön elektro-optisen siirtofunktion kulmakertoimen logaritmiasteikkolla. Se kuvaa ohjaussignaalin ja ulostuloluminanssin välistä korrelaatiota. Se määritetään kaavalla 66 /41, 71/:

$$L = aV^\gamma + L_b \quad (66)$$

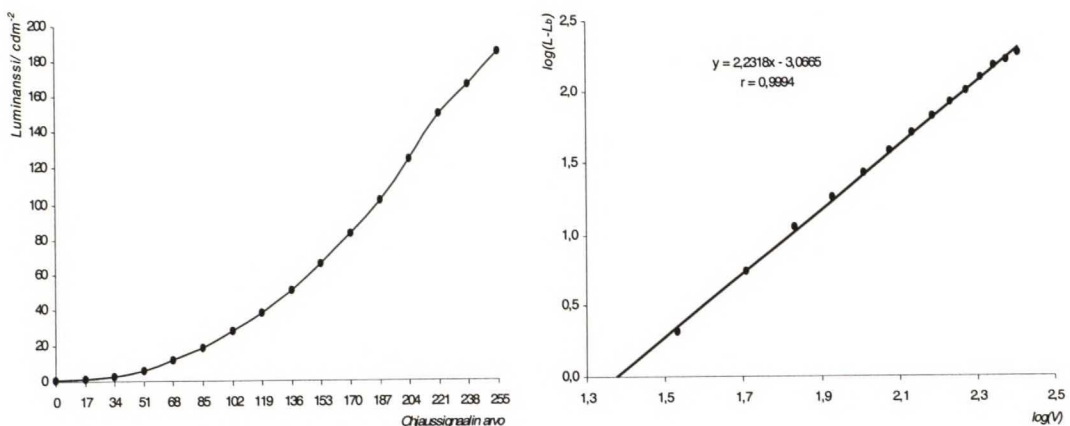
jossa,

$L$  on luminanssi,  
 $V$  on ohjaussignaalin taso,  
 $\gamma$  on gammakerroin,  
 $L_b$  on mustan ruudun luminanssiarvo ja  
 $a$  on vakiokerroin.

Sama kymmenkantaisessa logaritmiimuodossa on kaavassa 67 /71/:

$$\log_{10}(L - L_b) = \gamma \cdot \log_{10}(V) + \log_{10}(a) \quad (67)$$

Mittauksessa otetaan 8 tai 16 näytettä testikuvista, jotka ovat koko ruudun kokoisia ja joiden väri vaihtelee tasaisesti täysin mustasta täysin valkoiseen. Esimerkiksi kuvan 19 tapauksessa 16:n näytteen testikuvien RGB-arvot ovat kaikille osaväreille samat 0, 17, 34, 51, 68, 85, 102, 119, 136, 153, 170, 187, 204, 221, 238 ja 255. Näytteistä lasketaan lineaarisella regressioanalyysillä logaritmiasteikkossa gammakertoimen arvo. /71/



**Kuva 19.** Elektro-optinen siirtofunktio lineaarisessa ja logaritmisessa koordinaatistossa

Sovituksen hyvyttä voidaan arvioida korrelaatiokertoimella  $r$ . Korrelaatiokerroin saa arvoja  $|r| \leq 1$  siten, että arvojen ollessa lähellä yhden itseisarvoa on sovitus hyvä ja lähellä nollaa huono. VESAn mukaan korrelaatiokertoimen itseisarvon ollessa yli 0,98 on sovitus tarpeeksi hyvä. Jos näin ei ole, voidaan gamma-arvon laskemiseen käyttää vain osajoukkoa näytteistä. Tämä tulee ilmoittaa raportissa. Gamma-arvo voidaan myös jättää kokonaan ilmoittamatta, jolloin tulee ilmoittaa korrelaatiokerroin. /71/

Näyttötekniikasta riippuen voi elektro-optisen siirtofunktion käyttäytyminen poiketa selvästi potenssikäyrästä. Nestekidenäyttöjen osalta elektro-optinen siirtofunktio saattaa ohjaussignaalin yläpään läheisyydessä taipua alaspäin muodostaen S-käyrän /49/. Tämä johtuu nestekiteiden elektro-optisista ominaisuuksista. Tällöin perinteinen gamma-arvo ei kuvaa tarpeeksi hyvin elektro-optista käyttäytymistä. VESA FPDM ei tarjoa tähän ongelmaan ratkaisua. /71/

Kuudennessa mittauksessa (302-6) määritetään gamma-arvo osaväreistä erikseen. Vaihtoehtoisesti mittaus voidaan tehdä myös toisioväreistä päävärien lisäksi. Jokaiselle osavärielle lasketaan erikseen gamma-arvo. /71/

Seitsemännessä mittauksessa (302-7) puolestaan määritetään harmaasävyruutujen värierot. Mittaus tehdään vastaavasti kuin viidennessä luvussa, mutta testikuvista mitataan joko värillisyyssarvot CIE 1976  $u' v'$  -koordinaatistossa tai värilämpötila. Värillisyyssarvoja käytettäessä väriero  $\Delta u' v'$  lasketaan kaavalla 20. Tuloksista raporttiin voidaan liittää suurin väriero, keskiarvo tai taulukko kaikista värieroista. /71/

### 3.4.4 Laatikkokuvion mittaukset keskipisteestä

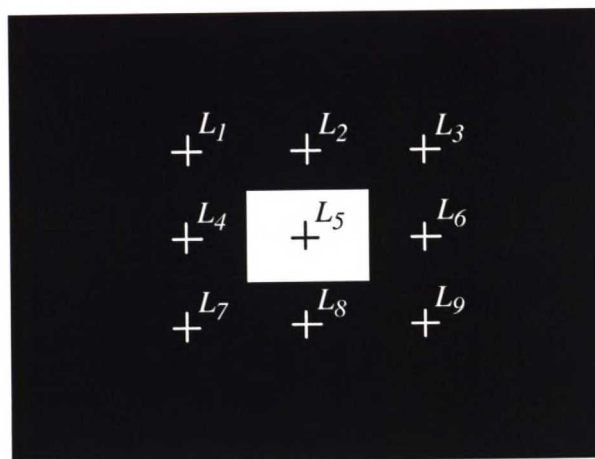
Laatikkokuvion mittauksissa keskipisteestä (VESA FPDM 304) tutkitaan näytön ominaisuuksia testikuvalla, joka ei ole tasainen koko näytön alueella. Näytölle asetetaan keskipisteeseen valkoinen laatikko taustan ollessa musta. Laatikon halkaisija on 16–20 % koko näytön halkaisijasta. Kaikki mittaukset tehdään kohtisuorassa näyttöpintaan nähden. /71/

Kun tehdään mittauksia mustasta laatikosta, joka on valkoisen alueen ympäröimänä, voivat harsohäikäisyt ja linssiheijastumat aiheuttaa huomattavaa virhettä mittauksiin. Harsohäikäisyssä valkoinen alue aiheuttaa tasaisen hunnun mitattuun kuvaan. Linssiheijastumassa puolestaan mitattuun kuvaan tulee selviä kirkkaita kohtia. Linssin ominaisuudet ja ulkoiset tekijät, kuten lika ja pöly, vaikuttavat ilmiöiden esiintymiseen. Isoja alueita mitattaessa vaikutusta voidaan vähentää peittämällä valkoiset alueet tai suojaamalla mittapää mustalla kartiolla. /71/

Ensimmäisessä mittauksessa (304-1) otetaan kaikkiaan yhdeksän luminanssinäytettä  $L_1-L_9$ , joista kahdeksan otetaan valkoisen laatikon ulkopuolelta ja yksi valkoisen laatikon keskeltä (kuva 20). Mittaus voidaan suorittaa myös negatiivisena eli käyttämällä mustaa neliötä valkoisen alueen ympäröimänä. Kontrastisuhde lasketaan valkoisen kohdan  $L_5$  ja jokaisen mustan kohdan  $L_1-L_4, L_6-L_9$  välillä kaavalla 65. Raportissa ilmoitetaan pienin  $C_{Bmin}$  ja suurin  $C_{Bmax}$  kontrastilukema sekä keskiarvo  $C_B$ , joka lasketaan kaavalla 68 /71/:

$$C_B = \frac{8L_5}{\sum_{i=1}^4 L_i + \sum_{i=6}^8 L_i} \quad (68)$$

Toisessa mittauksessa (304-2) mitataan luminanssi samasta testikuvasta kuin edellisessä kappaleessa kohdasta  $L_5$  sekä täysin mustasta ruudusta näytön keskipisteestä. Vaihtoehtoisesti mittaus voidaan tehdä negatiivisesta kuvasta ja täysin valkoisesta ruudusta. Tulokseksi saadaan valkoinen- ja mustaluminanssi, joista lasketaan kontrastisuhde kaavalla 65. /71/



**Kuva 20.** Laatikokuviomittauksissa käytetään kuvan osoittamaa testikuvaa. Valkoisen neliön halkaisija on viidesosa näytön halkaisijasta. Testipisteet sijaitsevat laatikon mittojen päässä keskipisteestä /71/

Näytön poikittainen kontrasti määritetään kolmannessa mittauksessa (304-3). Mittauksessa käytetään samaa testikuvaa kuin kahdessa edellisessä mittauksessa, mutta testipisteet määräytyvät seuraavasti:  $L_L = L_1$ ,  $L_C = L_2$  ja  $L_R = L_3$  (kuva 20). Mittaustuloksista lasketaan kontrasti  $C_B$  kaavalla 69. Vaihtoehtoisesti voidaan tehdä myös mittaus negatiivisesta (musta laatikko, valkoinen pohjaväri) kuvasta ja laskea kontrasti  $C'_B$  kaavalla 70 /71/:

$$C_B = \frac{2L_C}{L_L + L_R} \quad (69)$$

$$C'_B = \frac{L_L + L_R}{2L_C} \quad (70)$$



Neljäs, viides ja kuudes mittaus (304-4–6) ovat vastaavia kuin täyden ruudun mittauksiin sisältyvät vastaavat mittaukset (luku 3.4.3), mutta testikuvana on laatikkokuva (kuva 20). Neljännessä mittauksessa määritetään gamma-arvo harmaasävylaatikoista ja kuudennessa vastaavasti gamma-arvot osaväreille erikseen. Viidennessä mittauksessa määritetään väriavaruus värillisistä laatikoista. /71/

Seitsemäs ja kahdeksas mittaus (304-7, 304-8) käsittelevät luminanssin muuttumista testikuvan muuttuessa. Seitsemännessä luvussa määritetään varjokehän muodostumista mustaan laatikkoon, jota ympäröi valkoinen pinta. Näytön keskellä olevan mustan laatikon kokoa muutetaan siten, että laatikon halkaisijan pituus kasvaa seuraavasti: 0 %, 5 %, 10 %, 20 % ... 100 %. Laatikkoa ympäröi täysin valkoinen alue muissa paitsi 100 % testikuvan mittauksessa. Lisäksi mitataan täysin valkoisen ruudun luminanssi. Varjokehä lasketaan kaavalla 71 /71/:

$$\text{Varjokehä} = 100 \% \frac{L_{max} - L_b}{L_w} \quad (71)$$

jossa,

- $L_{max}$  on testisarjan suurin luminanssi,
- $L_b$  on 100 % testikuvan luminanssi ja
- $L_w$  on täysin valkoisen ruudun luminanssi.

Luminanssikuormitus määritetään kahdeksannessa mittauksessa vastaavalla menetelmällä kuin varjokehä, mutta testikuva on negatiivinen varjokehän mittauksessa käytettyyn nähden. Luminanssikuormitus lasketaan kaavalla 72 /71/:

$$\text{Luminanssikuormitus} = 100\% \cdot \frac{L_{ext} - L_w}{L_w} \quad (72)$$

jossa,

- $L_{ext}$  on testisarjan suurimman erotuksen  $L_w$ :hen nähden omaava luminanssi ja
- $L_w$  on täysin valkoisen ruudun luminanssi.

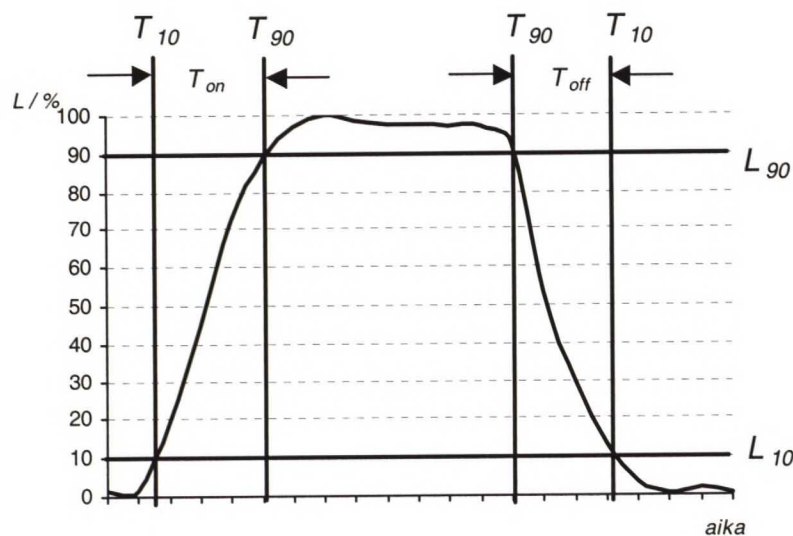
Shakkiruudukon luminanssi ja kontrasti mustasta ja valkoisesta ruudusta määritetään yhdeksännessä mittauksessa (304-9). Yleisimmät ruudukkovaihtoehdot ovat 5×4, 5×5, 6×5 ja 6×6. Muitakin vaihtoehtoja voidaan käyttää. Ruudukon koosta riippuen tehdään mittaus yhdestä, kahdesta tai neljästä pisteestä. Jos ruutujen määrä on parillinen pysty- tai vaakasuuntaan, tarvitaan kaksi mittausta siihen suuntaan. Muutoin riittää yksi mittaus keskimmäisestä ruudusta. Luminanssi ja kontrasti lasketaan ruutujen määrästä riippuen hieman toisistaan poikkeavasti. Taulukossa 7 on kaavat eri vaihtoehtojen laskemiseksi. Periaatteena on, että jos käytetään useampaa samanväristä ruutua, kontrastia laskettaessa käytetään näiden keskiarvoa. /71/

**Taulukko 7.** Shakkiruudukoiden tyypit ja kaavat luminanssin ja kontrastin laskemiseksi. Ensimmäinen alaindeksi tarkoittaa ruudun väriä, b-kirjain mustaa ja w-kirjain valkoista. Toinen alaindeksi tarkoittaa ruudun sijaintia keskimmäisten ruutujen joukossa, l-kirjain vasenta, r-kirjain oikeaa, t-kirjain yläruutua ja b-kirjain alaruutua [71]

Shakkiruudukon tyyppi		Vaadittu pienin ruutujen määrä	Valkoinen	Musta	Kontrasti
Sarake-määrä	Rivi-määrä				
Parillinen	Parillinen	1	$L_{wl} + L_{wr}$	$L_{bl} + L_{br}$	$C_C = \frac{L_{wl} + L_{wr}}{L_{bl} + L_{br}}$
Pariton	Pariton	2	$L_w$	$L_b$	$C_C = \frac{L_w}{L_b}$
Parillinen	Pariton	2	$L_{wl} + L_{wr}$	$L_{bl} + L_{br}$	$C_C = \frac{L_{wl} + L_{wr}}{L_{bl} + L_{br}}$
Pariton	Parillinen	2	$L_{wt} + L_{wb}$	$L_{bt} + L_{bb}$	$C_C = \frac{L_{wt} + L_{wb}}{L_{bt} + L_{bb}}$

### 3.4.5 Vasteaika

Tässä mittauksessa (VESA FPDM 305-1) määritetään näytön elektro-optinen askel-funktio. Yksittäiselle pikselille määritetään sen sytyttämiseen ja sammuttamiseen kuluva aika. Nämä yhteen laskettuna on vasteaika. Kuvassa 21 on tyypillinen vasteaikakäyrä.  $T_{10}$  on ajankohta jolloin saavutetaan 10 %:n luminanssilukema  $L_{10}$  maksimiluminanssista ja  $T_{90}$  90 %:n kohta  $L_{90}$ . [71]



**Kuva 21.** Vasteaikakäyrä, johon on merkitty kohdat, joissa luminanssi saavuttaa 10 ja 90 %:n lukemat maksimiluminanssista

Elektro-optisessa askelfunktiossa ilmenee usein korkeataajuisia kohinaa, joka johtuu taustavalosta, virkistystaajuudesta ja muista tekijöistä. Tämä tulee suodattaa pois käyttämällä digitaalista suodatusmenetelmää. Moving window average filtering -menetelmällä saadaan tehokkaasti poistettua säännöllinen jaksottainen kohina. Suodatettu signaali  $S_i$  lasketaan sisääntulo signaalista  $L_n$  kaavalla 73 /71/:

$$S_i = \frac{1}{\Delta N} \sum_{n=i}^{n=i+\Delta N-1} L_n \quad (73)$$

$\Delta N$  on kohinan jakson aikana kerätty näytteiden määrä, joka lasketaan kaavalla 74 /71/:

$$\Delta N = \tau s \quad (74)$$

jossa,

$\tau$  on kohinan jakso ja  
 $s$  on näytteenottotaajuus.

ISO 13406-2:n mukaan näytön vasteajan tulee olla alle 55 ms. Jos näyttö ei täytä tätä vaatimusta, tulee näytölle ilmoittaa vasteaikalukema. Näytön käyttötarkoituksesta johtuen ei pieni vasteaika ole aina välttämätöntä. /64/

### 3.4.6 Välkynä

Välkynnällä (VESA FPDM 305-4) tarkoitetaan näytöllä ilmenevää ei-toivottua temporaalista luminanssvaihtelua staattisessa kuvassa. VESA FPDM ja ISO 13046-2 esittelevät menetelmän, jossa välkynä määritetään näytön luminanssin tehospektristä. Kun tiedetään ihmisen herkkyys välkynnälle taajuuden funktiona, voidaan määrittää havaitseeko ihminen näytön välkynä. /64, 71/

Katodisädetekniikalla toteutetuilla näytöillä välkynä johtuu liian alhaisesta virkistystaajuudesta. Ongelma poistuu virkistystaajuuden ollessa yli 70 Hz. Nestekidenäyttöjen temporaalinen vaste on selvästi hitaampi. Nestekiteiden asento ei vaihdu niin nopeasti, että samanlaista välkynä syntyy kuin katodisädeputkinäytöissä. Sitä vastoin välkynä voi ilmetä katselukulmasta, esitettävästä kuviosta, väreistä tai harmaatasosta johtuen. Välkynäominaisuudet määräytyvät näytön toimintaperiaatteen mukaan. /71/

Välkynä mitataan täysin valkoiselta ruudulta tai testikuvasta, jonka on todettu antavan kaikista huonoin tulos. Ruudun luminanssista otetaan ajan funktiona näytteitä vähintään 64 kappaletta tasaisin intervallein. Jos näytteitä otetaan enemmän, tulee määrän olla kahden potenssi, koska tuloksille suoritetaan diskreetti Fourier-muunnos (FFT, fast Fourier transform). Mittaustuloksista tulee alipäästösuodattaa yli 150 Hz:n näytteet  $\pm 3$  dB:n jyrkkyydellä ja näytteenottotaajuus -60 dB:llä. Digitaalinen suodatus suoritetaan edellisessä luvussa esitetyllä tavalla. Fourier-muunnoksella saatuja taajuuksia vastaavat kertoimet painotetaan ihmisen näköjärjestelmän herkkyuden mukaan määritetyillä kertoimilla.

VESA esittelee EIAJ:n (Electronics Industries Association of Japan) standardissa ED-2522 määritetyt kertoimet. Vätkyntä lasketaan jokaiselle diskreetille taajuudelle suhteessa DC-komponenttiin. Taulukossa 8 on esimerkki, jossa on määritty vätkyntä desibeleinä, joka määritetään kaavalla 75 /71/:

$$\text{vätkyntä} = 20 \log_{10} \left( \frac{2 \cdot f_{\text{sfft}[n]}}{f_{\text{sfft}[0]}} \right) \quad (75)$$

jossa,

$f_{\text{sfft}[n]}$  on Fourier-kerroin taajuudella  $n$  ja  
 $f_{\text{sfft}[0]}$  on Fourier-kerrointen DC-komponentti.

**Taulukko 8.** Esimerkki vätkynnän laskemiseksi

Näyte	Fourier-kerroin	Taajuus/Hz	Painokerroin/dB	Painokerroin	Vätkyntä/dB
0	149,8	DC	0,0	1,000	-
1	0,003	15,00	0,0	1,000	-87,9
2	0,008	30,00	-3,0	0,708	-79,4
3	0,009	45,00	-9,0	0,355	-78,4
4	0,005	60,00	-40,0	0,010	-83,5

### 3.4.7 Luminanssin ja värillisyyden tasaisuus

Tasaisuudella (VESA FPDm 306) tarkoitetaan näyttöpinnan luminanssin ja värillisyyden ei-toivottuja muutoksia spatiaalisen sijainnin funktiona. Muutoksia on vaikea havaita silloin, kun ne tapahtuvat tasaisesti koko näyttöpinnan alueella. Luminanssin tasaisuus ja epätasaisuus määritetään kaavoilla 76 ja 77 /71/:

$$\text{Luminanssin tasaisuus} = 100 \% \cdot \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \quad (76)$$

$$\text{Luminanssin epätasaisuus} = 100 \% \cdot \frac{L_{\max} - L_{\min}}{L_{\max}} \quad (77)$$

jossa,

$L_{\max}$  on suurin näytöltä mitattu luminanssi ja  
 $L_{\min}$  on pienin näytöltä mitattu luminanssi.

Termit 100 %:n tasaisuus ja 0 %:n epätasaisuus tarkoittavat, että näytöllä ei ole ollenkaan luminanssvaihtelua. Yleensä käytetään suurempaa epätasaisuus. Kymmenen prosentin epätasaisuus on hyväksyttävissä. /71/

Värillisyyden tasaisuutta arvioidaan värierolla  $\Delta u'v'$ , joka määritetään kaavalla 20. Vie-rekkäisten värien ero yleensä havaitaan, jos väriero  $\Delta u'v' \geq 0,004$ , kuitenkin kahden eril-lään olevan värin erottamiseen vaaditaan  $\Delta u'v' \geq 0,04$  väriero. /71/

Standardin luku sisältää kaikkiaan kuusi mittausta, joista neljä on toteutettu mitta-laitteella. Kolme ensimmäistä mittausta (306-1-3) käsittää valkoisen ja mustan ruudun mittauksen ja kontrastin määrittämisen. Mittauspisteitä on viisi tai yhdeksän ja ne sijait-sevat kymmenesosan päässä näytön reunoista pysty- ja vaakasuunnassa. Viiden pisteen tapauksessa mittaus suoritetaan keskipisteestä ja kulmapisteistä. Yhdeksää pistettä käy-tettäessä mittaus tehdään kulmapisteiden ja keskipisteen lisäksi kulmapisteiden puolivä-listä. Luminanssin epätasaisuus lasketaan kaavalla 77 ja kontrastin epätasaisuus kaavalla 78. Vaihtoehtoisesti voidaan määrittää myös väriero kaavalla 20 /71/:

$$\text{Kontrastin epätasaisuus} = 100\% \cdot \frac{C_{max} - C_{min}}{C_{max}} \quad (78)$$

jossa,

$C_{max}$  on suurin laskettu kontrasti ja  
 $C_{min}$  on pienin laskettu kontrasti.

Neljännessä mittauksessa (306-4) määritetään väriruutujen tasaisuus samoista mittaus-pisteistä kuin mustalle ja valkoiselle värille. Väreinä ovat yleensä pää- tai toisiovärit. Tuloksista määritetään epätasaisuus kaavalla 77 ja väriero kaavalla 20. Viidennessä mit-tauksessa (306-5) määritetään vastaavat arvot tumman harmaasta väriruudusta. Harmaan tulee olla 3-5 % valkoisesta väristä. /71/

### 3.4.8 Suorituskyky katselukulman suhteen

Näissä mittauksissa (VESA FPDM 307) tutkitaan näytön suorituskykyä katselukulman muuttuessa. Vertailukohtana pidetään kohtisuoraa tai muuta sovitua suuntaa. Litteillä näytöillä on todettu olevan riippuvuutta katselukulman suhteen huomattavasti enemmän kuin katodisädeputkinäytöillä. Ongelmia aiheuttaa yleensä luminanssin ja kontrastin säi-lyminen katselukulman kasvaessa ja värillisyyden säilyminen haluttuna. /71/

Ensimmäisessä mittauksessa (307-1) määritetään näytön kontrastin ja värillisyydsarvojen muutokset neljällä mittauksella. Mittaus tehdään keskeltä näyttöä neljästä suunnasta; ylhäältä, alhaalta, oikealta ja vasemmalta. Valmistajan tulee ilmoittaa inkliinaatiokulmien suuruudet, jotka voivat vaihdella eri suuntien välillä. /71/

Jokaisesta suunnasta määritetään luminanssi- ja värillisyydsarvot testikuvilla, jotka ovat musta ja valkoinen sekä kaikki päävärit. Tuloksista raportoidaan kaikkien mittauksien luminanssi ja värillisyydsarvot sekä lasketaan kontrasti  $C_R$  kaavalla 65. /71/

Toisessa mittauksessa (307-2) määritetään katselukulma horisontaali- ja vertikaali-suuntaan kynnysarvoon perustuen. Tällä mittauksella saadaan tarkasti määritettyä näytön kulmariippuvainen suorituskyky pysty- ja vaakasuuntaisesti. Mittaus tehdään vastaavasti kuin edellinen mittaus, mutta näytteitä otetaan yhden inkliinaatiosuunnan sijaan koko

90°:n asteen suuruiselta inkliinaatioalueelta vähintään 5°:n välein. Väliarvot interpoloidaan tarkempaa tutkimista varten. Mittaus tehdään sekä kontrastille että värillisyyssarvoille. /71/

Kynnysarvo voi määräytyä usealla tavalla. Standardi suosittelee muutamaa tapaa. Kynnysarvona voidaan pitää kontrastisuhdearvoa 10:1. Toinen tapa on käyttää 50 %:n rajaa kohtisuorasti mitatusta arvosta, joka ei välttämättä ole suurin kontrastiarvo. Kynnysarvona voi olla myös musta värin muuttuminen vaaleammaksi 5 %:n verran valkoisesta väristä. Värieron  $\Delta u'v'$  kynnysarvoksi standardi puolestaan suosittelee 0,1:n suurista värieroa. /71/

Raporttiin liitetään kynnysarvot kuhunkin neljään suuntaan ja vaihtoehtoisesti kuvaaja kynnysarvosta kulman funktiona. Raporttiin tulee myös liittää tieto kynnysarvon määrittämisperusteista. /71/

Standardin luvun 307 neljäs mittaus on muuten vastaava kuin toinen, mutta neljän atsimuuttisuunnan sijaan tutkitaan koko 360°:n atsimuuttialuetta 10°:n intervaleihin. Mitattavat suureet ovat samat ja myös periaatteet kynnysarvojen laskemiseksi. Tulokset esitetään kaksiulotteisena kuvana polaarikoordinaatistossa, jossa luminanssin ja väriarvojen vaihtelun havainnollistamiseen on käytetty korkeuskäyriä ja värejä. /71/

Kolmannen ja viidennen luvun mittaukset käsittelevät harmaasävyjen invertoitumista. Tämä tarkoittaa peräkkäisten harmaasävyjen sekoittumista keskenään. Mittauksessa tutkitaan joko kahdeksan tai 16:sta harmaasävyyn luminanssin vaihtelua katselukulman funktiona. Jokaisesta harmaasävyistä mitataan luminanssi. Luminanssien tulisi erota toisistaan selvästi. Jos näin ei tapahdu, raporttiin ilmoitetaan raja-arvot eri suuntiin, joiden kohdalla invertoitumista alkaa tapahtumaan. /71/

### 3.5 Standardien vertailu ja aikaisempia tutkimuksia

Johtuen standardien eri lähestymistavoista näyttöjen ergonomiamittauksiin, eivät standardit sisällä täysin samoja kohtia kovinkaan paljon. ISO 13406-2 on selkeästi rajattu kokonaisuus mittauksia, joilla saadaan monipuolisesti selville näytön suorituskyky. VESA FPDM puolestaan sisältää laajasti mittauksia, joista testin tekijän tulee valita hyödylliset. VESAn SBM (suite of basic measurements) sisältää kattavan otoksen näytön oleellisimmista ominaisuuksista, kuten luminanssin, kontrastisuhteen ja väriarvojen määrittämisen sekä temporaalisia ja kulmariippuvaisia ominaisuuksia. Tämä on tarpeeksi laaja selvitys useimpiin käyttötarkoituksiin. /64, 71/

Standardien perusteella tehtyjä täydellisiä mittausraportteja ei ollut saatavana. Useat näyttövalmistajat ilmoittavat näyttöjensä täyttävän ISO 13406-2:n mukaiset vaatimukset. Kuitenkin yksityiskohtaiset tiedot eivät ole julkisesti saatavana. Useat tietokonelehtien tekemät näyttövertailut sisältävät laajasti mittaus tuloksia, mutta mittausmenetelmiä ei käsitellä kovinkaan yksityiskohtaisesti. Osin mittaukset ovat VESA FPDM:n mukaisia.

MikroPC-lehden näyttöpaneelitestissä arvioitiin kaksitoista 15”:n kokoista nestekidenäyttöä. Näytöille tehtiin luminanssi- ja värillisyyssmittauksia. Muita ominaisuuksia, kuten temporaalista vastetta, arvioitiin silmämääräisesti. Näytöt säädettiin samaan lumi-

nanssi- ja väriarvoon (D65) keskipisteen osalta ja tähän nähden määritettiin luminanssin tasaisuus. Tyypillisesti luminanssin tasaisuus oli 80–100 %. Parhain näyttö pystyi yli 90 %:n tasaisuuteen lähes joka kohdassa ruutua. Väriero ilmoitettiin JND-arvoina (just noticeable difference). JND-arvon ollessa yksi, havaitsee ihminen värieron. VESAn mukaan tämä vastaa CIE 1976  $\Delta u'v'$  arvoa 0,04 /71/. ISO 13406-2:n vaatimus värillisyyden tasaisuudelle on  $\Delta u'v' < 0,03$  15":n näytöille. JND-arvot olivat suurimmillaan 0,6 ( $\Delta u'v' = 0,024$ ). Tyypillinen tulos oli 0,0–0,2 ( $\Delta u'v' < 0,008$ ). Ehdot täyttävät ISO 13406-2:n vaatimuksen kohtisuoraan. ISO 13406-2:n värieron analysointi tulee kuitenkin tehdä useasta suunnasta. /64, 67/

PC Magazinen testissä mitattiin kolmetoista 15":n kokoista nestekidekidenäyttöä maksimiluminanssin, luminanssin tasaisuuden ja shakkiruudukon kontrastin osalta. Näytöt olivat säädetty visuaalisilla testiruuduilla optimaaliseen toimintatilaan. Vastaavaksi värilämpötilaksi valittiin 9300 °K. Testin paras näyttö yliti yli 250 cd·m<sup>-2</sup> luminanssiin. Hyvänä tuloksena pidettiin 200 cd·m<sup>-2</sup> luminanssia, johon yliti kahdeksan näyttöä. ISO 13406-2:n vaatimus luminanssille on 20 cd·m<sup>-2</sup> katselukulma-alueella /64/. Tutkimuksessa luminanssi tasaisuus vaihteli 8–27 %:iin. Kontrastit puolestaan 170:1–210:1. Lehden vuotta aikaisemmassa testissä mitattiin seitsemäntoista 15–18":n kokoista näyttöä. Tällöin mitattiin muun muassa kontrastisuhte ja väriavaruus. Kontrastisuhteen mittaus tulokset olivat välillä 200:1–430:1. Väriavaruuksia tutkittiin vain näyttöjen keskinäisen vertailun kannalta. Parhaimman tuloksen antaneen näytön väriavaruus oli noin 70 % suurempi kuin huonoimman. /11, 56/

Seikein yliopiston tutkimuksessa arvioitiin kirkkauden, kontrastin ja kirjaimen koon merkitystä informaation havaitsemiseen. Tutkimus tehtiin simuloimalla nestekidenäyttöä tulosteilla, joilla esitettiin japanilaiseen kirjaimistoon pohjautuvaa tekstiä. Tutkimuksen perusteella kirjainten tulisi olla vähintään 15 pisteen korkuisia 400–500 mm:n katseluetäisyydeltä ja 40°:n inkliinaatiokulmalla. Tämä vastaa noin 36' kulmakokoa 500 mm:n katseluetäisyydellä. ISO 13406-2:n vaatimus aasialaisille merkeille on 25' ja suositus 30–35'. Saatu tulos korreloi siis ISO 13406-2:n kanssa. Seikein yliopiston tutkimuksen mukaan kirkkaus riippuu voimakkaasti taustan vaaleusarvosta. Jos taustan vaaleus  $L^*$  on 70, kontrastisuhteen tulee noin 4:1.  $L^*$ :n olessa 50 tulee kontrastisuhteen olla 6:1–7:1. ISO 13406-2:n kontrastin arviointi tehdään CIE 1976  $u'v'$  -koordinaatistossa, joten tuloksia ei voida verrata. Värieron arviointi tehdään ISO 13406-2:ssa CIE 1976  $L^*u^*v^*$  -koordinaatistossa. /47, 64/

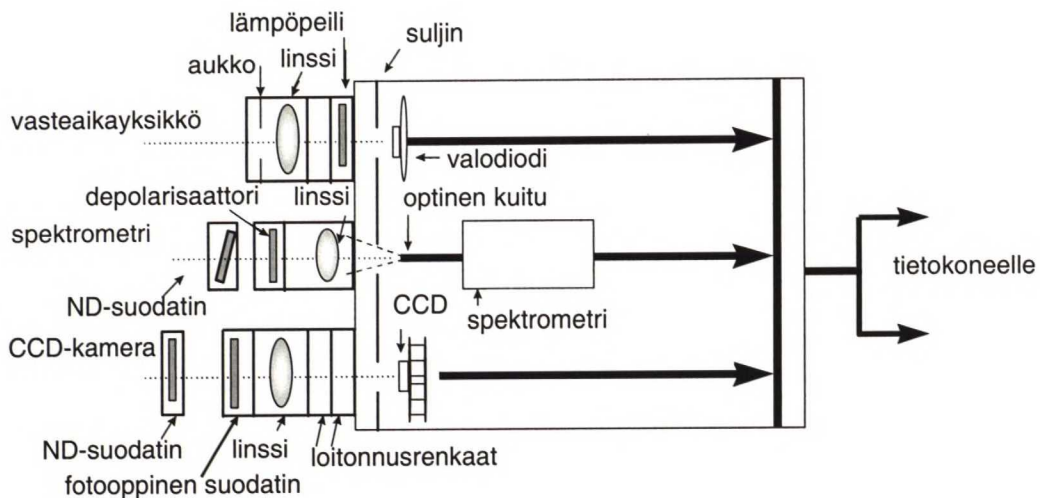
Aikaisempien tutkimusten pohjalta voidaan päätellä, että tämän hetken pöytänäytöt täyttäsivät ISO 13406-2:n vaatimukset kohtisuorassa suunnassa. Sitä vastoin laajalla katselusektorilla ei mittaustuloksia ole saatavilla. Kämmentietokoneitten näyttöjen suorituskyvystä ei ollut tutkimustuloksia saatavilla.

## 4 MITTAUSLAITTEISTO

### 4.1 Johdanto

Microvision SS230 mittalaitteiston mittapääät ovat spektrometri, digitaalinen kamera ja vasteajan mittaussyksikkö. Goniometrimittapää mahdollistaa kulmariippuvaiset mittaukset. Mittapään kulmaa mitattavan näytön pintaan nähden voidaan muuttaa liikuttamalla mittapäää. Toisessa markkinoilla olevassa ratkaisussa mitattavaa näyttöä liikutellaan mittapään pysyessä paikoillaan /8/. Kolmas menetelmä toteuttaa kulmariippuvaiset mittaukset on käyttää Fourier-optiikkaa suuntaamaan yhdestä pisteestä eri suuntiin tulevat valonsäteet tasolle, josta ne luetaan kaksikulotteisena matriisina /6/. Microvision SS230 koostuu kahdesta vaihtoehtoisesta kokoonpanosta SS210 ja SS220. Kumpaankin kokoonpanoon kuuluu yhteinen kohdistusyksikkö SS50 ja tietokone, jolla ohjataan koko järjestelmän toimintaa. Kohdistusyksikkö mahdollistaa mittapään liikuttamisen lineaarisesti kolmen kohtisuoran akselin suuntaisesti. /20/

SS210 sisältää kolme mittapäää, jotka ovat vasteajan mittaussyksikkö, spektrometri ja digitaalinen kamera (kuva 22). Tällä kokoonpanolla voidaan suorittaa luminanssi- ja kromaattisuusmittauksia kohtisuorassa kulmassa paikan ja ajan funktiona. SS220 puolestaan mahdollistaa goniometriset mittaukset avaruuskulmissa. Se sisältää vain yhden mittalaitteen, joka on vastaava spektrometri kuin SS210:n sisältämä. /20/



**Kuva 22.** Mittapään SS210 rakenne. Laite koostuu kolmesta erillisestä mittapäästä, jotka ovat integroitu samaan kuoreen /20/

Mittauslaitteistoa ohjataan PC-tietokoneella. Windows 98 -pohjaisella mittausohjelmistolla voidaan ohjata kaikkia laitteiston toimintoja, mikä käsittää mittapään liikuttelun, mittauksen suorittamisen ja testikuvan asettamisen. Ohjelmisto sisältää valmiita mittausrutiineja sekä kehitysympäristön, jolla voidaan ohjelmoida erityistä MATL-ohjelmointikieltä käyttäen kustomoituja mittausrutiineja. /14, 20/



## 4.2 Kohdistusyksikkö

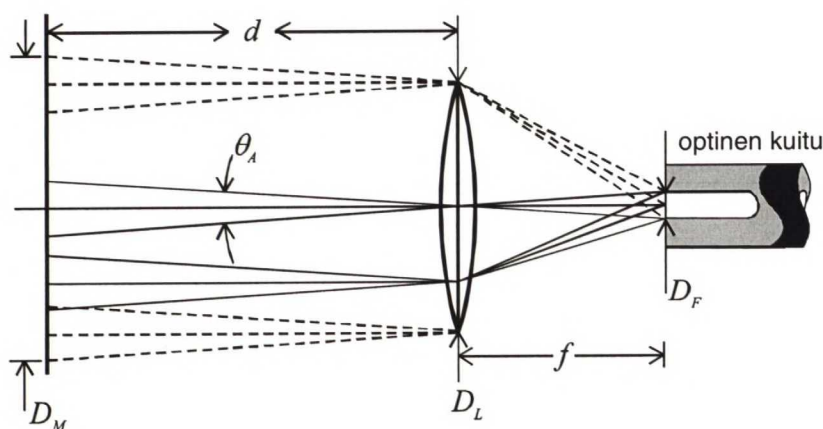
Kohdistusyksikkö SS50 koostuu kahdesta palkista, jotka ovat kohtisuorassa keskenään. Palkkeja voidaan liikuttaa toisiinsa nähden sähkömoottoreilla ja myös mittapäätä varten on liikuteltava kiinnitysalusta. Nämä kolme osaa muodostavat x-, y- ja z-akselit. Kohdistusyksikköön voidaan kiinnittää kerrallaan vaihtoehtoisesti SS210 tai SS220 -mittapää. Taulukossa 9 on kohdistusyksikön akselien ominaisuudet; toiminta-alue, ohjauksellinen erottelukyky, absoluuttinen tarkkuus ja spatiaalisen sijainnin toistettavuus sekä akselin liikkeen nimellisopeus. Kolmen lineaarisen akselin lisäksi SS220 sisältää kaksi rotaatioakselia, jotka ovat integroitu mittapähän. Mittapään rakenne on mitoitettu siten, että mittaussuunnasta riippumatta. /14, 20/

**Taulukko 9.** Valmistajan ilmoittamat parametrit kohdistusyksikölle /20/

Akseli	Toiminta-alue	Erottelukyky	Tarkkuus	Toistettavuus	Nopeus
x	1048 mm	0,03 mm	0,13 mm	0,05 mm	20 mm/s
y	882 mm	0,03 mm	0,13 mm	0,05 mm	20 mm/s
z	82 mm	0,03 mm	0,13 mm	0,05 mm	-
inklinaatio	72°	0,1°	-	-	-
atsimuutti	360°	1,0°	-	-	-

## 4.3 Spektrometri

Monikanavainen spektroradiometri (lyhyesti spektrometri) soveltuu luminanssin ja värillisyyssarvojen tarkkaan absoluuttiseen mittaamiseen. Laitteessa on kokoojalinssinä halkaisijaltaan 12 mm:n kokoinen akromaattinen linssi, joka on kollimoivassa tilassa (kuva 23). Linssi kohdistaa valon halkaisijaltaan 200 µm:n levyiselle yksimuotovalokuidulle. Valokuidulta tuleva valo hajoitetaan taivehilalla spektrikomponentteihin, jotka analysoidaan CCD-kennolla. CCD-kenno sisältää 2048 valoherkkää elementtiä, joista saatu tieto ohjataan 12-bittisen A/D-muuntimen kautta tietokoneelle. Spektrometri sisältää lämpötila-anturin, jolla voidaan tarkkailla laitteen lämpötilaa. Depolarisoiva kvartsikidesuodatin poistaa polarisaation mitattavista valonsäteistä. / 20, 36, 50/



Kuva 23. Spektrometrin mittausgeometria /71/

Näkyvän valon spektri on mahdollista mitata 380–780 nm. Mittaustarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa 7 nm ja mittaustoistojen virheeksi 3 %. Värillisyyсарвоjen osalta herkkyys on 0,005 CIE 1931 -värillisyyскоordinaatiston x ja y -arvoilla. /14/

Spektrometri on kalibroitu  $1000 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ :een asti  $2856 \text{ °K}$ :n CIE:n standardivaloon A. Mitattaessa näyttöä tätä vastaava yläraja mittauksille on noin  $500 \text{ cdm}^{-2}$ . Ylärajaa voidaan nostaa neutraalidensiteettisuodattimilla, jotka vähentävät mitattavan valon voimakkuutta vaikuttamatta sen spektrijakaumaan. Laitteiston mukana toimitetaan 50, 25, 10, 1 ja 0,1 %:n suodattimet. Laitteisto on kalibroitu kaikille kokoonpanoille koko aallonpituusalueella. Kalibrointitiedot on talletettu tiedostoihin, joiden perusteella tehdään korjaukset mittaustuloksiin. /14, 27/

Spektrometrin rinnakkaismittausten lukumäärää ja mittauksen integrointiaikaa sekä näytön virkistystaajuutta voidaan muuttaa ohjelmallisesti. Näytteiden lukumäärä voidaan säädellä 1–999 ja integrointiaikaa 1–50 ruutuun. Integrointiajan pituuteen vaikuttaa näytön virkistystaajuuden asetus. Ohjelmistoon on sisällytetty kaikki VESAn näyttötilat ja näyttötiloja voi myös laatia itse lisää. Näytteenotto on tahdistettu mitattavan näytön ohjauksen kanssa. Mittausten tarkkuutta voidaan lisätä integrointiaikaa pidentämällä. Optimaalinen tarkkuus saavutetaan, kun suurin spektrin arvo on lähellä mitta-asteikon puolta väliä. Mittalaitteessa on automaattinen toiminto, joka säätää integrointiajan optimaaliseen arvoon. /14/

Kuvassa 23 on nähtävissä mittauskokoonpanon geometria. Mittaus suoritetaan ympyrän muotoiselta alueelta, jonka koko saadaan laskettua kaavalla 79 /71/:

$$D_M = D_L + 2d \tan\left(\frac{\theta_A}{2}\right) \quad (79)$$

jossa,

$D_M$  on mittausalueen halkaisija,

$D_L$  on linssin halkaisija,

$d$  on mittausetäisyys ja

$\theta_A$  on aperaatiokulma.

Mittalaitteen linssin halkaisija  $D_L$  on noin 12 mm, mittausetäisyys  $d$  noin 70 mm ja aperaatiokulma  $\theta_A$  on  $1,5^\circ$ . Mittausalueen halkaisijaksi saadaan noin  $13,0 \pm 0,5$  mm. Mittausetäisyyden kasvattaminen kasvattaa myös mittausalueen kokoa. Mittausetäisyyden ollessa 500 mm on mittausalueen koko noin 25,5 mm. /14, 71/

Linssin edessä voidaan käyttää aukkoa, jolla voidaan pienentää mittausalueen kokoa. Laitteen mukana on toimitettu kuusi aukkoa. Taulukossa 10 on kahden käyttökelpoisen aukon koot, mittausalueiden halkaisijat ja pinta-alat sekä korjauskertoimet luminanssimittauksiin. Mittausalueen koko saadaan kaavasta 79, kun asetetaan linssinhalkaisijan  $D_L$  paikalle aukon koko. /71/

**Taulukko 10.** Spektrometrin aukkojen koot, korjauskertoimet luminanssimittauksiin ja mittausalueiden halkaisijat kullekin aukolle

Aukko	Korjauskerroin	Mittausalueen halkaisija	Mittausalueen pinta-ala
-	1	$13,0 \pm 0,5$ mm	$531 \text{ mm}^2$
5 mm	$3,8 \pm 0,1$	6,8 mm	$145 \text{ mm}^2$
2 mm	$22,3 \pm 0,1$	3,8 mm	$45 \text{ mm}^2$

Mittausalueella tulisi VESA FPDm:n mukaan olla vähintään 500 pikseliä, mutta ei kuitenkaan yli prosenttia näytön pinta-alasta. Vastaavasti ISO 13406-2:n mukaan mittausalueen tulisi olla  $1^\circ$ :n kokoinen katseluetäisyydeltä. Taulukkoon 11 on koottu muutaman tyypillisen markkinoilla olevan näytön tiedot ja laskettu 1 %:n ja 500 pisteen pinta-ala. Tämän perusteella yli  $13''$ :n näyttöjä voidaan mitata ilman aukkoa. Pienemmille tarvitaan 2 tai 5 mm:n aukko. Jos näytön pikselikoko ei ole tarpeeksi pieni, ei 500 pikselin ehto täyty. Näin on esimerkin  $2,5''$ :n näytöllä. /64, 71/

**Taulukko 11.** Tyypillisten markkinoilla olevien näyttöjen tiedoista laskettuja vertailupinta-aloja

Näytön diagonaali	Kuva-suhde	Pikselikoko/ $\mu\text{m}$	1 %:n pinta-ala	500 pisteen pinta-ala
18,0"	4:3	286	$1003 \text{ mm}^2$	$38 \text{ mm}^2$
15,0"	4:3	298	$697 \text{ mm}^2$	$44 \text{ mm}^2$
13,3"	4:3	264	$548 \text{ mm}^2$	$35 \text{ mm}^2$
4,4"	16:5	167	$36 \text{ mm}^2$	$14 \text{ mm}^2$
3,8"	3:4	241	$45 \text{ mm}^2$	$29 \text{ mm}^2$
2,5"	1:1	281	$20 \text{ mm}^2$	$39 \text{ mm}^2$

Heijastusmittauksia varten spektrometriin on liitettävissä adapteri, jolla kollimoivassa tilassa oleva linssi saadaan muunnettua tarkennettuun tilaan. Tällä menettelyllä pienennetään mittausalueen kokoa tarpeeksi pieneksi suuntaheijastusta tutkittaessa. ISO 13406-2:n heijastusmittauksissa pienellä valonlähteellä tulee mittalaitteen kulmakoon olla alle  $0,3^\circ$ . /20, 64/

#### 4.4 Digitaalinen kamerayksikkö

Kamerayksikkö käsittää objektiivin ja CCD-kennon (charged coupled device). CCD-kennon kerää objektiivilta tulevan valon, joka muunnetaan sähköiseen muotoon jatkokäsittelyä varten. CCD-kennossa on  $336 \times 243$  valoherkkää elementtiä. Yhden elementin koko on  $10 \mu\text{m}$ . Valoherkän alueen koko on  $3,23 \text{ mm} \times 2,42 \text{ mm}$ . CCD-kennon lämpötilaa voi tarkkailla ohjelmallisesti. /20/

Objektiiviksi voidaan valita kaksi vaihtoehtoa joko spatiaalisia tai fotooppisia mittauksia varten. Kummatkin objektiivit ovat Tamron 2/3”-n formaattisia ja niiden kiinnitys on C-tyyppinen. Niiden polttoväli  $25 \text{ mm}$  ja aukkoarvo on säädettävissä  $1,6$ – $16$ . Tosin fotooppisen objektiivin aukkoarvo on lukittu lukemaan  $5,6$  ja tarkennus on asetettu äärettömään. Tämä on kiinteä asetelma, jonka mukaan on tehty fotooppinen kalibrointi absoluuttisia luminanssimittauksia varten. Spatiaalisella objektiivilla voidaan tehdä vain suhteellisia luminanssimittauksia, mutta sillä saadaan joustavasti vaihdettua mittausetäisyyttä ja objektiivin läpi pääsevän valon määrää. Fotooppisen objektiivin eteen on asetettu tristimulus Y-suodatin ja kaksi loittorenkasta. CCD-kameralla ei voi tehdä värillisuusmittauksia. /14, 20, 22, 33/

Fotooppisella objektiivilla laite pystyy mittaamaan luminanssilukemia  $800 \text{ cdm}^{-2}$ :aan asti. Luminanssimittausaluetta voidaan laajentaa kaksi- tai kymmenkertaiseksi  $50$  ja  $100\%$ :n neutraalidensiteettisuodattimilla. Kaksiulotteisen luminanssijakaumakuvan tarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa  $1024$  intensiteettitasoa, joista  $256$  on kerralla käytössä. Spatiaalisella objektiivilla päästään  $5$ – $35 \mu\text{m}$  näytteenottotarkkuuteen riippuen suurennuksesta. Mittalaitteen mukana on toimitettu spatiaalikalibrointilaite, taustavalaistu ronchi ruling -yksikkö, jonka viivan leveys on  $20 \mu\text{m}$ . Näytteenottotaajuutta ja integrointiaikaa voidaan muuttaa vastaavasti kuin spektrometrilla. /14, 20, 21/

#### 4.5 Vasteajan mittaussyksikkö

Vasteajan mittaussyksiköllä (RTM, response time module) voidaan suorittaa temporaalisia mittauksia. Laite käsittää valodiodin ja objektiivin jotka on koteloitu SS220:n runkoon. Objektiivi on vastaava kuin CCD-kamerassa ja sen aukkoarvoa voidaan säätää  $1,6$ – $16$ . Linssin takana on lämpöpeili, joka eliminoi infrapunavalon. Näytteenottoväliä voidaan säätää  $0,1$ – $4000 \text{ ms}$  ja tarkkuudeksi valmistaja ilmoittaa  $100 \mu\text{s}$ . /20/

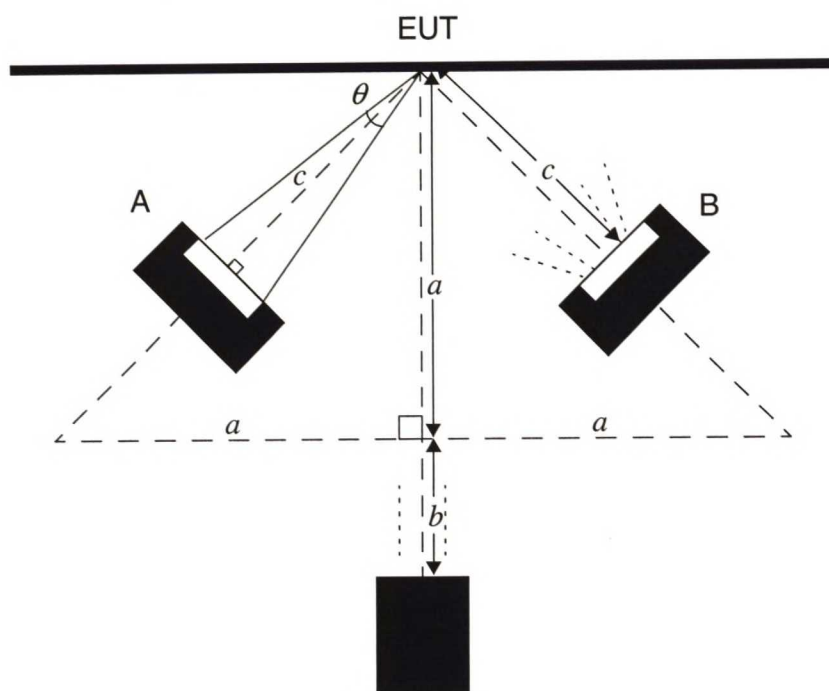
Ohjelmallisesti voidaan tahdistaa mittausten ottohetki tarkasti haluttuun aikajaksoon, jonka pituutta voidaan säätää. Mittaustuloksia voidaan suodattaa digitaalisella suodattimella (moving window average filter), joka on käsitelty luvussa 3.4.5. /20/

## 4.6 Valonlähde

Mittauslaitteiston mukana toimitetaan erillinen valonlähde Schott-Fostec LLC DCR II. Valonlähteenä toimii volframihalogeenihehkulamppu. Lamppu on koteloitu samaan kuo-reen 150 W:n virtalähteen, tuulettimen ja ohjauselektronikan kanssa. Valo ohjataan opti-sella kuiduilla valaisemaan mittausaluetta. /18/

Halogeenilampun toimintaperiaate on vastaava kuin tavallisen hehkulampun. Sillä pääs-tään kuitenkin yli 3000 °K:n lämpötilaan, mikä parantaa sen hyötysuhdetta ja sen valkoi-sen valon värilämpötila on lähempänä päivänvaloa. Lampun kuvun sisällä on halogeeni-kaasua. Halogeenikaasu estää hehkulangasta irtoavien volframiatomien tarttumisen kuvun pintaan kuljettamalla ne takaisin hehkulankaan. /29, 41/

ISO 13406-2:ssa tarvittava hajavalaistus synnytetään kuvan 24 mukaisella kokoon-panolla. Pallomaista valonlähdettä simuloidaan käyttämällä kahta tarpeeksi suurta ympyränmuotoista valonlähdettä 45°:een kulmissa pinnan normaaliin nähden. Joissain tapauksissa näyttö voi toimia epäoptimaalisesti tällä kulmalla ja tällöin voidaan valon-lähteet asettaa 30°:een kulmiin pinnan normaaliin nähden. Mittalaite sisältää myös tämän mahdollisuuden. Kuvassa 24 esitetyn kokoonpanon janojen  $a$ ,  $b$  ja  $c$  pituudet ovat  $60 \pm 1$  mm,  $10 \pm 3$  mm ja  $41 \pm 1$  mm. /64/

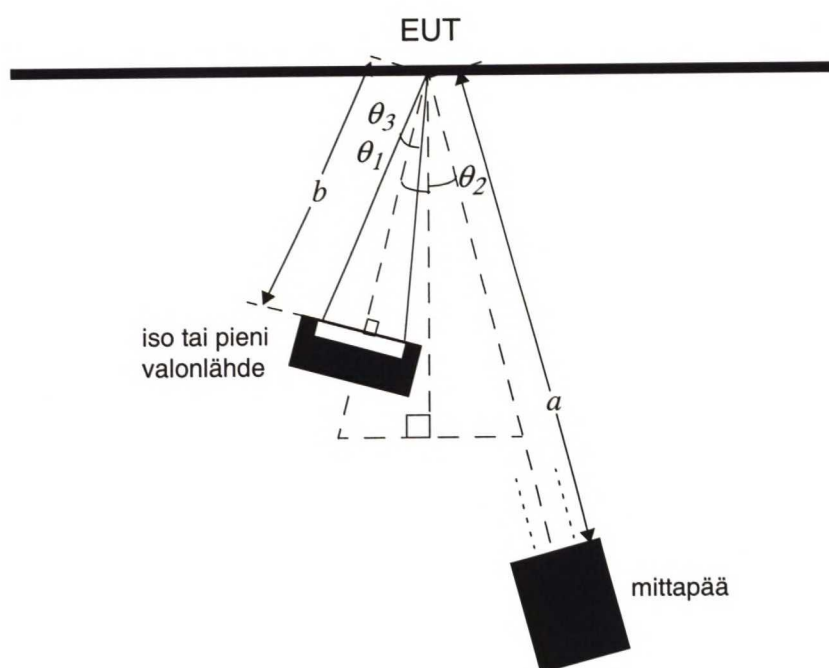


**Kuva 24.** Hajavalaistuksen luomiseen käytettävä kokoonpano. EUT on mitattavan näytön pinta, A ja B ovat valonlähteet

Valonlähteen valaiseva pinta on pyöreä, halkaisijaltaan noin 12,5 mm. Kulmaksi  $\theta$  saa-daan noin 17,3°. Tämä täyttää ISO 13406-2:n ehdon hajavalonlähteelle. Mittapäätä voi-daan kääntää maksimissaan 72° pinnan normaaliin nähden. Mittapäää kääntyy pitkin

ympyrän kehää, jonka säde on jana  $a+b$  ja keskipiste janojen  $a$  ja  $c$  leikkauspisteessä, siten että mittaus tapahtuu aina ympyrän keskipisteestä. Ympyrä sijaitsee pinnalla, joka on kohtisuorassa näytön pintaan ja janaan  $b$  nähden. /64/

Heijastusmittauksissa tarvitaan isoa ja pientä valonlähdetä. Pienen valonlähteen tulee olla alle  $1^\circ$ :n kokoinen näytönpinnasta katsottuna ja vastaavasti ison valonlähteen yli  $15^\circ$ :n kokoinen (suositus  $30^\circ$ ). Mittapään näkökentän (AFOV) tulee olla alle  $0,3^\circ$  pienellä valonlähteellä mitattaessa ja  $1-2^\circ$  isolla valonlähteellä. Mittauskokoontalon tulee mahdollistaa konfiguraation säätämisen  $0,2^\circ$  tarkkuudella, jotta mittaus voidaan kohdistaa valonlähteen aiheuttamaan suuntaheijastukseen. Mittausasetelma on kuvan 25 kaltainen. Mittapää ja valonlähde ovat samassa tasossa kumpikin  $15^\circ$ :n kulmassa pinnan normaaliin nähden, mutta vastakkaisilla puolilla. /64/



**Kuva 25.** Heijastusmittauksissa käytettävä mittauskokoontalo. EUT on mitattavan näytön pinta

Isolla valonlähteellä mitattaessa janojen  $a$  ja  $b$  pituudet ovat  $70 \pm 1$  mm ja  $40 \pm 1$  mm. Valonlähteen halkaisija on noin 12,5 mm, jolloin sen kulmakoko on noin  $18^\circ$ . Pieni valonlähde voidaan sijoittaa kolmeen kulmaan  $\theta_1$ ,  $15^\circ$ ,  $30^\circ$  ja  $45^\circ$ . Etäisyys  $b$  on 185 mm. Valonlähteen halkaisija on 5 mm. Tällöin pienen valonlähteen kulmakoko  $\theta_3$  on  $1,5^\circ$ . Iso valonlähde täyttää ISO 13046-2:n asettaman ehdon. Pieni valonlähde on hieman liian iso. /64/

## 5 MITTAUKSET

### 5.1 Yleistä

Mittausten tarkoituksena oli toisaalta selvittää mittalaitteen toimintakunto ja toisaalta selvittää, minkätyyppiset mittaukset karakterisoivat parhaiten tietyn tyyppisiä näyttöjä. Mittaukset suoritettiin kahdessa vaiheessa. Esimittauksilla tutkittiin pääasiassa pöytänäyttöjä ja mittauksia pyrittiin tekemään mahdollisimman paljon pohtimatta tarkemmin niiden tarkoituksenmukaisuutta. Varsinaisissa mittauksissa keskityttiin vain joihinkin osa-alueisiin.

Sekä esimittaukset että varsinaiset mittaukset jaettiin kahteen osaan standardien ISO 13406-2:n ja VESA FPDM:n mukaisesti. ISO 13406-2:n esimittauksissa kehitettiin mittausproseduureja ja arvioitiin puuttelisia kohtia. Varsinaisissa mittauksissa suoritettiin mittaukset niin toistettavasti kuin mahdollista. VESA FPDM:n esimittauksissa suoritettiin kaikki luvussa 3.4 käsitellyt mittaukset. Varsinaisissa mittauksissa tutkittiin vain kulmariippuvaisia mittauksia, joita täydennettiin esimittauksiin nähden. Taulukossa 12 on nähtävillä mittauksissa mukana olleet näytöt. Ne valittiin sen perusteella, mitä kulloinkin oli käytettävissä. Mittaukset aloitettiin pääasiassa pöytänäyttöillä. Loppua kohden kämmentietokoneitten määrä mittauksissa kasvoi.

**Taulukko 12.** *Mittauksissa mukana olleet näytöt*

<b>Esimittaukset</b>	<b>ISO 13406-2</b>	<b>VESA FPDM</b>
Mitatut näytöt	Fujitsu-Siemens 3814FA Fujitsu-Siemens 3851FA Fujitsu-Siemens C381FA Fujitsu-Siemens C383FA	Fujitsu-Siemens 3814FA Fujitsu-Siemens 3851FA Fujitsu-Siemens C381FA Fujitsu-Siemens C383FA Hewlett-Packard Jornada 548
<b>Varsinaiset mittaukset</b>	<b>ISO 13406-2</b>	<b>VESA FPDM</b>
Mitatut näytöt	Fujitsu-Siemens 3814FA Fujitsu-Siemens 3851FA Fujitsu-Siemens C381FA Fujitsu-Siemens C383FA Compaq iPAQ 3630 Palm m505	Fujitsu-Siemens 3814FA Fujitsu-Siemens 3851FA Fujitsu-Siemens C381FA Fujitsu-Siemens C383FA Compaq iPAQ 3630 Nokia 9210 Communicator Palm m505

Seuraavissa luvuissa on käsitelty erikseen ISO 13406-2 ja VESAn FPDM -standardimittaukset. Ennen näyttöjen mittauksia tehtiin määrittäviä mittausympäristöstä, jotta voitaisiin todentaa sen luotettavuus standardien vaatimuksiin nähden.

ISO 13406-2 -standardimittaukselle laadittiin ohje, joka on nähtävissä liitteessä 6. Ohjeen tarkoituksena on antaa käytännön työskentelyohjeita mittausten läpiviemiseen luotettavasti ja toistettavaksi. Ohje ei anna perusteellisia valmiuksia mittausten suorittamiseen, vaan käyttäjän tulee olla perehtynyt laitteiston toimintaan jo entuudestaan. Ohjeessa on yleisiä mittauksiin liittyviä ohjeita, joista voi olla hyötyä myös muita kuin ISO 13406-2 -mittausta tehtäessä.

## 5.2 Mittausympäristö

Mittaushuoneen pimeyttä eli huoneessa olevan hajavalon määrää tutkittiin mittaamalla luminanssi diffuusistandardin pinnalta, joka oli mitattavan näytön paikalla. Kokoonpano vastasi VESA FPDm:ssä luvussa 301-2f esitettyä menetelmää. Tämän perusteella diffuusistandardin pinnalta mitatun luminanssin tulisi olla alle  $0,32 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Kuitenkin tehtäessä mittauksia alle  $3 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ :n luminanssitasolla, tulisi hajavalon aiheuttaa alle kymmenesosan virheen mitattavaan luminanssiin. Mittauksen perusteella käyttämällä verhoja mitattavan näytön ympärillä voidaan hajavalon pienentää lukemaan  $0,001 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Ilman verhoja lukema on  $0,2 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Nämä tulokset täyttävät edellä mainitun ehdon. /71/

Mittalaitteen mukana toimitetun valonlähteen lämpenemisen vaikutusta lampun valaisusvoimakkuuteen tutkittiin mittaamalla lampun valaiseman pinnan luminanssiarvoa. Schott-Fostec LLC DCR II -valonlähteen tekniset tiedot on käsitelty luvussa 4.6. Lampun aiheuttaman luminanssin todettiin saavuttavan alle 2 %:n huojunnan 10 sekunnin päällä olon kuluttua. Lampun valmistaja lupaa alle 2 %:n huojunnan 5 minuutin päällä olon jälkeen. Mittalaitteen valmistaja suosittelee viiden minuutin lämpenemisaikaa. /13, 18/

Mittausten joustavan suorittamisen kannalta päädyttiin ratkaisuun, jossa ennen mittausten aloittamista annetaan valonlähteen olla päällä puoli tuntia. Mittausten aikana valonlähde joudutaan sammuttamaan useaan kertaan. Uudelleen käynnistämisen jälkeen valonlähteen annetaan lämmitä vähintään 10 sekuntia ennen mittausten aloittamista.

Mittalaitteen goniometriosan mittapään havaittiin olevan virheellisesti vinossa esimitausten aikana. Tämä saatiin korjattua kohtuullisella tarkkuudella siten, että kohtisuora suunta arvioitiin mittaamalla näytön pinnalta luminanssia. Mitatun luminanssin tulisi pysyä vakiona, vaikka atsimuuttikulmaa muutetaan. Tutkimukseen valittiin näyttö, jonka luminanssi muuttuu oleellisesti katselukulman funktiona.

## 5.3 ISO 13406-2:n suorittaminen SS230-mittauslaitteistolla

### 5.3.1 Esimittaukset

Mittalaitteen valmistaja on toteuttanut SS230-mittalaitteeseen ISO 13406-2:n mukaisen mittausympäristön, joka sisältää sekä ohjelmiston että lisälaitteita mittausten suorittamiseen. Kuitenkin tämän havaittiin olevan selvästi puutteellinen joidenkin mittausten osalta. Puutteellisella kokoonpanolla suoritettiin esimittauksia ennen kuin valmistaja toimitti laitteistopäivityksen.



Mittausohjelmiston osalta standardimittaus on jaettu seitsemään mittausproseduuriin ja viiteen erilliseen kalibrointimittaukseen. Ennen mittauksia asetuksiin tulee määrittää asetustiedot, kuten suunnitteluarvot ja näytön tiedot. Ensimmäinen mittaus on mittalaitteen akselien ääripäiden määrittäminen. Tämä mittaus tulee kyseeseen vain silloin, kun mitataan näyttöä, jonka kuvapinnan ympärillä ei pääse vapaasti liikkumaan. Mittauksella määritetään raja-arvot, joiden yli mittalaite ei missään vaiheessa liiku. Näin vältetään näytön ja mittalaitteen vaurioituminen.

Toinen mittaus sisältää testipisteiden ja -kulmien määrittämisen. Mittausohjelma piirtää automaattisesti oikean kokoisen testikuvan näytön pikselimäärän perusteella. Mittaus suoritetaan kaikista yhdestätoista testipisteestä, vaikka mittauspisteet menisivät päällekkäin. Tulosten raportointivaiheessa tämä tulee ottaa huomioon ja poistaa tarpeettomat pisteet. Ylimääräisten mittauspisteiden lisääminen ei ole mahdollista. Kuitenkin CL-, LL- ja HL-kohdat (kts. lyhenteet s. xi) voidaan asettaa manuaalisesti. Myös mittauskulmien määrittämiseen voi tehdä poikkeuksia. Muutoin ohjelma määrittää ne automaattisesti asetustietojen pohjalta standardin määritysten mukaisesti.

Kolmas mittaus on kromaattisuuden tasaisuuden määrittäminen. Ohjelma suorittaa mittauksen automaattisesti CL-, LL- ja HL-kohdista. Valmistajan tekemässä mittausohjelmistossa oli väriarvojen määrittämisessä virhe. Ohjelma raportoi värillisyydsarvot CIE 1931 x y -koordinaatistossa CIE 1976 u' v' -koordinaatiston sijaan. Tämä kohta korjattiin mittausohjelmaan.

Neljäs mittaus on värierojen määrittäminen. Tässä mittauksessa tarvitaan diffuusistandardia ja hajavalonlähteitä. Mittausohjelma ilmoittaa mittautuloksena sekä spektrin alueella 360–830 nm että tristimulusarvot. Mittalaite laskee tristimulusarvot spektristä, joten ne ovat yhtä luotettavia kuin spektriarvot. Tämän perusteella mittauksissa käytettiin tristimulusarvoja.

Myös luminanssin ja kontrastin mittauksessa tarvitaan diffuusistandardia ja hajavalonlähteitä. Mittausohjelmistossa havaittiin esimitauksia tehtäessä virhe luminanssilukemassa. Mittauskohdasta CL-1 tehtävä mittaus pimeässä  $Y_{dark,HS(n)}$  suoritettiin väärällä kulma-asetelmalla. Esimitauksissa tämä kohta oli virheellinen. Varsinaisiin mittauksiin se korjattiin. Standardin taulukon 42 heijastusmittarin lukemissa havaittiin negatiivisia arvoja. Näiden arveltiin johtuvan mittaushuojunnasta, koska luvut olivat hyvin lähellä nollaa.

Heijastusmittaukset isolla ja pienellä valonlähteellä olivat esimitauksissa erittäin puutteellisia ja mittautuloksia voidaan pitää virheellisinä. Pieni valonlähde ei täyttänyt standardin vaatimusta. Esimitausten kokoonpanolla valonlähde oli sijoitettu hyvin lähelle mitattavaa näyttöä, josta seurasi, että sen mittapälle heijastuva kuva oli niin pieni, että mittapään mittausalueen koko oli sitä suurempi. Myöskin valonlähteen tuottama valo ei ollut tarpeeksi voimakas. Ison valonlähteen kiinnityskohta oli virheellinen siten, että valonlähde ei ollut 15°:n kulmassa pinnan normaaliin nähden, vaan noin 10°:n kulmassa.

ISO 13406-2:n sisältämät kalibroinnit on jaettu viiteen erilliseen mittausohjelmaan.

Kumpikin valonlähde kalibroidaan erikseen sekä myös diffuusi- ja peiliheijastusstandardit. Luminanssin lisäksi standardeista ja valonlähteistä mitataan spektri. Viides

kalibrointi on toleranssi, joka suoritetaan diffuusistandardin pinnalta. Esimittauksessa ei pystytty suorittamaan standardien kalibrointia puutteellisen pienen valonlähteen vuoksi. Valonlähdettä ei pystytty mittaamaan kolmella kulma-asetelmalla, 15°, 30° ja 45°. Tämän vuoksi laskutoimituksissa käytettiin tehdasarvoja. Tosin standardien tehdaskalibrointi ei ollut enää voimassa.

Mittaukseen laadittiin automaattinen raportointilomake MS Excel -ohjelmaan. Mittauslaitteesta saatava lokitiedosto ladataan Excelliin, jossa ohjelma suorittaa automaattisesti tulosten jalostamisen lopulliseen muotoon. Raportointilomakkeeseen on jaoteltu eri toiminnot eri välilehdille. Ensimmäiselle välilehdelle *logfile* ladataan mittausohjelmiston lokitiedosto. Välilehdelle *data* kerätään mittaustulokset Excelin *vlookup*-komennolla. Tässä vaiheessa jaotellaan mittaustulokset standardin mukaisesti taulukoihin laskutoimitusten helpottamiseksi. Välilehti *calc* sisältää lähes kaikki laskutoimitukset. Tulosten arviointia varten välilehdelle laadittiin myös automaattisia rutiineja testaamaan mittaustuloksia.

Seuraavat välilehdet on tarkoitettu tulostettavaksi lopulliseen raporttiin. Välilehti *cover* on kansisivu ja välilehdelle *summary* kootaan tiiviissä muodossa kaikkien standardin vaatimusten päättelytulos. Välilehti *spec* sisältää näytölle ennen mittauksia määritetyt tiedot, kuten merkki, malli ja sarjanumero sekä tekniset tiedot, kuten koko, värien määrä ja ISO 13406-2:n mukaiset suunnitteluarvot. Loput kaksi välilehteä *chap7* ja *chap8* vastaavat standardin seitsemännettä ja kahdeksannetta lukua. Seitsemäs luku sisältää vaatimukset. Välilehdellä arvioidaan automaattisesti tai manuaalisesti jokainen vaatimus ja näytön soveltuvuus siihen. Osa vaatimuksista on niin monimutkaisia, ettei niiden automaattinen käsittely ole mahdollista Excellissä. Välilehdelle merkittiin ne kohdat, jotka tulee tarkistaa manuaalisesti. Kahdeksannen luvun mukainen välilehti sisältää kaikki mittaustulokset ja niihin kohdistuvat laskutoimitukset standardin taulukoiden mukaisesti. Mittaustuloksia havainnollistettiin muutamalla kuvalla, kuten testipisteiden polaarisuudella ja väriavaruuden kuvaajalla. Esimittauksissa osa välilehdistä oli puutteellisia. Raporttiin tulostettiin vain välilehti *chap8* ja lyhyesti mitattavan näytön tiedot.

Esimittaus suoritettiin neljälle pöytänäytölle, jotka valikoituivat sen perusteella, mitä mittausten suorittamisen aikana oli saatavilla. Näytöt olivat lainassa näyttöjen valmistajalta. Tutkimuksen kannalta ei koettu tarpeelliseksi saada kattavaa otosta markkinoilla olevista pöytänäytöistä. Liitteessä 1 on näyttöjen tekniset tiedot ja mittauksissa käytetyt suunnitteluarvot. Näytöt ovat kaikki 15”<sup>2</sup>:n kokoisia ja niiden pikseli- ja värimäärät ovat samat, 1024×768 pikseliä ja 2<sup>24</sup> väriä. Pikselikoko on näin ollen kaikissa sama 297 μm vaaka- ja pystysuuntaan. Näytöt ovat aktiivimatriisitekniikkaan perustuvia ja yksi niistä on toteutettu MVA-tekniikalla (3851FA). Suunnitteluarvojen osalta pöytänäytöissä käytettiin samaa näytön pintaan nähden kohtisuoraa katselusuuntaa ja katselusektori oli 60°. Suunnitteluvalaistusvoimakkuus oli 500 lx ja referenssivalkoinen 100 cd·m<sup>-2</sup> CIE 1976 -värikoordinaateilla  $u' = 0,198$  ja  $v' = 0,468$ . Katseluetäisyytenä käytettiin 500 mm:ä ja mittaus tehtiin sekä positiivisen että negatiivisen polariteetin ruuduille. Heijastusuokaksi, pikselivirheluokaksi ja katselusuuntaluokaksi arvioitiin kaikille näytöille luokka I. Näyt-

töjen kirkkaus-, kontrasti- ja värisäätimet olivat tehdasasetuksilla. Jokaiselle näytölle tehtiin ennen mittauksia automaattinen säätötoimenpide, joka asettaa ajoituksen oikein, jotta kuva toistuu parhaalla mahdollisella tavalla.

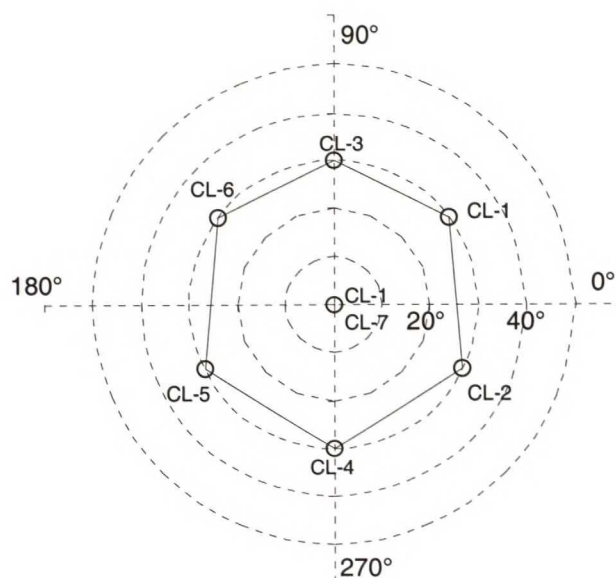
### 5.3.2 Esimittausten tulokset

Liitteessä 2 on nähtävissä mittaustulokset. Taulukkoon 13 on koottu testipisteiden määrittämisen tulokset. Tulokset osoittavat, kuinka paljon luminanssi vaihtelee eri kohdissa näytön pintaa. HL-kohta löytyy läheltä näytön keskipistettä ja vastaavasti LL-kohta jostain kulmasta. Luminanssitasossa on vaihtelua näyttöjen kesken. Tähän vaikuttaa suuresti kirkkaus- ja kontrastisäätimien asento. Varsinaisissa mittauksissa tähän tultaneen kiinnittämään erityistä huomiota.

**Taulukko 13.** Testipisteiden määrittämisen tulokset /kts. lyhenteet sivu xi /

Näyttö	CL / cd · m <sup>-2</sup>	HL / cd · m <sup>-2</sup>	HL-kohta	LL / cd · m <sup>-2</sup>	LL-kohta
3814FA	157,3	154,1	44	112,8	91
3851FA	137,6	136,4	66	114,8	19
C381FA	189,8	207,0	22	179,8	11
C383FA	144,3	140,0	44	99,9	91

Testikulmiksi määritettiin jokaiselle näytölle samat kulmat, koska näyttöjen mitat ja katseluetäisyys olivat samat. Kuvassa 26 on polaariesitys testikulmien suunnista. Koska katselusuunta oli kohtisuora näytön pintaan nähden, olivat testikulmat myös symmetrisesti normaalin ympärillä. Inkliinaatiokulma oli 30°, koska katselusektori oli 60°.



**Kuva 26.** Polaariesitys testikulmien suunnista

Värillisyyden tasaisuuden mittauksessa määritettiin, kuinka paljon näytön värintoistossa tapahtui muutoksia katselukulman muuttuessa. Taulukossa 68 on esimittauksen tulokset värillisyyden tasaisuuden suhteen. Mittauksessa käytettiin kuudentoista värin palettia.

Taulukossa on suurin laskettu väriero kunkin värin osalta. Väriero saa olla maksimissaan 0,03. Vain näyttö 3851FA täyttää tämän ehdon. Muiden näyttöjen osalta ehto voidaan täyttää, jos katselusektori valitaan pienemmäksi tai katselukulmaluokka IV:ksi.

**Taulukko 14.** Värien tasaisuuden mittausten tulokset. Taulukkoon on koottu suurin laskettu väriero kustakin väripaletin väristä

Väri	3814FA	3851FA	C381FA	C383FA
75% sininen	0,0350	0,0204	0,0163	0,0745
75% vihreä	0,0133	0,0045	0,0121	0,0390
75% syaani	0,0389	0,0118	0,0253	0,0557
75% punainen	0,0558	0,0188	0,0540	0,1366
75% magenta	0,0246	0,0168	0,0450	0,0258
75% keltainen	0,0264	0,0034	0,0153	0,0318
75% harmaa	0,0175	0,0107	0,0305	0,0364
50% harmaa	0,0131	0,0119	0,0347	0,0120
100% sininen	0,0234	0,0148	0,0163	0,0251
100% vihreä	0,0037	0,0031	0,0047	0,0085
100% syaani	0,0148	0,0075	0,0145	0,0588
100% punainen	0,0160	0,0125	0,0138	0,0434
100% magenta	0,0336	0,0116	0,0294	0,0402
100% keltainen	0,0082	0,0022	0,0110	0,0254
Valkoinen	0,0168	0,0067	0,0164	0,0396

Luminanssi- ja kontrastimittauksissa olleiden virheiden vuoksi ei niitä käsitellä tässä. Myös värierojen mittauksen puutteellisuuksien vuoksi ei tuloksia ole järkevää analysoida.

### 5.3.3 Varsinaiset mittaukset

Varsinaiset mittaukset tehtiin samoille pöytänäytöille kuin esimittaukset. Lisäksi ISO 13406-2 -standardimittaus suoritettiin kahdelle kämmentietokoneelle Palm m505:lle ja Compaq iPAQ 3630:lle. Tällä pyrittiin selvittämään, kuinka hyvin erityyppiset laitteet ovat mitattavissa monimutkaisella mittausmenetelmällä.

Valmistaja korjasi pieneen valonlähteeseen liittyvän ongelman tarjoamalla uuden valonlähteen, joka sijoitetaan selvästi kauemmaksi näytöstä ja jonka voimakkuus on suurempi kuin vanhan. Lisäksi mittauspään toimitettiin lisälinssi, jolla mittapään kollimoiva linssi muunnetaan tarkentavaksi, mikä pienentää mittausalueen kokoa. Tämä aiheutti muutoksen luminanssilukemaan, minkä vuoksi määritettiin korjauskerroin.

Valmistaja suosittelee käyttämään neutraalidensiteettisuodattimia kaikissa mittauksissa, joissa käytetään valonlähteitä. Kuitenkin luminanssitasot havaittiin hajavalaistuksessa ja mitattaessa isolla valonlähteellä niin alhaisiksi, että suodattimia ei tarvita. Suodattimien havaittiin aiheuttavan virhettä mittauksiin siinä määrin, että niiden käyttöä pyrittiin välttämään. Näyttöä mitattaessa pienellä valonlähteellä ei suodatinta tarvita, mutta peilihei-

jastusstandardista mitattaessa tarvitaan 1 %:n suodatin. Valonlähteitä kalibroitaessa käytettiin isolle valonlähteelle 5 mm:n aukkoa ja pienelle valonlähteelle tarkentavaa linssi-sovitinta ja 0,1 %:n suodatinta. Liitteessä 6 sijaitsevassa mittaushjeessa on käsitelty mittaussasetelmat yksityiskohtaisesti.

Iso valolähde sijoitettiin hieman eri kohtaan kuin esimittauksissa ja mittausetäisyyttä pienennettiin noin 5 mm. Tällä menettelyllä saatiin ison valonlähteen kulma pinnan normaaliin nähden 15°:een kohtuullisella tarkkuudella. Myös mittauksissa hajavalaistuksessa käytettiin lyhyempää mittausetäisyyttä, jotta mittaus suoritettaisiin tarkemmin standardin keskeltä. Mittausetäisyyden muuttamisen ei havaittu vaikuttavat luminanssituloksiin.

Näytön kirjainmerkkien analyysi tehtiin manuaalisesti. Näytöltä laskettiin ison H-kirjaimen vievät pikselit ja nämä merkattiin raporttiin. Pöytänäyttöille käytettiin 12 pisteen Arial-kirjasinta MS Word 2000 -ohjelmassa. Tämä vastaa normaalia toimistoasetelmaa. Kämmentietokoneille käytettiin niiden omaa merkistöä.

Kämmentietokoneen mittausta varten tehtiin muutoksia mittaushjelmaan. Koska kämmentietokonetta ei voida ohjata mittalaitteen testikuvageneraattorilla, täytyy testikuvat vaihtaa manuaalisesti. Mittaushjelmistoon tehtiin tätä varten keskeytykset. Ponnahdusikkunalla kerrotaan, mikä testikuva tulee milloinkin asettaa. Lisäksi mittapään siirtotapaa jouduttiin muuttamaan. Tavallisesti mittapää asetetaan mittaushkohtaan ajamalla mitattavan näytön pinnalla algoritmi, jonka perusteella mittapää tunnistaa yksittäisen kuvapikselin ja siirtyy sen kohdalle. Tämä ei kuitenkaan toimi kämmentietokoneen tapauksessa, koska ohjaus mitattavan näytön ja mittalaitteen väliltä puuttuu. Tällöin mittapään siirtäminen mittaushkohtaan täytyy tehdä absoluuttisina spatiaalisia siirtoina. Tämä on jonkin verran epätarkempi siirtotapa.

Ennen mittauksen aloittamista keskipisteen hakeminen täytyy tehdä manuaalisesti. Tätä varten kämmentietokoneelle laadittiin testikuva, joka sisältää keskellä ruutua valkoisen neliön mustalla taustalla. Keskipiste löydetään etsimällä luminanssilukeman maksimikohta, koska neliö on hieman pienempi kuin mittaushalueen koko.

Mittalaitteen tehdaskalibrointi ei ollut enää voimassa mittauksia tehtäessä. Mittalaitteen toiminnassa ei havaittu muutoksia, kuten luminanssitason tai väriarvojen merkittävää muuttumista, aikaisempiin mittauksiin nähden. Täten mittaustulosten voidaan päätellä olevan oikeellisia.

Kämmentietokoneista Palm m505:n pikselimäärä on 160×160 ja värimäärä 2<sup>16</sup> (liite 1). Sen koko on 3,1” ja se on toteutettu aktiivimatriisitekniikalla. Pikselikoko on hieman pöytänäyttöjä pienempi, vaakasuuntaan 225 μm ja pystysuuntaan 228 μm. Laitteessa taustavalo on sijoitettu näytön etupuolelle ja näyttöpinnan takana on heijastin. Tavallisesti laitetta on tarkoitettu käytettävän heijastavassa tilassa ilman taustavaloa, jolloin ympäröivä valaistus on ainoa valonlähde. Mittauksissa taustavalo oli koko ajan päällä. Compaq iPAQ 3630:n pikselimäärä on puolestaan 240×320 ja värimäärä 2<sup>12</sup> (liite 1). Näytön kuvasuhde on poikkeuksellisesti pienempi kuin yksi, jolloin näyttö on niin sanottu *portrait*-tyyppinen tavallisen *landscapen* sijaan. Pikselikoko on 240 μm ja näyttö on toteutettu aktiivimatriisitekniikalla. Kämmentietokoneet mitattiin 5 mm:n aukolla, jotta mittaushalueen koko olisi tarpeeksi pieni mittaushkohteeseen nähden.

Pöytänäyttöjen kirkkaus- ja kontrastisäädöt poikkeavat esimittauksen säädöistä, koska näyttöjen säätämiseen saatiin valmistajalta tarkempia ohjeita. Kontrasti säädettiin siten, että valkoisen ruudun luminanssi saavutti saturaatiotilan eli kontrastin lisääminen ei enää lisännyt luminanssilukemaa. Kirkkaus säädettiin siten, että mustan ruudun luminanssi oli lähellä  $0,5 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  ja valkoisen ruudun luminanssi lähellä valmistajan ilmoittamaa tyypillistä arvoa, joka valittiin referenssivalkoisen luminanssiksi. Näin referenssivalkoisen luminanssi vaihteli hieman näyttöjen kesken, värikoordinaatit sen sijaan olivat samat. Palmille näytön kirkkautta ei pystytty säätämään. Compaq iPAQille käytettiin tasoa *high bright*. Suunnitteluvalaistusvoimakkuus oli kaikissa pöytänäytöissä 500 lx. Palmille ja Compaq iPAQille käytettiin arvoa 250 lx. Katselusektori kasvatettiin pöytänäytöille esimittauksiin nähden  $80^\circ$ :een, koska valmistajan ilmoittaa näytöille vähintään tämän suuruisen katselukulman. Standardin perusteella tämä on maksimiarvo. Compaqille ja Palmille käytettiin puolta tästä eli  $40^\circ$ :n katselusektoria. Suunnittelukatselusuunta oli kaikille näytöille kohtisuorasuunta. Liitteessä 1 on nähtävissä näyttöjen tekniset tiedot ja myös varsinaisissa mittauksissa käytetyt asetusarvot.

#### 5.3.4 Varsinaisten mittausten tulokset

Mittausraportit on nähtävissä kokonaisuudessaan liitteessä 4. Mittaukset perustuvat ISO 13046-2:n keskeneräiseen versioon WG2 final text for ISO/FDIS. Versio sisältää virheitä, jotka on otettu huomioon mittauksia tehtäessä. Jokaiselle näytölle arvioitiin kaikkiaan 19 vaatimusta. Standardi sisältää kaikkiaan 29 vaatimusta. Näistä kaksi vaatii tarkastelua työskentelyolosuhteissa ja tätä ei ollut mahdollista suorittaa tutkimuksen puitteissa. Viisi vaatimusta perustuu näyttöjen erityisominaisuuksiin ja näitä ei katsottu tarpeelliseksi tarkastella. Temporaalet vaatimukset ja peittoprosentin määrittäminen jätettiin pois, koska niitä käsitellään VESA FPDM -mittauksissa.

Kaikkiaan kuusi vaatimusta todennetaan mittauksilla, jotka on mittalaitteeseen jaoteltu esimittauksissa selitetyllä tavalla. Katseluetäisyys, katselusuunta ja valaistusvoimakkuus ovat määrittystietoja näytön suunnittelua varten. Mittausten suorittamiseen vaikuttavia vaatimuksia ovat polariteetti ja oletusarvoinen väripaletti. Näiden mukaan määräytyvät testikuvat. Seitsemän vaatimusta on kirjainmerkkien esittämiseen liittyviä. Lisäksi pikselivirheet arvioidaan yhdellä vaatimuksella.

Pöytänäytöille testikulmat ovat atsimuuttisuuntaan samat kuin esimittauksissa. Inkliinaatiokulmat ovat suuremmat,  $40^\circ$ . Testipisteet HL ja LL ovat samat esimittauksiin nähden muilla pöytänäytöillä paitsi C381FA:lla (taulukko 15). Tämä johtuu näytön suhteellisen tasaisesta luminanssista koko näyttöpinnan alueella. Palmilla ja Compaq iPAQilla käytettiin vain viittä testipistettä johtuen näyttöjen pienistä mitoista. Nämä olivat kulmapisteet ja keskipiste. Mittaussuunnat olivat käytännöllisesti katsoen samat kuin pöytänäytöillä.

**Taulukko 15.** Testipisteiden määrittämisen tulokset

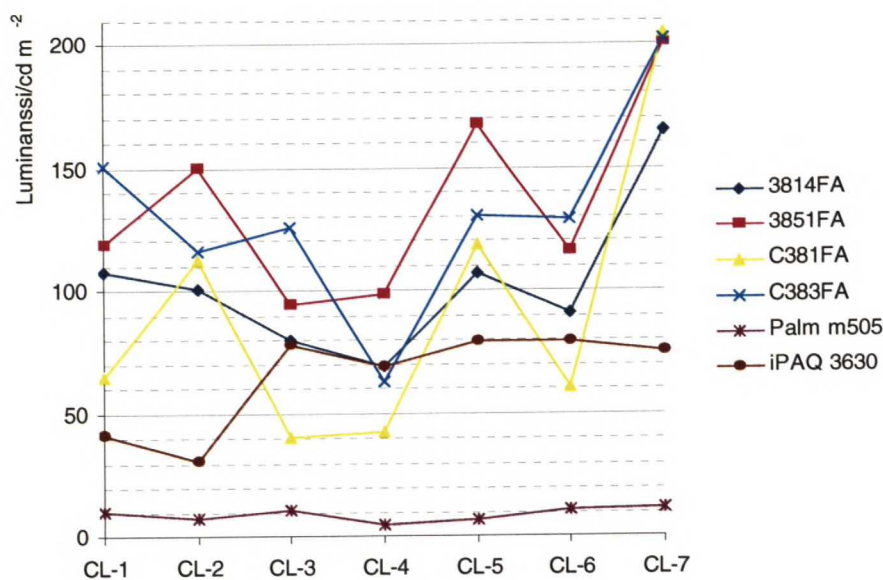
Näyttö	CL / cd·m <sup>-2</sup>	HL / cd·m <sup>-2</sup>	HL-kohta	LL / cd·m <sup>-2</sup>	LL-kohta
3814FA	157,7	155,9	44	114,2	91
3851FA	193,0	191,9	66	153,5	19
C381FA	198,8	215,1	91	192,6	44
C383FA	198,1	193,5	44	143,5	91
Palm m505	8,4	8,6	91	6,7	19
iPAQ 3630	70,2	67,6	91	65,2	99

Kaikille näytöille valittiin luokka IV (kts. määritelmä luvusta 3.3.3 sivulta 31) katselusektoriluokaksi, koska muutoin näytöt eivät olisi täyttäneet kromaattisuuden tasaisuuden ehtoa. Väriero sai pöytänäytöillä olla maksimissaan 0,03 ja kämmentietokoneilla 0,02. Ero johtui kämmentietokoneiden näyttöjen pienemmästä koosta suunnittelu- katseluetäisyydellä. Luokat I–III olisivat todennäköisesti toteutuneet pienemmällä katselusektorilla. Taulukossa 16 on kunkin näytön suurin mitattu väriero paletin väreillä. Palmilla ja Compaq iPAQilla mittaus tehtiin vain viiden värin paletilla, pöytänäytöillä 16 värin paletilla. Pöytänäytöillä pelkästään vihreän värin vaihtelu oli tarpeeksi pieni ehdon toteutumiseksi kaikilla luokilla. Palmilla ehto toteutui valkoisella ja sinisellä värillä, Compaqilla valkoisella ja vihreällä. Myös 3851FA:n valkoinen väri toteutti ehdon.

**Taulukko 16.** Suurimmat mitatut värierot kullekin väripaletin värille

Väri	3814FA	3851FA	C381FA	C383FA	Palm m505	iPAQ 3630
75% sininen	0,175	0,057	0,104	0,192	-	-
75% vihreä	0,070	0,020	0,054	0,089	-	-
75% syaani	0,045	0,024	0,040	0,056	-	-
75% punainen	0,159	0,069	0,142	0,199	-	-
75% magenta	0,073	0,040	0,047	0,094	-	-
75% keltainen	0,034	0,013	0,036	0,053	-	-
75% harmaa	0,029	0,022	0,042	0,041	-	-
50% harmaa	0,036	0,025	0,059	0,035	-	-
100% sininen	0,036	0,042	0,032	0,047	0,019	0,024
100% vihreä	0,008	0,015	0,011	0,013	0,023	0,009
100% syaani	0,032	0,015	0,034	0,054	-	-
100% punainen	0,046	0,052	0,049	0,068	0,023	0,022
100% magenta	0,068	0,027	0,057	0,053	-	-
100% keltainen	0,016	0,009	0,024	0,031	-	-
Valkoinen	0,035	0,014	0,036	0,040	0,010	0,008

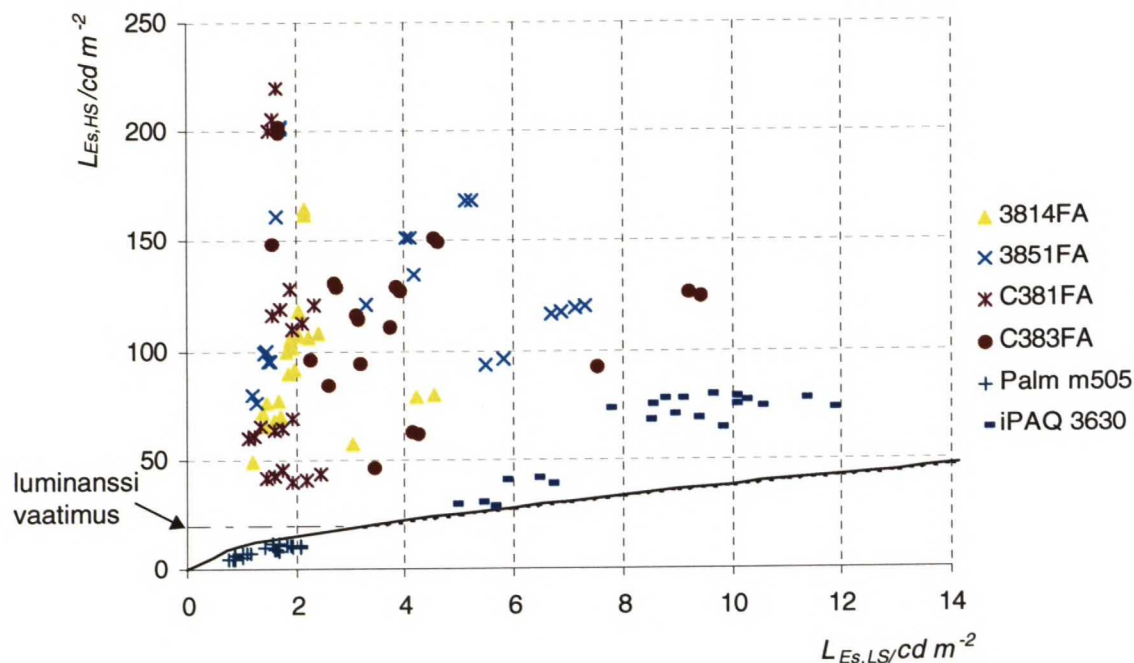
Standardin mukaan näytön luminanssin tulee olla yli  $20 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$  lisättynä toleranssilla. Toleranssiksi mitattiin 0,1. Palmia lukuun ottamatta mittausten näytöt pystyivät tähän luminanssitasoon. Palmin taustavalo oli heikko johtuen näytön heijastavasta luonteesta. Energian kulutuksen vähentämiseksi laitetta on tarkoitettu käytettävän ilman taustavaloa. Pöytänäytöissä kohtisuora suunta (CL-7) oli kaikkein kirkkain. Compaqin luminanssi oli suhteellisen tasainen joka suuntaan. Oikealta puolelta (CL-1 ja CL-2) katsoen luminanssi oli alhaisempi kuin muista suunnista. Tämän arvellaan johtuvan näytön päällystysmateriaalien heijastusominaisuuksista. Pöytänäytöillä suoraan ylhäältä ja alhaalta päin (CL-3 ja CL-4) luminanssi oli alhaisempi kuin sivuilta päin. HL- ja LL-kohdat käyttäytyivät analogisesti CL-kohdan kanssa, koska luminanssit HL- ja LL-kohdissa olivat skaalattu CL-kohdasta mitatuista tuloksista.



**Kuva 27.** Luminanssimittauksen tulokset CL-mittauskohdasta seitsemästä suunnasta

Kontrastin arviointi tehtiin sekä kontrastisuhteesta että -modulaatiosta. Tällä ei kuitenkaan ollut vaikutusta kriteereiden täyttymiselle, koska vaatimukset olivat yhtenevät. Kuvassa 28 on kontrastisuhteen mittaustulokset. Vaaka-akselilla on luminanssin mittaustulos mustasta ruudusta ja pystyakselilla valkoisesta. Kuvaan on merkitty myös kontrastisuhteen raja-arvokäyrä (yhtenäinen käyrä) ja luminanssin raja-arvosuora (katkoviiva). Kuvasta nähdään, että Palm ei täyttänyt kontrastivaatimusta minkään mittaustuloksen osalta. Compaqilla oli yhteen suuntaan (LL-2) liian pieni kontrasti, joten sekään ei täyttänyt standardin vaatimusta kontrastille.

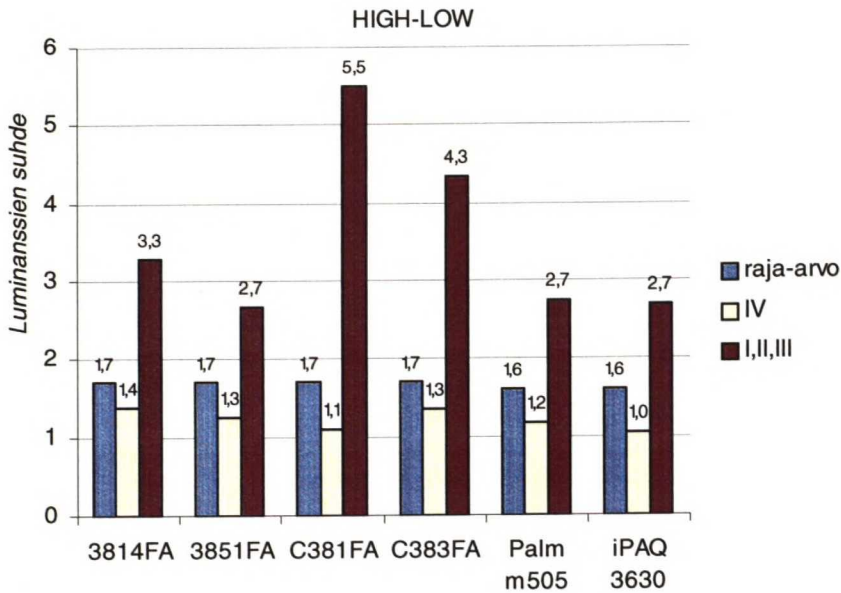




**Kuva 28.** ISO 13406-2:n mukainen kontrastisuhteen ehto

Pöytänäyttöjen kesken ei suorituskyvyssä kontrastin osalta ollut suurta poikkeavuutta. 3814FA kontrastin suurin arvo oli hieman muita pienempi. Kaikki olivat kuitenkin reilusti raja-arvokäyrän yläpuolella. 3851FA:n osalta ei havaittu suorituskyvyssä selvää paremmuutta muihin nähden, vaikka se oli ainoa MVA-tekniikalla toteutettu näyttö.

Luminanssin tasaisuuden osalta kaikki mittauksessa mukana olleet näytöt täyttivät vaatimuksen katselusuuntaluokan IV mukaisesti. Ehtoa tarkasteltiin myös luokkien I–III osalta, vaikka näytöille oli määritetty vain luokka IV. Kuvassa 29 on nähtävissä luminanssien väliset suhteet LL- ja HL-kohdan välillä. Muiden kohtien välisten suhteiden havaittiin noudattavan samaa jakaumaa. Ensimmäinen palkki on näytöille ominainen raja-arvo, joka määräytyy kohtien välisestä etäisyydestä. Keskimääräinen palkki on kohtisuoraan mitattujen luminanssien välinen suhde eli luokan IV mukainen ehto. Kaikkien näyttöjen osalta tämä ehto täyttyy. Oikean puoleinen palkki on pienimmän ja suurimman luminanssin suhde riippumatta mittaussuunnasta eli luokkien I–III ehto. Tässä tuloksessa havaittiin kaikkien näyttöjen osalta suuria eroja. Suurin luminanssien välinen ero oli C381FA:lla, jonka luminanssi oli 5,5 kertaa suurempi HL-kohdassa kuin LL-kohdassa. Lähimpänä raja-arvoa olivat 3851FA, Palm ja iPAQ. Kämmentietokoneiden tulokseen vaikutti mittauksissa käytetty pienempi katselusektori.



**Kuva 29.** Luminanssin tasaisuuden tulokset. Palkit kuvaavat kohtien väliltä laskettujen luminanssien suhteita. Raja-arvo osoittaa suurinta sallittua arvoa

Taulukossa 17 on pienin mitattu väriero näytön värien kesken sekä valkoisen testikuvan luminanssi ja värillisyyssarvot CIE 1976  $L^*u^*v^*$ -koordinaatistossa. Kaikki arvot mitattiin kohtisuorasta suunnasta. Arvojen suuruuteen vaikutti suuresti näytöille asetettu referenssivalkoinen ja suunnitteluvalaistusvoimakkuus. Palm ja 3851FA eivät täyttäneet standardin vaatimusta värierolle, joka oli  $20 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ . Compaq iPAQin väriarvot olivat vahvasti siirtyneet siniseen väriin päin, mikä kasvatti värieron suureksi. Palm ei saavuttanut referenssivalkoista ja tästä johtuen luminanssi jäi alhaiseksi CIE 1976  $L^*u^*v^*$ -muunnoksen jälkeen. Muut näytöt olivat suhteellisen lähellä referenssivalkoista.

**Taulukko 17.** Värieron pienin laskettu tulos sekä luminanssi ja värillisyyssarvot CIE 1976  $L^*u^*v^*$ -koordinaatistossa

Tunnusluku	3814FA	3851FA	C381FA	C383FA	Palm m505	iPAQ 3630
$\Delta E_{uv}^*$	26,8	9,5	23,6	25,2	15,1	64,3
$L^*$	100,8	99,7	107,2	104,2	44,4	98,6
$u^*$	6,7	2,4	-1,0	2,0	0,3	36,5
$v^*$	13,6	7,4	-7,8	-1,7	1,4	-17,5

Värillisyyssarvojen mittauksessa ilmeni ongelmia Palmin ja Compaq iPAQin kohdalla. Tuntemattomasta syystä mittauksesta tulokseksi saadut tristimulusarvot  $X$  ja  $Z$  olivat huomattavasti pienempiä kuin muista mittauksista saadut väriarvot. Asiaa tutkittiin laskemalla spektri-arvoista tristimulusarvot ja niiden todettiin olevan oikeelliset. Tämän vuoksi tuloksissa käytettiin spektri-arvoja, jotka muutettiin tristimulusarvoiksi laskutoimituksilla.

Pöytänäytöt täyttivät standardin ehdot heijastuksille sekä positiivisella että negatiivisella polariteetilla. Kämmentietokoneet eivät täyttäneet ehtoja. Compaq iPAQ täytti ehdot heijastusluokalle III, mutta ei luokille I ja II. Isolla valonlähteellä kontrastiehto heijastusten vaikutusten alaisena ei täytynyt mittaussuunnissa CL-1 ja CL-2 eli oikealta päin katsottaessa. Näytön luminanssi oli selvästi alhaisempi tähän suuntaan kuin muihin suuntiin. Pienellä valonlähteellä luokan I ja II ehdot eivät täytyneet isolla ja pienellä valonlähteellä missään suunnassa. Negatiivisella polariteetilla täytyivät kaikki ehdot mukaan lukien luokan I ehto. Palm täytti myös luokan III mukaiset ehdot. Pienellä valonlähteellä sen suorituskyky oli parempi kuin isolla, mutta kuitenkin ehtojen täytyminen jäi suhteellisen kauas.

Taulukossa 18 on kaikkien näyttöjen heijastusmittauksen tulokset mittaussuuntaan CL-2, joka on oikea alaviisto suunta. Näytöt toimivat yleensä vaakasuunnassa paremmin kuin pystysuunnassa, joten tämän suunnan pitäisi kuvata näytön hyvää toimintaa. Compaqille tämä tosin oli huono suunta. Kolme ensimmäistä tulossaraketta ovat HS-tilassa mitattuja tuloksia ja loput kolme LS-tilassa. Ensimmäinen tulos on luminanssi korjattuna hajavalaistuksen mukaiseen arvoon. Toinen tulos on luminanssi mitattuna ison valonlähteen peiliheijastuksen kanssa ja kolmas tulos pienen valonlähteen kanssa. Loput kolme saraketta ovat samat luminanssit LS-tilassa mitattuina. Tuloksista nähdään, että valonlähteet eivät vaikuttaneet merkittävästi pöytänäyttöjen suorituskykyyn. Mustalla ruudulla vaikutus oli suurempaa. Pöytänäytöt oli päällystetty voimakkaasti diffuosoivalla pintamateriaalilla, joten peiliheijastukset jäivät erittäin pieniksi. Kämmentietokoneilla peiliheijastukset olivat suurempia. Palmin luminanssin alhaisesta tasosta johtuen heijastukset ovat merkittäviä, vaikka ne absoluuttisina luminanssiarvoina olivat pieniä. Compaq iPAQilla luminanssi lähes kaksinkertaistui heijastusten vallitessa. Tummilla ruuduilla heijastukset olivat erittäin haittaavia informaation esittämisen kannalta.

**Taulukko 18.** Heijastusmittauksen tulokset kulmalla CL-2

Näyttö	$L_{Es}$ , HS(CL-2S)	$L_{Es+}$ REFEXT_I, HS(CL-2S)	$L_{Es+}$ REFSML_I, HS(CL-2S)	$L_{Es}$ , LS(CL-2S)	$L_{Es+}$ REFEXT_I, LS(CL-2S)	$L_{Es+}$ REFSML_I, LS(CL-2S)
3814FA	159,4	164,3	159,5	1,5	6,4	1,7
3851FA	197,8	200,7	198,2	1,3	4,2	1,7
C381FA	195,1	200,9	195,5	1,2	6,8	1,5
C383FA	189,3	193,4	189,8	1,4	5,4	2,0
Palm m505	8,6	8,9	10,0	1,4	1,7	2,8
iPAQ 3630	38,9	69,7	76,9	5,7	34,0	41,0

Heijastusmittausten suorittamisessa ilmeni vaikeuksia peiliheijastuksen mittaamisessa. Mittalaitteen kohdistaminen tarkasti luminanssin maksimikohtaan, jossa peiliheijastus on suurimmillaan, oli hankalaa erittäin tarkasta kohdistamisvaatimuksesta johtuen. Tämän vuoksi ei voitu olla täysin varmoja, että ehdoton maksimikohta mitattiin joka suuntaan. Lisäksi näytön päällystyskalvot aiheuttivat useamman heijastuksen, mikä edelleen vai-

keutti peiliheijastuksen löytymistä. Mitattujen pöytänäyttöjen kohdalla huntuheijastus aiheutti pehmeän heijastuksen, jonka maksimikohta oli peiliheijastus. Näiden kohdalla heijastuskäyttäminen saatiin luotettavasti selville.

Kirjainmerkkien osalta pöytänäyttöjen tulokset olivat samat, koska näyttöjen tiedot näiltä osin vastasivat toisiaan. Tuloksiin vaikutti suuresti käyttöjärjestelmän asetukset, jotka olivat Windows 2000:n oletusasetukset. Kämmentietokoneissa tarkastelu tehtiin laitteen käyttöjärjestelmän tarjoamalla tekstinkirjoitusohjelmalla. Pöytänäytöt ja Compaq iPAQ täyttivät standardin vaatimukset. Palmilla puolestaan tuotti ongelmia liian vähäinen pikseleiden määrä merkkejä esitettäessä. Kirjaimet esitettiin 5×7 kokoisella pikselimatriisilla, kun standardin suositus on 7×9. Samaten sanojen välissä oleva pikseleiden määrä oli liian pieni. Sitä vastoin kirjainten koko oli tarpeeksi suuri, johtuen suuresta pikselikoosta. Suunnitelukatselusuuntavaatimus ei täytynyt johtuen liian vähäisestä pikselimäärästä kirjaimissa. Taulukossa 19 on kirjainten korkeus kulmakokona. Kämmentietokoneiden katseluetäisyys määritettiin 400 mm:ksi, kun se pöytänäytöille oli 500 mm. Tämä paransi kämmentietokoneiden näytön luettavuutta hyväksyttävälle tasolle.

**Taulukko 19.** Kirjainmerkkien korkeus kulmakokona minuutteina

Tunnusluku	3814FA	3851FA	C381FA	C383FA	Palm m505	iPAQ 3630
Kirjainmerkin korkeus	24,6'	24,6'	24,6'	24,6'	20,6'	16,6'

Pikselivirheitä ei havaittu visuaalisella tarkastelulla. Näyttöjä on toistaiseksi käytetty vähän, mikä osaltaan selitti virheettömän toiminnan. Mekaaniset vauriot yleistyvät käyttötuntien kasvun myötä nimenomaan nestekidenäytöillä. /71/

Taulukkoon 20 on koottu standardin vaatimusten toteutuminen mittauksessa olleiden näyttöjen osalta. Testatuista ominaisuuksista 3814FA, C381FA ja C383FA täyttivät vaatimukset. Peittoprosentti- vasteaika- ja välkyntämittauksia ei pystytty tekemään luotettavasti mittalaitteen vikaantumisen johtuen. Pöytänäyttöjen valmistaja ilmoittaa C383FA täyttävän ISO 13406-2:n asettamat vaatimukset. Tämän tutkimuksen puitteissa tätä ei pystyttä kumoamaan, mutta ei myöskään todentamaan.

**Taulukko 20.** Yhteenvedo ISO 13406-2:n vaatimusten täyttymisestä tutkimuksessa mukana olleille näytöille

Vaatus	Fujitsu-Siemens 3814FA	Fujitsu-Siemens 3851FA	Fujitsu-Siemens C381FA	Fujitsu-Siemens C383FA	Palm m505	Compaq iPAQ 3630
7.1 Suunnittelukatselutäisyys	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
7.2 Suunnittelukatselusuunta	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	ei	kyllä
7.3 Suunnitteluvalaistusvoimakkuus	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
7.4 Katsekulman ja pään kaltevuus	-	-	-	-	-	-
7.5 Kromaattisuuden tasaisuus	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
7.6 Kirjainmerkin korkeus	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
7.7 Kirjaimen viivan leveys	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
7.8 Merkin leveyden ja korkeuden suhde	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
7.9 Peitto prosentti	-	-	-	-	-	-
7.10 Merkin muoto	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	ei	kyllä
7.11 Merkkien väli	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
7.12 Sanojen väli	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	ei	kyllä
7.13 Riviväli	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
7.14 Luminanssi	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	ei	kyllä
7.15 Kontrasti	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	ei	ei
7.16 Luminanssin tasapaino	-	-	-	-	-	-
7.17 Heijastukset	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	ei	ei
7.18 Polariteetti	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
7.19 Luminanssin tasaisuus	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
7.20 Pikselivirheet	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
7.21 Vasteaika	-	-	-	-	-	-
7.22 Absoluuttinen luminanssikoodaus	-	-	-	-	-	-
7.23 Koodaus vilkuttaen	-	-	-	-	-	-
7.24 Välikyntä	-	-	-	-	-	-
7.25 Oletusväripaletti	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä	kyllä
7.26 Monivärisen objektin koko	-	-	-	-	-	-
7.27 Väriero	kyllä	ei	kyllä	kyllä	ei	kyllä
7.28 Spektrisesti ääripään värit	-	-	-	-	-	-
7.29 Värien määrä	-	-	-	-	-	-

ISO 13406-2 -mittausta tehtäessä tulee kiinnittää erityistä huomiota näytön suunnittelu-arvoihin. Ne tulee selvittää laitteen valmistajalta tai mittauksen tilaajalta tarkasti, jotta jokainen standardin vaatimus voidaan määrittää oikeilla parametreilla. Myös näytön säädöt, kuten kirkkaus, kontrasti ja väriämpötila, vaikuttavat suuresti näytön suorituskykyyn, joten nämä on suositeltavaa myös selvittää etukäteen mittauksen tilaajalta.

## 5.4 VESA FPDM:n suorittaminen SS230-mittauslaitteistolla

### 5.4.1 Esimittaukset

Mittalaitteen valmistaja on toimittanut valmiit mittausproseduurit osaan VESA FPDM:n mittauksista. Nämä on käsitelty luvussa 3.4. Kuitenkin tulosten raportointi oli selvästi puutteellinen. Tämän korjaamiseksi laadittiin MS Excel -ohjelmaan raportointipohja tulosten havainnollista käsittelemistä varten. Mittausten luotettavuutta ja soveltuvuutta tutkittiin saatavilla olleilla neljällä pöytänäyttöllä, jotka olivat samat kuin ISO 13406-2 mittauksissa, sekä yhdellä kämmentietokoneella HP Jornada 548:lla. Pöytänäyttöjen ominaisuuksia on käsitelty luvussa 5.3.1 ja kaikkien näyttöjen tekniset tiedot ovat liitteessä 1.

HP Jornada 548:n on passiivimatriisitekniikalla (CSTN) toteutettu PocketPC -käyttöjärjestelmällä toimiva kämmentietokone. Sen fyysiset mitat ovat likimain samat kuin Compaq iPAQilla. Näyttöruudun koko on 54 mm × 73 mm ja pikselimäärä 240×320. Värisyvyys on 12 bittiä eli neljä bittiä osaväriä kohden ja siis 16 harmaasävytasoa.

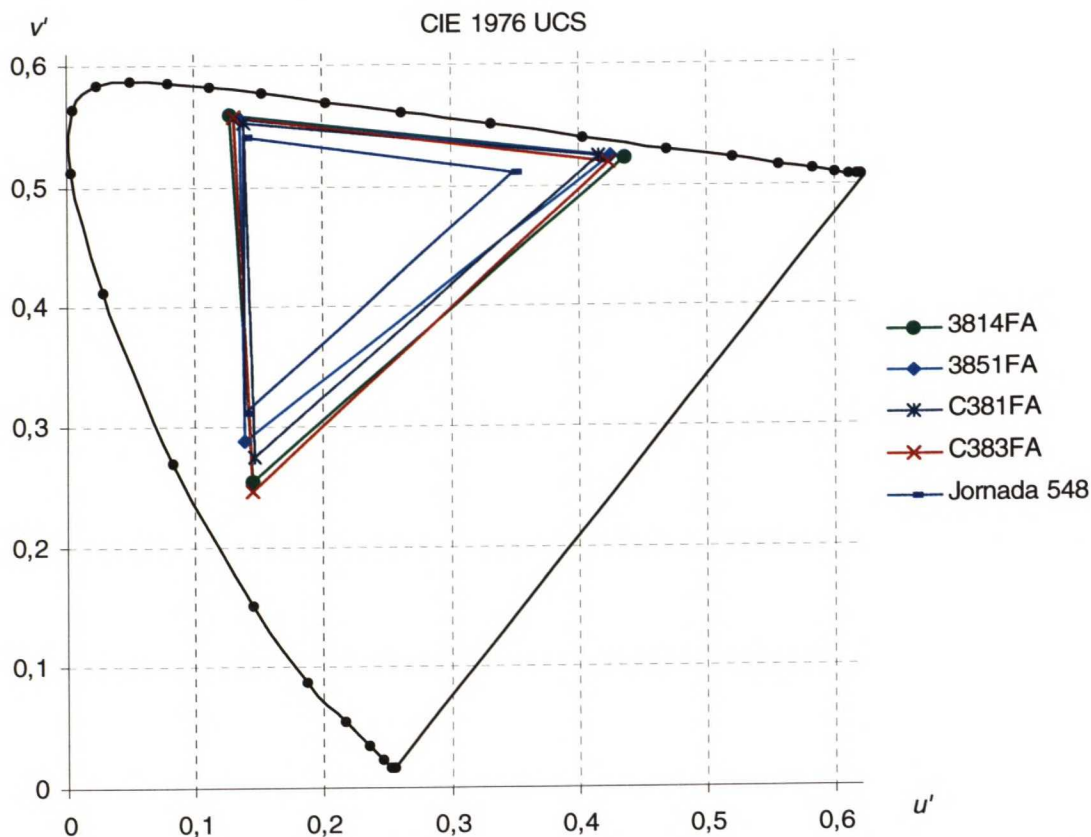
Näytöille suoritettiin kaikki VESA FPDM:n mittaukset, jotka mittalaitteen valmistaja on toimittanut. Spatiaali-, luminanssi-, värillisyyss- ja temporaalimittaukset tehtiin SS210-mittapöydällä ja kulmariippuvaiset luminanssi- ja värillisyyssmittaukset SS220-mittapöydällä. HP Jornadan mittaamista varten tehtiin mittausohjelmiin muutoksia, koska laitteeseen ei ollut mahdollista saada ohjausta mittalaitteesta. Vasteaikamittausta ei pystytty tekemään Jornadalle, koska kyseinen mittaus vaatii reaaliaikaisen ohjauksen mittalaitteesta. Muiden mittausten suorittamista helpottamaan käytettiin Virtual CE Pro -ohjelmaa, jolla voidaan PC-tietokoneelta muodostaa virtuaalinen yhteys kämmentietokoneeseen. Ohjelma esittää kämmentietokoneen ruudun sisällön reaaliaikaisesti ja laitetta voidaan ohjata ohjelman välityksellä. Tämä helpotti mittauksia, koska laitetta voitiin ohjata samasta PC-tietokoneesta käsin kuin millä suoritettiin mittauksia. Esimittauksissa ei mittausalueen kokoa pienennetty erillisellä aukolla.

MS Excel -ohjelmaan laaditun raportointitiedoston toiminta on vastaava kuin ISO 13406-2:lle laaditun. Tiedoston rakennetta yksinkertaistettiin, koska ISO 13406-2:n kohdalla se havaittiin liian monimutkaiseksi. Mittalaitteelta saatava lokitiedosto tuodaan *log file* -välilehdelle. *Data*-välilehdelle kootaan kaikki mittaustulokset järjestettyyn muotoon ja siinä myös suoritetaan kaikki laskutoimitukset. *Report*-välilehti on lopullinen tulosten raportointilomake, jonka sisältö on tulostettavassa muodossa.

### 5.4.2 Esimittausten tulokset

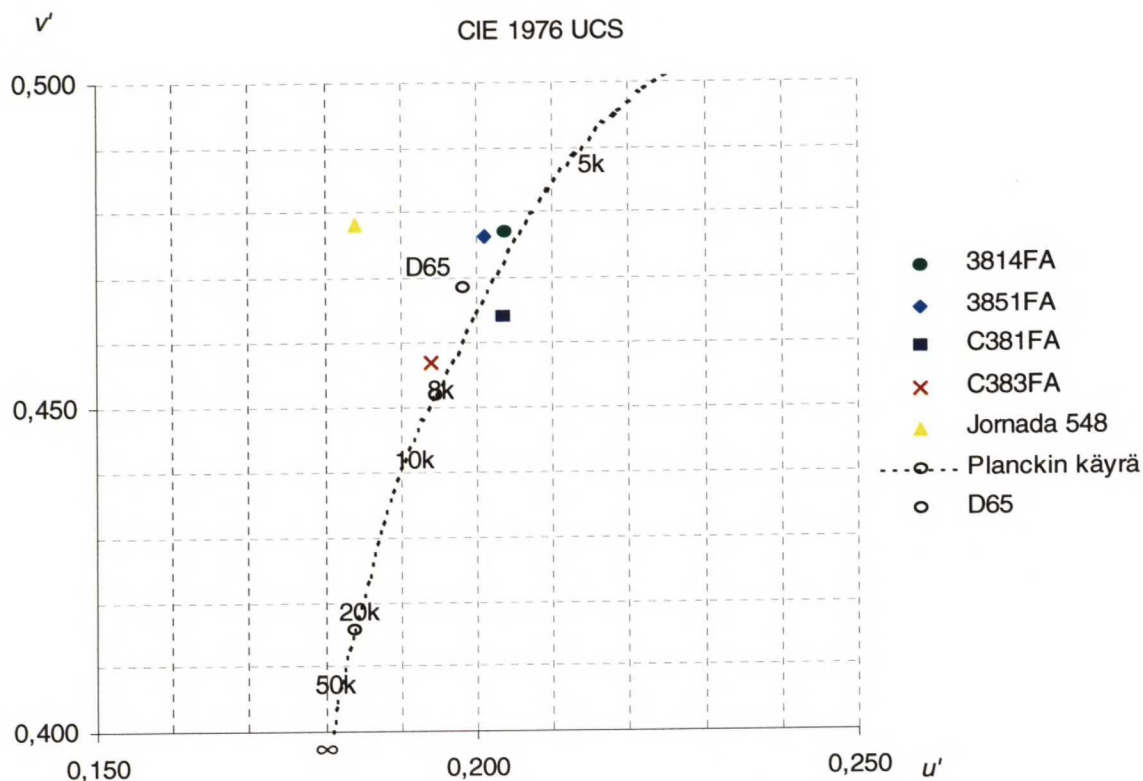
Mittausten tuloksista laaditut raportit ovat liitteessä 3. Luminanssi ja värillisyyssmittaukset tehtiin sekä koko ruudun kokoisella testikuvalla että laatikkokuviolla. Kuvassa 30 on esitetty näyttöjen väriavaruudet CIE 1976  $u'v'$ -koordinaatistossa mitattuna kokoruudulta VESA FPDM:n lukujen 302-1–4 mukaisesti. Mittaukset tehtiin näyttöjen tehdasetuksilla. Pöytänäyttöjen osalta ei väripisteiden sijainnissa ollut suuria eroja. HP Jornadalla puolestaan oli selvästi pienempi väriavaruus, jonka kolmion muoto

oli kuitenkin sama kuin pöytänäyttöjen. Laatikkokuviosta mitatut värikoordinaatit vastasivat erittäin tarkasti koko ruudulta mitattuja arvoja. Pöytänäyttöjen osalta suurin niiden välille laskettu erotus oli 0,002 ja HP Jornadalle 0,01.



**Kuva 30.** Koko ruudun kokoisten testikuvien perusteella määritetty väriavaruus viidelle näytölle

Kuvassa 31 on valkoisten pisteiden sijainti CIE 1976  $u'v'$ -koordinaatistossa. Koordinaatistosta on suurennettu valkoisen pisteen läheisyydessä oleva osa. Näyttöjen säätöjen perusteella valkoisen pisteen tulisi olla lähellä D65-pistettä. Pöytänäyttöjen valkoiset pisteet olivat alle 0,01 yksikön etäisyydellä D65-pisteestä ja sijaitsivat erittäin lähellä Planckin käyrää. HP Jornadan valkoinen piste sijaitsi noin 0,02 yksikön päässä D65:stä, mutta pois päin Planckin käyrästä vihreään väriin päin. Visuaalisesti värivirhe ei ollut havaittavissa. Pöytänäytöt sisältävät säätöjä, joilla voidaan asettaa valkoisen pisteen sijainti tyypillisesti lukemaan 5000–9500 °K. Myös päävärejä voidaan säätää yksilöllisesti, jolloin voidaan asettaa valkoisen pisteen sijainti tarkasti tiettyyn kohtaan. HP Jornadan värikoordinaatteja ei pystytty säätämään.



**Kuva 31.** Valkoisten pisteiden sijainnit suurennetussa CIE 1976 -koordinaatistossa

Näyttöjen luminanssit eivät ole keskenään vertailukelpoisia, johtuen näyttöjen poikkeavista säädöistä. Pöytänäyttöjen luminanssit olivat  $140\text{--}190\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ . Toimistotilan yleisvalaituksen tulisi olla noin  $500\text{ lx}$ :ia ja vastaavasti näytön  $200\text{--}250\text{ lx}$ :ia /12/. Jos näytön ajatellaan olevan täysin heijastava pinta, olisi valaistusvoimakkuutta vastaava luminanssi noin  $80\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ . Kuitenkin yleensä näytölle suositellaan yli  $100\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ :n luminanssia. HP Jornadan luminanssi oli noin  $75\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ :n tasolla. Luminanssin havaittiin laskevan akun varauksen heiketessä. Laatikkokuvioista mitattu luminanssi oli kaikilla näytöillä hieman matalampi kuin koko ruudulta mitattu. Ero oli Jornadalla  $4,4\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$  ja pöytänäytöillä alle  $3\text{ cd}\cdot\text{m}^{-2}$ .

VESA FPDM sisältää runsaasti määrittämiä kontrasteille. Taulukkoon 21 on koottu eri mittauksista saadut kontrastit mitatuille näytöille. Pöytänäyttöjen kontrastisuhteita voitiin pitää erittäin hyvinä, HP Jornadan puolestaan vain kohtuullisena. Täydellä ruudulla ja laatikkokuvioista mitatun kontrastisuhteen ero oli 3814FA:lla, 3851FA:lla ja C383FA:lla alle 4 % ja muilla alle 16 %. Muiden kontrastien osalta näyttöjen keskinäiset erot olivat johdonmukaisia. 3851FA sai parhaimman tuloksen kaikilla kontrasteilla, HP Jornada puolestaan huonoimman. Shakkikuvion kontrasti mitattiin pöytänäytöillä  $5\times 5$  kokoisilla ja Jornadalla  $3\times 4$  kokoisilla ruudukoilla.



**Taulukko 21.** VESA FPDM:n mukaisesti mitatut kontrastit

Kontrasti	VESA FPDM:n luku	3814FA	3851FA	C381FA	C383FA	Jornada 548
Täyden ruudun kontrastisuhde	303-3	408:1	533:1	348:1	323:1	28:1
Laatikkokuvion kontrastisuhde	304-2	408:1	514:1	348:1	271:1	25:1
Laatikkokuvion kontrasti ympäristöön nähden	304-1	372:1	435:1	317:1	223:1	27:1
Poikittainen kontrasti	304-3	330:1	410:1	285:1	204:1	27:1
Shakkiruudukon kontrasti	304-9	213:1	232:1	213:1	104:1	22:1

Luminanssin epätasaisuutta tutkittiin valkoisella, mustalla, tumman harmaalla ja päävärien mukaisilla ruuduilla. Testipisteitä oli yhdeksän, ruudun kulmissa, sivujen puolessa välissä ja keskellä. Epätasaisuus määritettiin suurimman ja pienimmän arvon väliltä prosentteina (taulukko 22). Harmaasta tehty mittausta suoritettiin virheellisesti liian vaaleasta harmaasta ( $r = 32$ ,  $g = 32$ ,  $b = 32$ ). Standardi suosittelee 3–5 %:n harmaata valkoiseen väriin verrattuna. Tämä huomattiin vasta mittausten jälkeen, eikä mittausta voitu enää uusida. Lisäksi määritettiin värieron suurin arvo. Tuloksista nähdään, että osavärien epätasaisuus oli suurempaa kuin valkoisen värin. Myös harmaalla havaittiin suurta epätasaisuutta. Väriero on huomattavasti suurempaa osaväreillä kuin valkoisella ja harmaalla. Jornadan suorituskyky oli hieman huonompi kuin pöytänäyttöjen. Jornada mitattiin akun toimiessa virtalähteenä, mikä saattoi vaikuttaa luminanssin tasaisuuteen.

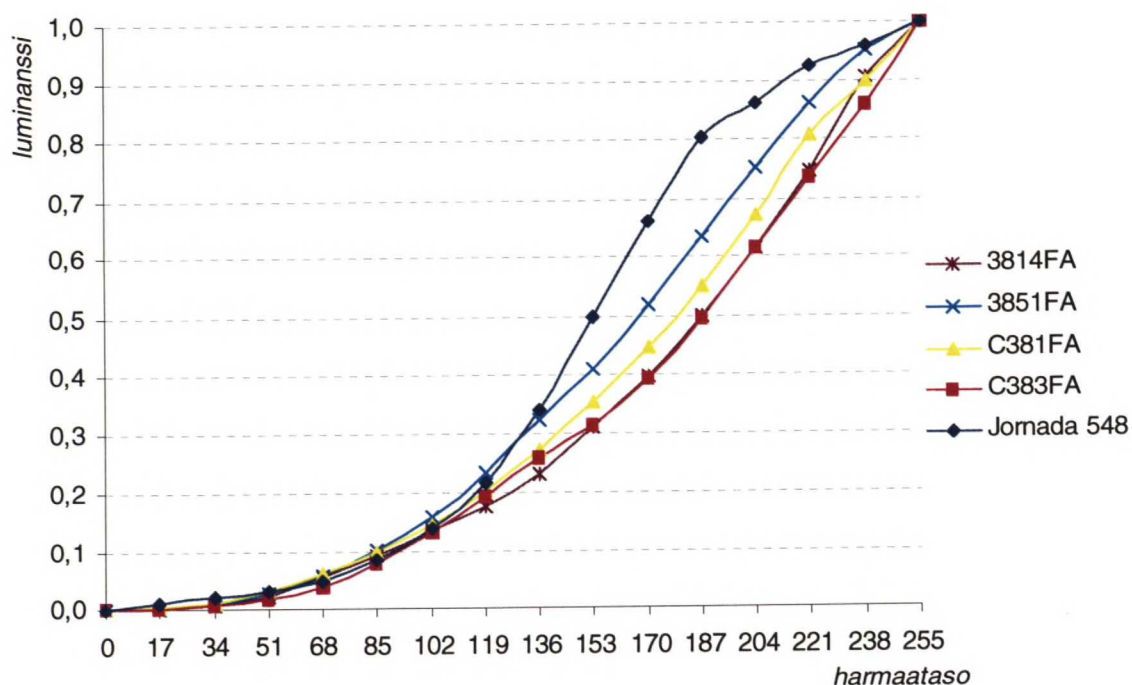
**Taulukko 22.** Luminanssin epätasaisuus ja suurin väriero

Testikuva	3814FA	3851FA	C381FA	C383FA	Jornada 548
Valkoinen	21 % 0,001	13 % 0,002	13 % 0,004	22 % 0,001	27 % 0,012
Musta	31 %	16 %	24 %	27 %	50 %
Punainen	52 % 0,082	51 % 0,075	57 % 0,075	66 % 0,097	30 % 0,021
Vihreä	55 % 0,113	29 % 0,025	46 % 0,030	54 % 0,034	30 % 0,004
Sininen	62 % 0,090	25 % 0,021	38 % 0,040	58 % 0,126	33 % 0,026
Harmaa 13 %	29 % 0,002	51 % 0,002	32 % 0,003	39 % 0,003	62 % 0,018

Mittauksen suorittamisessa aiheutti ongelmia se, että mittalaite ei tallettanut värikoordinaattiarvoja luminanssin ollessa alle  $1 \text{ cd} \cdot \text{m}^{-2}$ , vaan raportoi arvot nolliina. Varsinkin mustaa väriä mittattaessa väriarvot jäivät usein pois. Tämän vuoksi mustasta väristä ei määritetty värieroa. Värieroa laskettaessa ei otettu huomioon nolla-arvoja. Myöhempiä mittauksia varten muutettiin mittalaitteen asetusta siten, että värikoordinaatit

talletetaan aina riippumatta luminanssista. Mittausohjelma määrittää automaattisesti myös värilämpötilan epätasaisuuden. Valkoisen värin ollessa kaukana Planckin käyrästä ei mittalaite ilmoita värilämpötilaa. Värieron voidaan ajatella olevan havainnollisempi suure kuin värilämpötila värien epätasaisuuden tarkastelussa.

Harmaatasojen toistumista tutkittiin sekä täyden ruudun kokoisella testikuvalla että laatikkokuviolla. Tulosten perusteella määritettiin gamma-arvo. Gamma-arvo laskettiin myös osavärien sävyntoistokäyrille. Kuvassa 32 on kaikkien näyttöjen sävyntoistokäyrät. Vaaka-akselilla on harmaatason 0–255. Mittaus tehtiin 16:sta harmaatason. Pystyakselin luminanssi on skaalattu alueelle 0–1. HP Jornadan käyrä erottui selvästi muista. Sen muoto oli STN-näytöille tyypillinen S-kirjaimen muotoinen. 3814FA:n ja 3851FA:n muoto oli myös hiekan samanlainen. Näillä näytöillä oli ongelmia valkoisten harmaatason toistossa. Nestekidenäytöissä vaaleiden sävyjen toisto on tyypillisesti ongelmallista. Vaaleat sävyt sekoittuvat toisiinsa, jolloin niitä ei voida erottaa toisistaan. Tummassa päässä myös dynamiikka ei riitä toistamaan kaikkia sävyjä tarpeeksi hyvin. Tarkemmin tätä ilmiötä voi tutkia ottamalla harmaasävyntäytteitä enemmän, aina 256:een asti ja tutkimalla harmaatason invertoitumista eli sekoittumista toisiinsa. /69/



**Kuva 32.** Harmaasävykäyrät skaalattuna samalle tasolle kaikilla näytöillä

Gamma-arvot määritettiin valkoiselle, punaiselle, vihreälle ja siniselle testikuvalla sekä koko ruudun kokoisella että laatikkokuvion muotoisella testikuvalla. Taulukossa 23 on koottuna kaikki lasketut arvot. Laskemiseen käytettiin MS Excel -ohjelman lineaarisia regressioanalyysifunktioita. HP Jornadan kohdalla laskuista jätettiin alin luminanssitaso huomioimatta, jotta korrelaatiokerroin olisi yli 0,98. Mustan testikuvan luminanssi on vähennetty kaikista tuloksista, jotta nollassa olisi samassa kohdassa. Pöytänäyttöjen täyden ruudun ja laatikkokuvion gamma-arvot vastasivat hyvin toisiaan. Kaikkien näyttöjen perusteella laskettu keskiarvo oli 2,43. Tämä vastasi hyvin katodisädeputkinäyttöjen tyypillistä gamma-arvoa /66/. Sitä vastoin HP Jornadan gamma-arvoissa oli vaihtelua. Laa-

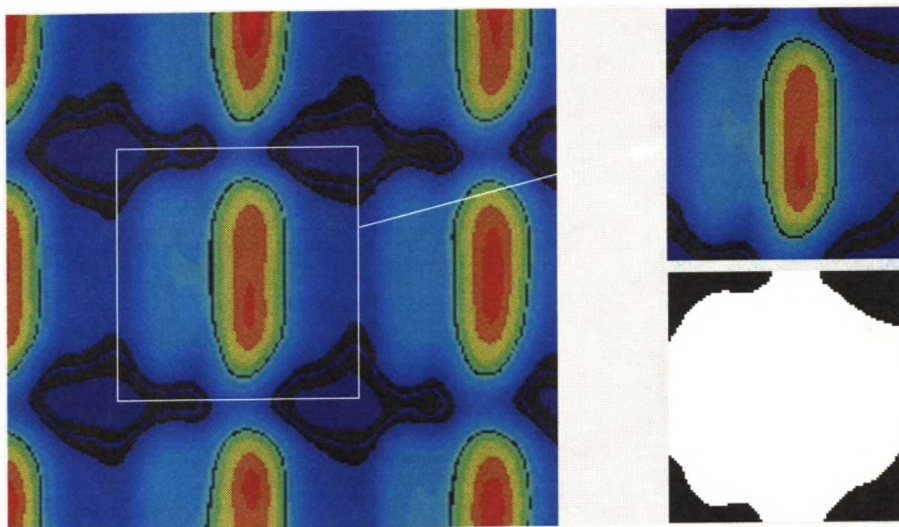
tikkokuvion gamma-arvot olivat selvästi alempia kuin koko ruudulta määritetyt. Tämä johtui sävyntoistokäyrän keskiosasta, joka oli laatikkokuvion kohdalla huomattavasti korkeammalla. Tämän arveltiin johtuvan HP Jornadassa ilmenevästä varjokuvailmiöstä, joka on visuaalisesti selvästi havaittavissa. Näytön passiivimatriisiohjauksesta johtuen eri voimakkuuksiset alueet aiheuttavat toisiinsa virheellistä luminanssia. Esimerkiksi musta laatikko näytön keskellä valkoisella pohjalla aiheuttaa mustan värin leviämisen tarkasti laatikon ylä- ja alapuolelle.

**Taulukko 23.** *Gamma-arvot*

Testikuva		3814FA	3851FA	C381FA	C383FA	Jornada 548
Täysi ruutu	valkoinen	2,45	2,47	2,23	2,60	2,25
	Punainen	2,36	2,45	2,42	2,70	2,94
	Vihreä	2,43	2,59	2,17	2,55	2,16
	Sininen	2,40	2,41	2,15	2,40	2,26
Laatikkokuvio	Valkoinen	2,44	2,45	2,24	2,71	1,47
	Punainen	2,37	2,45	2,40	2,39	1,71
	Vihreä	2,42	2,60	2,17	2,58	1,37
	Sininen	2,35	2,32	2,17	2,83	1,37

Peittoprosentin mittaus havaittiin jälkikäteen virheelliseksi. Näytöltä otettiin kuva vain valkoisesta pikselistä ja määritettiin sen maksimikohdan perusteella kynnysarvokäyrä. Mittaus olisi pitänyt tehdä jokaisesta osaväristä erikseen, jotta kynnyskäyrä olisi määritetty suhteessa osaväripikselin maksimiluminanssiin. Johtuen osavärien huomattavasti poikkeavista voimakkuuksista, määräytyvät kynnysarvokäyrät eri luminanssitasoille. Tämän vuoksi mittaustuloksista tuli erittäin huonoja peittoprosenttiarvoja. Johtuen mitalaitteen kameraosassa ilmenevästä viasta, ei mittausta voitu enää suorittaa uudelleen tämän tutkimuksen puitteissa.

Peittoprosentin määrittäminen voidaan tehdä mitalaitteesta saatavasta kaksiulotteisesta pikselikarttakuvasta, jossa luminanssitasot ovat merkitty näkyviin värein (kuva 33). Kuvankäsittelyohjelmassa voidaan kuvasta erottaa pikselin varaama alue. Saatua kuva kynnystetään raja-arvon mukaisen käyrän kohdalla. Ohjelman histogrammifunktiolla voidaan laskea sekä valkoisen että koko pikselin viemän alueen pikselimäärä, joiden perusteella saadaan selville peittoprosentti. Kuvan 33 mukainen esimerkki on tehty virheellisesti valkoisesta pikselistä ja tämän vuoksi peittoprosentiksi saadaan 80 %.



**Kuva 33.** Peittoprosentin määrittäminen pikselin luminanssijakaumaa esittävästä kuvasta

Taulukkoon 24 on koottu varjokehä- ja luminanssikuormitusmittauksien tulokset. Varjokehän kohdalla prosenttiosuus ilmaisee, kuinka paljon suurin mustasta laatikosta mitattu luminanssi on täyden valkoisen ruudun luminanssista. Ideaalitapauksessa arvon tulisi olla nolla. Mittausten perusteella voidaan päätellä, että mitatuissa näytöissä ei juurikaan ilmene varjokehää. HP Jornadan kohdalla sitä ilmeni hieman enemmän, mutta ei kuitenkaan merkittävästi. Kuormituksen vaikutuksesta aiheutuvaa luminanssin alenemista ei havaittu ollenkaan mittausten näytöillä. Suorituskyky oli näytöillä negatiivista eli luminanssi oli hieman suurempaa koko ruudun kokoisella testikuvalla kuin laatikkokuvalla. Tämän arvellaan johtuvan liian suuresta mittausalueesta mitattaessa 5 % testikuvalla. Jos 5 %:n testikuvalla mitattuja tuloksia ei oteta huomioon, on luminanssin vaihtelun itseisarvo alle 1 %:n. HP Jornadan kohdalla mittausta ei tehty ollenkaan 5 %:n testikuvalla.

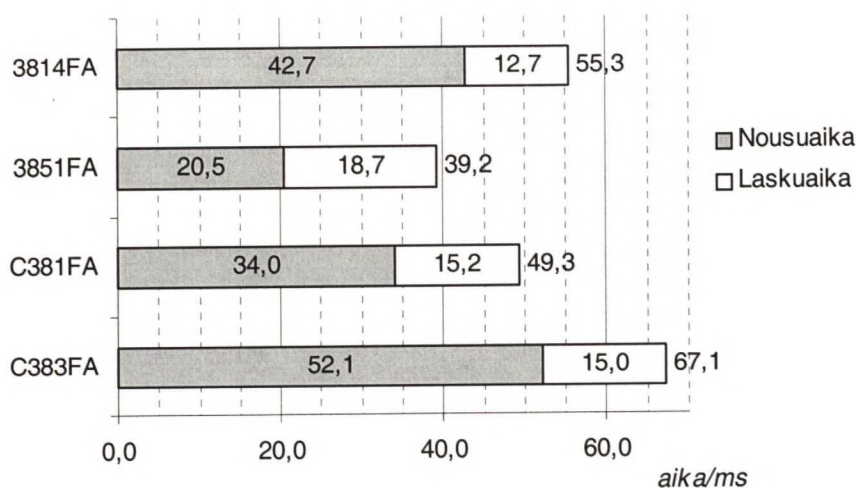
**Taulukko 24.** Varjokehän ja luminanssikuormitusmittauksen tulokset

Tunnusluku	3814FA	3851FA	C381FA	C383FA	Jornada 548
Varjokehä	2,5 %	2,6 %	2,6 %	4,8 %	6,3 %
Kuormitus	-2,7 %	-3,8 %	-2,0 %	-4,9 %	-0,1 %

Mitatuilla näytöillä ei ilmennyt laatikkokuvan koon vaikuttavan luminanssilukemaan. Tämän arvellaan johtuvan näyttöjen toimintaperiaatteesta, jossa pikselit ovat toisistaan riippumattomia yksikköjä. Tämä toteutuu hyvin varsinkin aktiivimatriisinestekidenäyttöjen kohdalla. Katodisädeputkinäytöillä saattaa ilmetä jopa 15 %:n muutoksia luminanssissa laatikkokuvion koosta riippuen /41/.

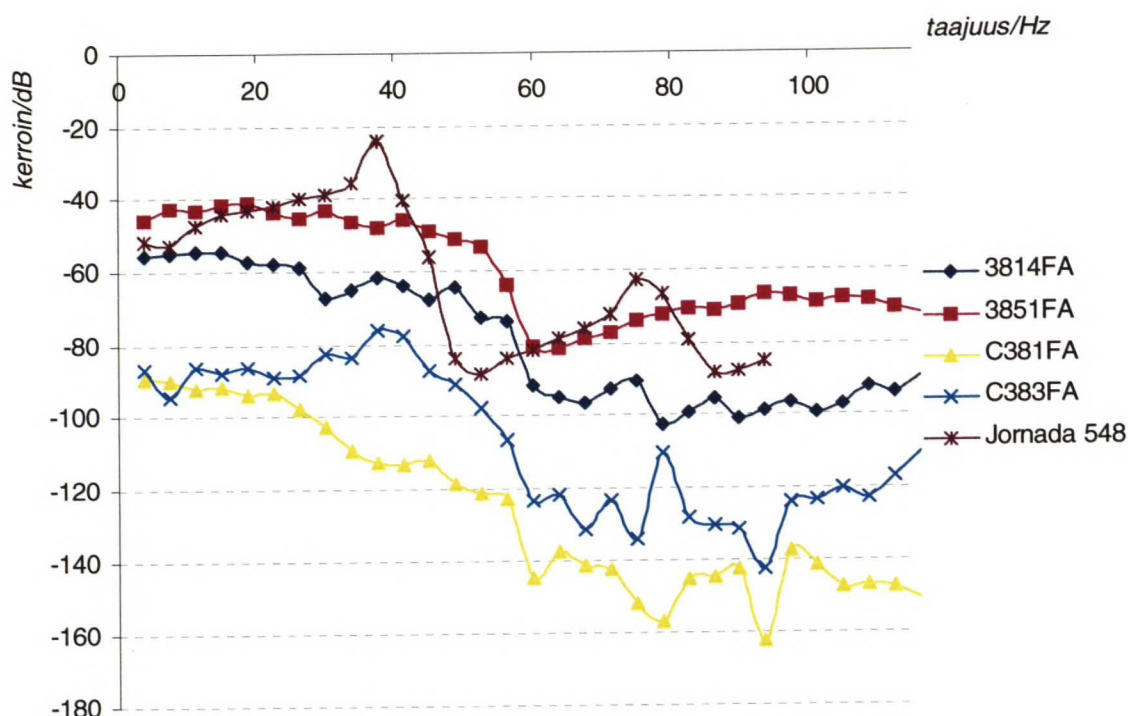
Vasteaikamittaus suoritettiin pelkästään pöytänäytöille, koska HP Jornadaa ei voitu synkronoida mittalaitteen kanssa. Kuvassa 34 on nähtävissä mittauksen tulokset. ISO 13406-2:n mukaan 55 ms:a on raja toimistonäyttöjen vasteajalle, mikä pitäisi saavuttaa. 3814FA ei aivan saavuta kyseistä lukemaa, C383FA jää siitä noin 12 ms:n päähän. Vasteajalla 55 ms kuvan päivitystaajuus on 18 Hz, mikä on kohtuullinen liikkuvan kuvan esittämistä

varten. 3851FA:n tulos 39,2 ms takaa 25 Hz:n päivitystaajuuden, mikä vastaa yleisiä televisio- ja elokuvateknisiä vaatimuksia. C383FA pystyy 15 Hz:n kuvanpäivitystaajuuteen, mikä on suhteellisen alhainen sujuvaan liikkuvan kuvan esittämiseen. Näyttöjen valmistajan mukaan vasteaikatulokset vaihtelevat näyttöyksilöiden välillä. Mitatut tulokset ovat keskimääräisiä pitempiä. Mittalaitteen vikaantumisen johdosta mittausta ei voitu suorittaa uudelleen ja todentaa aikaisempia mittaustuloksia.



**Kuva 34.** Mitattujen näyttöjen vasteajat

Välkkyminen mitattiin 512 näytteellä, jotka otettiin tasavälein. Näytteille tehtiin Fouriermuunnos ja saadut kertoimet suhteutettiin DC-kertoimeen. Tämän jälkeen kertoimet muutettiin desibeliasteikkoon ja painotettiin ihmisen näköjärjestelmään perustuvilla kertoimilla, jotka perustuvat EIAJ:n ED-2522 standardiin. Kuvassa 35 on käyrä jokaisen näytön välkkymisestä taajuuden funktiona. HP Jornadalla ilmeni jonkin verran välkkymistä noin 40 Hz:n taajuudella. Muutoin näyttöjen kohdalla ei ilmennyt merkittävää välkkymisen taajuusriippuvuutta. Käyrien laskeminen johtui näköjärjestelmän perusteella tapahtuneesta painotuksesta. Yli 60 Hz:n taajuudella painotus oli vakio -40 dB. Tämän tutkimuksen puitteissa ei analysoitu välkkymisen ISO 13406-2:n mukaista vaatimusta mitattujen näyttöjen osalta.



**Kuva 35.** Näyttöjen välkkyminen taajuuden funktiona

Kulmariippuvaiset mittauksia tehtiin luminanssin ja kontrastin osalta puolipallon alueelta 36:lla näytteellä atsimuuttisuuntaan ja 15:llä näytteellä inkliinaatiosuuntaan. Pysty- ja vaakasuuntaan määritettiin myös kynnsarvot kontrastisuhteen osalta lukemille 10:1, 50:1 ja 100:1. Taulukossa 25 ovat kulmat, joilla kontrastisuhteen kynnsarvo 10:1 saavutettiin ylös, alas ja sivuille. Tätä kynnsarvoa käytetään yleensä arviointiperusteena, kun näytölle ilmoitetaan katselukulma. 3851FA:n katselukulma oli kaikkein laajin. Hp Jornada oli odotetusti kaikkein huonoin ja varsinkin ylös- ja alaspäin kulma jäi noin 20°:een. Tyypillisesti katselukulma on hieman laajempi vaakasuuntaan kuin pystysuuntaan.

**Taulukko 25.** Katselukulma neljään suuntaan

Suunta	3814FA	3851FA	C381FA	C383FA	Hp Jornada
Ylös	50°	>72°	56°	50°	19°
Alas	60°	>72°	60°	39°	22°
Oikealle	72°	>72°	70°	56°	41°
Vasemmalle	72°	>72°	72°	61°	37°

Raporttiin liitettiin myös polaarikoordinaattikuva kontrastisuhteesta sekä poikkileikkauksien kuvaajat vertikaali- ja horisontaalisuunnissa. Kuvat ja kuvaajat piirrettiin mitta-laitteen hemianalyysimittausohjelmalla. Lisäksi määritettiin myös luminanssi- ja värillisyyssarvot ylös, alas ja sivuille 30°:n inkliinaatiokulmilla. Taulukossa 26 on luminanssin suurin suhteellinen muutos kohtisuoraan arvon nähden sekä suurin väriero niin ikään kohtisuoraan suuntaan mitattuihin värikoordinaatteihin nähden. Luminanssivaihte-

lut määritettiin kaikkien osavärien tuloksista. Luminanssi vaihteli huomattavasti katselukulman suhteen C381FA:lla, C383FA:lla ja HP Jornadalla. Värillisyyden vaihtelu oli HP Jornadalla huomattavan suuri ja myös C383FA:lla kohtuullisen suuri.

**Taulukko 26.** *Luminanssin ja värieron suurin vaihtelu mittauksen näytöillä 30°:n inkliinaatiokulmilla*

Tunnusluku	3814FA	3851FA	C381FA	C383FA	HP Jornada
Suurin luminanssin muutos	36 %	18 %	50 %	70 %	84 %
Suurin väriero	0,017	0,008	0,014	0,045	0,144

Hemianalyysimittausohjelman puutteita olivat, että kuvat olivat epätarkkoja, kynnysarvojen määrittäminen tarkasti ei ollut mahdollista ja värillisyyскоordinaatteja ei voitu tallentaa. Lisäksi mittaus voitiin tehdä vain mustasta ja valkoisesta ruudusta. Varsinaisissa mittauksissa päätettiin paneutua hemianalyysin täydentämiseen ja kehittämiseen.

#### 5.4.3 Hemianalyysin kehittäminen

Hemianalyysissa suoritetaan kulmariippuvaisia mittauksia näytön edestä puolipallon kulma-alueelta. Tällöin tulee selville tutkittavan ominaisuuden osalta näytön kulmariippuvuus kaikilla mahdollisilla kulmilla.

Mittalaitteessa oleva hemianalyysiohjelma laadittiin uudelleen. Ohjelmaan lisättiin mahdollisuus suorittaa mittaus valkoisen ja mustan ruudun lisäksi pääväreistä ja laatikko-kuviosta sekä vapaavalintaisesta väristä. Lisäksi toteutettiin harmaasävyjen invertoitumisen määrittäminen harmaasävytasoista. Ohjelmaan lisättiin mahdollisuus asettaa näyttöiden määrä atsimuutti- ja inkliinaatiosuuntaan sekä mittausten otolle voitiin asettaa viive, jotta testikuva ehtisi varmasti piirtyä ennen mittauksen suorittamista. Mittaustulosten käsittelyä varten laadittiin MS Excel ja Matlab -ohjelmiin tarvittavat rutiinit. Mittausohjelmaan tehtiin mahdolliseksi mitata laitteita, joita ei voida ohjata suoraan mittalaitteella.

Luminanssin ja kontrastisuhteen tutkimista varten laadittiin Matlab-ohjelmaan proseduuri, joka piirtää kaksi- tai kolmiulotteisen korkeuskäyräkuvaajan kyseisestä ominaisuudesta. Kuvaajassa x- ja y-akselien muodostamassa tasossa on polaarikoordinaatisto, joka kuvaa kulmariippuvuutta. Väreillä ja z-akselilla kuvataan luminanssin tai kontrastin taso kullakin kulma-asetelmalla. Kuvaan voidaan piirtää kynnysarvoihin perustuvia käyriä. Kynnysarvot voidaan määrittää absoluuttisia tai suhteellisia arvoina kohtisuoraan tai suurimpaan arvoon nähden.

Kontrastisuhteen kynnysarvojen kulmariippuvuuden tutkimista varten laadittiin Matlab-ohjelmaan proseduuri, jolla piirretään samoista kulmariippuvaisista mittaustuloksista poikkileikkauskuvaajat vertikaali- ja horisontaalisuuntiin. Ohjelma palauttaa kynnysarvojen tarkan sijainnin kulmana kuhunkin suuntaan. Mittaustuloksien väliset alueet on interpoloitu erittäin tehokkaalla interpolointimenetelmällä.

Värikoordinaattiarvojen kulmariippuvuuden tutkimiseksi laadittiin Exceliin valmis sivupohja, joka piirtää mittaustuloksista CIE 1976  $u'v'$ -koordinaatistoesityksen. Mittaustulokset piirtyvät eri värisinä pisteinä päävärien mukaisesti. Kulmariippuvuus tulee kuvasta esille pisteiden hajaantumisenä kohtisuoraan mitatusta tuloksesta.

Harmaatasojen invertoitumista voidaan tutkia 8:lla tai 16:lla harmaasävytasolla. Jokaisella testikuvalla tehdään vastaava kulmariippuvainen mittausta kuin edellä käsitellyssä luminanssimittauksessa. Väriillisyyсарvojen mittaaminen jätettiin pois mittaustulosten käsittelyn hankaloitumisen vuoksi. Mittaustulokset analysoidaan Matlabissa siten, että samaan kuvaajaan piirretään kaikkien harmaasävyjen luminanssi kulman suhteen. Kerralla tutkitaan vain yhtä inkliinaatiosuuntaa, yleensä pysty- tai vaakasuuntaa. Luminanssiasteikko on logaritminen.

#### 5.4.4 Hemianalyysimittaukset ja tulokset

Kulmariippuvaiset mittaukset suoritettiin aikaisemmissa mittauksissa mukana olleille neljälle pöytänäytölle ja kolmelle saatavilla olleelle kämmentietokoneelle, Compaq iPAQ 3630:lla, Palm m505:lle ja Nokia 9210 Communicatorille. Tässä esitetään vain näytteitä mittaustuloksista. Täydelliset mittaustulosten raportit ovat liitteessä 5.

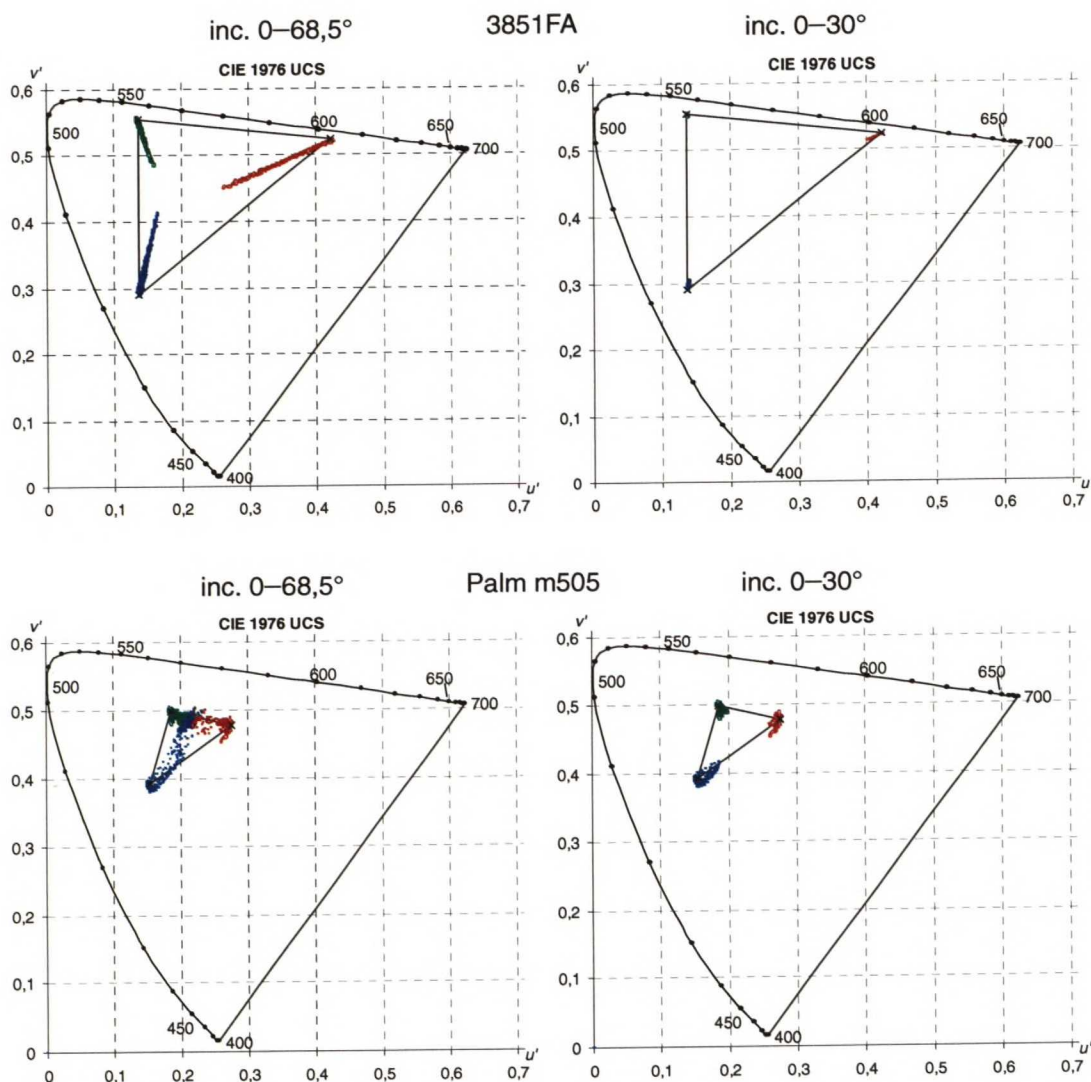
Mittauksissa suoritettiin päävärien koordinaattien ja valkoisen pisteen sijainnin kulmariippuvuus inkliinaatiokulmilla  $0-68,5^\circ$  ja  $0-30^\circ$ . Kulma-alueita valittiin kaksi, jotta voitiin arvioida kulman suuruuden muutoksen vaikutusta väriillisyyсарvoihin. Atsimuuttikulma-alue oli kaikissa mittauksissa  $0-360^\circ$  eli koko ympyrän alue. Korkeuskäyräesitykset laadittiin luminanssista ja kontrastisuhteesta inkliinaatiokulmilla  $0-68,5^\circ$ . Kulmaa rajoitti mittalaitteen kohtisuoran mittaussuunnan virheellinen asento, jota kompensoitiin siirtämällä inkliinaatiokulman nollakohtaa. Ongelmaan löydettiin ratkaisu kesken mittauksien suorittamista. Compaq iPAQ mitattiin koko mittalaitteen kapasiteetilla. Samalla inkliinaatiokulma-alueella laadittiin myös kontrastisuhteesta kuvaajat vertikaali- ja horisontaalisuuntiin sekä määritettiin kynnysarvojen 10:1, 50:1 ja 100:1 kulmat. Harmaatasojen inversiosta laadittiin kuvaajat vertikaali- ja horisontaalisuuntiin. Nokia 9210 oli mahdollista mitata vain inkliinaatiokulmaan  $40^\circ$  asti johtuen laitteen näppäimistöä. Nokia 9210, Compaq iPAQ ja Palm m505 mitattiin 5 mm:n aukolla johtuen laitteiden näyttöjen pienistä mitoista.

Nokia 9210 Communicatorin näyttö on aktiivimatriisiteknikalla toteutettu (liite 1). Sen pikselitiheys on erittäin suuri. Näytön mitat ovat  $108 \text{ mm} \times 34 \text{ mm}$  ja pikselimäärä  $640 \times 200$ . Pikselikooksi saadaan  $169 \mu\text{m}$  vaakasuuntaan ja  $170 \mu\text{m}$  pystysuuntaan. Näytön värisyvyys on 12 bittiä.

Kuvassa 36 on Excel -ohjelmassa laaditut CIE 1976  $u'v'$ -koordinaatistoesitykset värikoordinaattien muutoksesta katselusuunnan funktiona 3851FA ja Palm m505 näytöillä. Vasemmalla on päävärien värikoordinaatit inkliinaatioalueella  $0-68,5^\circ$  ja oikealla inkliinaatioalueella  $0-30^\circ$ . Rastilla on merkitty kohtisuoran mittaussuunnan värikoordinaatit ja viivat rajaavat kohtisuoraan mitatun väriavaruuden. Johtuen Palmin taustavalon vuotamisesta näytön reunoista väriarvot yhtyvät suurella inkliinaatiokulmalla katsottaessa laitetta ylhäältä päin. 3851FA:n kulmariippuvat ominaisuudet ovat erittäin hyvät. Väriavaruus pienenee katselukulman kasvaessa, mutta muutos tapahtuu erittäin

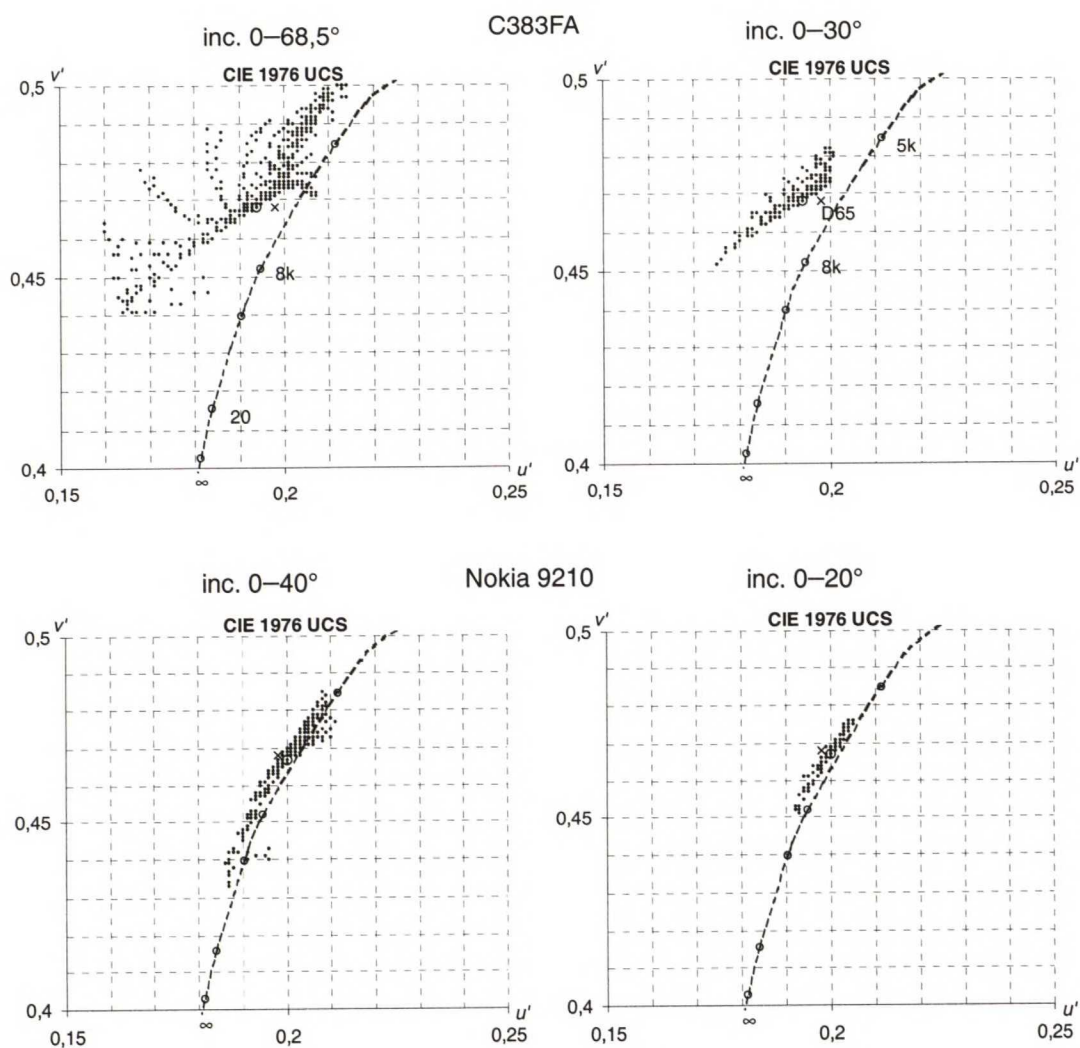


tasaisesti. Muiden pöytänäyttöjen käyttäytyminen oli samanlaista. Kämmentietokoneilla tapahtui kaikilla taustavalon vuotamista, minkä seurauksena värikoordinaatit sekoittuivat toisiinsa.



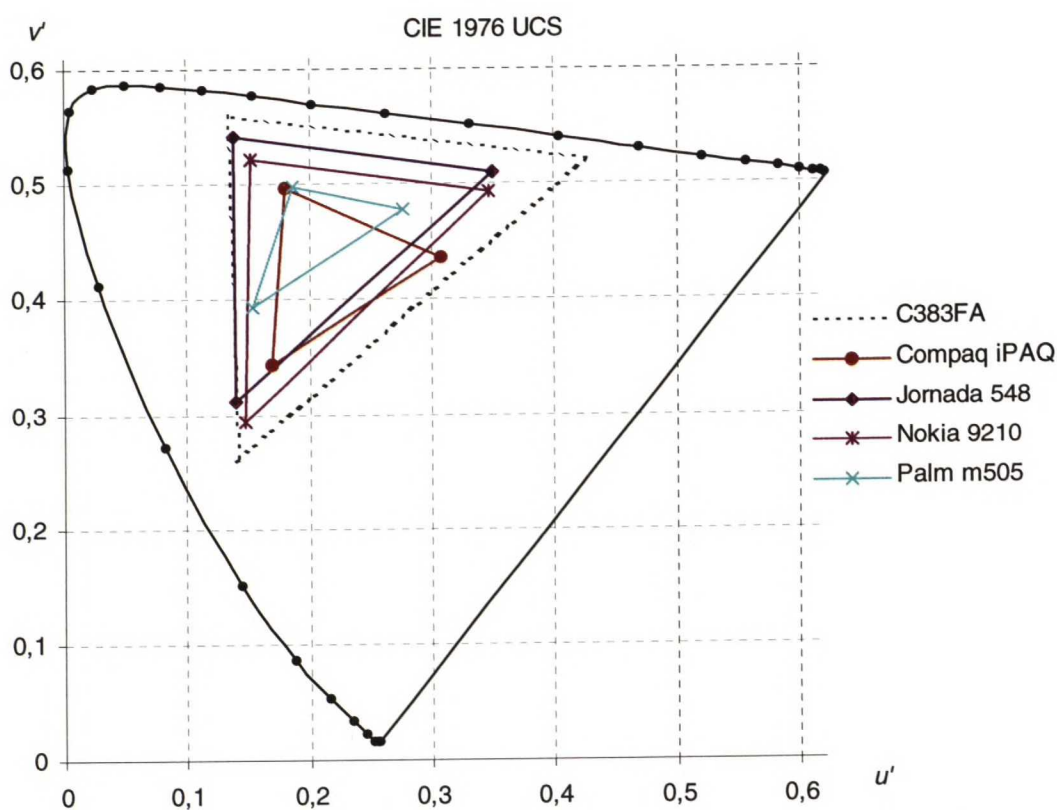
**Kuva 36.** Näyttöjen värikoordinaatit koko katselusektorissa

Valkoinen piste määritettiin vastaavalla mittauksella kuin värikoordinaatit. Mittaus suoritettiin täysin valkoiselta ruudulta. Kuvassa 37 on C383FA:n ja Nokia 9210:n valkoisen pisteen kulmariippuvuus. Kuvaaja on CIE 1976  $u' v'$ -koordinaatistossa, josta on suurennettu valkoisen pisteen läheisyydessä oleva alue. Kohtisuoraan mitatut värikoordinaatit on merkitty ympyrällä. Planckin käyrällä olevat ympyrät ovat värlämpötila-arvoja. C383FA mitattiin  $0-68,5^\circ$ :n (vasen kuvaaja) ja  $0-30^\circ$ :n inkliinaatiokulmilla (oikea kuvaaja). Nokia 9210 mitattiin pienemmiltä  $0-40^\circ$ :n ja  $0-20^\circ$ :n inkliinaatioalueilta. C383FA:n valkoinen piste siirtyi huomattavasti katselusuunnasta riippuen. Muut pöytänäytöt käyttäytyivät paremmin kuin C383FA. Nokia 9210:n valkoinen piste siirtyi jonkin verran katselusuunnasta riippuen, mutta siirtyminen tapahtui Planckin käyrän suuntaisesti. Kuvaan on merkitty D65-piste eli päivänvalon valkoinen väri. Näytöt säädetään tyypillisesti tähän pisteeseen tai johonkin vastaavan värlämpötilan pisteeseen.



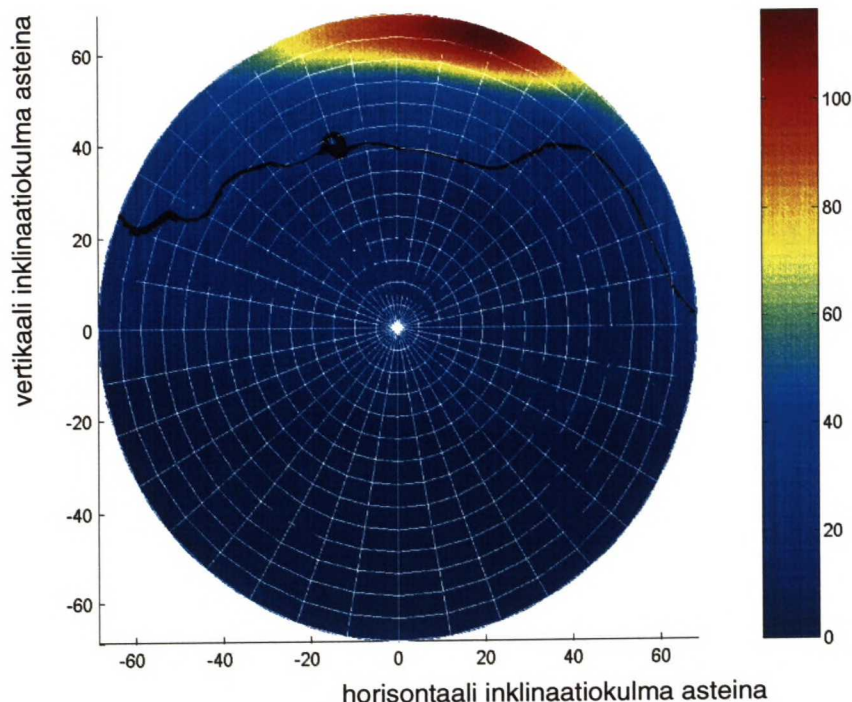
**Kuva 37.** Valkoisen pisteen kulmariippuvuus kahdella näytöllä. Pisteiden säännöllinen etäisyys toisiinsa nähden johtuu pyöristysvirheestä

Kuvassa 38 on kaikkien kämmentietokoneiden väriavaruudet sekä vertailukohtana C383FA:n väriavaruus, joka osoittautui tyypilliseksi tulokseksi pöytänäytöille tässä tutkimuksessa. Jornadan ja Nokia 9210:n väriavaruudet olivat isoimmat ja myös muodoltaan lähimpänä pöytänäyttöjä. Palmin väriavaruus oli muodoltaan oikea, mutta sen koko oli selvästi muita pienempi. Compaq iPAQin väriavaruuden koko oli suhteellisen pieni ja punaisen värin sijainti oli pahasti vääristynyt.



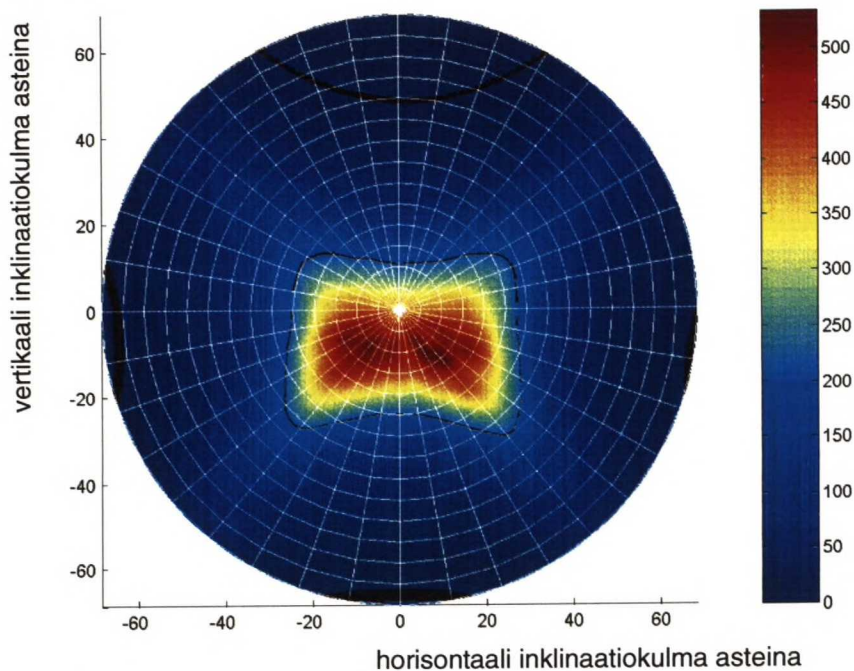
**Kuva 38.** Kämmentietokoneiden väriavaruuudet. Vertailun vuoksi katkoviivalla on merkattu laadukkaan aktiivimatriisineskide tekniikalla toteutetun pöytänäytön väriavaruuus

Pöytänäyttöjen ja Palmin luminanssit mitattiin inkliinaatiokulmilla 0–68,5°. Compaq iPAQ mitattiin koko mittalaitteen kapasiteetilla eli kulma-alueella 0–72°. Nokia 9210 voitiin mitata vain 0–40°:n inkliinaatioalueella johtuen laitteen näppäimistöä. Kuvassa 39 on Palmin luminanssin riippuvuus katselusuunnasta polaarikoordinaatistossa. Origossa on kohtisuora suunta. Musta käyrä on ISO 13406-2:n mukainen 20 cd·m<sup>-2</sup>:n raja. Normaalkatselusuunnan eli origon läheisyydessä luminanssi oli alle kynnsarvon. Ylhäältä päin katsottaessa luminanssi oli yli kynnsarvon, mutta tämä johtui taustavalon voimakkaasta ei-toivotusta vuotamisesta.



**Kuva 39.** *Palm m505:n luminanssin kulmariippuvuuden polaarikoordinaattiesitys*

Kuvassa 40 on nähtävissä 3814FA:n kontrastisuhteen kulmariippuvuus. Mittaus suoritettiin inkliinaatioalueella  $0\text{--}68,5^\circ$ . Kontrasti oli hieman parempi katsottaessa näyttöä hieman alaviistosta kuin yläviistosta. Sivusuunnassa suorituskyky oli symmetristä. Suurin kontrasti on yli 500:1, mikä on huomattavan korkea arvo. Mustalla käyrällä on merkitty kontrastisuhteen arvo 10:1 ja 50 %:n raja kohtisuoraan mitatusta kontrastisuhteesta. Mittalaitteen kulma-alue ei riittänyt määrittämään tarkasti 10:1:n kontrastisuhteen rajaa kaikkiin suuntiin.



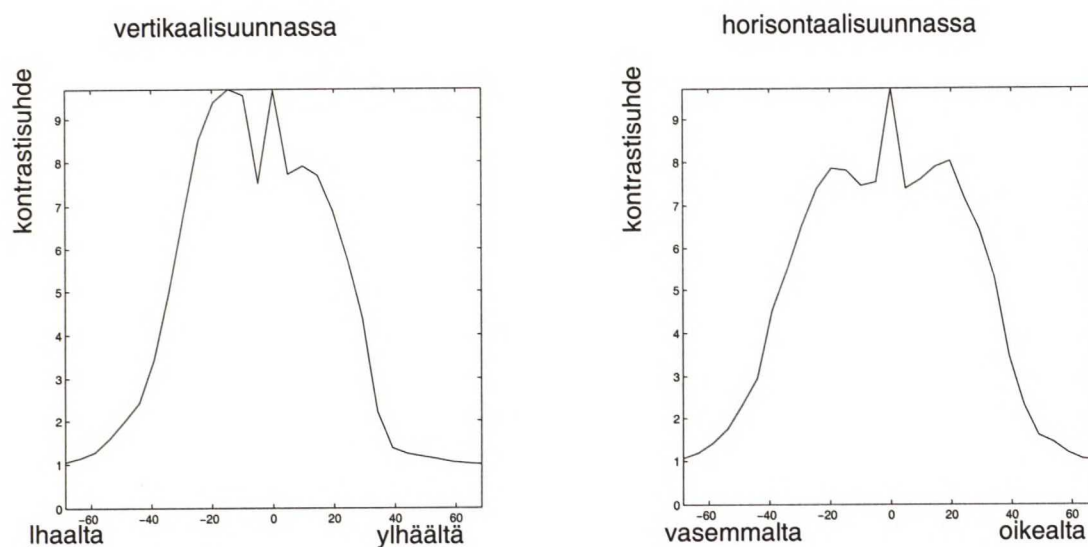
**Kuva 40.** *3814FA:n kontrastisuhteen kulmariippuvuus polaarikoordinaatistossa*

Näyttöjen katselukulman määrittäminen tehtiin pysty- ja vaakasuuntaisista poikkileikkauskuvaajista. Kynnysarvona käytettiin kontrastisuhteen arvoa 10:1. Taulukossa 27 on kulmat eri suuntiin, joilla kynnysarvot saavutettiin. 3851FA:n katselukulma ylti joka suuntaan yli mittalaitteen kapasiteetin. 3814FA:lla ja C381FA:lla sivusuunnassa kulma oli yli 68,5°. Pöytänäyttöjen kulmat olivat vähintään 45°, jolloin katselukulmaksi tuli vähintään 90°. Compaq IPAQ ja Palm eivät täyttäneet kontrastisuhteen ehtoa 10:1 mihinkään suuntaan. Nokia 9210:lla vaakasuuntaan kulmat olivat yli 40° kumpaakin suuntaan. Pystysuuntaan ne olivat rajoitetumpia.

**Taulukko 27.** Kontrastisuhteen arvon 10:1 kulmalukema neljään suuntaan

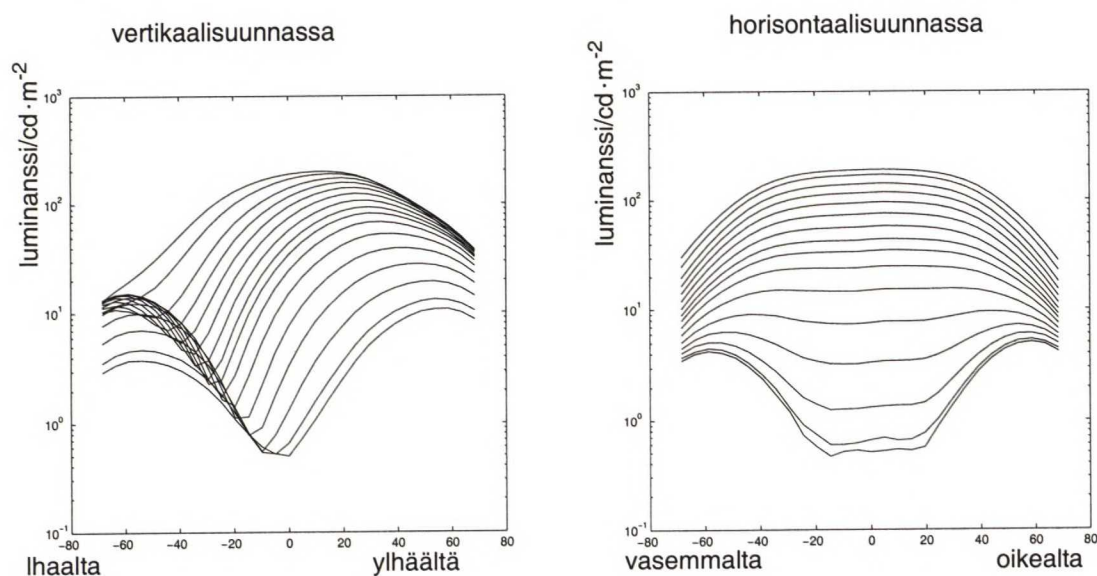
Suunta	3814FA	3851FA	C381FA	C383FA	Compaq iPAQ	Nokia 9210	Palm m505
Ylös	48,6°	>68,5°	49,1°	46,3°	-	29,9°	-
Alas	66,6°	>68,5°	59,5°	46,9°	-	18,6°	-
Oikealle	>68,5°	>68,5°	>68,5°	59,9°	-	>40°	-
Vasemmalle	>68,5°	>68,5°	>68,5°	65,4°	-	>40°	-

Kuvassa 41 on Palm m505:n kontrastisuhteen poikkileikkaukset vertikaali- ja horisontaalisuunnissa. Pystyakselilla on kontrastisuhteen arvo ja vaak- akselilla inkliinaatikulma. Vertikaalileikkauksessa positiivinen suunta on ylhäältä päin mitatut arvot ja negatiiviset alhaalta päin. Horisontaalileikkauksessa positiivinen suunta on oikealta mitatut tulokset ja negatiiviset vasemmalta. Palm m505:n kontrasti oli hieman parempi alhaalta päin katsottaessa. Sivusuunnassa suorituskyky oli symmetristä.



**Kuva 41.** Kontrastisuhteen poikkileikkaukset vertikaali- ja horisontaalisuuntiin Palm m505:n näytöllä

Harmaasävyjen inversio C383FA näytöllä on esitetty kuvassa 42. Pystyakselilla on harmaatasojen luminanssi logaritmiasteikolla. Vaakasuunnassa on inkliinaatiokulma. C383FA:n toiminta on alhaalta päin katsottaessa selvästi huonompaa kuin muista suunnista. Harmaasävyt inverttoituivat alhaalta päin katsottaessa jo noin  $10^\circ$ :n kulmalla. Ylhäältä päin inverttoitumista alkaa tapahtumaan lievästi  $20^\circ$  kulmalla. Sivusuunnassa harmaasävyt lähenevät toisiaan voimakkaasti katselukulman kasvaessa, mutta eivät saavuta täysin toisiaan mitattuun  $68,5^\circ$ :n kulmaan mennessä.



**Kuva 42.** Harmaasävyjen inverttoituminen pysty- ja vaakasuuntaan C383FA näytöllä

Pöytänäyttöjen kulmariippuvaiset ominaisuudet vastasivat kohtuullisen hyvin toisiaan. 3851FA oli jonkin verran muita parempi, mikä selittyy kehittyneemmällä toimintaperiaatteella. Näytön valmistajan mukaan MVA-tekniikalla toteutetut näytöt ovat epälineaarisia harmaasävyasteikon tummassa päässä. Horisontaalikuvassa tämä näkyy erittäin hyvin kahdesta alimmaisesta harmaasävykäyrästä, jotka ovat selvästi lähempänä toisiaan kuin toiseksi ja kolmanneksi alimmaisiksi. Kämmentietokoneiden näytöt olivat keskenään samankaltaisia ja jäivät huomattavasti pöytänäyttöjen suorituskyvystä. Nokia 9210:n näyttö oli jonkin verran parempi varsinkin kontrastin osalta Palmin ja Compaqin näyttöihin nähden. Kirkkauden suhteen Palm oli selvästi heikoin, mikä selittyy heijastavalla toimintaperiaatteella. Transmissiiviset ja heijastavat näytöt eivät ole keskenään vertailukelpoisia samoilla mittausmenetelmillä.

## 5.5 Mittaustulosten tarkastelu

Mittaustuloksista saatiin johdonmukaisia arvoja koko mittausten ajan. Johtuen näyttöjen poikkeavista säädöistä, oli mittaustuloksien absoluuttisissa arvoissa vaihtelua. Mittausten aikana ilmeni useita ongelmia mittalaitteen toiminnassa. Niiden vaikutusten mittaus-tarkkuuteen ei kuitenkaan uskota olevan merkittävää. Tämän tutkimuksen puitteissa ei

toteutettu laitteiston kalibrointia eikä mittaustarkkuuden ja toistettavuuden määrittämisestä. Mittaustarkkuuden arvioimiseksi tarvitaan erityinen mittaustarkkuusjärjestely, jossa mittaushuoneeseen tuotetaan valo, jonka voimakkuus ja spektri tunnetaan tarkoin.

ISO 13406-2:n osalta ei ollut saatavilla aikaisempia mittauksia, joihin mittaustuloksia olisi voitu verrata. Mittausten luotettavuuden arviointi perustuikin pelkästään standardista saatavaan tietoon. Väriarvojen absoluuttinen suuruus oli odotetulla tasolla (kts. seuraava kappale). Sitä vastoin valonlähteen vaikutuksen arviointi oli vaikeaa, koska mittaustapa on kirjallisuudessa toistaiseksi harvinainen. Hajavalon vaikutus mittaustuloksiin oli vähäinen ja johdonmukainen. Heijastusmittauksissa käytettyjen ison ja pienen valonlähteen osalta sitä vastoin ilmeni vaihtelua mittausten välillä. Pöytänäyttöt täyttivät ISO 13406-2:n vaatimukset lähes kokonaan. Kämmentietokoneiden suorituskyky ei ollut riittävää standardin vaatimusten täyttymiseksi. Erityisesti luminanssitason ja kontrastin alhaisuus aiheuttivat hylkäyksen usean vaatimuksen kohdalla. Kämmentietokoneiden valmistajat eivät ole ilmoittaneet laitteidensa olevan ISO 13406-2:n mukaisia. Tämän tutkimuksen puitteissa sopimattomuus ISO 13406-2 standardiin voitiin todentaa Compaq iPAQ 3630:n ja Palm m505:n osalta käytettyjen asetusarvojen kanssa.

VESA FPDm:n mukaiset mittaustulokset pöytänäyttöjen osalta vastasivat muiden tutkimusten tuloksia sekä valmistajan ilmoittamia arvoja. VESA FPDm:n kulmariippuvaisten mittausten tulokset vastasivat erittäin tarkasti pöytänäyttöjen valmistajan ilmoittamia katselukulma-arvoja /9/. Kontrastisuhteiden lukemien kohta 10:1 oli noin 5-10°:n tarkkuudella sama kuin valmistajan ilmoittamat katselukulmat. Luminanssitaso kohtisuoraan suuntaan vastasi noin 5 %:n tarkkuudella valmistajan ilmoittamia lukuja ja oli noin 200 cd·m<sup>-2</sup>:n tasolla, mikä osoittautui epäviralliseksi suositukseksi pöytänäyttöille (kts. luku 3.5). Kontrastin useista mittaustavoista johtuen ei perusteellista vertailua muihin tutkimuksiin voitu tehdä. Pöytänäyttöjen osalta näyttöjen keskinäinen paremmuusjärjestys kontrastin osalta osoittautui samaksi kuin valmistajan ilmoittamien tietojen pohjalta voidaan päätellä. Väriero näytön spatiaalisten kohtien välillä oli pöytänäyttöille alle 0,004, mikä vastaa tavallisia lukemia pöytänäyttöille (kts. luku 3.5). Mitattujen nestekidenäyttöjen väriavaruudet poikkesivat tyypillisestä katodisädeputkinäyttöjen väriavaruudesta /76/. Vihreän ja sinisen värin osalta nestekidenäyttöjen värintoisto oli rajoituneempaa kuin katodisädeputkinäyttöjen. Kämmentietokoneiden suorituskykyarvoja ei ollut saatavilla vertailtavaksi. Nokia 9210:lle valmistaja ilmoittaa näytön luminanssiksi 100 cd·m<sup>-2</sup>, mikä vastasi saatuja mittaustuloksia.

Tutkimuksessa mitattujen näyttöjen suorituskykyarvot vastasivat niitä tietoja, jotka etukäteen olivat saatavilla. Näin ollen mittausten voidaan päätellä olevan näiltä osin luotettavia. Vertailumittausten osittaisen puuttumisen vuoksi ei tämän mittauksen puitteissa pystytty täydellisesti arvioimaan mittalaitteen luotettavuutta.

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tässä työssä oli tarkoituksena vakiinnuttaa mittalaitteen toimintakunto ja toisaalta tuottaa uusia mittaussuunnitelmia sekä arvioida vanhojen luotettavuutta. Osin nämä tavoitteet täyttyivät, mutta puutteita ja kehitettävää jäi silti. Näyttöjen keskinäisen vertailun kannalta mittausten otos oli liian pieni, jotta luotettaviin ja yleistäviin johtopäätöksiin litteiden näyttöjen suorituskyvyn osalta voitaisiin ryhtyä. Kuitenkin varsinkin pienten laitteiden näyttöjen ja pöytänäyttöjen keskinäisen vertailun osalta jonkinlaisia johtopäätöksiä voitaneen tehdä.

Mittalaitteen toimintakunnossa oli jatkuvasti ongelmia sekä mittausten aikana että jo ennen mittauksia. Ongelmat liittyivät sekä laitteistoon että ohjelmistoon. Valmistajan toimittamat päivitykset korjasivat ongelmat liittyen pienen valonlähteen käyttöön. Kuitenkin myös ison valonlähteen kiinnittämisessä ilmeni edelleen ongelmia, jotka vaatisivat myös korjauksen. Kohtisuoran mittaussuunnan saavuttamisessa ilmeni ongelmia mittausten aikana. Mittapää oli siirtynyt pois paikoiltaan, mikä aiheutti kohtisuorasta suunnasta poikkeamisen. Tämä aiheutti virhettä esimittausten kulmariippuvaisiin mittauksiin. Varsinaisiin mittauksiin mittapää suoristettiin. Edelleen kuitenkin mittapään sijainti avaruudessa ei ollut kiinteä, jos atsimuuttikulmaa muutettiin inkliinaatiokulman ollessa nolla. Tämän virheen korjaaminen vaatisi valmistajan toimia, koska mittalaitteeseen tulisi tehdä rakenteellisia muutoksia. Samaten inkliinaatiosuunnan tarkkuudessa havaittiin puutteita. Inkliinaatiokulman muuttuessa tulisi mittauskohdan säilyä samana. Tätä ei luotettavasti pystytty todentamaan. Virheen tarkka määrittäminen vaatisi erityisen mittaussuunnitelman, jota tämän tutkimuksen puitteissa ei laadittu. Tutkimuksen loppuvaiheessa ilmeni SS210-mittapäässä uusi vika, joka estää mittapään käyttämisen kokonaan. Vika ilmenee mitattavan näytön vilkkumisena ja koko mittaussuunnitelman keskeyttämisenä. Ongelmaan ei toistaiseksi ole löydetty ratkaisua.

Edellä käsiteltyjen puutteiden vaikutus lopullisiin mittaustuloksiin ei ollut merkittävä. Kulmiin liittyvän rakenteelliset ongelmat aiheuttivat systemaattista virhettä mittaustuloksiin, mutta keskenään näytöt olivat vertailukelpoisia. Mittausvirheiden tarkka määrittäminen vaatisi erityisiä tarkoitusta varten laadittuja mittaussuunnitelmia.

Mittaussuunnitelmista korjattiin runsaasti virheitä tutkimuksen aikana. Varsinkin ISO 13406-2:n mittauksessa ilmeni runsaasti virheitä, jotka vaikuttivat oleellisesti mittaustuloksiin. Lisäksi ohjelmistosta poistettiin turhia toimintoja, kuten neutraalidensiteettisuodattimien käyttö tietyissä mittauksissa. ISO 13406-2:n luvun 8.22 mukainen absoluuttisen luminanssikoodauksen määrittäminen puuttuu kokonaan mittaussuunnitelmista. Näyttöjä, joissa informaation esittämiseen käytetään vain luminanssitasoltaan poikkeavia elementtejä, ei pystytä todentamaan mittalaitteella. Tässä tutkimuksessa kulmariippuvainen hemianalyysimittaus kirjoitettiin kokonaan uudelleen. Tällöin voitiin helposti liittää mukaan värikoordinaattien mittaaminen ja lisätä testikuvien määrää. Lisäksi kehitettiin kokonaan uusi mittaus, harmaatasojen invertoitumisen määrittäminen.

Laitteiston luotettavuuden säilyttäminen vaatii säännöllisiä huoltotoimenpiteitä ja kalibrointeja. Huoltotoimenpiteet käsittävät mekaanisten osien rasvaamisen, valonlähteen ja valokuitujen kunnan tarkastamisen sekä linssien ja suodattimien puhdistamisen. Kalib-



rointi tulisi suorittaa kerran vuodessa ulkopuolisessa kansainvälisesti tai kansallisesti tunnustetussa kalibrointilaboratoriossa. Laitteen kalibrointi aika umpeutui tämän tutkimuksen aikana. Kuitenkaan laitteen toiminnassa ei havaittu muutoksia. Laitteen kalibrointi voidaan suorittaa valmistajan toimesta, jolloin laitteisto joudutaan toimittamaan Yhdysvaltoihin. Toinen tapa on suorittaa kalibrointi kansallisessa kalibrointi-laboratoriossa, kuten Teknillisen korkeakoulun Mittaustekniikan laboratoriossa. Kalibrointitietojen pohjalta kirjoitetaan kalibrointitiedostot, jotka sisältävät mittaustulosten pohjalta määritetyt korjaustiedot. Ennen kalibroinnin suorittamista tulee tarkasti selvittää, kuinka tiedostot laaditaan. Kalibrointi voidaan myös suorittaa ilman korjauksia, jolloin saadaan selville mittaustulokset, mutta ei pystytä kompensoimaan niitä. Kalibrointi tulee suorittaa erikseen kaikille mittalaitteen kokoonpanoille, mikä käsittää kaikki suodattimien ja vaihdettavien linssien asetelmat.

Tämän tutkimuksen aikana kehitettiin mittaustulosten raportointia, jotta mittalaitteelta saatava suuri tietomäärä voitaisiin jalostaa tehokkaasti ja nopeasti havainnolliseen esitysmuotoon. ISO 13406-2:n ja VESA FPDM:n mukaisia mittauksia varten laadittiin MS Exceliin työpohja, joka sisältää automaattisia toimintoja mittaustulosten käsittelyyn. Kaikkia tulosten käsittelyä ei voitu kuitenkaan automatisoida. ISO 13406-2:n kohdalla osa standardin vaatimuksista tulee arvioida manuaalisesti. Myös VESA FPDM:n kohdalla osia mittauksista, kuten peittoprosentin määrittäminen, tulee tehdä manuaalisesti. Kehityspotentiaalia raportoinnin osalta on vielä jäljellä, vaikkakin paljon voidaan jo nyt toteuttaa automaattisesti.

Raportoinnista otettiin käyttöön uusi työkalu, Matlab-ohjelma. Tämä lisää toisaalta manuaalista työpanosta, koska mittaustuloksia täytyy siirtää ohjelmien välillä. Kuitenkin Matlabilla saadaan käsiteltyä varsinkin kulmariippuvaisten mittausten tuloksia tehokkaasti ja tuloksista saadaan piirrettyä tarkkoja kuvaajia.

ISO 13406-2:n suorittaminen vaatii manuaalista työpanosta enemmän kuin VESA FPDM:n. Mittauksessa tarvitaan paljon valonlähteitä, suodattimia ja linssijä, joita joudutaan kiinnittämään ja irrottamaan useita kertoja. Näitä toimintoja ei pystytä korvaamaan laitteistolla. Kuitenkin mittaushjelmaa voisi optimoida siten, että mittausten suoritusjärjestys järjesteltäisiin uudelleen. Tällöin ei kuitenkaan voitaisi enää suorittaa mittauksia ISO 13406-2:n mukaisissa osioissa, vaan kaikki mittaukset kerrallaan. Muutos vaatisi koko mittaushjelman kirjoittamista uudelleen ja saatava hyöty voisi silti jäädä vähäiseksi.

Erittäin työlääksi osoittautui kämmentietokoneiden mittaaminen. Testikuvien vaihtaminen täytyi tehdä manuaalisesti, koska laitteet eivät tue VGA-liitäntää. Automaattisen ohjauksen laatiminen mittalaitteesta kämmentietokoneille vaatisi sovellusohjelmiston laadintaa kummankin laitteen käyttöjärjestelmälle. Johtuen kämmentietokoneiden poikkeavista käyttöjärjestelmistä, vaatisi tämä paljon resursseja. Mittausmäärien kasvaessa tulee tätäkin vaihtoehtoa pohtia.

Kokonaisuutena voidaan todeta, että mittalaitteella saadaan mitattua suuri joukko tunnuslukuja erittäin tehokkaasti. Luminanssi- ja värillisuysmittauksia voidaan suorittaa paikan ja katselukulman funktiona eri värisille testiruuduille. Kontrasti voidaan määrittää hyvin monella menetelmällä. SS210-mittapään ongelmista johtuen, temporaaliset ja pienten

spatiaalisten kohteiden mittaaminen ei ole tällä hetkellä mahdollista. Kuitenkin valmius mittausten suorittamiseen on olemassa. Mittalaitteen absoluuttista ja suhteellista tarkkuutta ei tämän tutkimuksen puitteissa todennettu erityisillä mittauksilla. Mittaustulosten todettiin kuitenkin olevan odotetun kaltaisia. Absoluuttisen tarkkuuden määrittäminen vaatisi vertailumittauksia tunnettuun valonlähteeseen nähden mittaushuoneessa.

Mittauksissa pystyttiin todentamaan suurin osa ISO 13406-2:n mukaisista vaatimuksista. Kuitenkin täydellinen todentaminen ei vielä ollut mahdollista. Tutkittujen ominaisuuksien perusteella mitatut neljä pöytänäyttöä täyttivät lähes kaikki vaatimukset. Vain 3851FA ei täyttänyt värieron vaatimusta. Ehto olisi täyttynyt vähentämällä väripaletin värejä. Väripaletti ei ollut täysin sopiva kyseisen näytön käyttötarkoitusta varten. Kämmentietokoneilla oli suuria ongelmia ISO 13406-2:n täyttämiseksi. Palmilla suurin ongelma oli liian alhainen luminanssitaso. Heijastaville näytöille valonlähteiden vaikutus mittaustuloksiin nousee merkitsevämmäksi kuin transmissiivisillä näytöillä. Heijastavien näyttöjen luotettava mittaaminen vaatii lisätutkimuksia. Compaq iPAQilla oli ongelmia heijastusten ja kontrastin kanssa. ISO 13406-2:n suunnitteluarvoja muuttamalla olisi Compaq todennäköisesti täyttänyt vaatimukset. Tutkimuksen puitteissa voidaan todeta, että ISO 13406-2:n suunnitteluarvoja muuttamalla voidaan vaikuttaa erittäin suuresti vaatimusten täyttymiseen. Tämän vuoksi on erittäin tärkeää, että raportissa esitetään selvästi, mitä parametreja mittauksissa on käytetty. Mittauksen tilaajalta tulee etukäteen selvittää tarkasti nämä arvot ja myös näyttöihin liittyvät säädöt.

VESA FPDM:n mukaisesti tutkittujen ominaisuuksien osalta ei pöytänäyttöjen välille saatu suuria eroja. Kämmentietokoneiden kohdalla sitä vastoin erot olivat suuremmat. 3814FA:n ja C381FA:n väriavaruudet olivat kaikkein suurimmat. Erot olivat kuitenkin pieniä pöytänäyttöjen kesken. Kämmentietokoneista HP Jornada 548 ja Nokia 9210 toisivat parhaimmat väriavaruudet, jotka olivat kuitenkin pöytänäyttöjä pienemmät. Compaq iPAQin väriavaruus oli pahasti vääristynyt punaisen värin osalta. Palm m505:n väriavaruus oli oikean muotoinen, mutta selvästi muita pienempi. Kulmariippuvaisten ominaisuuksien osalta 3851FA oli hieman muita parempi johtuen sen MVA-tekniikkaan perustuvasta toimintaperiaatteesta. Muutoin pöytänäyttöjen kulmariippuvaisten ominaisuudet vastasivat kohtuullisen hyvin toisiaan. Kämmentietokoneiden kohdalla kulmariippuvaisuus oli suurempaa ja varsinkin taustavalon vuotaminen näyttöruutujen reunoista aiheutti erittäin voimakkaan luminanssin, joka vähensi kontrastin olemattomiin.

Tämän tutkimuksen puitteissa ei mitattu perusteellisesti yksittäisen kuvapikselin ominaisuuksia. SS210-mittapöydällä tehtävät pikselin luminanssijakaumaan liittyvät mittaukset olisivat yksi kehittämistä vaativa osa-alue. Tyypillisiä tunnuslukuja ovat MTF ja pikselin muoto sekä koko. Myös peittoprosentin automaattinen määrittäminen voisi olla kehittämisen kohde.

Tässä tutkimuksessa mittalaitteeseen kehitettiin paljon uusia ominaisuuksia ja toisaalta parannettiin olemassa olleiden mittausten luotettavuutta. Kuitenkin kehittävää on paljon ja pysyvän mittausvalmiuden ylläpitäminen vaatii jatkuvaa kehittämistä ja ihmisresursseja. Myös henkilökunnan kouluttamiseen mittausten suorittamiseen tulee kiinnittää huomiota.

## LÄHDELUETTELO

- /1/ **Agamanolis Stefan.** *Liquid Crystal Displays: Past, Present, and Future* [online]. Massachusetts Institute of Technology, Physics and Media, Yhdysvallat 1995, päivitetty 18.5.1995 [viitattu 27.9.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://www.media.mit.edu/people/stefan/liquid-crystals/liquid-crystals.html>.
- /2/ **Alku Antero, Simpanen Timo, Tikkanen Jaakko.** *18-tuumaiset paneelinäytöt*. Tietokone 19(2000)3, s. 46–57.
- /3/ **Anandan Munisamy.** *Introduction to special section on LCD backlighting*. Journal of the SID 7(1999)3, s. 149–150.
- /4/ **Anderson D.** *The PC technology guide, Flat panel displays* [online]. Päivitetty 10.5.2001, [viitattu 27.9.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://www.pctechguide.com/07panels.htm>.
- /5/ **Anon.** *Electro Optical, Inc. Educational and Reference* [online]. Yhdysvallat 2000 [viitattu 28.8.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://www.electro-optical.com/>.
- /6/ **Anon.** *EZContrast 160D High speed spatial photometer* [online]. Eldim, Ranska 1999 [viitattu 24.11.2001]. Saatavilla PDF-muodossa: <http://www.eldim.fr/ezcontrast/Products/DS/eq01.pdf>.
- /7/ **Anon.** *Flat panel display technology* [online]. Hitachi America, Ltd, Yhdysvallat 2001 [viitattu 5.3.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: [http://www.hitachidisplays.com/how\\_monitors/flatpanel.htm](http://www.hitachidisplays.com/how_monitors/flatpanel.htm).
- /8/ **Anon.** *FPD Performance Measurement System* [online]. Westar Corporation, Yhdysvallat 2000 [viitattu 21.11.2001]. Saatavilla PDF-muodossa: <http://www.westar.com/dis/dnloads/FPM%20Brochure.pdf>.
- /9/ **Anon.** *Fujitsu-Siemens Computers Monitore* [online]. Fujitsu-Siemens Computers, Saksa, päivitetty 14.6.2000 [viitattu 26.11.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://www.fujitsu-siemens.de/monitore/>.
- /10/ **Anon.** *IBM flat panels, T Series* [online]. IBM, Yhdysvallat [viitattu 28.9.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://www.pc.ibm.com/us/accessories/monitors/tseries.html>.
- /11/ **Anon.** *Love me slender*. PC Magazine 19(2000)2, s. 132–158.
- /12/ **Anon.** *Metalliteollisuuden keskusliitto, standardisointi* [online]. Helsinki 2001 [viitattu 28.8.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://www.met.fi/standard>.
- /13/ **Anon.** *Microvision Application Note: Software & hardware implementation of ISO 13406-2 flat panel ergonomic requirements v. 5.0*. Auburn, Yhdysvallat 2001. 46 s.
- /14/ **Anon.** *Microvision Application Notes 13: Luminance measurements*. Auburn, Yhdysvallat 1998. 5 s.
- /15/ **Anon.** *Monitors Matter*. Computing Suppliers Federation, Iso-Britannia 1999. 30 s.

- /16/ **Anon.** *Näyttökomponentit* [online]. TTKK, Elektroniikan laitos, Tampere [viitattu 27.9.2001]. Saatavilla PDF-muodossa: [http://www.ele.tut.fi/teaching/74521/naytto\\_periaatteita.pdf](http://www.ele.tut.fi/teaching/74521/naytto_periaatteita.pdf).
- /17/ **Anon.** *Näyttöpäätetyön valaistus. Suosituksia ja suunnitteluohjeita*. TKK, Sähkölaitos- ja valaistustekniikan laboratorio, Suomen Valotekninen Seura r.y. Espoo 1990. 26 s.
- /18/ **Anon.** *Schott-Fostec DCR II DC Regulated Light Source, User Manual and Technical Reference*. Auburn, Yhdysvallat 1999. 37 s.
- /19/ **Anon.** *SGI display overview* [online]. Silicon Graphics Inc, Yhdysvallat [viitattu 1.10.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://www.sgi.com/peripherals/displays/index.html>.
- /20/ **Anon.** *SS200 Serial Operational Manual*. Microvision, Auburn, Yhdysvallat 2001. 329 s.
- /21/ **Anon.** *SS220 Data Sheet*. Microvision, Auburn, Yhdysvallat. 4 s.
- /22/ **Anon.** *Tamron CCTV Lenses* [online]. Yhdysvallat 2001 [viitattu 6.9.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://www.tamron.com/frame2.htm>.
- /23/ **Anon.** *World of LCDs* [online]. Sharp Corporation, Japani, [viitattu 27.9.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: [http://www.sharp.co.jp/sc/library/lcd\\_e/indexe.htm](http://www.sharp.co.jp/sc/library/lcd_e/indexe.htm).
- /24/ **Barten Peter G. J.** *Contrast sensitivity of the human eye and its effects on image quality*. SPIE Optical Engineering Press, Yhdysvallat 1999. 208 s.
- /25/ **Belcher M. Clay, Helms Ronald N.** *Lighting - the electronic textbook* [online]. University of Kansas, School of architecture and urban design, Yhdysvallat [viitattu 27.9.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://www.arce.ku.edu/book/>.
- /26/ **Bos Philip J.** *Nematic LCD modes and applications*. In: SID. Applications seminars. San Jose, Yhdysvallat 1999, s. A-2/1-33.
- /27/ **Brown S. W., Ohno Y.** *NIST Colorimetric Calibration Facility for Displays*. SID International Symposium, Digest of technical papers, San Jose, Yhdysvallat 1999, s. 794-797.
- /28/ **Cornelissen Hugo J.** *Frontlights for reflective LCDs*. Philips Research Laboratories, Alankomaat 1999. 18 s.
- /29/ **Engdahl Tomi.** *Sfnet.harrastus.elektroniikka, usein kysytyt kysymykset* [online]. TKK, Espoo [viitattu 27.9.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://www.hut.fi/Misc/Electronics/faq/sfnet.harrastus.elektroniikka/>.
- /30/ **Erickson Mark.** *Eye Anatomy* [online]. St. Luke's Cataract & Laser Institute, Yhdysvallat 2001 [viitattu 27.9.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://www.stlukeseye.com/anatomy.htm>.
- /31/ **Glynn II Earl F.** *Color Projects* [online]. efg's Computer Lab. Yhdysvallat 2001, päivitetty 15.7.2001 [viitattu 29.8.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://www.efg2.com/Lab/Graphics/Colors/index.html>.

- /32/ **Halonen Liisa, Lehtovaara Jorma.** *Valaistustekniikka*. Otatiето 542, Espoo 1992. 456 s.
- /33/ **Hedgecoe John, Ford Leonard.** *Valokuvaajan käsikirja*. Kindersley Limited, Lontoo 1977. 351 s.
- /34/ **Heeks Karl.** *Light-emitting-polymer displays*. Information Display 16(2000)12, s. 22–25.
- /35/ **Hunt R.W.G.** *Measuring Colour. 2nd ed.* Ellis Horwood series in applied science and industrial technology, Iso-Britannia 1991. 313 s.
- /36/ **Ikonen Erkki.** *Optiikan Perusteet*. Teknillinen korkeakoulu, Mittaustekniikan laboratorio, Espoo 1999. 81 s.
- /37/ **ISO 9241-7.** *Ergonomic requirements for office work with visual display terminals (VDTs) - Part 7: Requirements for display with reflections*. ISO, Sveitsi 1998. 31 s.
- /38/ **Israel S. [et al].** *Polymers and liquid crystals* [online]. Case Western Reserve University, päivitetty 2000 [viitattu 27.9.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://abalone.phys.cwru.edu/tutorial/enhanced/main.htm>.
- /39/ **Jacobsen Alan R.** *Display Image Quality: Design and Evaluation*. In: SID. Applications seminars. San Jose, Yhdysvallat 2001, s. A-5/1-46.
- /40/ **Jones Myrddin.** *Flat panel displays for monitors*. In: SID@EID Display Conference, Day one, Lontoo 2000. 15 s.
- /41/ **Keller Peter A.** *Electronic display measurement concepts, techniques, and instrumentation*. John Wiley & Sons, Inc in Association with SID, Yhdysvallat 1997. 326 s.
- /42/ **Kelley Edward F.** *Flat-Panel-Display Measurements and Standards*. In: SID. Applications seminars. San Jose, Yhdysvallat 2001, s. A-4/1-64.
- /43/ **Kelley Edward F., Jones George R., Germer Thomas A.** *Display reflectance model based on the BRDF*. Displays 19(1998)1, s 27–34.
- /44/ **Kimmel Jyrki.** *Displays for Portable and Mobile Communication Devices*. In: SID@EID Display Conference, Day one, Lontoo 2000. 20 s.
- /45/ **Koponen M.** *Väriäyttyjen viivanleveyden mittausten menetelmien arviointi*. Teknillinen korkeakoulu, S-18 sähkölaitokset, Espoo 1995. 82 s.
- /46/ **Korpela Jukka.** *Ajatuksia SI-järjestelmästä* [online]. TTKK, Tietotekniikan osasto, Tampere 2001, päivitetty 15.1.2001 [viitattu 27.9.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://www.cs.tut.fi/~jkorpela/SI/>.
- /47/ **Kubota Satoru.** *Ergonomic requirements for reflective liquid-crystal displays*. Displays 19(1998)19, s. 121–125.
- /48/ **Laine Janne.** *Värikuvan käsittely lähdetietojen pohjalta*. Teknillinen korkeakoulu, Viestintäteknikka, Espoo 1999. 80 s.

- /49/ **MacDonald L. W., Kwak Y.** *Characterisation of an LCD Projection Display*. University of Derby. Colour & Imaging Institute, Iso-Britannia 2000. 17 s.
- /50/ **MacDonald L. W. (toim.), Lowe A. C. (toim.)** *Display systems, design and applications*. John Wiley & Sons, Iso-Britannia 1997. 418 s.
- /51/ **Mikoshiba Shigeo.** *Color plasma displays*. In: SID, Seminar lecture notes Vol I, Boston, Yhdysvallat 1997, s. M-4/1-36.
- /52/ **Munisamy Anandan.** *LCD Backlighting*. In: SID Seminar lecture notes Vol II, San Jose, Yhdysvallat 2001, s. F-2/1-131.
- /53/ **Oittinen Pirkko, Saarelma Hannu.** *Kuvatekninen laatu*. Otatiето Oy 881, Otaniemi 1991. 141 s.
- /54/ **Oittinen Pirkko, Saarelma Hannu.** *Printing*. Fapet Oy, Helsinki 1998. 295 s.
- /55/ **Okumura Fujio.** *Active-Matrix Liquid-Crystal Displays (AMLCDs)*. In: SID Seminar lecture notes Vol I, San Jose, Yhdysvallat 2001, s. M-3/1-37.
- /56/ **Poor Alfred, Wilkes John.** *Look at this*. PC Magazine 20(2001)2, s. 165-175.
- /57/ **Rash C.E., Klymenko V., Harding T. H., Martin J. S.** *Do FPDs Need New Image-Quality Metrics?* Information Display 16(2000)6, s. 26-29.
- /58/ **Rohde Laura.** *IBM's New Display Is Easy on the Eyes* [online]. IDG news service, päivitetty 27.6.2001 [viitattu 28.9.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://www.pcworld.com/news/article/0,aid,53887,00.asp>.
- /59/ **Scheffer Terry, J., Nehring Jurgen.** *Supertwisted-nematic LCDs*. In: SID Seminar lecture notes Vol I, Boston, Yhdysvallat 1997, s. M-6/1-31.
- /60/ **Scheffer Terry, J., Nehring Jurgen.** *Supertwisted-nematic (STN) LCDs*. In: SID Seminar lecture notes Vol II, San Jose, Yhdysvallat 2001, s. F-1/1-39.
- /61/ **SFS-EN 29241-3:1992/AM1:2000.** *Näyttöpäätteillä tehtävän toimistotyön ergonomiset vaatimukset. Osa 3: Näytön vaatimukset*. Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2001. 43 s.
- /62/ **SFS-EN 61966-4.** *Multimedia systems and equipment. Colour measurement and management. Part 4: Equipment using liquid crystal display panels*. Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2000. 75 s.
- /63/ **SFS-EN ISO 13406-1.** *Ergonomiset vaatimukset litteillä näytöillä työskenneltäessä. Osa 1: Johdanto*. Suomen Standardisoimisliitto SFS, 1999. 16 s.
- /64/ **SFS-EN ISO 13406-2.** *Ergonomiset vaatimukset litteillä näytöillä työskenneltäessä. Osa 2: Litteiden näyttöjen vaatimukset*. WG2 final text for ISO/FDIS, 2001. 146 s.
- /65/ **Shiga T. [et al].** *A 30,000-cd/m<sup>2</sup>, 50-lm/W, and 92%-luminance uniformity flat discharge fluorescent lamp for LCD baclights*. Journal of the SID, 7(1999)3, s. 151-156.

- /66/ **Stokes Michael, Anderson Matthew, Chandrasekar Srinivasan, Motta Ricardo.** *A Standard Default Color Space for the Internet - sRGB Version 1.10* [online]. W3C, julkaistu 5.11.1996 [viitattu 27.10.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://www.w3.org/Graphics/Color/sRGB.html>.
- /67/ **Sundell Sami, Sulanto Matti.** *Paneelit pöydälle.* MikroPC (2001)14, s. 26–34.
- /68/ **Tannas Lawrence E. Jr.** *Display technologies and applications.* In: SID Applications seminars. San Jose, Yhdysvallat 1999, s. A-1/1–44.
- /69/ **Tomminen Jari.** *Kauniskuvainen tasonäyttö.* MikroPC (2001)11, s. 69.
- /70/ **VESA DFP 1.** *Digital Flat Panel.* Video Electronics Standards Association, San Jose, Yhdysvallat 1999. 16 s.
- /71/ **VESA FPDM 1.0.** *Flat panel display measurements standard.* Video Electronics Standards Association, San Jose, Yhdysvallat 1998. 281 s.
- /72/ **VESA VBE 3.0.** *BIOS Extension Core Functions Standard.* Video Electronics Standards Association, San Jose, Yhdysvallat 1998. 87 s.
- /73/ **Virginia Joe.** *iFire deploys inorganic EL technology for large-screen TVs.* Display Devices (2001)25, s. 43–44, 62.
- /74/ **Weber Larry F.** *Color Plasma Displays.* In: SID, Seminar lecture notes Vol II, San Jose, Yhdysvallat 2001, s. F-3/1–54.
- /75/ **Werner Ken.** *Information display online* [online]. SID, Yhdysvallat 2001 [viitattu 28.9.2001]. Saatavilla WWW-muodossa: <http://www.sid.org/news/newsarchive.html>.
- /76/ **Widdel H. (toim.), Post D. L. (toim.)** *Color in electronic displays.* In: Defense research series, Volume 3. Plenum Press in cooperation with NATO Defense Research Group, New York 1992. 335 s.
- /77/ **Wyszecki G., Stiles W.** *Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae.* John Wiley & Sons, New York 1982. 950 s.
- /78/ **Yana T., Hanzawa F., Watanabe Y.** *An intelligent inverter for a high-power LCD backlight.* Journal of the SID, 7(1999)3, s. 163-176.
- /79/ **Young H. D., Freedman R. A.** *University Physics.* Addison-Wesley Publishing Company Inc, 1999. 1484 s.

## LIITTEET

Liitteet on koottu oheiselle CD-levylle. Kaikki dokumentit ovat PDF-muodossa ja niiden lukemiseen tarvitaan Adobe Acrobat -ohjelma. Liitteet on jaettu lukuihin seuraavasti:

LIITE 1 Näyttöjen tiedot

LIITE 2.1 ISO 13406-2 -esimittaukset 3814FA

LIITE 2.2 ISO 13406-2 -esimittaukset 3851FA

LIITE 2.3 ISO 13406-2 -esimittaukset C381FA

LIITE 2.4 ISO 13406-2 -esimittaukset C383FA

LIITE 3.1 VESA FPDm -esimittaukset 3814FA

LIITE 3.2 VESA FPDm -esimittaukset 3851FA

LIITE 3.3 VESA FPDm -esimittaukset C381FA

LIITE 3.4 VESA FPDm -esimittaukset C383FA

LIITE 3.5 VESA FPDm -esimittaukset HP Jornada 548.pdf

LIITE 4.1 ISO 13406-2 -mittaukset 3814FA

LIITE 4.2 ISO 13406-2 -mittaukset 3851FA

LIITE 4.3 ISO 13406-2 -mittaukset C381FA

LIITE 4.4 ISO 13406-2 -mittaukset C383FA

LIITE 4.5 ISO 13406-2 -mittaukset iPAQ3630

LIITE 4.6 ISO 13406-2 -mittaukset m505

LIITE 5.1 Kulmariippuvaiset mittaukset 3814FA

LIITE 5.2 Kulmariippuvaiset mittaukset 3851FA

LIITE 5.3 Kulmariippuvaiset mittaukset C381FA

LIITE 5.4 Kulmariippuvaiset mittaukset C383FA

LIITE 5.5 Kulmariippuvaiset mittaukset m505

LIITE 5.6 Kulmariippuvaiset mittaukset 9210

LIITE 5.7 Kulmariippuvaiset mittaukset iPAQ3630

LIITE 6 ISO 13406-2 mittausohje