



Joacim Pehkonen

Näyttöteknologioiden kehitys: Vertaileva analyysi ja valinta

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Konetekniikka

Insinöörityö

28.3.2025

Tiivistelmä

Tekijä: Joacim Pehkonen
Otsikko: Näyttötekniologian kehitys: Vertaileva analyysi ja valinta
Sivumäärä: 67 sivua
Aika: 28.3.2025

Tutkinto: Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma: Konetekniikka
Ammatillinen pääaine: Koneautomaatio
Ohjaaja: Lehtori Maria Sjöholm

Opinnäytetyön aiheena oli selvittää näyttötekniologioiden väliset suorituskyvylliset erot ja mikä niistä kannattaisi valita oman tarpeensa mukaan. Työssä keskityttiin pääasiallisesti televisioihin ja monitoreihin. Työn tarkoituksena oli selvittää lukijalle mitä nykypäivänä käytössä olevien näyttötekniologioiden takana teknillisesti löytyy ja kuinka nämä vaikuttavat näyttöjen ominaisuuksiin ja kuvanlaatuun. Tämä puolestaan auttaa valitsemaan itselle parhaiten sopivan vaihtoehdon huolellisen pohdinnan perusteella.

Tutkimusaineistona oli nettiartikkelit (tieteelliset raportit, kirjat, opinnäytetyöt ja näyttötekniologyritysten laatimat artikkelit). Työn tutkimusmetodi oli siis selvitystyö, jossa kerättiin tieto aineistomuotoon. Tämä luo kokonaiskuvan näyttötekniologioista, näin lisäten lukijan ymmärrystä aiheesta ja ohjaten oikeanlaisen näytön hankintaan.

Aineistoon sisältyy keskeisiä digitaalisia asiakokonaisuuksia, joihin vaikuttavat fyysikaaliset ominaisuudet. Näitä ovat muun muassa resoluutio, virkistystaajuus, väriavaruudet ja HDR, sekä SDR, sekä näihin liittyvät alakokonaisuudet. Nämä mahdollistavat digitaalisen kuvan ja määrittävät esimerkiksi kuvan liikkeenselkeyden, tarkkuuden ja kontrastin. Samalla käytiin läpi näyttöjen koostumus, niiden rakenne ja miten nämä komponentit toimivat yhdessä ja yksinään kemiallisella ja fyysikaalisella tasolla luoden kuvan näytölle. Näin myös lukija oppii ymmärtämään, mitä asioita kannattaa tarkistaa näyttöjen teknillisistä ja ominaisuudellisista tiedoista.

Tuloksena syntyi aineisto, joka kattaa edellä mainitut asiat, kommenttien ja harkintojen lisäämänä. Lopputuloksena saatiin hahmotettua laaja asiakokonaisuus yhtenäiseksi kokonaisuudeksi ja tästä syntyi kattava aineisto näyttötekniologioista pintaa syvemältä.

Avainsanat: HDR, näyttötekniologia, resoluutio, SDR, virkistystaajuus, väriavaruus

Abstract

Author: Joacim Pehkonen
Title: Advancements in Display Technologies: A Comparative Analysis and Selection
Number of Pages: 67 pages
Date: 28 March 2025

Degree: Bachelor of Engineering
Degree Programme: Mechanical Engineering
Professional Major: Machine Automation
Supervisor: Maria Sjöholm, Lecturer

The topic of this thesis was to present the main performance differences in currently available display technologies and make suggestions for the selection based on application. This work focused on televisions and monitors. The focus of this work was to clarify the technical specifications of displays on the market currently and how these affect the final picture quality. This helps guiding the buyer to the best screen solution for them.

Articles, such as scientific articles, books, theses, and articles written by display technology companies were the main source of information in this thesis. The research method was in the form of an examination where information was gathered into a material, which creates an overall picture of the display technologies used today. This increases the knowledge of the reader, steering to invest in the best display solution for their needs.

The resulting material includes overall key properties, such as pixel resolution, refresh rate, color spaces, HDR and SDR along with subtopics related to these. These make the digital picture possible on a software level. This material also includes panel construction, what they are made of and how the components work together and separately on an electrochemical and physical basis enabling the picture on the screen. By reading this, the reader learns what to look for in the technical properties of a display.

The result is a collection of materials that cover the aforementioned things, with added comments and consideration. The result is a well-covered material about display technologies.

Keywords: Color space, display technology, HDR, pixel resolution, refresh rate, SDR

Sisällys

Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Taustatietoa ja aiheen avaaminen	2
2.1	Ihmisen visuaalinen kyky suhteessa näyttötekniologiaan	3
2.1.1	Resoluutio ja katseluetäisyys	4
2.1.2	Virkistystaajuus ja kuvataajuus	5
2.1.3	Näytöissä sovellettavat väriavaruudet	8
2.2	Korkea dynamiikka-alue (HDR)	14
2.3	Light-Emitting Diode (LED)	18
3	Nykypäivän näyttötekniologiat	20
3.1	LCD (Liquid Crystal Display) / LED (Light-Emitting Diode)	22
3.1.1	Rakenne ja toimintaperiaate	23
3.1.2	Päättyypit	26
3.1.3	Taustavalaistustyypit	29
3.1.4	Yhteenveto	32
3.2	QLED (Quantum Dot LED)	33
3.2.1	Rakenne ja toimintaperiaate	34
3.2.2	Yhteenveto	36
3.3	OLED (Organic Light-Emitting Diode)	37
3.3.1	Rakenne ja toimintaperiaate	38
3.3.2	Yhteenveto	45
3.4	Teknologioiden vertailu	45
4	Näyttötekniologioiden tulevaisuus	50
4.1	Micro-LED (Micro Light-Emitting Diode)	51
4.1.1	Rakenne ja toimintaperiaate	51
4.1.2	Haasteet	52
4.2	PHOLED (Blue Phosphorescent OLED)	54
4.2.1	Haasteet	55
4.3	QDEL (Quantum Dot Electroluminescence)	56
4.3.1	Rakenne	56
4.4	Kvanttipistepohjainen värifilteri (QDCF)	58

4.4.1	Haasteet ja tulevaisuuden applikaatiot	59
5	Näytön valinta	60
5.1	Käyttötarkoitus - televisio vai monitori?	61
5.2	Teknologian valinta	64
6	Johtopäätökset	66
7	Yhteenveto	67
	Lähteet	68

Lyhenteet ja käsitteet

Alipikseli: Jokainen pikseli koostuu kolmesta alipikselistä., jotka ovat väriltään punainen, vihreä ja sininen. Tästä nimitys ”RGB”, (red, green, blue).

ALLM: Auto Low Latency Mode. Ominaisuus, joka vähentää syöttöviivettä estämällä tietyt videonkäsittelyominaisuudet.

APL: Average Picture Level. Määrittää, kuinka suuri osa näytöstä on kirkas prosentuaalisesti.

BBC: British Broadcasting Corporation. Britannian julkinen yleisradio- ja tuotantoyhtiö.

Eksitoni: Kristallisissa liikkuva energiapitoisuus, joka muodostuu virittyneestä elektronista ja siihen liittyvästä aukosta.

Elektroluminesenssi:

Optoelektroninen ilmiö, jossa sähköenergia muunnetaan suoraan valoksi. Se sisältää fluoresenssin tai fosforesenssin, joka syntyy sähkövirran kulkiessa tai voimakkaan sähkökentän vaikutuksesta. Ilmiö perustuu elektronien ja aukkojen säteilylliseen rekombinaatioon puolijohteessa.

EOTF: Electro-optical transfer function. Karkeasti suomennettuna sähköoptinen siirtofunktio.

Fluoresenssi:

Sähkömagneettisen säteilyn, yleensä näkyvän valon, emissio, joka johtuu aineen atomien virittymisestä ja niiden lähes välittömästä uudelleensäteilystä (noin 10^{-8} sekunnin kuluessa).

FOV: Field of View. Näkökenttä.

Fosforesenssi:

Ilmiö, jossa aine emittoi valoa säteilyn vaikutuksesta ja jatkaa hehkumista vielä sen jälkeen, kun virittävä säteily on poistettu.

HDMI: High Definition Multimedia Interface. Patentoitu audio-/video-liitäntä.

HDR: High Dynamic Range. (Korkea dynamiikka-alue). Videosignaali, joka parantaa kuvanlaatua tuomalla esiin entistä kirkkaampia kohokohtia ja luomalla laajemman värikirjon.

HLG: Hybrid Log-Gamma. HDR-muoto, joka on tarkoitettu live-lähetysten käyttöön. Se yhdistää SDR- ja HDR-muodot yhdeksi signaaliksi.

ITU: International Telecommunication Union. Kansainvälinen televiestintäliitto.

IQE: Internal Quantum Efficiency. Ominaisuus, joka kuvaa puolijohdemaateriaalin tai valonlähteen kykyä muuntaa sähköisesti tuotetut varauksenkuljettajat (elektronit ja aukot) fotoneiksi.

Kapselointi: Encapsulation. Prosessi, jossa toinen materiaali "kapseloidaan" eli suojataan toisen materiaalin sisälle.

Kandela: Candela. Valovoiman yksikkö (cd). Periaatteessa valonlähteen kirkkaus tietyyn suuntaan. Tulee latinankielisestä sanasta "candela", joka tarkoittaa kynttilää. 1 kandela vastaa suunnilleen kynttilänvalon voimakkuutta.

Kondensaattori:

Laite, jolla on kyky varastoida sähkövarausta.

Kuvataajuus:

Frame rate. Frames Per Second (FPS). Mittari nopeudelle, jolla näyttönohjain/grafiikkaprosessori voi tuottaa ja renderöidä kuvia sekuntia kohden.

Luminesenssi:

Ilmiö, jossa aineen elektronitila virittyy ulkoisen energian vaikutuksesta ja viritysentergia vapautuu valon muodossa.

NHK: Nippon Hoso Kyokai. Japan Broadcasting Corporation. Japanin yleisradioyhtiö.

Nits: Kirkkauden mittausyksikkö, joka vastaa yhtä kandela per neliometri (cd/m²). Tulee latinankielisestä sanasta "nitere", joka tarkoittaa "loistaa".

Pikseli:

Pienin yksikkö näytössä. Suuressa määrin luovat digitaalisen kuvan. Koostuu 3–4 alipikselistä, riippuen teknologiasta.

Rekombinaatio:

Negatiivisen ja positiivisen varauksenkuljettajan välinen vuorovaikutus, jossa niiden sähkövaraukset neutraloituvat.

SDR: Standard Dynamic Range. Tällä viitataan vanhaan näyttöteknologian standardiin pohjautuvaan videosignaaliin.

SMPTE: Society of Motion Picture and Television Engineers. Maailmanlaajuisen asiantuntijaliitto. Standardointi organisaatio.

Suspensio: (Kemia). Aine, jossa nesteeseen on sekoittunut hienojakoista liukenematonta kiinteää ainetta, joka ei erotu nesteestä.

Syöttöviive: Input lag. Viive, joka syntyy näytön vastaanottaman signaalin ja tämän näytöllä näyttämisen välillä. Esim. kaukosäätimen tai näppäimistön lähettämä signaali.

Sävykartoitus:

Tone Mapping. Kuvan prosessointitekniikka.

Vasteaika: Pixel Response Time. Pikselin värinmuutokseen kuluva aika harmaasta harmaaseen. Näytöissä tyypillisesti tämä aika on 1 ms - 30 ms.

VESA: Video Electronics Standards Association. Elektroniikkavalmistajista koostuva kansainvälinen organisaatio. Pää tavoitteena on kehittää ja edistää standardeja näyttöliittymille ja vastaaville teknologioille.

Virkistystaajuus:

Refresh Rate (Hz). Näytön virkistystaajuus, jonka mittayksikkö Herz.

VRR: Variable Refresh Rate. Kuvan lähetysjärjestelmä, joka mahdollistaa laitteen virkistystaajuuden sopeutumisen videotulolähteen tai pelin sisällön virkistystaajuuden mukaan.

VSyc: Vertical Synchronization. Näyttötekniikka, joka estää kuvanvetohäiriön/kuvan repeilyä (screen tearing) graafisesti intensiivisissä sovelluksissa.

Värialue: Color Gamut. Määrittää värien määrän, jonka laite pystyy näyttämään.

Väriavaruus:

Color Space. Näitä ovat muun muassa sRGB, DCI-P3, Rec.709 ja Rec.2020. Jokaisella väriavaruudella on yksilöllinen värien alue, joka perustuu yhdistelmään ensisijaisia värejä ja näiden intensiteetteihin.

Värimäärä: Color Volume. Esitys värien määrästä, jonka näyttö voi näyttää eri kirkkaustasoilla.

WCG: Wide Color Gamut. Tällä viitataan värialueeseen, joka on laajempi kuin sRGB standardi.

1 Johdanto

Tässä insinööriyössä perehdytään selvitystyön muodossa nykypäivän näyttöteknologioiden maailmaan. Tutkimuskysymyksenä on ”Mikä on näyttöteknologioiden välinen suorituskykyero ja mikä teknologia kannattaa valita?”. Tästä insinööriyöstä selviää juuri sinulle optimaalisin näyttöteknologia ja näyttömuoto, oli se sitten vapaa-ajan viihteeseen ja harrastukseen tai työkäyttöön.

Työssä esitellään, vertaillaan ja analysoidaan perusteellisesti nykypäivänä käytössä olevia näyttöteknologioita perehtymällä syvemmin erityisesti televisioihin ja monitoreihin sekä tuleviin innovaatioihin ja trendeihin. Samalla tarkastellaan tärkeimpiä ominaisuuksia, jotka tekevät kuvasta mahdollisimman hyvän, luoden parhaan mahdollisen kokemuksen. Aineisto luo kattavan ja selkeän kuvan tänä päivänä saatavilla olevista teknologioista ja näihin liittyvistä ominaisuuksista.

Tavoitteena on siis tunnistaa ja analysoida näyttöteknologioiden viimeaikaisia edistysaskeleita vertaamalla näiden fyysistä ja ohjelmistopohjaista suorituskykyä ja ominaisuuksia. Samalla selvennetään teknisiä termejä, jotka on luotu kuvaamaan potentiaalista kuvanlaatua, kuten esimerkiksi värisyvyys ja kontrasti, näin lisäten ostajan ymmärrystä ja tietoisuutta valitessaan itselleen sopivinta näyttöratkaisua.

Näiden pohjalta voidaan tehdä perusteltuja näyttövalintoja, jotka voivat parantaa työtuloksen laatua tai yksinkertaisesti parantaa käyttökokemusta.

Työn tavoitteena on tarjota arvokkaita näkemyksiä näyttöteknologian nykytilasta ja tulevaisuudesta, ja näin helpottaa ammattilaisten ja yksityishenkilöiden päätöksentekoa näyttöjen valinnassa sekä inspiroida tulevaa tutkimusta.

Insinööriyö perustuu pääasiallisesti nettikirjoihin, -artikkeleihin ja -tieteellisiin tutkimuksiin/raportteihin. Tiedot on tarkistettu useasta lähteestä ja luotettavuutta kyseenalaistettu, ja näin ollen hyvää lähdekritiikkiä on sovellettu.

2 Taustatietoa ja aiheen avaaminen

Näyttötekniikoiden kehitys on ollut merkittävä osa digitaalisten laitteiden evoluutiota, jopa johtava. Niiden ansiosta tieto on saatu visualisoitua reaaliaikaisesti, joka vuorostaan on vaikuttanut siihen, kuinka ihmiset ovat vuorovaikutuksessa informaation, viihteen ja koko maailman kanssa.

Tässä luvussa avataan näyttötekniikkaan liittyviä asiakokonaisuuksia, samalla vertaillen tätä ihmisen näkökykyyn. Selvitetään keskeiset edistysaskeleet, jotka ovat mahdollistaneet nykypäivän saavutukset ja laaditaan hyvä tietoperusta teknologioiden esittelyitä ja vertailuita varten.

Näyttötekniikoiden mahdollistamisen takana on fotonikan opintoala, optoelektronikka, joka viittaa tutkimukseen ja sovelluksiin, joissa elektronisia laitteita käytetään valon tuottamiseen, havaitsemiseen ja ohjaamiseen hyödyntämällä valon kvanttimekaanisia vaikutuksia elektronisiin materiaaleihin, erityisesti puolijohteisiin [1].

Nykypäivän näyttötekniikat nähdään hyvinkin laajasti etenkin kuluttajaelektronikassa. Muun muassa kannettavissa tietokoneissa, monitoreissa, kännyköissä, älykelloissa, videopeli konsoleissa ja televisioissa. Ne perustuvat monesti usean eri teknologian yhteistoimintaan ja tämän takia markkinallisia teknologianimityksiä onkin enemmän kuin puhtaita teknologioita, joita tässä työssä vertaillaan.

Näytöt rakentuvat kahdesta eri tekijästä. Ensimmäinen on fyysinen kokonaisuus, johon kuuluvat sisään-/ulostulot (I/O), eli liitettävyys ja näyttöpaneeli kerrokseen. Sisääntuloihin (input) lukeutuvat kaikki laitteet, jotka lähettävät digitaalisen videosignaalin näytölle, esimerkiksi pelikonsoli tai Blu-Ray soitin. Digitaalinen videosignaali koostuu väriavaruudesta, siirtofunktiosta (gamma), kuvataajuudesta ja resoluutiosta.

Ulostulo (output) tarkoittaa vastakohtaa, esimerkiksi näytön lähettämä äänisignaali kaiuttimille. HDMI-liitäntä voi siis toimia, sekä sisään- että ulostulona riippuen tiedonsiirron kulkusuunnasta. Tätä käytetään pakkaamattoman

videosignaalin ja pakkaamattoman tai pakatun digitaalisen audion siirtämiseen lähdelaitteesta esim. pelikonsolista, näyttölaitteeseen, kuten televisioon. Tällä kokonaisuudella saadaan kuva ja ääni fyysisesti mahdollistettua.

Jokaisella näytöllä on oma käyttöjärjestelmä, josta löytyy kuva-, ääni- ja järjestelmäasetuksien lisäksi tulot, lähteet ja käyttöliittymä. Tämä pätee televisioille kokonaisuudessaan, muttei kaikkien monitoreiden kohdalla, sillä niissä ei välttämättä ole kaikkia ominaisuuksia kuin televisioissa. Esimerkkejä näistä on sisäänrakennetut kaiuttimet ja langattoman verkon adapteri. Monitoreissa on yleensä vähemmän asetuksia, ja ne rajoittuvat usein vain perusmuokkauksiin, mikä tekee televisioista vahvemman vaihtoehdon kuvansäädön osalta.

Näyttötekniikoilla on hyvin suuri markkina. Vuonna 2022 globaalin näyttömarkkinan arvo oli 159,7 miljardia Yhdysvaltain dollaria (USD). Markkinoiden odotetaan kasvavan noin 297,3 miljardiin USD vuoteen 2030 mennessä, mikä tarkoittaisi 8,3 % yhdistettyä vuotuista kasvuvauhtia (CAGR) vuosina 2024–2034. [2.]

Aihe onkin hyvin relevantti laajuutensa ansiosta ja se on mullistanut koko elämäntyyliämme, tehden jokapäiväisestä elämästä sujuvampaa, mutta samalla monimutkaisempaa. Kaikki tarvittava tieto löytyy kämmenenkokoisesta laitteesta, joka ei ilman näyttötekniikoita olisi mahdollinen.

2.1 Ihmisen visuaalinen kyky suhteessa näyttötekniikkaan

Kun ajatellaan tekniikkaa, joka on ainoastaan näöllä havaittava, täytyy tietenkin ottaa huomioon ihmisten näkökyky, kun näyttöjä kehitetään. Kehittäminen tulee suunnitella ja toteuttaa niin, että saavutetaan paras mahdollinen tulos.

Ihmisen horisontaalinen näkökenttä on molemmilla silmillä samanaikaisesti katsottuna arviolta 120° ja noin 200° vertikaalisesti [3]. Värinäkö on noin 25 % laajempi kuin mitä mikään tämänhetkinen näyttö pystyy tuottamaan.

Näitä kahta vertaillessa on otettava huomioon resoluutio ja katseluetäisyys, virkistystaajuus, väriavaruus, jota sisältö käyttää, värialue, johon itse näyttö kykenee, sekä kontrasti ja kirkkaus.

2.1.1 Resoluutio ja katseluetäisyys

Suosittelun katseluetäisyyteen vaikuttaa näytön resoluutio ja koko. Mitä suurempi resoluutio, sen lähempänä täytyy olla havaitakseen tarkemmat yksityiskohdat, jotka suurempi resoluutio tuo tullessaan. Pikselikoko vaihtelee näytöissä koon mukaan, koska pikselimäärä pysyy samana koon suurentuessa tai pienentyessä. Tässä kohtaa tulee katseluetäisyys mukaan kuvioihin. Katseluetäisyys kasvaa luonnollisesti näytön suurentuessa, jotta silmä pystyy havaitsemaan kaiken näytöllä olevan tiedon. Tähän ihmissilmän näkökenttä on suuri vaikuttava tekijä.

Vertaillessa näköä digitaaliseen resoluutioon täytyy ottaa huomioon, että ihmisen näkökykyä ei voida mitata suoraan pikseleissä, sillä silmä ei näe pikseleissä. Yksittäisiä pikseleitä silmä voi kuitenkin nähdä, jos tarpeeksi läheltä katsoo.

Tämä vaikeuttaa vertailua ja asiasta onkin kuitenkin tehty tutkimus, jossa liikkeessä olevan silmän näkemäksi resoluutioksi on saatu 576 megapikseliä, joka vastaa 576,000,000 yksittäistä pikseliä [4] (olettaen normaalin näöntarkkuuden). Vilkaaisu taas olisi ainoastaan noin 5–15 megapikseliä.

Ihmisen visuaalinen järjestelmä on kehittynyt miljoonien vuosien ajan ja jatkaa kehittymistään. Eroavuus ihmisen näkemän todellisuuden ja vuoden 2000 tuotetun sisällön välillä oli yli miljoonakertainen. Näyttötekniikan suurena haasteena oli ja on edelleen, kuroa umpeen tämä ero laitteiden ja näköjärjestelmän välillä. [5.]

Nykypäivänä ero ei ole läheskään yhtä suuri kuin tuolloin. Tällä hetkellä suurin resoluutio markkinakäytössä on 8k (7,680 x 4,320 pikseliä), joka vastaa 33,2 megapikseliä. Termi "8K" tulee siitä, että tämän resoluutioisessa näytössä on aina

7,680 pikseliä horisontaalisesti vierekkäin koko näytön leveydeltä. Se on pyöristetty täksi markkinointitarkoituksessa. Sama periaate pätee muihin resoluutioihin (4K = 3840 x 2160p, 2K = 2560 x 1440p ja Full HD= 1920 x 1080p).

8K- resoluutioiset-näytöt eivät kuitenkaan ole kovin suuressa kysynnässä, sillä silmällä havaittava ero 4K-teknologiaan on minimaalinen normaalilta katseluetäisyydeltä. Jos haluaa nähdä mitään eroa, tulisi etäisyys puolittaa. Tämän lisäksi 8K-sisältöä on hyvin niukasti ja hintaero on suuri. Kiteytettynä, hintaero yhdistettynä rajallisen sisällön määrään, 8K-näytöt ovat tällä hetkellä ”normaali” viihde-, peli ja työkäyttöön tarpeettomia.

Aikaisemmin mainittu 2000-luvun alussa oleva miljoonakertainen ero on nykyään enää noin seitsemäntoistakertainen. Näyttötekniologioiden tuottama resoluutio on siis kehittynyt merkittävästi viimeisten kahdenkymmenen vuoden aikana.

Se, että ero on seitsemäntoistakertainen, ei kuitenkaan tarkoita, että näkisimme 8k:n, mainitsemattakaan 4K:n epätarkkana. Tähän vaikuttaa katseluetäisyys ja silmän tapa prosessoida tietoa, jotka ovat suuria tekijöitä tähän.

Etäisyyden merkittävyyttä voidaan havainnollistaa tosielämäntilanteella. Kuvittele olevasi hiekkarannalla. Katsot hiekkaa läheltä päin ja pystyt laskemaan hiekanjyviä, mutta heti katseluetäisyyden kasvaessa et enää pystykään erottamaan hiekanjyviä toisistaan. Tähän periaatteeseen voidaan verrata näytön resoluutiota.

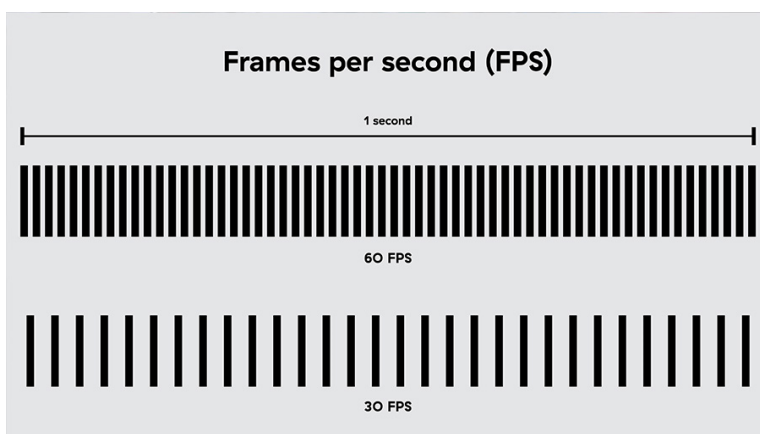
2.1.2 Virkistystaajuus ja kuvataajuus

Virkistystaajuudella ja kuvataajuudella on suuri merkitys videon näkyvyydellä silmälle. Virkistystaajuuteen sekoitetaan usein kuvataajuus-termi, joten käydään tässä lävitse näiden ero ja suhde toisiinsa. Näillä kahdella on suuri merkitys videon selkeyteen nopeiden liikkeiden toistossa, edellyttäen näiden kahden yhteistä toimintaa.

Ihmisen silmä työstää liikkeen eri tavalla kuin näyttö, joka havaitsee jokaisen yksittäisen ruudun videossa. Video on kokoelma liikkumattomia kuvia (ruutuja)

liikkeessä, jotka päivittyvät jatkuvasti uuteen. Sisältö ja mahdollisesti grafiikka-suoritin (GPU), sekä prosessori (CPU), (jos kyseessä on peli tai muu reaaliaikaisesti tuotettava sisältö), määrittävät kuvataajuuden, kun taas näyttö virkistystaajuuden.

Kuvataajuuden ollessaan 60 fps tarkoittaa, että ruutu vaihtuu toiseen 60 kertaa jokaista sekuntia kohden (kuva 1). Tämä luokitellaan jo hyvin nopeaksi ja se tarjoaa tuplasti enemmän tietoa kuin 30 fps.



Kuva 1. Kuvataajuus visualisoituna. 60 fps verrattuna 30 fps [6].

Kuvataajuus ja virkistystaajuus sekoitetaan helposti toisiinsa. Sen ymmärtää helpoiten selvittämällä käytännölliset erot. Kuvataajuus määrittää kuinka yksityiskohtaiselta kuva näyttää (kuva 2), kun taas virkistystaajuus määrittää kuinka su-lavasti kuvat näkyvät silmälle vähentämällä välkyntää [7].



Kuva 2. 30 fps verrattuna 60 fps digitaalisessa mikroskoopissa. Kuva havainnollistaa hyvin tietomäärän eron. Tämä pätee samalla tavalla esimerkiksi pelissä tai toimintaelokuvassa, näytöllä nopeasti tapahtuviin liikkeisiin. [6.]

Ajatellessa uuden näytön hankkimista esimerkiksi tietokoneelle tai pelikonsolille, tulee selvittää näytönohjaimen kyvykkyys ja sen mukaan valita tarpeeksi korkea virkistystaajuudellinen näyttö. Muuten näyttö toimii ikään kuin pullonkaulana, koska se ei pysty päivittämään kuvia yhtä nopeasti kuin näytönohjain tuottaa ja renderöi/hahmontaa niitä.

Lopuksi käydään läpi näihin kahteen liittyvää tekniikkaa, joka synkronisoi nämä toistensa kanssa estäen kuvanvetohäiriön, joka esiintyy, kun näytön virkistystaajuus ja näytönohjaimen tuottama kuvataajuus eivät täsmää toistensa kanssa. Kuvanvetohäiriö esiintyy näytöllä horisontaalisena jakaumana yhdessä tai useammassa kohtaa (kuva 3).

Tätä teknistä ominaisuutta kutsutaan synkronointitekniikaksi. V-Sync (Vertical Synchronization) oli ensimmäinen versio tästä tekniikasta korjaamaan tätä ongelmaa. Se synkronoi näytön vertikaalisen virkistystaajuuden näytönohjaimen kuvataajuuden kanssa. Tämä kuitenkin lisää syöttöviivettä, koska se laittaa näytönohjaimen odottamaan, kunnes näyttö esittää kokonaisen ruudun, ennen kuin se sallii sen alkaa renderöimään seuraavaa. [8.]

Nykyään tästä on tehty parempia dynaamisia versioita, jotka mahdollistavat näytön virkistystaajuuden muuttamista dynaamisesti. Näitä ovat VESA:n kehittämä Adaptive-Sync, NVIDIA:n G-Sync ja AMD:n FreeSync. Tämä edellyttää

kuvataajuuden olevan näytön VRR-alueen sisällä, joka voi olla esimerkiksi 48–144 Hz. [9.]



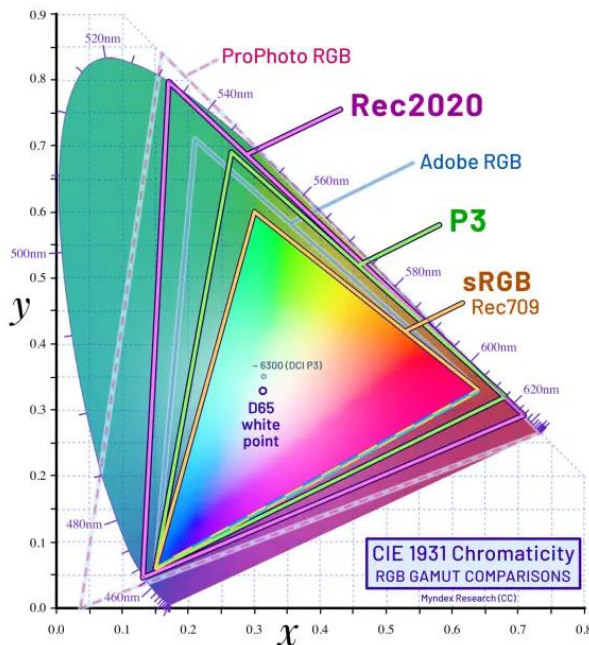
Kuva 3. Kuvanvetohäiriö esitettyä tosielämäntilanteessa [9].

2.1.3 Näytöissä sovellettavat väriavaruudet

Väriavaruuteen liittyy väritarkkuus ja värimäärä. Väritarkkuuteen liittyy siirtofunktio (gamma), valkotasapaino, värilämpötila ja tietysti väritarkkuus itse. Värimäärään vaikuttaa näytön värialue, kirkkaus ja kontrasti. Samalla määritetään muita aiheeseen liittyviä käsitteitä, kuten saturaatio, värisävy ja värisyvyys. Tässä alaluvussa selvennetään nämä käsitteet ja kuinka nämä liittyvät toisiinsa ja itse kuvanlaatuun.

Aloitetaan käymällä läpi väriavaruudet. Näyttötekniologiassa sovellettavat väriavaruudet ovat sRGB, Rec.709, DCI-P3 ja Rec.2020, jotka voidaan esittää CIE 1931 kromaattisuus diagrammissa. Tämä diagrammi määrittelee värilaadun objektiivisella tasolla, kartoittamalla ihmisen silmälle näkyvät värisävyt ja värikylläisyyden [10]. CIE 1931 -väriavaruuden on luonut ranskalainen Commission Internationale de l'Éclairage tai englanniksi International Commission on Illumination

(CIE) vuonna 1931. Tämä on siis ihmisen värinäön kartoittava malli, jota voidaan hyödyntää väriavaruuksien havainnollistamiseen (kuva 4).



Kuva 4. Väriskaala, jossa esitetään eri väriavaruuksien kyvykkyyttä suhteessa ihmisen näkemään väriskaalaan ja toisiinsa xy-diagrammissa. Uloin reunus on ihmissilmän väriskaala [11].

sRGB on standardi, jota käytetään erityisesti verkkografiikassa ja tietokonenäytöissä. Sen gamma-arvo on 2.2 ja bittisyvyys 8. Standardi: IEC 61966-2-1:1999.

Rec.709/BT.709 toimii samassa väriavaruudessa kuin sRGB, mutta sen gamma-arvo on suurempi (2.4). Tämä kattaa arviolta 35,9 % ihmissilmän värihavaittavuudesta. Tämä on kehitetty SDR-standardin mukaan Full HD (1920 x 1080) -resoluutiota varten, mutta voidaan soveltaa myös muissa resoluutioissa. Bittisyvyys 8.

DCI-P3 (Digital Cinema Initiatives - Protocol 3) on DCI-organisaation vuonna 2010 laatima väristandardi, jota käytetään yleisimmin digitaalisissa elokuvissa. Se kattaa arviolta 53,6 % ihmissilmän värihavaittavuudesta ja gamma-arvo on 2.6.

Rec.2020/BT.2020 on International Telecommunication Unionin (ITU) 2012 julkaisema suositus ultrateräväpiirtoisille (UHD) näytöille. Se on erittäin laaja väriavaruus, joka kehitettiin 4K/8K-näytöille ottaakseen täyden hyödyn irti

väri-laajuudellisesti. Se kattaa arviolta 75,8 % ihmissilmän värihavaittavuudesta. Bittisyvyys on 10/12.

Värisyvyys

Seuraavaksi selvennetään mitä värisyvyys (bittisyvyys) tarkoittaa. Sillä viitataan koodausjärjestelmän suurimpaan mahdolliseen arvoon. Se on siis suurin arvo bittejä järjestelmän tallennuselementissä, joka näyttöjen kohdalla on alipikseli. [12.] Eli jos bittisyvyys on 8, se tarkoittaa, että jokainen alipikseli sisältää 8 bittiä. Joskus tämä nähdään esiteltynä 24-bit, jolla viitataan yhden kokonaisen pikselin bittimäärään.

Bittisyvyys (bittimäärä) alipikselissä määrittää totaalisen määrän värejä, joita näyttö pystyy esittämään ja tämä on hyvin tärkeä mittari vertaillessa näyttöjä, jotka väittävät kykenevänsä WCG- ja HDR-sisällön toistamiseen (kuva 5). Bittisyvyyden suurentuessa esimerkiksi kahdeksasta kymmeneen, sävyarvot ja värisävyjen määrä nousee eksponentiaalisesti, josta seuraa tasaisempi värinmuutos, yksityiskohtaisemmat varjot ja kohokohdat (kirkkaimmat kohdat), sekä laajempi värialue.

Bit-Depths Converted To Potential Gray Tones and Colors			
Bits Per Color	Log Formula (power of 2)	Monochrome Grayscale Values	Potential R,G,B Color Values
1-bit	$2^1 =$	2	8
2-bit	$2^2 =$	4	64
3-bit	$2^3 =$	8	512
4-bit	$2^4 =$	16	4096
6-bit	$2^6 =$	64	262144
8-bit	$2^8 =$	256	16.77 Million
10-bit	$2^{10} =$	1024	1.07 Billion
11-bit	$2^{11} =$	2048	8.59 Billion
12-bit	$2^{12} =$	4096	68.72 Billion

Kuva 5. Bittisyvyys muunnettuna yksivärisiin harmaaskaalaisiin arvoihin ja väriarvoihin [13].

Harmaaskaalan laskemiseen käytetään pohja-arvoltaan 2 logaritmia, jonka potenssiin sijoitetaan bittimäärä. Esimerkiksi 2^8 (8 bittisessä järjestelmässä), josta tulee 256 yksittäistä yksiväristä harmaaskaalan arvoa. Kun nämä kerrotaan kolmella, (koska alipikseleitä on kolme) saadaan; (punainen 256) x (vihreä 256) x (sininen 256), josta tulee yhteensä $16,777,216 \approx 16,77$ milj. ainutlaatuista väriä. [13.] Kustakin väristä on siis 256 eri sävyä, jotka yhdistettynä toisiinsa luovat eri saturaatioisia värejä.

Värimäärä ja saturaatio

Värimäärän laatuun vaikuttaa värialue, kirkkaus ja kontrasti. Värimäärä itsessään tarkoittaa hyvinkin yksinkertaisesti, kuinka monta eri väriä näyttö pystyy esittämään eri kirkkaustasoilla [14].

Värialue määrittää kuinka monta eri väriä näyttö pystyy tuottamaan [15]. Värialue on siis näytön värintoistokyvykkyyttä kuvastava termi. Näytön värialue ilmaistaan prosentuaalisena kattavuutena tietystä väriavaruudesta, esimerkiksi 75,67 % kattavuus Rec.2020 väriavaruudesta. Värialue sekoitetaan usein edellä mainittuun värisyvyyteen. Yksinkertaistettuna asian voi selittää siten, että mitä enemmän bittitejä, sen suuremman määrän eri värejä voidaan näyttää näytön määrittämällä värialueella. [16.]

Kirkkaudella (luminanssilla) viitataan objektiin, joka emittoi, eli säteilee valoa. Näytön kirkkaus saadaan selville mittaamalla valon voimakkuus (kandela, cd) pinta-alaa kohti (cd/m^2). Näytönvalmistajat käyttävät tälle nimitystä nits.

Kontrasti on yksi keskeisemmistä tekijöistä kuvanlaadun takaamiseksi. Se tarkoittaa suhdetta näytön tuottaman kirkkaimman valkoisen valon ja syvimmän mustan välillä [17]. Mitä suurempi tämä ero on, sen parempi. Esimerkiksi 4000:1 kontrastisuhde tarkoittaa, että näyttö emittoi valkoista valoa, joka on 4000 kertaa kirkkaampaa kuin sen tuottama musta. Tällä on erityisesti merkitystä pimeässä ympäristössä, jolloin musta näkyy harmaana näytöllä sen ollessa liian matala.

Värikylläisyys eli saturaatio viittaa värin ”puhtauteen”, eli kuinka intensiivinen värisävy on. Värisävy tarkoittaa itse väriä, kuten esimerkiksi sinistä tai punaista.

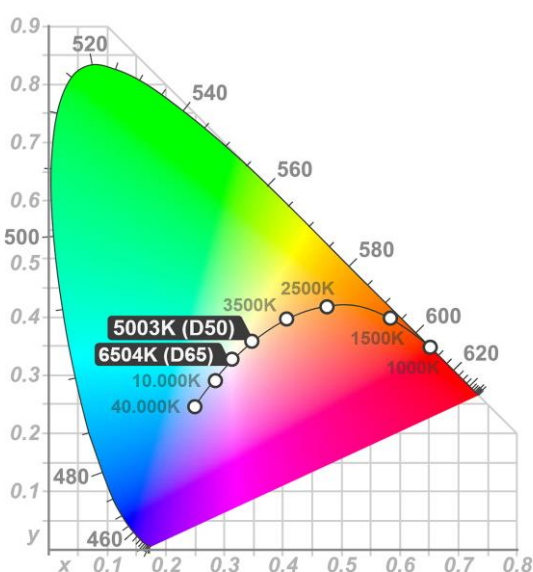
Väritarkkuus

Näyttöjen väritarkkuus viittaa siihen, kuinka realistisesti se pystyy tuottamaan värejä ja näiden sävyjä [18]. Tämä on erityisen tärkeä, jos esimerkiksi työskentelee kuvien muokkaajana tai vastaavana. Väritarkkuus ennen kalibrointia on nykyään usein hyvällä tasolla. Väritarkkuutta voi kuitenkin halutessaan parantaa juuri kalibroimalla. Tämän voi tehdä itse, jos asiaan perehtyy tarpeeksi ja ostaa lisenssin esimerkiksi Calman-ohjelmistoon tai antaa asiantuntijan kalibroida.

Tässä toimenpiteessä väriasetuksia, joita ei pysty itse näytön asetuksista muuttamaan, säädetään vastaamaan referenssiarvoja mahdollisimman hyvin. Tämä tehdään erikseen SDR- ja HDR-tiloille, sillä nämä käyttävät eri väriavaruuksia ja gamma-arvoja. Eli käytännössä tässä säädetään SDR-tilan (Rec.709), gamma-arvoa, jonka kuuluu olla 2.4, mahdollisimman lähelle tätä. Tämän lisäksi säädetään valkoinen referenssipiste oikeanarvoiseksi (~ 6500 K). Näin tehden saadaan kuvasta entistä tasapainoisemman ja realistisen näköisen.

Valkotasapaino määrittää kuinka tarkasti näyttö toistaa harmaan värin eri sävyjä valkoisen ja mustan välillä [18]. Tämä on tärkeä koko näytön yleisen värilämpötilan kannalta.

Väriämpötila on mittari valon värin lämpötilasta [18]. Värin lämpötilaa mitataan kelvineissä (K). Esimerkki kylmästä väristä on valkoinen referenssipiste (D65), joka esiintyy edellä mainitussa kromaattisuus diagrammissa. Tämän lämpötila on 6504 K ja se kuvastaa iltapäivän päivänvaloa. [19.] Väriämpötilaltaan 3000 K valkoinen väri luokitellaan lämpimäksi. Kylmät värit havaitaan enemmän sinertävinä ja lämpimät kellertävinä/punertavina. Alla on kuva havainnollistamaan värien lämpötiloja (kuva 6). Tasapainoinen väriämpötila on tärkeä etenkin saadakseen toistettua ihonväri oikeanlaisena.



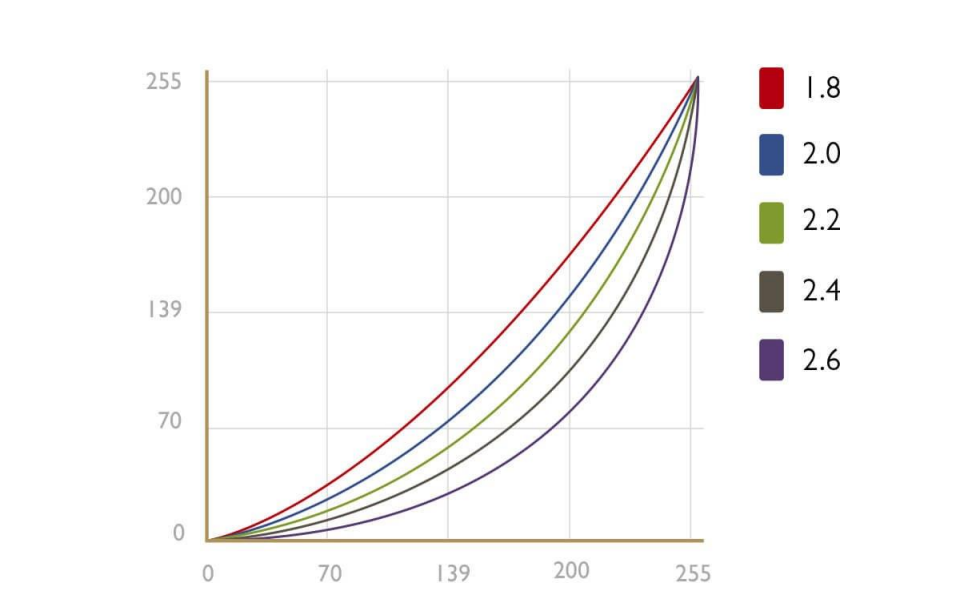
Kuva 6. Väriämpötilat kromaattisessa diagrammissa esiteltyinä [19].

Siirtofunktio (EOTF, electro-optical transfer function)

Lopuksi käydään läpi siirtofunktio (gamma), jota sovelletaan muuttamaan sisään-tulon videosignaali lineaariseksi valon ulostuloksi [20]. EOTF siis määrittää kuinka digitaalinen tieto muutetaan valoksi. Tällä on vaikutusta siihen, kuinka tassisesti musta siirtyy valkoiseksi digitaalisella näytöllä. Tyypillisiä gamma-arvoja ovat 2.2 ja 2.4, joita sovelletaan sRGB- ja Rec.709-väriavaruuksissa mainitsemisjärjestyksessä. Nämä numerot kuvastavat, kuinka laaja mustasta valkoiseen tai valkoisesta mustaan kulkeva käyrä on (kuva 7).

Siirtofunktiot, kuten 2.2, 2.4 ja BT.1886, ovat kehitetty SDR:n dynaamiselle kirkkausalueelle, eli nämä eivät sovellu HDR-tilaan. Tästä syystä HDR-tekniikalle on kehitetty omat gammakäyrät, jotka käydään läpi seuraavassa luvussa, jossa käsitellään HDR.

Yleisin käytössä oleva gamma-arvo on 2.2, sillä sitä sovelletaan sRGB-väriavaruudessa, joka on muun muassa internetissä käytetty väriavaruus. Tämä tuottaa hyvin tasapainoisia ja neutraaleja sävyjä kohokohtien ja varjojen välillä, jotta harmaat sävyt pystyvät helposti erottamaan toisistaan. [21.]



Kuva 7. XY-kuvaaja, joka kuvastaa tyypillisiä gamma-arvoja ja kuhunkin viittaavat nousukäyrät kuvastavat muutosta mustasta valkoiseen [21].

2.2 Korkea dynamiikka-alue (HDR)

Tässä käydään läpi korkean dynaamisen alueen (High Dynamic Range) merkittävyys näyttötekniologioissa ja tähän liittyviä käsitteitä, kuten sävykartoitus ja laaja väriskaala (WCG).

Yksi suurimmista näyttötekniologioiden kehityksen edistysaskeleista lähivuosina on ollut HDR-videoformaatin tulo. Tämän myötä kuvanlaatu on parantunut huomattavasti vanhaan Standard Dynamic Range (SDR) -tekniologiaan verrattuna.

Kuvan kirkkaampien kohokohtien ja merkittävästi laajemman värikirjon ansiosta, kuvan yksityiskohdat säilyvät tummissa ja kirkkaissa kohdissa, tehden kuvasta elävän näköisen. [22.] Mustat toistuvat syvempinä ja valkoiset kirkkaampina.

Se, että näytössä on HDR ei kuitenkaan aina takaa sen olevan hyvänlaatuinen. Tämä riippuu näytön kyvystä toistaa kuvaa toivotulla tavalla, joka ei aina ole mahdollista näytön kyvykkyyden takia. Kyvykkyyteen mukaan lukeutuvat näytön huippukirkkaus SDR-tilassa, joka korreloi myös HDR-huippukirkkauteen, värialue, värimäärä, sekä gradientti.

Gradientti näyttöteknologiassa määrittää kuinka hyvin näyttö pystyy esittämään eri värien sävyjä [22]. Tämä on erityisen tärkeää kohtauksissa, jossa on aurin-gonlasku tai taivas. Jos näytöllä on hyvä gradientin käsittely, värisävyjen välinen siirtymä on tasaista, eikä raitautumia esiinny, kuten näytössä, jossa on huono gradientin käsittely. Pohtiessa uuden näytön ostoa nämä asiat täytyy ottaa huomioon, jos haluaa mahdollisimman paljon irti uudesta sijoituksestaan.

Korkeaan dynamiikka-alueeseen liittyvät termit:

Sävykartoitus viittaa kuvaprosessitekniikkaan, jossa näyttö analysoi, säätää ja tämän jälkeen toistaa HDR-sisällön laitteen kykyjen perusteella [23]. Tarkemmin selitettynä, se kartoittaa joukon värejä ja sävyjä toiseen joukkoon, kuvastamaan digitaalista signaalia paremmin [24]. Tämä tekniikka kehitettiin ylläpitämään elokuvantuottajan alkuperäistä ajatusta, siitä kuinka sisältö tulisi näkyä. Sävykartoitus ei ollut edes tarpeellista ennen kuin korkea dynamiikka-alue kehitettiin, koska SDR-video pystyttiin jo hallitsemaan nykyaikaisilla näytöillä.

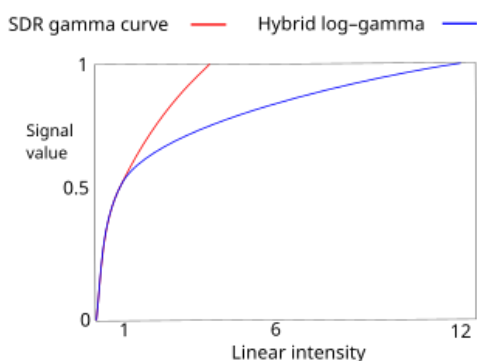
Laaja väriskaala/alue (WCG), tarkoittaa yksinkertaisesti, että näyttö pystyy esittämään enemmän ja syvempiä värejä. Koska tälle ei ole varsinaista määritelmää otetaan [Rtings](#)-sivuston testeihin perustuva määrittely käyttöön: Jos näyttö kykenee toistamaan 67 % Rec.2020 väriavaruudesta, se voidaan luokitella WCG-tuennalliseksi.

HDR-tilassa sovellettava siirtofunktio

SMPTE ST 2084 [25] ja BT.2100 [26] - SMPTE:n (2014), sekä ITU:n (2016) standardoimat HDR-standardit on kehitetty 4K/8K-näytöille, jotka soveltavat HDR-ominaisuutta. Nämä sisältävät 2 eri siirtofunktiota korvaamaan SDR-gammakäyriä. Näitä kahta sovelletaan eri käyttötarkoituksiin.

Dolby:n kehittämä Perceptual Quantizer (PQ) on siirtofunktio, jonka käyttökohteenä on median suoratoisto ja elokuvat. Tätä siirtofunktiota hyödyntävät HDR10, HDR10+ ja Dolby Vision, jotka ovat yleisimmin käytetyt HDR-muodot. Tätä siirtofunktiota hyödyntävät HDR10, HDR10+ ja Dolby Vision, jotka ovat yleisimmin käytetyt HDR-muodot. Tämä siirtofunktio kykenee teoriassa 0,0001–10,000 cd/m² (nits) luminenssialueeseen. [27.] Tällä hetkellä kuitenkin mikään kuluttajakäyttöön tarkoitettu näyttö ei tuohon enimmäismäärään pysty.

Toinen on NHK:n ja BBC:n kehittämä rajoittamaton Hybrid Log-Gamma (HLG) gammakäyrä, jota sovelletaan suoriin lähetyksiin ja videoihin, kuten esimerkiksi jalkapallo-otteluihin tai uutisiin [27]. Tämä on näistä uusin ja se lisää logaritmisestä käyrästä SDR-gammakäyrään (kuva 8), metatiedon käyttämisen sijaan [28]. Periaatteessa se yhdistää SDR:n ja HDR:n yhdeksi signaaliksi, eli jos näyttö tukee korkeaa dynamiikka-alueita se yksinkertaisesti toistaa sen sillä, jos ei, niin se toistaa sen SDR-signaalilla. Kaikki nykyajan televisiot tukevat tätä ominaisuutta.

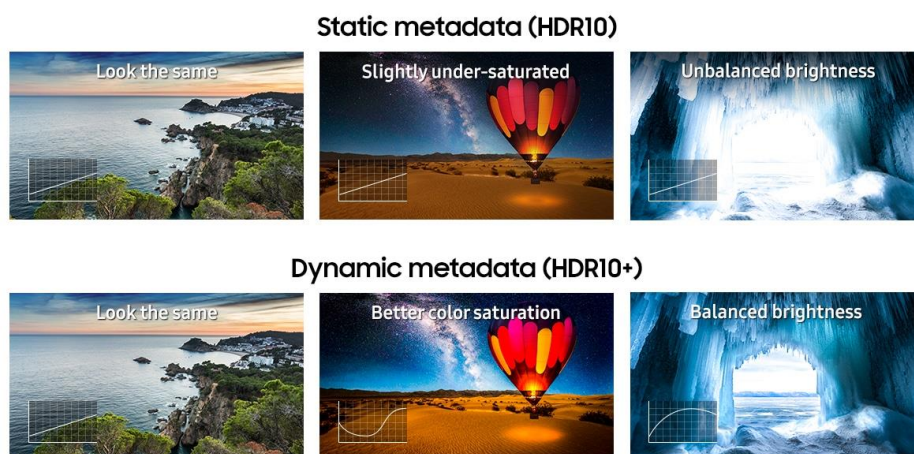


Kuva 8. Kuvaaja, jossa esiintyy perinteisen SDR-gammakäyrä ja HLG-käyrä [28].

Siirrytään PQ-siirtofunktiota hyödyntävien HDR-muotojen vertailuun. HDR10 käyttää staattista tietojenkäsittelymenetelmää (metatietoa), kun taas HDR10+ ja Dolby Vision käyttävät dynaamista metatietoa. HDR10 on osa Ultra HD 4K Blu-ray-standardia ja se tukee 10-bittistä värintuottoa ja jopa 1,000 nits:in kirkkaustasoa. HDR10+ on tästä parempi versio, ja se tukee 12-bittistä värintuottoa (4,086 eri harmaaskaalan sävyä), sekä 8K- resoluutiota. Dolby Vision on tästä vielä astetta parempi; se tukee 12 bittistä värintuottoa (tuottaen 4096 eri harmaaskaalan sävyä), ja kykenee jopa 10,000 nits:in luminanssiin.

Staattinen metatieto tarkoittaa, että toistetun sisällön kirkkaus ja sävykartoitus pysyvät samana koko toiston ajan [29]. Tämän takia jotkut elokuvan kohtaukset saattavat toistua liian kirkkaina ja tietyt taas liian pimeinä.

Dynaaminen metatieto taas tarkoittaa, että näytön kirkkaus ja sävykartoitus sopeutuvat näytöllä näkyvän kohtauksen mukaan, kuten esimerkiksi elokuvantuottaja on sen ajatellut näkyvän. Metatieto siis muuttuu näytöllä toistuvan kohtauksen mukaan, joka mahdollistaa sen huippukirkkauden laskemisen pimeitä kohtauksia varten ja samoin sen nostamisen valoisia varten. Tämän ansiosta elokuvia voidaan katsoa kuin elokuvantuottaja on sen ajatellut näkyvän, tehden kokemuksesta miellyttävämmän. [29.]



Kuva 9. Havainnollistava vertailu staattista (HDR10) ja dynaamista (HDR10+) metatietoa käyttävien HDR-muotojen välillä. Kuten vertailusta huomataan, HDR10+, tuottaa parempaa värikylläisyyttä ja tasapainoisempaa kirkkaudentasoa. [30.]

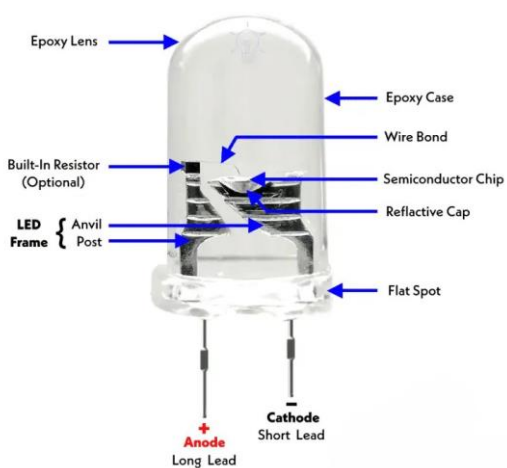
Metatietoa voi verrata ohjekirjaan, joka antaa näytölle tiedon, kuinka toistaa värejä ja määrittää kirkkausparametrit. Sillä viitataan ylimääräiseen kuvatietoon, joka löytyy sisällöstä. Tämä sisältää väri- ja kirkkaustietoa, joita käytetään HDR-kuvan taitamisprosessissa. Jos haluaa parasta, niin kannattaa valita HDR10+ tai Dolby Vision tuennallisen näytön, sillä nämä käyttävät edellä mainittua dynaamista metatietoa. Näiden välinen ero on minimaalinen, joten kumpikin soveltuu mainiosti.

2.3 Light-Emitting Diode (LED)

Käydään LED-valon taustaa läpi, sillä se on hyvin keskeinen osa tätä työtä.

LED tarkoittaa valoa lähettävää diodia, joka on pienen polttimon muotoinen elektroninen komponentti (kuva 10). Se on siis puolijohde, joka loistaa valoa, kun siihen lisätään jännite. Se on eniten käytetty elektroninen komponentti.

Riveittäin ja sarakkeittain asetettuna nämä luovat LCD-näytölle taustavalaistuksen. Tätä rakennelmaa kutsutaan LED-näyttöteknologiaksi, josta on tullut viimeisten kahden vuosikymmenen aikana yleisin näyttöteknologia johtuen sen eduista verrattuna loisteputkitaustavalaistukseen ja muihin vanhentuneisiin taustavalaistustekniikoihin.



Kuva 10. LED rakenne (elektroninen komponentti) [31].

Ledit käyttävät puolijohteita ja elektroluminesenssia valon tuottamiseen. Yksinkertaistettuna ne muuntavat sähköenergian suoraan valoksi puolijohteiden avulla. Tämä prosessi ei tuota merkittävästi lämpöä, mikä tekee LED-tekniikasta erittäin energiatehokkaan valonlähteen.

Historia

Ensimmäisen käyttökelpoisen ledin, joka oli väriltään punainen, kehitti yhdysvaltalainen insinööri Nick Holonyack vuonna 1962 [32]. Muutaman vuoden tämän jälkeen (1972), Monsanto-nimisessä yrityksessä työskentelevä George Craford kehitti ensimmäisen käyttökelpoisen vihreän ledin [33]. Ensimmäiset led-näytöt kehitti Hewlett-Packard (HP) -yritys jo vuonna 1968. Tämä tarkoitti käytännössä punaisen ledin soveltamista näytöillä varustettuihin laskimiin.

Enää tarvittaisiin sininen ledi mahdollistamaan kaikki värispektrin värit. Näistä tärkein on valkoinen. Tämä mahdollistaisi ledin sovellettavuutta valaistustarpeeseen. Tämä kuitenkin osoittautui monimutkaisemmaksi kuin oli ajateltu, sillä sinisen ledin luominen kesti punaisen ledin luomisesta kolme vuosikymmentä.

Sitä kehittivät japanilaiset Shuji Nakamura (Nichia Chemical), Hiroshi Amano ja Isamu Akasaki (Nagoyan yliopisto) 1980-luvusta 1990-luvun alkupuolelle saakka, kunnes 1993 Nakamuralla oli täydellisesti sinistä tuottava ledi [34]. Sen valoteho oli 1500 mikrowattia (mW) ja se säteili täydellistä sinistä 450 nanometrin (nm) aallonpituudella. Se oli yli 100 kertaa kirkkaampi kuin muut markkinoilla olevat siniset ledit, joita ei laskettu mukaan, sillä ne olivat hyödyttömiä niiden valotehonsa heikkouden takia. [35.]

Tämä oli yksi merkittävämmistä, jos ei merkittävin saavutus näyttötekniikoiden kehittymisen osalta. Ilman tätä ei olisi LED-tekniikkaa, joka on ollut valtava edistysaskel näyttötekniikoiden kehittämisessä. Valaistuskin olisi luultavasti vielä loisteputki-, hehkuvalo- ja halogeenipainotteinen.

3 Nykypäivän näyttötekniikat

Tässä luvussa esitellään, vertaillaan ja analysoidaan nykypäivänä kuluttajakäytössä olevia näyttötekniikoita, jotta voidaan ymmärtää näiden toimintaa syvemmällä tasolla. Tämä auttaa havainnollistamaan miksi yksi tekniikka on parempi kuin toinen.

Käydään läpi kunkin tekniikan taustaa, toimintaperiaate, rakenne ja keskeiset ominaisuudet, jotka erottavat nämä toisistaan. Samalla esittäen näille soveltuvat käyttötarkoitukset perustellen teknisin ominaisuuksin.

Nyttötekniikat voidaan jakaa kahteen pääryhmään: taustavaloa muokkaaviin ja itsevalaistaviin, joka tarkoittaa, että pikselit valaisevat itsensä toisistaan riippumatta.

Nykypäivänä kuluttajakäytössä on pääasiassa neljä eri tekniikkaa: LCD, LED, QLED ja OLED. Näistä kaikki paitsi OLED ovat LCD-pohjaisia ja ne hyödyntävät taustavalaistusta. OLED-tekniikassa pikselit ovat itsevalaisevia.

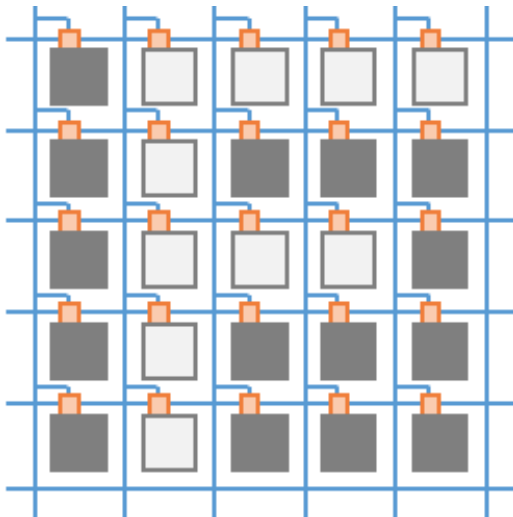
Kaikkia näitä tekniikoita yhdistää optoelektroninen ilmiö nimeltä elektroluminesenssi (electroluminescence, EL). Tämä viittaa ilmiöön, jossa sähköenergia muuttuu valoenergiaksi tuottamatta lämpöä, kun puolijohdteeseen lisätään sähkövirtaa. [36.]

Yleisesti elektroluminesenssin rakenne näytöissä koostuu neljästä kerroksesta; kahdesta orgaanisesta (OLED), tai epäorgaanisesta materiaalista (puolijohdteista). Ainakin toinen näistä elektrodeista (anodi/katodi), täytyy olla läpinäkyvä. Tähän käytetään hyvin usein indiumtinaoksidia (ITO), joka on kiinnitetty lasiin tai muoviin muodostaen paneelin päällyselektrodin. Tämä yhdistää hyvän läpinäkyvyyden korkean sähköjohtavuuden kanssa. Piilotettu elektrodi on tyypillisesti heijastava metallinen kerros. Tämä kokonaisuus on kiinnitetty aluslevyyn, joka on laitteeseen mukailtu. [37.]

Ohutkalvotransistori-tekniikka (Thin-Film Transistor Technology) tunnustetaan myös nimellä "Active Matrix", joka tarkoittaa mikroelektronisissa laitteissa toimivaa puolijohdekomponenttia, joka vahventaa ja kytkee (pälle/pois) elektronisia signaaleja [38]. Se on ohut kalvomainen piiri, joka on järjestetty matriisimuotoon, jossa transistorit on sijoitettu ruudukkomaisesti riveihin ja sarakkeisiin ohjaamaan jokaista pikseliä. Tämä tekniikka on kaikissa nykypäivän televisioissa ja monito-reissa.

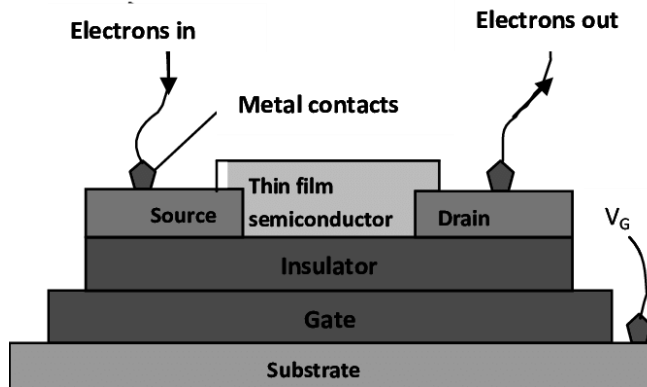
Jokaiseen transistoriin on yhdistetty kondensaattori (capacitor), joka estää jännitteen yhtäkkisen putoamisen pikseleistä, vaikka ohjaussignaali katoaisi hetkeksi, seuraavaan päivityssykliin asti. Tämä takaa pikselin pysymistä valaistuna, jos äkillinen lisätty virrantarve pudottaisi jännitteen. Näin ollen taaten vakaan ja yhtenäisen näytönkirkkauden. Tämä mahdollistaa teknologioiden soveltamista suurkokoisissa näytöissä.

Tämä rakenne mahdollistaa tehokkaan ja tarkan pikseleiden ohjauksen, parantaen muun muassa vasteaikaa, virkistystaajuutta, väritarkkuutta, katselukulmia ja energiatehokkuutta.



Kuva 11. Pikseleihin lisätyt ohutkalvotransistorit kuvastamaan TFT-tekniikan toimintaa pikseleissä [39].

Ohutkalvotransistorirakenne koostuu: alustasta (substrate), puolijohdeesta (semiconductor), eristeestä (dielectric), hilaelektrodista (gate metal) ja laskukourusta (drain metal). Alusta on usein lasista tai muovista ja puolijohde piitä. Eristävä materiaali; piioksidia ja hilaelektrodi; monikiteinen pii. Laskukouru on usein metallisilidistä. [40.] Puolijohde on asetettu sähköä eristävän kerroksen ja alustan päälle.



Kuva 12. Ohutkalvotransistorin perusrakenne [41].

Tämä on implementoitu hieman eri tavoin teknologian mukaan, joten sen toiminta käydään jokaisen teknologian kohdalla erikseen läpi.

3.1 LCD (Liquid Crystal Display) / LED (Light-Emitting Diode)

Kaikki LED-teknologiaa soveltavat näytöt ovat LCD-pohjaisia ja näiden rakenne poikkeaa ainoastaan taustavalaistuksessa. LED-näytöt käyttävät ledejä ja perinteiset LCD-näytöt kylmäkatodilamppuja. Tästä syystä näyttöteknologiaan viitataan "LCD"-nimityksellä, mutta kyseessä on LED-teknologia, sillä ne soveltavat ledejä taustavalaistukseensa.

Perinteisen LCD-teknologian kehitti yhdysvaltalainen "RCA Laboratories"-niminen sähköelektronikkaan keskittyvä insinööriyritys vuonna 1964 [42]. Suomeksi "nestekidediodi" on yleisin käytössä oleva näyttöteknologia, ja se toimii perustana LED-teknologialle. Nykypäivän kuluttajaelektronikassa LCD-näytöt toimivat ohutkalvotransistori-tekniikkaa (TFT, thin-film transistor) hyödyntäen.

Tämä tunnetaan myös Active-Matrix LCD-teknologiana (AMLCD), joka on ylivoimainen vanhaan Passive Matrix LCD-teknologiaan (PMLCD) verrattuna.

LCD-teknologiaa sovelletaan moneen eri käyttötarkoitukseen sen energiatehokkuuden ja kestäväen laadun takia. Tähän kuuluu kuluttajaelektroniikka, kuten monitorit ja televisiot, autoteollisuus, kodinkoneet ja teolliset sovellukset, kuten ohjauspaneelit (HMI, human machine interface) ja instrumentointinäytöt.

Taustavalaistuksen ensisijaisena valonlähteenä toimi alun perin kylmäkatodiputkilamppu (Cold Cathode Fluorescent Lamp, CCFL). Nämä sisälsivät elohopeahöyryä, ja käyttivät elektrodeja tuottaakseen ultraviolettia valoa, jonka putken sisällä oleva fosforipinnoite muutti näkyväksi valoksi. [43.]

Myöhemmin, 2000-luvun alussa otettiin käyttöön elektroluminesenssiin perustuva taustavalaistus (electroluminescent backlight, EL), joka teki rakenteesta kevyemmän ja laitteista energiatehokkaampia. Näistä ratkaisuista kuitenkin luovuttiin, kun siirryttiin led-pohjaiseen taustavalaistukseen, sillä se oli entistä energiatehokkaampi ja huomattavasti pidempielinkaarinen.

Nykyään kaikki uudet kuluttajaelektroniikaksi tuotetut LCD-paneelit käyttävät ledejä taustavalaistukseen ja myös tästä syystä tässä työssä ei käydä läpi vanhoja taustavalaistustekniikoita. Taustavalaistuksella tarkoitetaan valonlähdettä, joka joko sijoitetaan suoraan pikselipaneelin taakse, tai sivuille, valaisemaan pikseleitä [44].

3.1.1 Rakenne ja toimintaperiaate

LCD-tekniikan rakenne voidaan jakaa kahteen osaan: taustavalaistusyksikköön ja itse LCD-paneeliin. Rakenne voi vaihdella hieman valmistajan mukaan, mutta tästä huolimatta toiminta ja komponentit ovat pääosin samat. Esimerkiksi taustavalaistustyyppi vaikuttaa rakenteeseen, siten, että elektroluminesenssia (EL) hyödyntävässä LCD-paneelissa diffuusorilevyä ei ole lainkaan, sillä se tuottaa yhtenäistä valoa koko näytön pinta-alalle ihan itsestään [44]. Diffuusorilevy jakaa

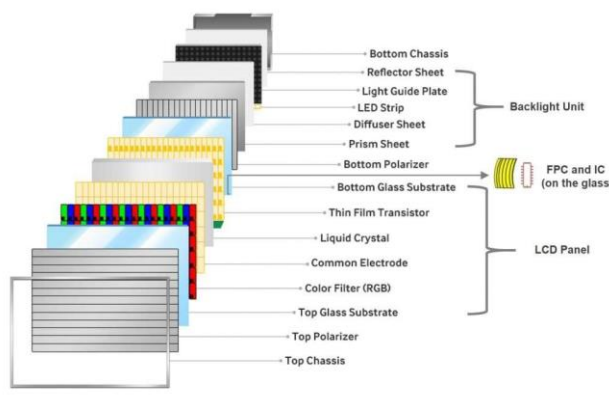
valon tasaisesti näytölle, joka on tarpeen soveltaessa LED-taustavalaistusta, sillä nämä eivät siihen kykene itsestään.

Taustavalaistusyksikkö koostuu lukuisista optisista levyistä ja valonlähteestä. Näihin lukeutuvat pohja-alusta (takakuori), heijastinlevy, valon ohjauslevy, LED-nauhoitus, diffuusorilevy, prismalevy ja valon horisontaalinen polarisointilevy. Sen päätarkoituksena on tuottaa riittävän määrän valoa jakaen tämän tasaisesti paneelille. Tämä määrittää näytön ominaisuuksia, kuten kirkkauden, väritason ja ulos tulevan valon yhtenäisyyden. [45.]

Paneeli itsessään koostuu pohjalasialustasta, ohutkalvotransistorista, nesteki-teistä, yhteisestä elektrodista, värifiltteristä, päällimmäisestä lasialustasta, verti-kaalisesti polarisoivasta levystä ja asennuspohjasta (kuva 13). Tämän lisäksi ko-konaisuuteen kuuluu integroitu virtapiiri (Integrated Circuit, IC) ja joustava piiri-levy (Flexible Printed Circuit Board, FPC).

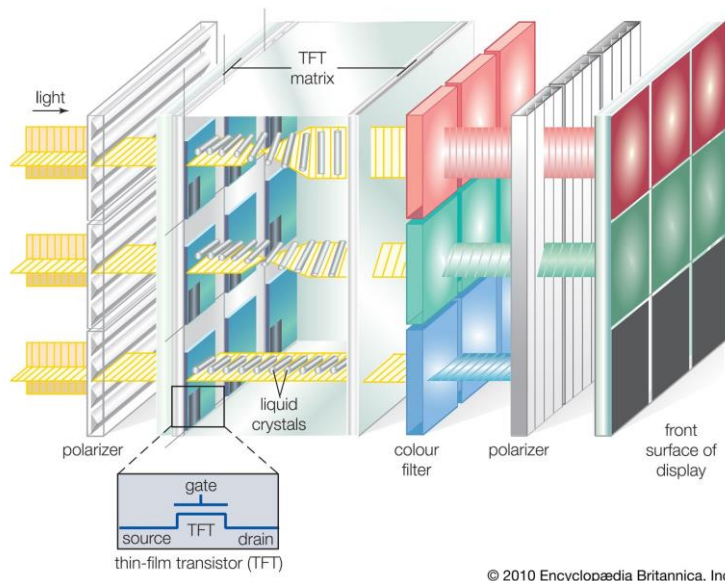
Integroitu virtapiiri on sirulaite, joka koostuu integroiduista piireistä. Sen tarkoitus on säätää ja ohjata potentiometrinen signaalien vaihetta, taajuutta, huippuarvoa ja muita parametrejä elektrodissa. Tämä luo ohjaavan sähkökentän, ja mahdol-listaa tiedon näyttämisen näytöllä.

Joustava piirilevy mahdollistaa piirin toiminnan ja tulostaa emolevyn tarvitseman käyttöliittymän, jotta LCD voi toimia sähköisesti.



Kuva 13. TFT-tekniikkaan pohjautuva LCD-näytön rakenne [45].

TFT (Thin-Film Transistor) matriisi LCD/LED rakenteessa:



Kuva 14. Jokaiseen pikseliin liittyy ohutkalvotransistori (TFT). Altistuessa vaihtelevalle jännitteelle, nestekidesuspensiossa olevat molekyylit orientoituvat sen mukaisesti. Tämä vaihteleva molekyylien orientaatio vuorostaan säätelee, kuinka paljon valo pääsee TFT-matriisiin ja värifiltterin läpi, täten muuttaen näytössä näkyvää värikuvaa. [46.]

Tässä syvennyttään LCD-tekniikan sähkö- ja orgaanisen kemian toimintaperiaatteeseen.

Perustoiminta pohjautuu nestekidekerrokseen, joka sijoittuu kahden lasialustan väliin. Näiden sisäpinnat ovat päällystetty läpinäkyvillä, hyvin sähköä johtavilla indiumtinaoksidikalvoilla (ITO, indium tin oxide), josta muodostuu elektrodit (anodi ja katodi) vastakkaisille puolille. Näiden välissä olevat nestekiteet toimivat väliaineena valoalloille, näin muokaten valon määrää. Tämän ITO-kalvo muuttaa sähköisen signaalin optiseen muotoon. Tämä pätee VA- ja TN-versioissa, muttei IPS-versiossa, jossa sähkökenttä on rinnakkain, eikä vastakkain lasialustan kanssa. Kun sähkövirta johdetaan läpi, nestekiteet asettuvat linjaan ja säätelevät niiden läpi kulkevan valon määrää, jolloin näytölle muodostuu kuva.

Nestekide itsessään tarkoittaa molekyyliarakenteeltaan riisinyvän muotoista ainetta, jossa yhdistyy nesteen ja kiteisen kiinteän aineen rakenteet ja

ominaisuudet [47]. Aine ei siis ole nestemuodossa, eikä kiinteässä muodossa, vaan molempia samanaikaisesti.

3.1.2 Päätyypit

LCD-näytöt jaetaan kolmeen eri päätyyppiin alipixelitasolla toimivien nestekiteiden toimintaperiaatteen mukaan: TN (Twisted Nematic), IPS (In-Plane Switching) ja VA (Vertical Alignment). Näistä on myös kehitetty ja yhdistetyt variaatiot, mutta niillä ei ole tässä työssä merkitystä, sillä ne eivät kata televisioita ja monitoreita. Kiteytettynä päätyyppien erot löytyvät nestekiteiden alkuasennosta ja kuinka niiden orientaatio muuttuu, kun niihin lisätään sähkömagneettinen kenttä.

Jokainen näistä tuottaa värejä hieman eri tavoin vaikuttaen virkistystaajuuteen, värintarkkuuteen, katselukulmiin ja kontrastiin. Perusidea jokaisessa on sama; nestekiteet reagoivat sähkövaraukseen ohjaten valon määrää, joka pääsee läpi ja saavuttaa alipixelit. [48.] Näin jokaisen värin voimakkuutta voidaan ohjata, saadakseen eri sävyjä kaikista väreistä. Nämä kaikki yhdistettynä samanaikaisesti luovat kuvan näytölle ja tämä vuorostaan LCD-näytön. Tässä käydään läpi näiden erot ja millaiseen käyttöön kukin soveltuu parhaiten.

Twisted Nematic:

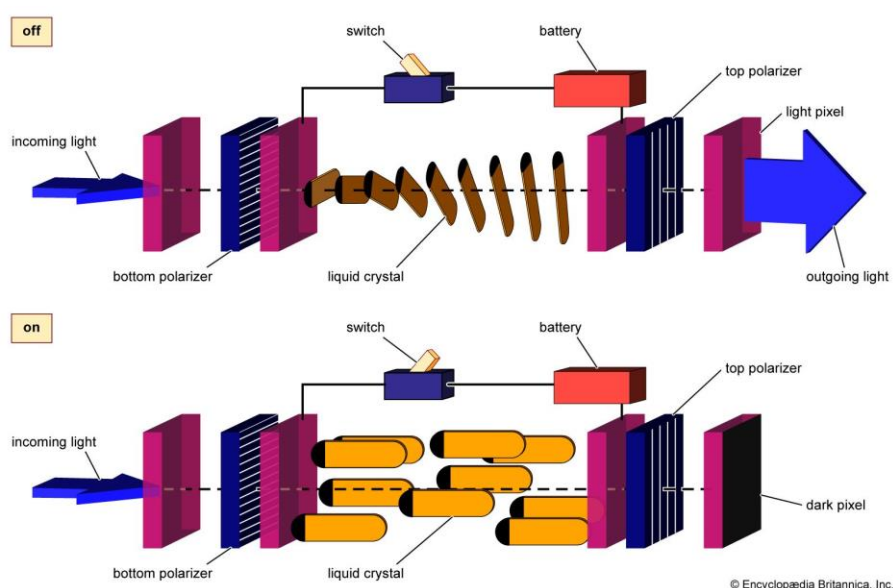
TN on näistä kolmesta vanhin ja edullisin teknologia. Se luokituu nykypäivän standardeja ajatellen jo hieman vanhentuneeseen teknologiaan. Käyttökohteena on pääsääntöisesti pelimonitorit, sillä tämän ominaisuudet eivät ole isoille näytöille ja kohderyhmälle optimaaliset. Tämän TN-teknologiaa nähdään hyvin harvoin televisioissa.

Toiminta perustuu kahden lasialustan välissä oleviin kiertyneisiin nestekidemolekyyleihin, joita ohjataan ohutkalvotransistoreita käyttäen. Tässä nestekiteet ovat 90° kiertokulmassa jännitteettömässä tilassa, mutta kun niihin lisätään jännite, ne suoristuvat vaihtelevissa määrin, riippuen jännitteestä. Jos ne suoristuvat kokonaan (0°), valoa ei pääse läpi lainkaan. Eli 90° kulmassa valoa pääsee läpi 100

% ja prosentuaalinen määrä pienenee lineaarisesti kulman mukaan. Esimerkiksi 45° kulmarotaatio päästää 50 % taustavalosta läpi (kuva 15).

TN–teknologia on suosittu erityisesti kilpapelajien keskuudessa, nopean vasteajan ja korkean virkistystaajuuden ansiosta. Huonoina puolina tässä on väritarkkuuden epämääräisyys ja heikot katselukulmat, etenkin pystysuunnasta katsottuna. Tämän takia värit saattavat näyttää haaleilta muualta kuin suoraan kohti katsottuna. Tämä on lyhyesti sanottuna paras LCD-teknologia kilpapelikäyttöön, jossa jokainen ruudun päivitys voi tehdä eron, kuoletko sinä vai vastustaja.

Sovellettavuus: Monitorit



Kuva 15. Twisted Nematic -toimintaperiaate nestekidemolekyylien tasolla [49].

In-Plane Switching

IPS erottautuu näistä kahdesta muusta päätyypistä nestekideorientaatiollaan. Tässä tyypissä nestekiteet ovat rinnakkain lasialustan kanssa, ja ne kiertyvät alustan kanssa samassa tasossa päästääkseen valoa läpi (kuva 16). Tätä voi verrata kameran sulkeeseen.

Se erottautuu muista erinomaisella värintarkkuudellaan ja katselukulmillaan, säilyttäen väriyhtenäisyyden jopa sivuista katsottuna. Tätä teknologiaa suositaan muun muassa graafiseen suunnitteluun, sisällöntuotantoon, yleiseen työpöytäkäyttöön ja pelaajille, jotka kuluttavat paljon HDR-sisältöä.

Sovellettavuus: Monitorit ja televisiot



Kuva 16. IPS-paneelin nestekidetoiminta. [50].

Vertical Alignment

VA on yhdistelmä IPS- ja TN-näytöistä. Tässä toiminta perustuu vertikaalisesti asetettuihin nestekiteisiin, jotka kallistuvat reagoidessaan sähkövirtaan, päästämällä tämän mukaan oikean määrän valoa läpi (kuva 17).

Sen vasteaika ja virkistystaajuus on nopeampi kuin IPS ja värintarkkuus on parempi kuin TN:llä. Se on tunnettu korkeasta kontrastisuhteestaan, joka usein ylittää jopa 3000:1, verrattuna TN-tekniikkaan, joka pääsee noin 600:1–1200:1 ja IPS, jonka kontrastisuhte pyörii 700:1–1500:1 paikkeilla. [51.]

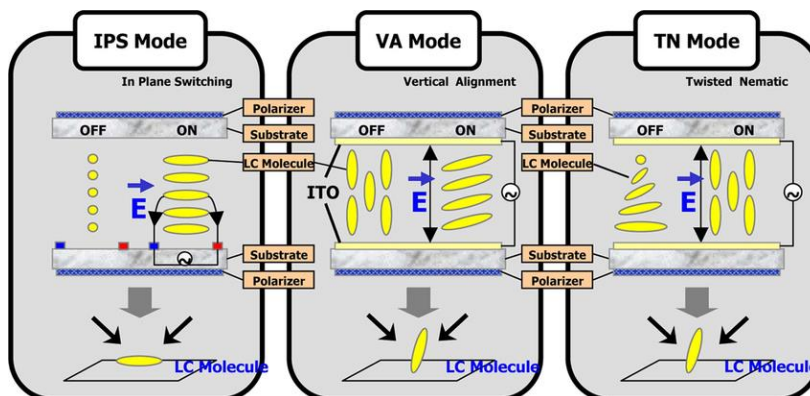
Se myös tuottaa syvempiä mustia ja voimakkaampia värejä. Tästä syystä VA-teknologiaan pohjautuva LCD soveltuu parhaiten elokuvien katseluun, etenkin hämärässä/pimeässä ympäristössä.

Sovellettavuus: Monitorit ja televisiot

Yhteenveto LCD-päättyypeistä:

Twisted Nematic: Paras suorituskyky liikkeentoistossa. In-Plane Switching: Parhaat katselukulmat ja tarkin värintoisto. Vertical Alignment: Näiden kahden kompromissi. Se sijoittuu muuten näiden väliin suorituskyvyssä, paitsi kontrastissa, jossa se voittaa molemmat.

Ymmärrettyään näiden kolmen teknologian yksilölliset vahvuudet ja heikkoudet, voidaan tehdä perusteltuja päätöksiä näyttövalinnoissa, sekä yritys- että kuluttajakäyttöön. Oli kyseessä sitten pelikäyttöön tuleva monitori tai ammattitason näyttö, näihin kaikkiin löytyy usein vaatimuksia ja budjettia vastaava LCD-ratkaisu.



Kuva 17. LCD-päättyyppien nestekidetoimintaperiaate [52].

3.1.3 Taustavalaistustyyppit

LCD-näytöt soveltavat kolmea eri taustavalaistustyyppiä: suoravalaistu (direct lit), reunavalaistu (edge lit) tai full array. Kyseessä on valonohjaukseen vaikuttavia tekniikoita, jotka pyrkivät parantamaan kontrastia. [53.] Näiden lisäksi on mini-LED, joka ei itsessään ole taustavalaistustyyppi, mutta sitä sovelletaan full-array-taustavalaistuskokoonpanossa.

Teknologiat käydään läpi paremmuusjärjestyksessä, aloittaen parhaimmasta. Lanseerausvuodet kuluttajakäyttöön ovat kunkin tekniikan yhteydessä.

Full Array (2004)

Tässä ledit ovat levitetty koko pinta-alalle näytön taakse. Tähän tekniikkaan kuuluu "local dimming" (suomennettuna "paikallinen himmennys"), joka tarkoittaa ominaisuutta, jossa näyttö pystyy himmentämään ja valaisemaan pikseleitään alueittain. Tämän tarkan ohjauksen myötä, se pystyy tuottamaan parempia kontrastisuhteita ja syvempiä mustia.

Paikallinen himmennys ei kuitenkaan ole täydellinen tekniikka ja se saattaa tuoda mukanaan muita pieniä ongelmia. Esimerkiksi valon hehkuntaa kirkkaiden kohtien ympärillä, kirkkauden yhtenäisyyden vaihtelua ja yksityiskohtien puutteellisuutta tummissa kohdissa. [53.]

Riippuen siitä, kuinka moneen alueeseen ledit ovat jakautuneet ja paikallisen himennyksen implementaatiosta, parannus kontrastisuhteessa saattaa olla hyvinkin merkittävä verrattuna LCD-paneeliin, jossa näitä ei ole.

Tätä yhdistelmää markkinoidaan lyhenteellä "FALD" (Full Array Local Dimming) ja nähdään usein Premium-tasoisissa LED-näytöissä.

Plussat (+): Valonohjauksen tarkkuus ja kontrastisuhte

Miinukset (-): Hintaa

Edge lit (2008)

Tässä ledit ovat nimensä mukaisesti sijoitettu reunoille (useimmiten vastakkaisille puolille, joko pysty- tai vaakasuunnassa). Hyvänä puolena tässä on se, että tämä tekee rakenteesta ohuemman. Tämä tekniikka nähdään joskus yhdistettynä paikallisella himennyksellä, muttei samalla kattavuudella kuin Full Array, tehden

siitä paljon epätarkemman. Valaistus saattaakin näkyä epätasaisena, luoden näkyviä epämuotoisuuksia näytön kirkkaudessa.

(Tämä ratkaisu hyödyntää diffuusorilevyä, jotta valo jakautuu tasaisesti näytölle).

Plussat (+): Ohuempi rakenne ja hinta

Miinukset (-): Valonohjaus

Direct lit (2012)

Tässä LED-valot on asetettu riveihin suoraan näyttöpaneelin taakse, samoin kuin full-arrayssa, mutta tämä toimii ilman paikallista himmennystä ja ledien määrä on huomattavasti pienempi.

Tämä tuottaa kuitenkin kirkkautta yhtenäisemmin ja vuotaa vähemmän valoa kuin reunavalaistu. Tästä se tosin maksaa paksuudellaan, joka johtuu siitä, että ledit ovat asetettu suuremmin välein – tämä vuorostaan vaatii suuremman välin taustavalaistuksen ja itse paneelin väliin, jotta valo kattaisi koko näytön.

Taustavalaistuksen puutteellinen ohjaus jättää kontrastisuhteen LCD-paneelille kokonaan hoidettavaksi. Eli jos paneeli on VA-pohjainen, kontrasti saattaa kuitenkin olla kiitettävä, toisin kuin jos se on esimerkiksi IPS-pohjainen.

Plussat (+): Hinta

Miinukset (-): Valonohjaus, rakenteen paksuus ja kontrastisuhde

Mini-LED

Mini-LED viittaa full-array-kokoonpanoon, jossa käytetään entistä pienemmän kokoisia LED-siruja. Perinteiset LED-sirut, joita sovelletaan full-array-taustavalaistuksessa ovat halkaisijaltaan ~1000 µm, kun taas mini-ledien halkaisija on 100–200 µm [54]. Tämä kokoero mahdollistaa suuremman määrän ledejä

samalle pinta-alalle, eli ledien asettelutiheys kasvaa. Näin myös valonohjaus tarkentuu ja kirkkaus, kontrasti ja yksityiskohdat paranevat. Mini-LED-taustavalaistusta yhdistetään usein muihin LCD-näyttöjä parantaviin tekniikoihin, kuten kvanttipistekerroksisiin näyttöihin.

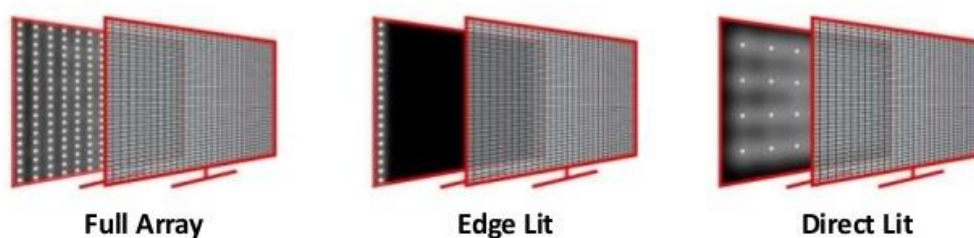
Yhteenveto taustavalaistustyypeistä:

Paras taustavalaistustyyppi on Full-Array, joka on luonnollisesti myös kallein, eli jos budjetti sen sallii, valitse tämä – jos olet ostamassa LCD-näyttöä.

Reunavalaistu on näistä toiseksi paras. Tätä ratkaisua löytyy halvemmista (mid-range) -malleista, mutta esiintyy myös kalliissa. Tämä sopii hyvin peruskäyttöön.

Suoravalaistu – Uusin ei aina tarkoita parasta. Kannattaa välttää, paitsi, jos haluaa todella ison television mahdollisimman halvalla, eikä laadulla ole väliä.

Mini-LED: Entistä pienempien ledien soveltamista LCD-näyttöjen taustavalaistuksessa parantamaan valonohjausta ja näin kontrastia. (Ei ole itsessään taustavalaistustyyppi).



Kuva 18. Taustavalaistustyyppit (LED) [55].

3.1.4 Yhteenveto

LCD on nykypäivän näyttöteknologioista laajimmin sovellettu näyttöteknologia, joka tarjoaa kattavan valikoiman eri käyttötarkoituksiin sopivia näyttöratkaisuja.

Tämä johtuu suureksi osaksi siitä, että se on teknologioista vanhin, ja on myös luonnollisesti tästä syystä laajimmalle levinnyt teknologia yhteiskunnassamme.

Nykyään kuitenkin LCD-teknologiaa kutsutaan hyvin usein LED-teknologiaksi, koska miltei jokainen nykypäivänä tuotettu LCD-näyttö käyttää LED-taustavalais- tusta tämän tuomien etujen takia.

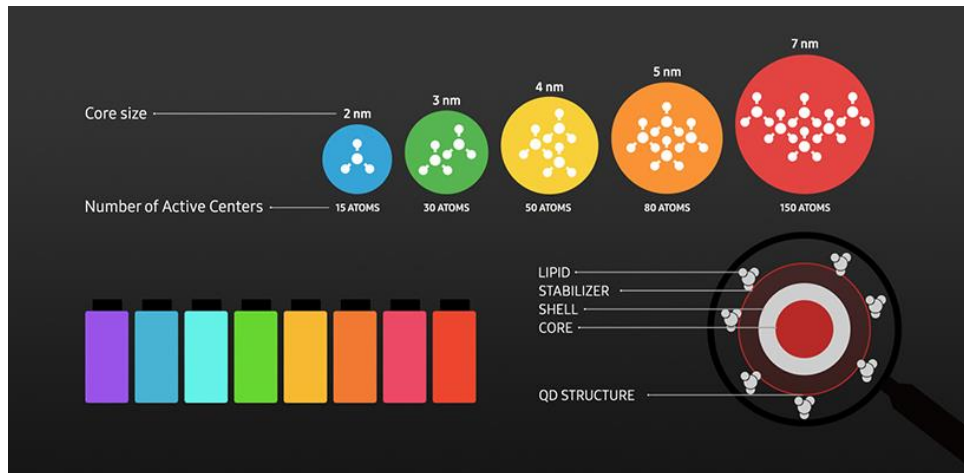
3.2 QLED (Quantum Dot LED)

Tämän teknologian esittely jää toisia lyhyemmäksi, sillä se on edistyneempi ver- sio LCD-teknologiasta ja tämän takia muun muassa rakenteellinen läpikäynti jää suppeammaksi. Quantum Dot LED viittaa kvanttipistepohjaiseen LED-teknologi- aan, joka on Samsungin vuonna 2017 lanseeraama näyttöteknologia [56].

Kvanttipiste on nanokokoinen puolijohdemateriaali, joka tuottaa valon eri värit partikkelin koon mukaan (kuva 19). LED-rakenteeseen lisätty kvanttipistekerros (Quantum Dot Enhanced Film Layer, QDEF) laajentaa näytön värialuetta kattaak- seen 95 % DCI-P3 väriavaruudesta ja lisäten kirkkautta. Tätä voidaan soveltaa kaikkiin LED-teknologioihin, kuten IPS, VA ja TN. [57.] LG soveltaa kvanttipisteitä NanoCell-televisioissaan.

Tästä teknologiasta on myös tehty entistä parempi variantti, integroimalla tähän Mini-LED-taustavalaistustekniikka. Samsung-näytöissä tätä kutsutaan Neo QLED:ksi ja LG-näytöissä QNED:ksi. Samsung soveltaa tätä sen VA-pohjaisissa näytöissä ja LG IPS-näytöissään (Nano IPS).

QLED-teknologiasta on myös nousemassa toinen variaatio, QDCF, jossa kvant- tipisteet ovat sijoitettu suoraan värifilttereiksi. Tämä on vielä kehitysvaiheessa, eikä täten ole vielä kaupallistettu. Tästä enemmän ”Näyttöteknologioiden tulevai- suus” -luvussa.

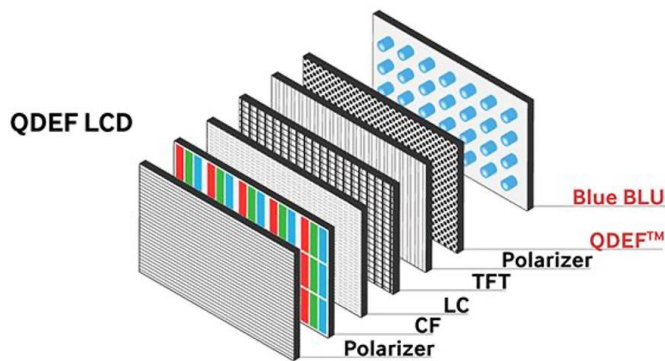


Kuva 19. Kvanttipisteiden tuottamat värit pistekokojen mukaan [58].

3.2.1 Rakenne ja toimintaperiaate

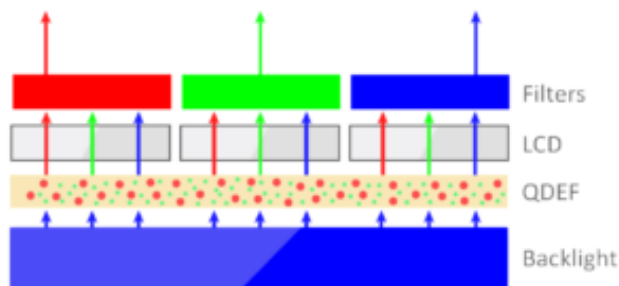
Kvanttipiste on nanorakenteinen puolijohde (halkaisijaltaan 2–10 nm), joka koostuu ytimeistä ja kuoresta [58]. Näyttötekniologioissa kvanttipisteinä sovelletaan usein kadmiumselenidiä (CdSe) tai indiumfosfidia (InP) [59]. Tosin kadmiumia on jouduttu vähentämään huomattavasti, sen myrkyllisyyden takia.

Kvanttipisteet rajoittavat sähkövarausten (elektronien ja aukkojen) liikkumisen kaikkiin suuntiin [60]. Varausten energia ja liikeradat ovat toisin sanoen kvanttimekaanisesti määriteltäviä, kuten atomissa. Tällainen rajoitus mahdollistaa kvanttipisteen toimimisen keinotekoisena atomina, jolla on erityisiä optisia ja sähköisiä ominaisuuksia, esimerkiksi valon tehokas absorbointi tai emittointi tietyillä aallonpituuksilla. Aallonpituudet määrittyvät kvanttipisteen koon mukaan (kuva 19). [61.]



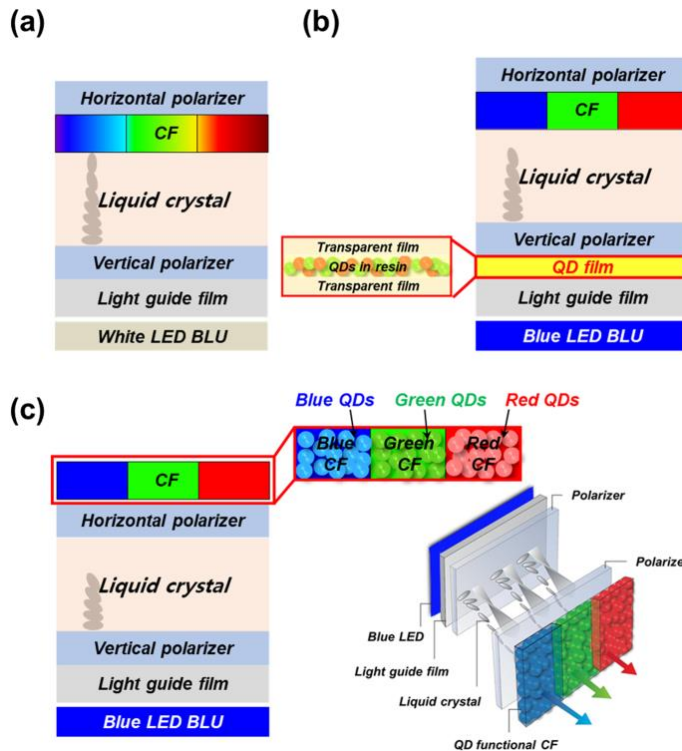
Kuva 20. Kvanttipistekerroksinen LCD-paneeli [62].

QLED-rakenne, jota tällä hetkellä sovelletaan markkinallisissa näytöissä, erottuu perinteisestä LED-rakenteesta ainoastaan taustavalaisuksellaan ja lisätyllä kvanttipistekerroksellaan. Kvanttipistekerros (QDEF) on nimensä mukaisesti kalvomuotoinen ja se sijaitsee taustavalaisusyksikön ja itse LCD-paneelin välissä (kuva 20). Toisin kuin LED-teknologiassa, jossa taustavalaisuus toteutuu keltaisella fosforilla pinnoitettujen sinisten ledien avulla, tästä on jätetty fosfori kokonaan pois, johtaen siniseen valaistukseen. Tämä sinisen taustavalon nanopartikkelit muuttavat punaiseksi ja vihreäksi. Näin saadaan aikaan punaista, vihreää ja sinistä tuottavat alipixelit (kuva 21).



Kuva 21. QLED-tekniikan yksinkertaistettu rakenne [59].

Lopuksi vielä kuva, jossa esitetään perinteinen LED-, nykyisin sovellettava QLED-, ja tuleva QLED-rakenne havainnollistamaan teknologioiden rakenteellisiä eroja (kuva 22).



Kuva 22. LCD-paneelin kaavamainen rakenne. (a): Perinteisen LCD-tekniikan rakenne. (b): QLED-tekniikan rakenne (QDEF). (c): Tuleva QLED-tekniikan (QDCF) QLED-rakenne [63].

3.2.2 Yhteenveto

QLED tarjoaa perinteisiä LED-näyttöjä laajempaa värialuetta, parempaa väritarkkuutta ja korkeampaa kirkkaustasoa. Tämän lisäksi se on energiatehokkaampi, sillä kvanttipisteet muuntavat valon 99 % hyötysuhteella, eikä yhtä suuri osa taustavalaistuksen valosta mene hukkaan.

Teknologiassa rajoitteena kuitenkin on edelleen taustavalaistuksen käyttö, joka poistaa mahdollisuuden totaalisen mustan tuottamiseen ja näin ollen myös kontrasti on rajallinen.

QLED on yksi markkinajohtavista näyttötekniikoista, joka tuo vahvuutensa esille etenkin valoisassa ympäristössä.

3.3 OLED (Organic Light-Emitting Diode)

OLED-paneeleissa valoa lähettävät diodit ovat orgaanisista, usein hiilipohjaisista materiaaleista, jotka emittoivat valoa, kun sähkövirtaa johdetaan näiden läpi. Tämä on suhteellisen uusi näyttöteknologia televisioissa, puhelimissa ja monitoreissa.

Sen kehittivät alun perin Eastman Kodak -yrityksessä työskennelleet tiedemiehet; Ching W. Tang ja Steven Van Slyke vuonna 1987. Tästä kesti lähes kaksi vuosikymmentä ennen kuin tämä päätyi massatuotantoon, televisioiden muodossa vuonna 2007, kun Sony lanseerasi maailman ensimmäisen OLED-television. [64.] Tästä alkoi OLED-tekniikan matka maailman parhaaksi näyttöteknologiaksi.

OLED-tekniikka voidaan jakaa karkeasti kahteen kategoriaan: Passive Matrix OLED (PMOLED) ja Active Matrix OLED (AMOLED). Tekniikka, johon tässä työssä keskitytään, on AMOLED, sillä tätä sovelletaan kuluttajanäyttöihin, kuten televisioihin, monitoreihin ja puhelimiin nykypäivänä. Tätä markkinoidaan pelkästään OLED-nimisenä televisioissa ja monitoreissa.

AMOLED-tekniikka on jo aikaisemmin mainittua TFT-tekniikkaa hyödyntävä kehittyneempi versio perinteisestä PMOLED-tekniikasta. PMOLED-tekniikkaa sovelletaan pienissä (1"-5") matalaresoluutioisissa näytöissä, kuten kelloissa ja sulautetuissa laitteissa [65].

OLED-tekniikasta, jota sovelletaan monitoreissa ja televisioissa on tätä nykyä 2 päätyyppiä. Ensimmäinen on Samsungin 2022 kehittämä Quantum Dot OLED (QD-OLED), joka nimensä mukaan yhdistää Quantum Dot tekniikan orgaanisten ledien kanssa. Toinen on LG:n kehittämä arkkitehtuuri, WRGB / White OLED (WOLED), joka käyttää RGB-värifilteriä valkoisella OLED-valaisulla. Tämän tekniikan uusimmissa malleissa (2023, LG G3 alkaen) nähdään myös LG:n kehittämä Micro Lens Array (MLA)- tekniikka yhdistettynä. Muut valmistajat kuten Sony, Hisense ja Panasonic ostavat siis paneelit LG:ltä ja Samsungilta, ja lisäävät näihin oman videoprosessoinnin ja elektroniikan.

Aikaisemmin oli myös kolmas; 2014 ”Japan Display”-korporaation perustama JOLED (Japan OLED), johon kuului elektroniikkajätit Sony ja Panasonic. Tämä meni kuitenkin vuonna 2023 konkurssiin, ja tämän myötä myös OLED-paneelien tuotanto lakkautettiin. [66.] He ovat siirtyneet Mini-LED-tekniikkaan.

OLED-tekniologiassa jokainen pikseli valaistuu yksitellen, joka tarkoittaa, että mustan tuottaminen sammuttaa nämä totaalisesti, luoden täydellisen mustan. Tämän takia myöskään taustavalaisulle ei ole tarvetta. Se että, jokainen pikseli pysyy sammumaan kokonaan luo mahdollisuuden suurille energiasäästöille tulevaisuudessa. Esimerkiksi suunnittelemalla ja rakentamalla nettisivuja ja ohjelmistoja tätä hyödyntäen. Toisin sanoen tekemällä mustantaustaisia sivuja / ohjelmia, jolloin suuri osa näytöstä olisi ”sammuksissa”.

3.3.1 Rakenne ja toimintaperiaate

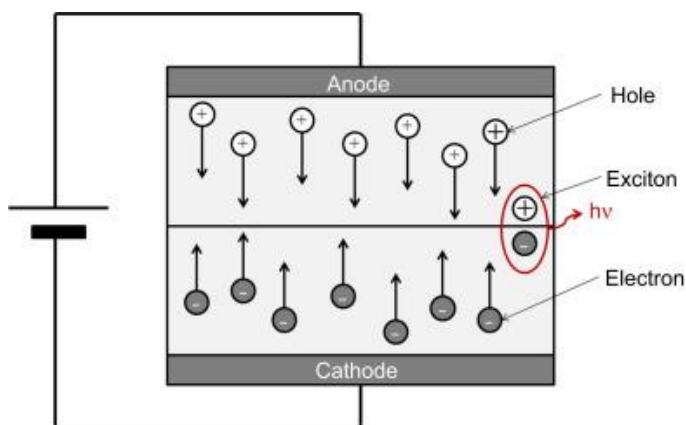
Kuten aikaisemmin on mainittu OLED-tekniologiaa, jota käytetään televisioissa ja monitoreissa on TFT-pohjainen (AMOLED). Toisin sanoen jokaiselle alipikselille tulevaa jännitettä ohjaa ohutkalvotransistori, joka korreloi suoraan luminenssin voimakkuuteen yksittäiselle alipikselille.

Kutsutaan tätä tästä lähtien pelkästään OLED-tekniologiaksi yksinkertaistamaan esittelyä ja vertailua. Tässä käydään läpi mihin pikseleiden toiminta pohjimmiltaan perustuu, paneelin perusrakenne, edellä mainittujen päätyyppien toiminnalliset erot ja kuinka nämä taklaavat yleisen OLED pulman: kuvan retentoitumisen.

Aloitetaan syvemmästä päästä perehtymällä tekniologian valontuotantoprosessiin, joka perustuu samantyyppiseen prosessiin kuin LED.

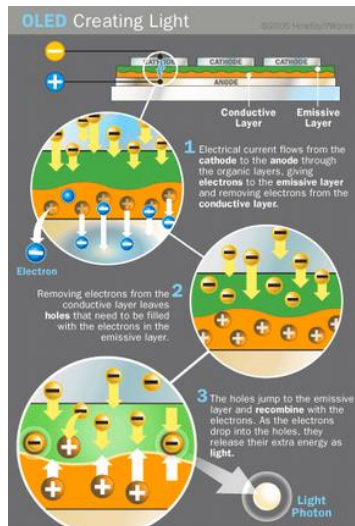
Laitteen virtalähde lisää jännitteen koko näytölle, jonka seurauksena sähkövirta kulkee katodilta anodille orgaanisten kerrosten läpi (elektronivirtauksen muodossa). Katodi vastaanottaa elektroneja sähkövirrasta ja anodi häviää elektroneja (vastaanottaa aukkoja). Tässä tilanteessa emittoiva kerros on negatiivisesti varautunut ja johtava kerros positiivisesti varautunut.

Emittävän ja johtavan kerroksen rajapinnassa elektronit kohtaavat elektronivajauksia. Kun elektroni täyttää elektronivajauksen (eli asettuu atomille, jolta puuttuu elektroni), elektroni luovuttaa ylimääräisen energiansa valon fotonin muodossa, säteillen valoa (kuva 23). Tätä prosessia kutsutaan rekombinaatioksi. Tämä tapahtuu monta kertaa sekunnissa ja se tuottaa valoa niin kauan kun virta on kytkettynä. [67.]



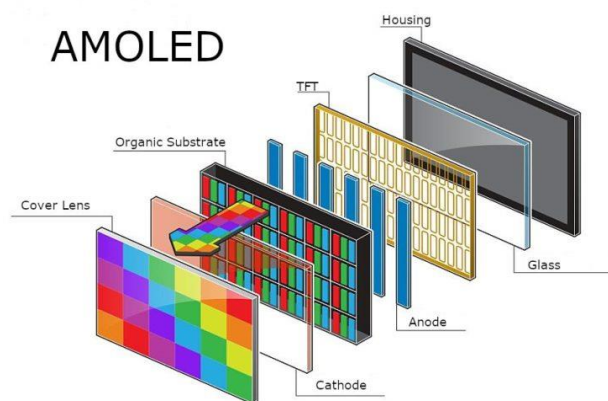
Kuva 23. Rekombinaatio virtapiirissä. Anodin ja katodin väliin asetetaan orgaaninen alusta, jossa positiiviset ja negatiiviset elektrodit kumoavat toisensa, näin luoden pieniä energiapurkauksia kemiallisessa aineessa fotoneiden muodossa [68].

Valon väri riippuu emittivassa kerroksessa käytössä olevasta orgaanisesta molekyylistä. Lisätyn jännitteen määrä määrittää valon intensiteetin / kirkkauden. Mitä suurempi jännite, sen kirkkaampi valo. [69.]



Kuva 24. Valon tuottamisprosessi OLED-teknologiassa [69].

Seuraavaksi siirrytään perusrakenteeseen ja syvennytään jokaiseen kerrokseen järjestyksessä. Alla olevassa kuvassa nähdään kerrokset, jotka ovat takakotelo, lasialusta, johon on yhdistettynä ohutkalvotransistori, anodi, orgaaninen alusta, katodi ja näyttölasia.



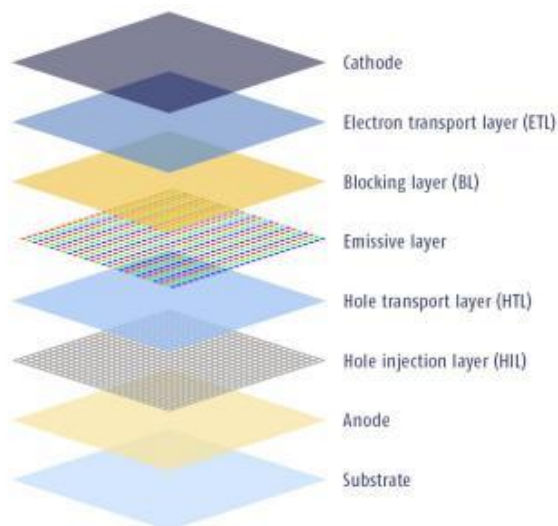
Kuva 25. AMOLED-teknologian karkea rakenne [70].

Tässä alla olevassa kuvassa esitetään OLED-rakenteen orgaanisen alustan (organic substrate) kerrokset, jotka eivät edellisessä kuvassa ole avattuna (kuva 26). Tähän kuuluvat: aukkojen injektiokerros (hole injection layer, HIL), aukkojen kuljetuskerros (hole transport layer, HTL), emittöiva kerros, estokerros (blocking

layer, BL) ja elektronien siirtokerros (electron transport layer, ETL). [71.] Suojataksen orgaanisia materiaaleja kosteudelta ja muulta, ne ovat kapseloituna. (Encapsulation).

Käydään jokainen kerros lyhyesti läpi ylhäältä aloittaen:

1. Negatiivisesti varautunut katodi syöttää elektroneja orgaaniseen kerrokseen, josta ne ensin kulkevat ETL-kerroksen läpi, joka on tarkoitettu juuri niiden kuljetamiseen.
2. Estokerroksen (BL) tarkoitus on estää liiallinen määrä elektroneja kulkemasta emittoivalle kerrokselle. Saavuttuaan emittoivaan kerrokseen, joka koostuu väriä määrittävistä emittoijista, sähköenergia muuttuu valoenergiaksi.
3. Aukkojen kuljetuskerros tukee nimensä mukaisesti aukkojen siirtymistä emittoivalle kerrokselle, jotka aukkojen injektiokerros syöttää anodilta. Aukoilla viitataan anodin häviämiin elektrodeihin lisätyn virransyötön seurauksena.



Kuva 26. Orgaaninen alusta (OLED): Perusrakenne. [72].

Nyt kun on käyty OLED-teknologia toimintaperiaate ja rakenne läpi, voidaan siirtyä tarkastelemaan WOLED- ja QD-OLED-implementaatioita. Näiden toiminta on muuten sama kuin perinteisellä OLED-teknologialla, mutta pikselitasoista toimintaa on muokattu entisestään tavoitteena korjata perinteisen OLED-teknologian pulma: kuvan retentio (image retention) ja kuvan pysyvä retentio ”sisäänpalaminen” (burn-in).

Perinteisessä versiossa näytöissä oli erikseen OLED-emittorit, jokaista alipikseliä kohti. Yksi, joka tuotti punaista, toinen vihreätä ja kolmas sinistä. Nämä koostuivat erilaisista orgaanisista yhdisteistä, jotka tuottivat nämä värit lisätessään näihin jännite. Ongelmaksi koitui se, että nämä orgaaniset yhdisteet vanhenivat eri nopeuksilla, vähentäen näiden tehokkuutta. Tästä seurasi värimuutoksia ja näytön epätasaista himmenemistä (sisäänpalamista). [73.]

Kuvan retentio on alkuvaihe sisäänpalamisesta, joka on pysyvä ja näyttävämpi muutos näytössä. Aiheuttaja tälle on staattisten kuvien, kuten logojen pitkään jatkuva näyttäminen näytöllä, jolloin pikselit kyseisellä alueella kuluvat kovemman käytön seurauksena, jättäen näyttöön haamumaisen jäljen.

Tähän on kuitenkin nykypäivän OLED-näytöissä automaattisia ohjelmistopohjaisia tekniikoita, jotka ehkäisevät tätä ongelmaa, samalla parantaen yleistä kestävyyttä. Näitä ovat esimerkiksi lyhyt pikselin virkistäjä ja pikseleitten puhdistus.

Lyhyt pikselinvirkistäjä käynnistyy joka kerta kun näytön sammuttaa ja suorittaa ”pikselivirkistykseen” (pixel refresh). Käytännössä tämä tarkoittaa transistorien läpi kulkevan jännitteen määrän uudelleensäätämistä, jotta jokainen pikseli tuottaa oikean määrän valoa, kun näyttö käynnistetään uudelleen. (Se palauttaa pikselit alkutilanteeseen). Tätä tarvitaan, koska jokaisen käytön jälkeen pikseleitä ohjaavat ohutkalvotransistorit reagoivat samaan sisääntulojännitteeseen eri tavalla, jolloin jotkut pikselit eivät valaistu yhtä kirkkaiksi kuin olisi tarkoitettu, näkyen kuvan retentiona.

Pikseleiden puhdistus on ominaisuus, joka on kehitetty pysyvää retentiota ”sisäänpalamista” varten. Pysyvä retentio pohjautuu orgaanisen led-kerroksen

kemialliseen väistämättömään huononemiseen. Tämä ominaisuus mittaa ensin, kuinka paljon jokainen pikseli on huonontunut, ja ohjaa enemmän jännitettä heikkoihin pikseleihin. (Se ei siis palauta pikseleitä alkutilaan, kuten pikselinvirkistäjä, vaan kompensoi pikseleitä lisäämällä jännitettä himmeisiin pikseleihin).

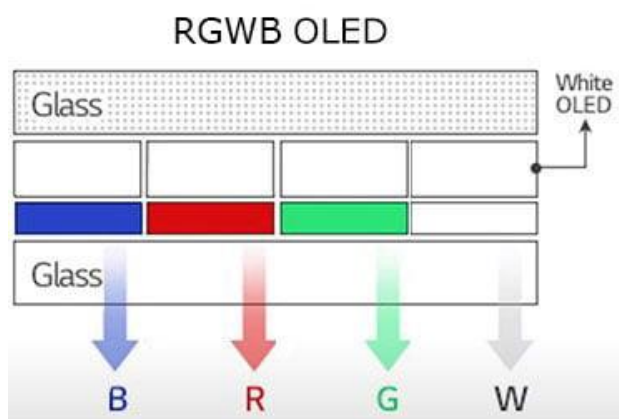
Seuraavaksi käydään läpi, kuinka nämä tekniikat kohtaavat tämän ongelman rakenteellisella tasolla.

WRGB OLED / WOLED-ratkaisuna värifiltterit ja MLA-tekniikka

Tässä variantissa käytetään valkoista OLED-valaistusta yhdistettynä värifiltterin kanssa. Siinä on RGB-alipikseleiden lisäksi neljäs filttitön alipikseli, jonka läpi valkoinen valo pääsee kulkemaan vapaasti. Toisin sanoen tässä jokainen pikseli koostuu neljästä alipikselistä. Hyvänä puolena tässä on se, että tämä lisää näytön kirkkautta, mutta ainoastaan valkoisen värin kohdalla. Varjopuolena tässä on värifiltteri, joka estää suuren osan valkoisten OLED-emittoijien tuottamasta valosta. Tämän tutkimusartikkelin [74] mukaan ainoastaan 20 % valkoisten orgaanisten valoa lähettävien diodien emittoivasta valosta päätyy hyödylliseksi.

Tämän takia on kehitetty MLA-tekniikka, jonka tarkoituksena on lisätä valotehokkuutta. Se on laitteistopohjainen rakenteellinen muutos, jossa on lisätty tuhansia linssejä jokaiseen pikseliin taittamaan valoa katsojaa kohti. [75.]

Yleisesti tässä teknologiassa lopputuloksena on huonompi värimäärä ja haaleammat kyläiset värit verrattuna valkoiseen. Rtings-sivuston tekemien testien [76] mukaan tämä ei myöskään korjaa alkuperäistä sisäänpalamisen ongelmaa kokonaan.



Kuva 27. WOLED-tekniikan toimintaperiaate pikselitasolla [77].

QD-OLED- Ratkaisuna kvanttipistetekniikka ja sininen itsevalaiseva kerros

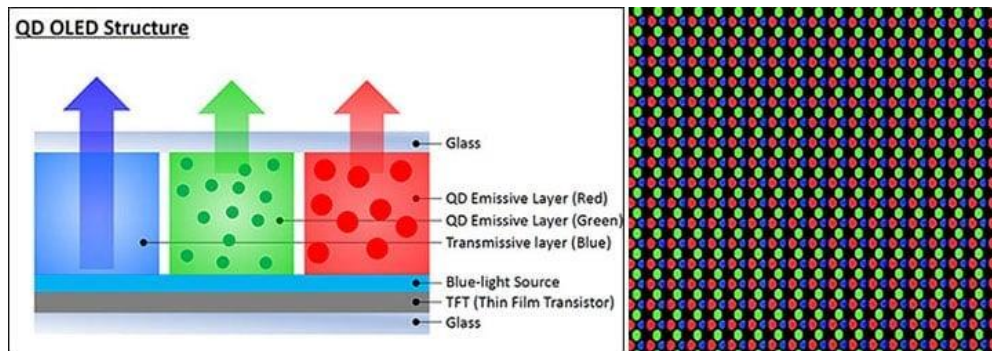
Tässä pikselirakenne koostuu kolmesta alipikselistä, joista sininen on värifilterritön, johtuen siitä, että OLED-valaistus on sininen tässä teknologiassa, samoin kuin QLED-teknologiassa.

Syynä tähän ratkaisuun on se, että sinistä tuottavat OLED-emittorit ovat useimmiten ne, jotka kuluvat nopeimmin [78]. Näin ollen, koko paneelin kattavan sinistä tuottavan OLED-kerroksen soveltaminen valon tuottamiseen on käytännössä hyvä ratkaisu, sillä kuluminen on tällöin tasaista koko näytön kirkkauden osalta. Vaikka näyttö himmenee vuosien saatossa, ei sitä huomaa, koska silmä on totunut, eikä epämuotoisuuksia esiinny kuvassa.

Toinen implementoitu muutos on kvanttipistekerros, joka on asetettu sinisten orgaanisten valoa emittoivien valojen ja päällimmäisen lasialustan väliin (kuva 28).

Kvanttipisteet ovat nanometreissä mitattavia, puolijohdemateriaaleja, jotka muuntavat valon aaltopituuksia absorboiden ja uudelleentuottaen puhtaita värejä. Tämän ne tekevät hyvin korkealla 99 % hyötysuhteella, käyttämättä sähköä lainkaan. Näiden tuottama väri määräytyy kvanttipisteen koosta. Esimerkiksi 2 nm piste tuottaa sinistä ja 7 nm piste punaista. Tuottaakseen valkoista väriä jokainen pikseli ajetaan täydellä kirkkaudella (255,255,255). [79.]

No, miten QD-OLED suoriutuu verrattuna WOLEDiin? Värialue on huomattavasti parempi, sillä se pystyy tuottamaan paljon laajemman värikirjon. Tämä johtuu värien puhtaudesta, jotka ovat paljon tarkemmat QD-OLEDssä. Kirkkaudessa ja värimäärässä QD-OLED voittaa yleisellä tasolla ja WOLED valkoisen värin toisessa. Kuvan retentoitumiseen on liian aikaista sanoa mitään, sillä teknologia on vielä niin uusi. Luultavasti samankaltainen tai hieman parempi kuin WOLED.



Kuva 28. QD-OLED paneelin rakenne yhden pikselin näkökulmasta [77].

3.3.2 Yhteenveto

OLED-teknikka jatkaa kehitystään ja tulevaisuudessa voidaan odottaa pidempää kestoikää, pienempää sisään palamisen riskiä, korkeampaa virkistystaajuutta ja näytön kirkkautta, soveltuvuutta muilla aloilla ja laitteissa, sekä kehittyneempiä tuotantoprosesseja, jotka tuovat hintoja alas.

Tämä teknologia soveltuu etenkin sellaisille, jotka haluavat kuvalaadullisesti kaiken irti. Katseluympäristön tulisi olla pimeä/hämärä – jos tähän ei ole mahdollisuutta, tätä ei kannata valita.

3.4 Teknologioiden vertailu

Tässä luvussa vertaillaan edellä mainittuja teknologioita keskenään mahdollisimman loogisella tavalla. Vertailtaviin ominaisuuksiin kuuluvat: hinta, fyysiset tekijät, kuten paneelin paksuus, elinkaaren pituus ja energiatehokkuus, toiminnolliset erot, ja kuvalaadulliset kyvyt, kaikki näytönkirkkauden ja värialueen väliltä.

Vertailuissa käytetään jokaisen teknologian ylemmän tasoisia näyttöjä, eli nämä vertailut eivät siis ole universaaleja, vaan vertailulla luodaan kokonaiskuva teknologioiden eroista.

Vaikkakin suurin osa tämän päivän LCD-näytöistä käyttää led-taustavalaistusta ja näin ollen luokitellaan LED-teknologiaksi, aloitetaan vertailun vuoksi tarkastamalla perinteistä LCD-tekniikkaa, joka käyttää kylmäkatodiputkitaustavalaistusta (CCFL) suhteessa LED-tekniikkaan.

Taulukko 1. Perinteinen LCD-teknologia verrattuna LED-teknologiaan [80; 81; 82].

Vertailu	Perinteinen LCD (CCFL)	LED (Full-Array)	Voittaja kategorian mukaan
Hinta	Edullisempi	Yleensä kalliimpi	LCD
Kuvalaatu	Hyvä	Kiitettävä	LED
Näytönkirkkaus	Karkeampi kirkkaudenohjaus	Tarkempi kirkkaudenohjaus	LED
Katselukulmat	Heikommat	Laajemmat	LED
Värintarkkuus	Hyvä	Parempi	LED
Kontrasti	Hyvä	Parempi	LED
Virkistystaajuus	Huonompi	Monitoreissa jopa 360 Hz ja televisioissa 120–144 Hz	LED
Vasteaika	Tyypillisesti hitaampi	Tyypillisesti nopeampi	LED
Fyysiset ominaisuudet	Häviäjä	Voittaja	LED
Energiatehokkuus	Hyvä	Parempi	LED
Paneelin paksuus	Paksumpi	Ohuempi	LED
Elinkaari	30,000–60,000 h	50,000–100,000 h	LED
Vertailun voittaja	1	10	LED

Yhteenveto: LED-teknologia on vertailussa ylivoimainen ja tämän takia se onkin nykypäivänä käytössä. Perinteinen LCD voittaa ainoastaan hinnassa, valaistuksen yhtenäisyydessä, jonka LED on ratkaisut diffuusorilevyllä ja siinä, että se emittoi vähemmän sinistä valoa.

Taulukko 2. WOLED- ja QD-OLED-teknologioiden välinen vertailu [83; 84; 85; 86].

OLED (AMOLED)	LG: WOLED	Samsung: QD-OLED	Voittaja
Hinta	Hintataso alkaen 1000 € (ovh.). Koskee: TV, monitori	Hintataso alkaen 1000 € (ovh.). Koskee: TV, monitori	-
Kuvalaatu	Erinomainen	Erinomainen	-
Näytönkirkkaus	Yleinen kirkkaustaso matalampi	Yleinen kirkkaustaso korkeampi	QD-OLED
Valkoinen luminanssi	Parempi	Huonompi	WOLED
Värillinen luminanssi	Matalampi	Parempi	QD-OLED
Värialue	Rec.2020 väriavaruuden kattavuus noin 74 %	Kattaa ~80% Rec.2020 väriavaruudesta	QD-OLED
Katselukulmat	Erinomaiset	Erinomaiset	-
Kontrasti	Ääretön	Ääretön	-
Virkistystaajuus	Monitoreissa jopa 480 Hz ja televisioissa jopa 144 Hz	Monitoreissa jopa 360 ja televisioissa jopa 144 Hz	WOLED
Vasteaika	Huippuluokkainen (<1 ms)	Huippuluokkainen (<1 ms)	-
Fyysiset ominaisuudet	-	-	-
Energiatehokkuus	Erinomainen	Erinomainen	-
Paneelin paksaus	0,9–2,5 mm	0,9–2,5 mm	-
Elinkaari	100,000 h	100,000 h	-
Vertailun voittaja	2	3	QD-OLED

Yhteenveto: Pienistä eroista huolimatta, molemmat teknologiat ovat erinomaisia. LG:n vahvana puolena on käyttöliittymä, joka on käyttäjäystävällisempi kuin Samsungilla. Suosituksena on valita TV hinnan perusteella. Jos toinen näistä on kovassa alennuksessa, kannattaa tämä valita. Jos haluaa päästä mahdollisimman helpolla, yleinen suositus on LG, sillä käyttäjäystävällisyys on sen verran parempi.

Elinkaaren tekninen määritelmä viittaa aikaan, joka kestää ennen kuin luminanssi pienenee 50 % alkuperäisestä [86].

Taulukko 3. QLED- ja WOLED-teknologioiden välinen vertailu [87; 88; 89].

QLED - OLED	Quantum Dot LED (QLED)	WRGB Organic LED (WOLED)	Voittaja
Hinta	Halvempi	Kalliimpi	QLED
Kuvalaatu	Kiitettävä	Erinomainen	OLED
Näytökirkkaus	Korkeampi	Korkea	QLED
Katselukulmat	Keskivertainen	Erinomaiset	OLED
Värialue	Rec.2020 väriavaruuden kattavuus noin 71 %	Rec.2020 väriavaruuden kattavuus noin 74 %	OLED
Kontrasti	Jopa ~400,000 : 1	Ääretön	OLED
Virkistystaajuus	Monitoreissa jopa 165 Hz ja televisioissa jopa 144 Hz	Monitoreissa jopa 480 Hz ja televisioissa jopa 144 Hz	OLED
Vasteaika	Parhaimmillaan ~4 ms - 10 ms	Huippuluokkainen (<1 ms)	OLED
Fyysiset ominaisuudet	Häviöjä	Voittaja	OLED
Energiätehokkuus	Hyvä	Erinomainen	OLED
Paneelin paksuus	25–50 mm	0,9–2,5 mm	OLED
Elinkaari	50,000–100,000	100,000 h	OLED
Vertailun voittaja	2	9	OLED

Yhteenveto: QLED- ja OLED-teknikat vastaavat erilaisiin tarpeisiin ja mieltymyksiin. QLED sopii niille, jotka arvostavat kirkkautta, edullisuutta (etenkin suuremmissä näytöissä) ja pitkää käyttöikää, tehden siitä hyvän vaihtoehdon valoisiin tiloihin.

OLED puolestaan on parempi valinta, jos tavoitteena on täydellinen kontrasti, syvät mustat ja erinomaiset katselukulmat, tarjoten vaikuttavamman katselukokemuksen hämärissä ympäristöissä. Valinta riippuu siis katseluolosuhteista, budjetista ja mieltymyksistä.

Tässä alapuolella on havainnollistava vertailu selventämään eri teknologioiden kyvykkyyttä toisiinsa nähden (taulukko 4). Tässä on mukana aiemmin esitettyjen teknologioiden lisäksi Micro-LED, joka on pitkällä kehitteillä oleva teknologia, mutta joka ei vielä ole kuluttajakäyttöön päätenyt korkeiden tuotantokustannusten takia. Mini-LED on käyty LED- osuudessa taustavalaistustyyppien kohdalla läpi.

Taulukko 4. Vertailu LED-, Mini-LED-, OLED ja Micro-LED-teknologioiden välillä.

Havainnollistava vertailu	LED- taustavalaistettu LCD (LED)	Mini-LED	OLED	Micro-LED
Näyttötyyppi	Taustavalaistu	Taustavalaistu	Itsevalaistu	Itsevalaistu
Kontrasti	Matala - keskitasoinen	Keskitasoinen	Korkea	Korkea
Vasteaika (ms)	Matala	Matala	Matala-lampi	Erittäin matala
Energiätehokkuus	Keskitaso	Keskitaso - korkea	Korkea	Korkea
Ainoastaan valaistutut pikselit käyttävät sähköä	Ei	Ei	Kyllä	Kyllä
Elinkaari	Pitkä	Pitkä	Pitkä	Pitkä
Näkyvyys auringossa	Keskitasoinen	Keskitasoinen	Keskitasoinen	Korkea
Käyttölämpötila (°C)	(-20) - (80)	(-20) - (80)	(-30) - (70)	(-100) - (120)
Tarve kapseloinnille	Ei	Ei	Kyllä	Ei
Kirkkaus	Keskitaso	Keskitaso	Matala - keskitaso	Korkea
Taipuisuus	Matala	Matala	Korkea	Keskitaso - korkea
Katselukulmat	Matalatasoiset	Matalatasoiset	Korkeatasoiset	Korkeatasoiset
Teknologian kypsyytaso	Korkea	Keskitaso - korkea	Keskitaso - korkea	Matala

(Kapselointi tarkoittaa orgaanisten ledien suojaamista kosteudelta ja hapelta, joka televisioissa ja monitoreissa on ratkaistu lasilla) [90].

Yhteenveto: Vertailusta huomataan, että Micro-LED:llä on hyvät edellytykset voittaa OLED-vertailukriteereissä, kuten virrankulutuksessa, kirkkaudessa ja

vasteajassa. OLED kuitenkin jatkaa kehitystään ja siihen mennessä, että Micro-LED saadaan kaupallistettua, saattaa OLED olla jo pidemmällä. Sekä OLED, että Micro-LED-teknologioita voidaan soveltaa taituvissa sovelluksissa, kuten esimerkiksi taitettavissa kännyköissä.

Mini-LED on perinteistä LCD-teknologiaa edistävä tekniikka, jossa hyödynnetään entistä pienempiä ledejä taustavalaistuksessa. Ero huomataan kontrastissa ja energiatehokkuudessa.

4 Näyttötekniologioiden tulevaisuus

Tässä luvussa tarkastellaan tulevia ja jo olemassa olevia innovaatioita näyttötekniologia-alalla. Kiinnostusta herättäviä teknologioita ovat varsinkin Micro-LED ja OLED, jotka lähivuosina ovat nostaneet rimaa näyttöjen suorituskyvyssä. Näiden lisäksi käydään läpi kvanttipistepohjaiset innovaatiot: QDEL ja QDCF, jotka ovat perinteisestä QLEDstä kehittyneempiä kvanttipisteteknologioita.

Katsottuna kauemmas tulevaisuuteen, voimme odottaa läpinäkyvien-, holografisten- ja lisätyn todellisuuden (Augmented reality, AR) kanssa integroitujen näyttöjen tulevan muuttamaan sitä, kuinka olemme vuorovaikutuksessa digitaalisen sisällön kanssa. Pysytään kuitenkin tässä työssä vielä lähitulevaisuudessa.

Näyttötekniologioiden kehitys kulkee jatkuvasti eteenpäin, ja tulevaisuudessa voimme odottaa entistä kevyempiä, kirkkaampia, energiatehokkaampia ja luontoa säästäviä näyttöjä, jotka tarjoavat paremman laatuista kuvanlaatua ja liikkeenselkeyttä.

Ennen kun siirytään innovaatioiden esittelyyn, selvennetään vielä tässä vaiheessa, että Micro-LED ei ole sama kuin mini-LED-teknologia, joka viittaa perinteisiä pienemmän kokoiisiin ledeihin (100–200 μm). Näitä sovelletaan LCD-taustavalaistuksena, parantaen valonohjausta etabloimalla enemmän ohjattavia alueita (local dimming zones).

4.1 Micro-LED (Micro Light-Emitting Diode)

Micro-LED (μ LED), on tulevaisuuden näyttötekniologia, jonka toiminta perustuu erittäin pieniin ledeihin ($\leq 100 \mu\text{m} / 0,1 \text{ mm}$) [91], jotka toimivat itsessään alipikseleinä (RGB). Tämä tekniologia on siis itsevalaiseva samoin kuin OLED, eli jokaista pikseliä voidaan ohjata yksitellen ja esimerkiksi sammuttaa kokonaan.

Sovelluskohteita ovat kaikki älykellojen ja isokokoisten (100"+) televisioiden väliltä. Tämän tekniologian uskotaan kykenevän kilpailemaan OLED-tekniologiaa vastaan vasta 3–5 vuoden kuluttua; ensiksi erittäin suurikokoisten näyttöjen, sekä pienteen älylaitteiden ja silmien eteen tulevien lasien, kuten AR-lasien muodossa [92]. Pidemmälle katsottuna, se saattaa hyvinkin olla koko näyttötekniologiateollisuuden tulevaisuus.

4.1.1 Rakenne ja toimintaperiaate

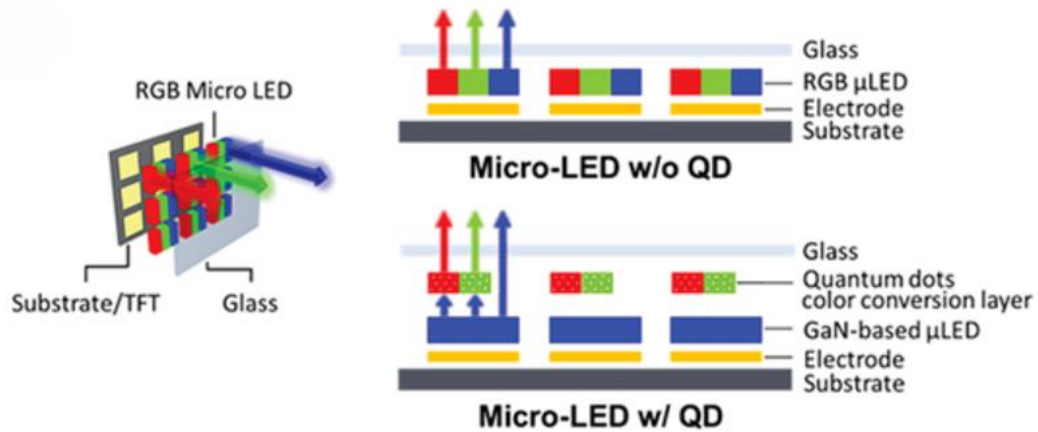
Micro-LED on rakenteeltaan tämän hetken näyttötekniologioista yksinkertaisin. Se on jopa orgaanista LED-tekniologiaa yksinkertaisempi. Taustavalaistuksen ja värifilttereiden puuttuminen kokonaan tekee rakenteesta huomattavasti ohuemman ja valotehokkaamman kuin LCD-pohjaiset näytöt.

Tässä ledit hyödyntävät kestäviä epäorgaanisia puolijohdemateriaaleja, kuten indiumgalliumnitraattia (InGaN) – (sininen ja vihreä led) tai alumiinigalliumindiumfosforia (AlGaInP) - (punainen led), orgaanisten materiaalien sijasta [93, 94]. Tämä vuorostaan luo entistä kestävämpiä ja luotettavia näyttöjä, sekä sisä-, että ulkokäyttöön.

Perusrakenne koostuu aluslevystä, johon on yhdistetty ohutkalvotransistorit ja muu elektroniikka, kuten IC (integroitu piiri / mikropiiri) ohjaamaan pikseleitä, pikselikerroksesta ja päällyslasista.

Kertauksen vuoksi, integroidut piirit muuttavat video- tai kuvasignaalin analogiseksi sähköjännitteeksi, jonka se jakaa ohutkalvotransistoreille, ja nämä

vuorostaan säätävät jokaisen alipikselin intensiivisyyttä. Se toimii siis ”välikätenä” mikroprosessorin ja ulostulokomponentin välillä. [95.]

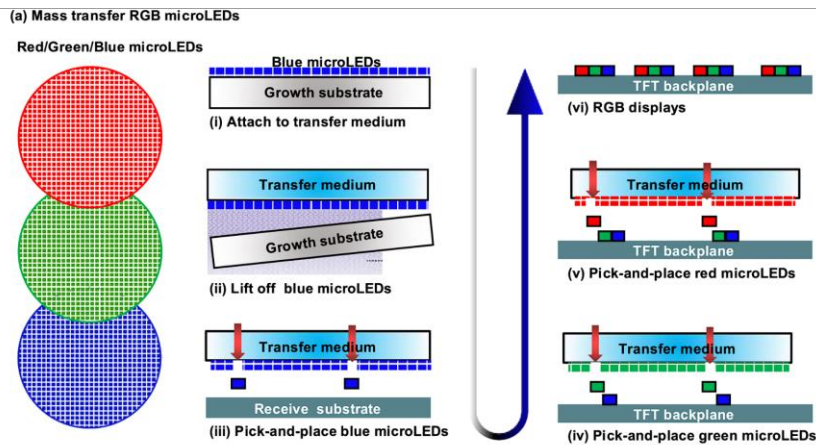


Kuva 29. Micro-LED-rakenne (kvanttipisteiden kanssa ja ilman) [96].

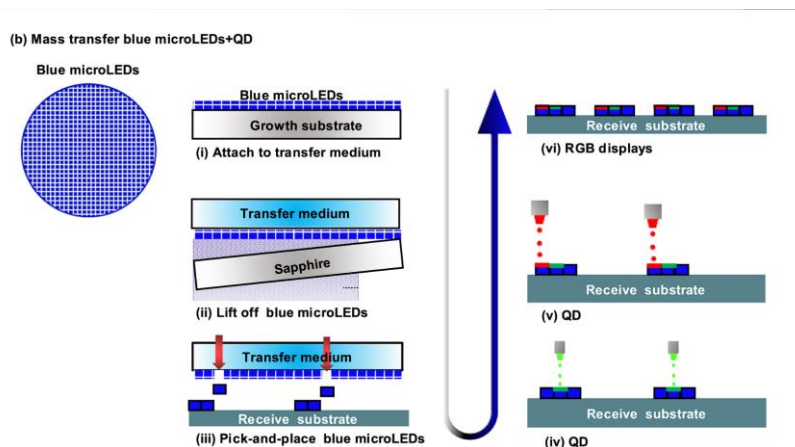
4.1.2 Haasteet

Perehdytään seuraavaksi siihen, mikä tuotannosta tekee niin hankalan ja kalliin; toisin sanoen, miksi tämä ei ole vielä kuluttajakäytössä.

Syy piilee tuotantoprosessivaiheessa, joka tunnetaan nimellä ”mass transfer” (kuva 30 & 31). Tässä punaiset, vihreät ja siniset diodit tuotetaan kolmelle eri alustalle, jotka siirretään kokonaisuudessaan suoraan näytön aluslevylle (alus-talle). Tämä on hyvin nopea ja tarkka siirtoliike, jota kutsutaan ”Pick-and-Place”-siirtoprosessiksi, joka on yksi suurimmista haasteista tuotannossa. [97 & 98.]



Kuva 30. "Mass transfer"- tuotantoprosessivaihe [99].



Kuva 31. "Mass transfer"- tuotantoprosessivaihe kvanttipisteteknologiaa hyödyntävässä rakenteessa [99].

Erityisen vaikeaksi tässä tekee se, että asetelutarkkuus on mikrometritasolla ja ledien (tässä tapauksessa alipikseleiden) suuri määrä, joka on jo pienessä näytössä ($500 \text{ pikseliä} \times 500 \text{ pikseliä} \times 3 = 750,000$ yksittäistä lediä). Yhdessä nämä vähentävät tuottoa, sillä yhdenkin pikselin ongelmallinen toimivuus johtaa korjaustoimenpiteisiin tai jopa kokonaan hylkäämiseen. [98.] Toisin sanottuna, tästä prosessista täytyy saada hyvin luotettava, ennen kuin siirrytään massatuotantoon. Tässä on hyvinkin pitkälti syy siihen, miksi tämä ei ole vielä käytössä.

4.2 PHOLED (Blue Phosphorescent OLED)

Nykypäivän OLED-paneelit, joita sovelletaan televisioissa ja monitoreissa hyödyntävät jo fosforesenssia, mutta ainoastaan osittain. Fosforesenssisia materiaaleja hyödynnetään nimittäin punaisissa ja vihreissä ledeissä [100], mutta sininen on tuottanut ongelmia, kuten aiemminkin on huomattu (kts. luku 2.3).

PHOLED-tekniikalla viitataan siis kehittyneeseen OLED-tekniikkaan, joka hyödyntää fosforoivia materiaaleja myös sinisissä emittoijissa, fluoresoivien sijasta. Nämä emittoijat sisältävät raskaita metalleja, useimmiten iridiumia (Ir) tai platinaa (Pt). [101.] Tutkijat kuitenkin yrittävät löytää ratkaisua, joka poissulkisi raskaiden metallien käytön kokonaan.

Hyödyt: Energiatehokkaampi, sillä se muuttaa teoriassa lähes kaiken (~100 % IQE, Internal Quantum Efficiency) sähköenergian valoenergiaksi verrattuna fluoresenssiin perustuvaan OLEDiin (~25 % IQE). Näin myös virrankulutus on matalampi, joka edistää ympäristöystävällisyyttä, sillä se tarkoittaa käytännössä pienempää hiilijalanjälkeä ja mahdollisia taloudellisia säästöjä. [102.]

Energiatehokkuus johtaa myös laitteen pidempään elinkaareen. Tämä johtuu siitä, että energianmuutoksessa käytännössä mitätön osuus (<1 %) vapautuu lämpöenergiana, josta seuraa huomattavasti matalampi käyttölämpötila näyttössä. (Tämä korreloi suoraan näytön käyttöikäen, sillä korkea lämpötila kuluttaa orgaanisia materiaaleja). [102.] Näiden hyötyjen lisäksi voidaan odottaa kirkkaampia paneeleja, sillä tehokkaampi valontuotanto yhdistettynä matalampaan käyttölämpötilaan, mahdollistaa tämän riskeeraamatta ylikuumenemisen.

4.2.1 Haasteet

Pääasiallisena esteenä Micro-LED-tekniikan käyttöönotossa ja kaupallistamisessa on fosforisenssiin perustuvan sinisen ledin epävakaus, joka vuorostaan johtaa lyhempään kestoikään – liian lyhyeen kuluttajakäyttöön.

Ymmärtääksemme syy epävakauteen kerrataan nopeasti, kuinka OLED tuottaa valoa. Virtaa syötettäessä orgaanisten ledien läpi, elektronit lähtevät katodilta ja aukot anodilta; ne rekombinoituvat keskimmaisessa emittoivassa kerroksessa muodostaen eksitoneja, jotka vapauttavat joko valoa tai lämpöä hajotessaan [luku 3.3.1].

Tämä prosessi voi tuottaa kahta tyyppiä eksitoneja: singletti tai tripletteksitoneja. Tämä on ongelma, koska perinteisissä – eli fluoresoivissa orgaanisissa ledeissä vain singletit emittoivat fotoneja, kun taas tripletit vapauttavat energiansa lämpönä. Tästä syystä fluoresoivien orgaanisten ledien sisäinen kvanttitehokkuus (IQE) on ~25 % ($1 / 1 + 3$), kun taas fosforoivien on ~100 %, sillä ne pystyvät hyödyntämään kaikkia eksitoneja ($4 / 4$). [103.]

Sinisen fosforisen orgaanisen ledin kestoikä on arviolta 10–40 kertaa lyhyempi kuin vastaavien punaisten ja vihreiden. Tämä tarkoittaa käytännössä tuhansia käyttötunteja, joka ei ole riittävästi kuluttajaelektronikan vaatimaan monikymmenkertaiseen määrään. [104.]

Juurisyys sille, miksi käyttöikä on niin lyhyt, johtuu sinisten emittoijien korkeasta tripletteksitonien energiamäärästä. Tämä johtaa nopeampaan hajoamiseen, sillä molekyyliidokset katkeavat rajummin. [104.]

4.3 QDEL (Quantum Dot Electroluminescence)

QDEL (Nano-LED) on itsevalaiseva kvanttipisteteknologia haastamaan OLED. Se on Sharp-näyttöteknologiayrityksen kehittämä ja edelleen kehitteillä oleva innovaatio [105]. Tällä hetkellä käytössä oleva QD-teknologia perustuu fotoluminesenssiin. Se tarkoittaa yksinkertaisesti, että kun aine (kvanttipiste) absorboi valoa, se säteilee sen takaisin kirkkaampana ja värikkäämpänä, samalla mahdollisesti muuttaen sen väriä.

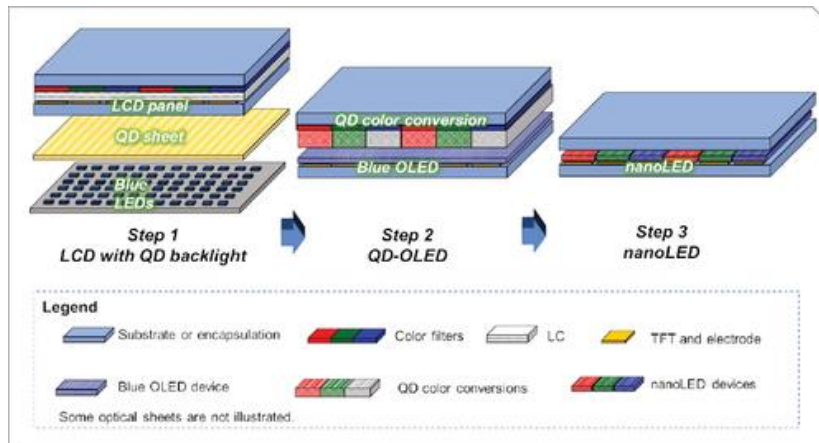
Tämä uusi tekniikka taas hyödyntää kvanttipisteiden elektroluminesenssia tuottaakseen valoa. Nämä siis emittoivat valoa suoraan, kun näihin lisätään jännite samoin kuin orgaaniset ledit. [106.] Se eroaa täten perus QLED-tekniikasta, jossa sininen led-pohjainen taustavalaistus kiihottaa kvanttipisteet muuttamaan nämä erivärisiksi.

Tämän on arvioitu tulevan kuluttajakäyttöön lähivuosina, kun sinisten kvanttipisteiden kestoikä saadaan pidennettyä vihreiden ja punaisten tasolle. Kaupallistamista helpottaa se, että tämän tuotanto voidaan toteuttaa nykyisillä LCD (LED) -linjastoilla [107]. Tästä syystä myös näiden hinnat tulevat luultavasti olemaan hyvin kilpailukykyisiä erityisesti OLEDiin verrattuna.

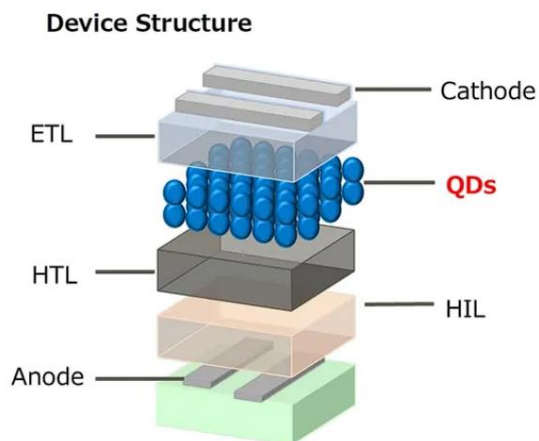
4.3.1 Rakenne

Rakenne koostuu kapseloidusta kvanttipistekerroksesta, joka sijoittuu katodin ja anodin väliin. Tämä kokonaisuus yhdistettynä suoraan aktiiviseen ohutkalvotransistorimatriisiin (Active TFT Matrix), joka on suoraan alustaan kiinnitetty. Tämän kaiken päälle asettuu lasinen päällysalusta (kuva 32).

Toiminta on sama kuin OLEDssä- katodin puolella on elektronien kuljetuskerros (ETL, electron transport layer), ja anodin puolella reikien injektointikerros (HIL, hole injection layer), sekä reikien kuljetuskerros (HTL, hole transport layer) (kuva 33). Erona on emittoiva kerros, joka on tässä teknologiassa kvanttipistekerros, orgaanisen sijaan.



Kuva 32. Kvanttipistepohjaisten teknologioiden rakenteellinen vertailu. Vasemmanpuolinen (perinteinen QLED), keskimäinen (kvanttipistepohjainen OLED) ja oikeanpuolinen tuleva QDEL (Nano-LED) [105].



Kuva 33. Kvanttipisteyksikön rakenne QDEL-teknologiassa [108].

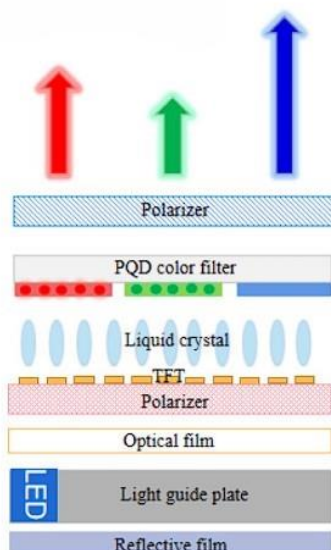
Tämän teknologian tullessa kuluttajakäyttöön, voidaan odottaa värikkämpiä näyttöjä kuin koskaan, juuri sen takia, että tässä hyödynnetään puhtaasti kvanttipisteiden elektroluminesenssia.

4.4 Kvanttipistepohjainen värifilteri (QDCF)

Tämä tekniikka on hyvin keskeinen tulevaisuuden innovaatio, sillä sitä voidaan soveltaa kaikissa nykypäivän näyttötekniologioissa, jotka hyödyntävät värifiltteriä. Sen uskotaan olevan seuraava askel kvanttipistepohjaisessa näyttötekniologiassa.

Kuten QLED-esittelyssä jo mainittiin, kvanttipisteteknologiasta on nousemassa toinen tehokkaampirakenteinen versio. Tämä tunnetaan englanninkielisellä nimellä: "Quantum Dot Color Filter". Tässä teknologiassa kvanttipisteet toimivat suoraan värifiltterinä, eli se paikkaa perinteiset pigmentoidut värifiltterit. Se lupautuu tarjoamaan enemmän kirkkautta, tehokkaampaa valon tuottoa, laajempia katselukulmia ja entistä ohuempaa paneelia. [109.]

Näihin kaikkiin lupauksiin on loogiset perusteet. Koska kvanttipisteet toimivat värifiltterinä, tämä tarkoittaa, että valon muutos tapahtuu nestekidekerroksen ja muiden optisten kerroksien jälkeen. Tällöin muunnetun valon ei tarvitse enää kulkea usean kerroksen läpi ennen kuin se pääsee näytöstä ulos, joka lisää luminanssia eli näytön kirkkautta.



Kuva 34. QDCF-rakenne. Kvanttipisteitä hyödynnetään suoraan värifiltterinä [110].

4.4.1 Haasteet ja tulevaisuuden applikaatiot

Vastaus tähän on lyhyesti sanottuna tekniset ja lakisääteiset esteet.

Aloitetaan tuotantoon liittyvistä teknisistä haasteista. Kvanttipisteiden kuviomainen valmistus värimuunnoskerroksille liittyy monimutkaisia valmistusprosesseja, kuten fotolitografia (photolithography) tai mustesuihkutulostus (inkjet printing). Nämä prosessit vaativat hyvin tarkkaa ohjausta varmistaa kseen kvanttipistekerroksien yhtenäisyyden ja kestävyuden, joka vaikeuttaa valmistusta, eikä näin ollen ole sarjatuotantomielessä kestävä ratkaisu. [111.]

On muutamia vaihtoehtoja korvaamaan tämä, mutta näitä ei ole vielä saatu suoriutumaan yhtä hyvin kuin kadmiumselenidi. Näitä ovat muun muassa perovskitti ja indiumfosfidi (InP). Tutkimusten mukaan nämä vielä kohtaavat ongelmia fotoluminesenssiin ja vakauteen liittyen. [112.]

Lakisääteiset esteet perustuvat kadmiumselenidin (CdSe) myrkyllisyyteen. Nämä kadmiumselenidipohjaiset kvanttipisteet tarjoavat yliverstaista suorituskykyä, mutta ovat kiellettyjä osassa Eurooppaa. Tämän käyttöä rajoittaa EU:n laatima direktiivi (RoHS, Restriction of Hazardous Substances) – säädös, jolla rajoitetaan tiettyjen haitallisten aineiden käyttöä elektronisissa laitteissa. [113.]

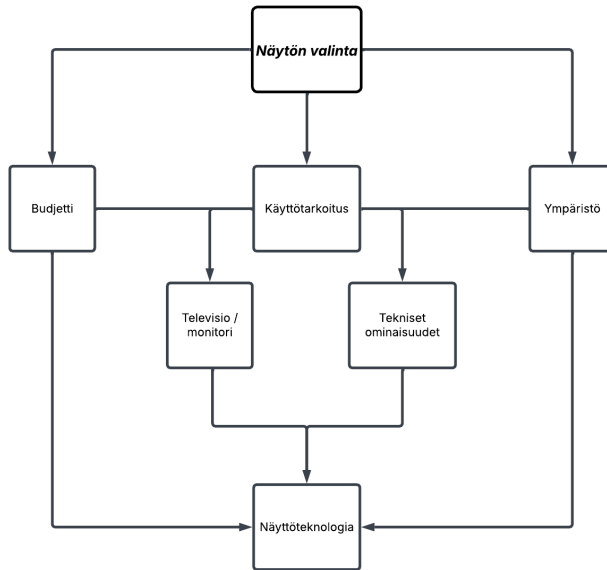
Tulevaisuudessa voidaan mahdollisesti implementoida LED-, WOLED- ja MicroLED-teknologioihin korvaamaan perinteiset pigmenttipohjaiset värifiltterit, parantamaan kirkkautta ja lisäämään valon ja energian hyötysuhdetta, näin tuottaen enemmän valoa samalla määrällä virtaa.

5 Näytön valinta

Tässä luvussa käydään läpi mitkä tekijät täytyy ottaa huomioon näytön valinnassa ja mistä kannattaa aloittaa. Tämä luku sisältää myös kaavioita paremmin havainnollistamaan, miten teknologiat jakautuvat, millaisia yhdistelmiä on olemassa ja millä perusteilla valinta kannattaa tehdä. Tässä ei käydä läpi teknologia-yritysten antamia nimityksiä näille, kuten esimerkiksi Neo QLED, joka on Samsungin nimitys kvanttipisteteknologiapohjaiselle, mini-led taustavalaistukselliselle LCD-paneelille. Vaan pysytään teknologioiden puhtaissa nimityksissä ja avataan, mitä vaihtoehtoja on, esittämällä kaikki asiat yhdessä paikassa. Syy tähän on, että nimityksiä on paljon ja lisää on tulossa.

Näytön valinta perustuu ensisijaisesti budjettiin, käyttötarkoitukseen ja käyttöympäristöön, jossa näyttöä aiotaan soveltaa. Käyttötarkoitus määrittää onko soveliaain näyttötyyppi televisio vai monitori ja tekniset ominaisuudet, kuten virkistystaajuuden ja resoluution.

Ensiksi siis määritetään budjetti, eli hinta, joka ollaan valmis maksamaan näyttöstä. Tämän jälkeen pohditaan, millaiseen käyttötarkoitukseen- ja ympäristöön näyttö tulee. Kun nämä ovat selvillä voidaan siirtyä teknisten ominaisuuksien, näyttömuodon ja muiden kriteerien määrittämiseen, jotka perustuvat edellä mainittuihin tekijöihin. Näiden selvitettyä voidaan valita sopivin teknologia, joka vastaa näitä tietoja mahdollisimman tarkasti. (Alla on esiteltyinä kaaviomuodossa edellä mainittu rakenne valinnalle).



Kuva 35. Kaavio, joka esittää luontevimman järjestyksen näytön valinnalle.

5.1 Käyttötarkoitus - televisio vai monitori?

Pääasiallinen käyttötarkoitus merkitsee suurta roolia oikeanlaisen näytön valinnassa. Tämä määrittää näyttömuodon ja millaiset teknilliset ominaisuudet sen olisi hyvä sisältää. Käyttötarkoituksen tarkka määrittäminen voi säästää hankkijan rahoja, koska voidaan valita näyttö, josta puuttuu tietyt tekniset ominaisuudet, jotka ovat kyseiseen käyttötarkoitukseen merkityksettömiä. Esimerkiksi kilpailulliseen PC-pelikäyttöön voidaan säästää resoluutiossa, valitsemalla 1440p (QHD) tai 1080p (FHD) resoluutioinen monitori ja keskittyä virkistystaajuuteen, joka kilpapelamisessa näytön osalta on tärkein tekijä.

Aloitetaan käymällä läpi mihin käyttötarkoituksiin kukin näyttömuoto soveltuu parhaiten.

Suosittelut teknilliset ominaisuudet käyttötarkoituksen mukaan (jos käyttötarkoituksia on useampi, valitse näyttö, joka sisältää jokaisessa mainitut suositellut teknilliset ominaisuudet:

Televisio

Televisiot ovat suunniteltu ensisijaisesti viihdekäyttöön, mutta voidaan käyttää myös esitysmuodossa ja mainonnassa. Suuren kokonsa vuoksi, nämä soveltuvat erinomaisesti muun muassa esitystarkoitukseen kokoushuoneisiin, tiedotteiden ja mainonnan tarkoituksessa kauppakeskuksiin ja muihin julkisiin tiloihin. Pääasiallisiiin viihdemuotoihin kuuluvat elokuvat ja sarjat, konsolipelaaminen ja urheilulähetykset.

Suositteltu resoluutio on kaikissa 3840 x 2160 p (UHD /4K).

1. Elokuvat ja sarjat: Virkistystaajuus: 60 Hz; HDR-tuenta (HDR10+ / Dolby Vision).
2. Konsolipelaaminen: HDR-tuenta (HDR10); Virkistystaajuus: ≥ 120 Hz; Syöttöviive ≤ 15 ms (ALLM); VRR.
3. Urheilulähetykset: Virkistystaajuus 120 Hz ja tehokas liikkeentoisto.
4. Esityskäyttö ja mainostus: Perus LED soveliain: Edullinen hinta, ei riskiä kuvan sisäänpalamiselle, vaikka kuva saattaa olla paikollaan pitkiäkin aikoja.

Monitori

Monitorit on optimoitu tarkkaan työskentelyyn ja interaktiiviseen käyttöön, kuten tietokoneiden kanssa työskentelyyn ja pelaamiseen. Käyttötarkoitushaarukka on televisioita laajempi, muttei välttämättä parempi. Näihin mukaan lukeutuvat muun muassa: ohjelmistojen käyttö, kuten graafinen suunnittelu, videoiden / kuvien editointi tai vaikkapa 3D-mallintaminen, tietokonepelaaminen, toimistokäyttö ja muu viihdekäyttö.

1. Graafinen suunnittelu / videontuotanto: IPS; resoluutio: 3840 x 2160 p (UHD) – 7680 x 4320 p (8K); väritarkkuus keskeinen tekijä; HDR-tuki

2. Tietokonepelaaminen: (TN / IPS); resoluutio: 1920 x 1080 p (FHD) - 3840 x 2160 p (UHD); virkistystaajuus: 144–480 Hz; syöttöviive ≤ 5 ms; VRR (G-Sync / FreeSync- riippuen näyttöohjaimesta, jos NVIDIA:n näyttöohjain valitse G-Sync tuennallinen ja jos AMD valitse FreeSync tuennallinen; HDR-tuki

3. Toimistokäyttö ja ohjelmointi: (IPS / VA); resoluutio: 2560 x 1440 (QHD) / 3840 x 2160 p (UHD); syöttöviive ≤ 15 ms

Jos etsit HDR-tuennallista monitoria- tarkista, että näytössä on VESA:n myöntämä sertifikaatti ja valitse budjettisi mukainen vaihtoehto.

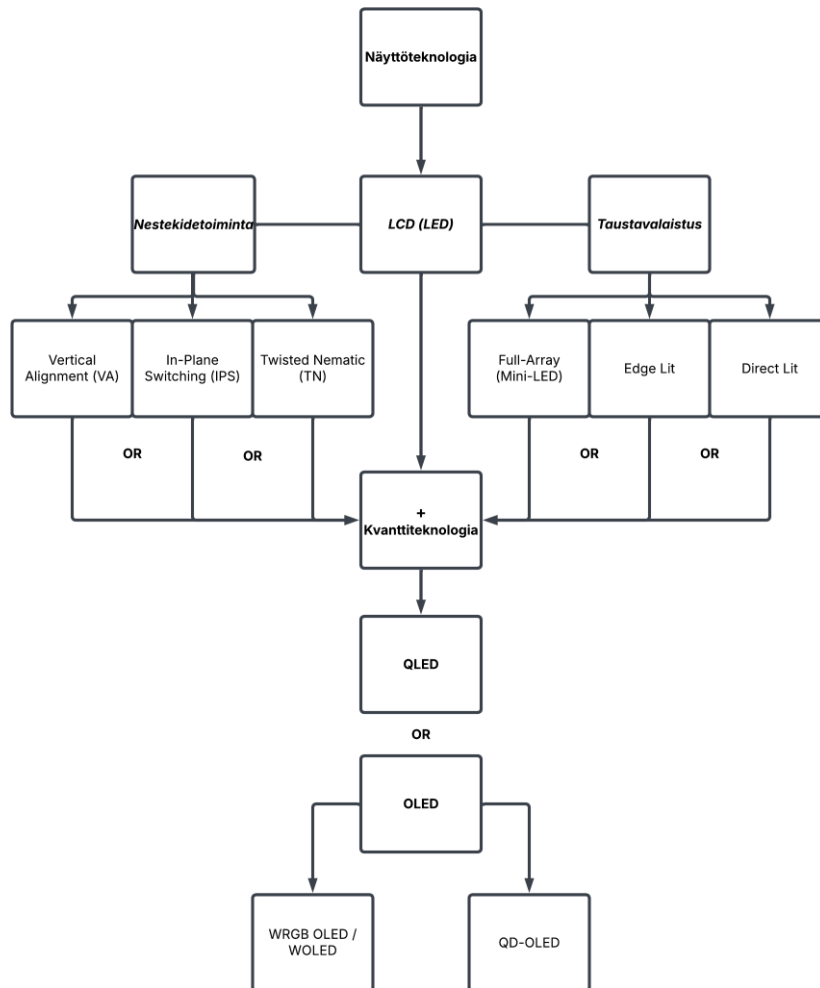
Näytön valinta riippuu siis ensisijaisesti käyttötarkoituksesta – televisiot ovat parhaimmillaan viihteessä ja esityksissä, kun taas monitorit soveltuvat tarkkuutta ja nopeutta vaativaan työskentelyyn ja pelaamiseen.

Ympäristön / tilan vaikutus valintaan: Ainoa syy valita jotain muuta kuin OLED liittyy juuri tilan valoisuuteen (poissulkien budjetin). Jos tila on hyvin valoisa, parempana vaihtoehtona olisi QLED, sillä se on yleisesti ottaen kirkkaampi. Tämäkin on hieman kaksipäinen asia, sillä OLED on viime aikoina parantanut kirkkautta huomattavasti.

Katseluetäisyys vaikuttaa näytön tuumakokoon ja tarkkuuteen (resoluutioon), ei niinkään teknologiaan. Tästä lisää (luku 2.1.1).

5.2 Teknologian valinta

Nyt kun tiedetään näyttömuoto ja suositellut tekniset ominaisuudet, voidaan siirtyä oikean näyttötekniikan valitsemiseen. Tässä käydään läpi jokainen teknologiayhdistelmä parhaimmuusjärjestyksessä ja esitetään yhdessä kaaviossa, kuinka teknologiat jakautuvat ja rakentuvat tänä päivänä.



Kuva 36. Kaavio, joka esittää tällä hetkellä kuluttajakäytössä olevat näyttöteknologiat, ja mistä nämä voivat koostua.

Näyttötekniikat parhaimmuusjärjestyksessä huomioonottamatta muita teknillisiä ominaisuuksia:

1. OLED (WOLED tai QD-OLED)
2. QLED FALD (Full-Array Local Dimming) + Mini-LED taustavalaistus
3. QLED (FALD)
4. QLED (Edge Lit)
5. LED (FALD) + Mini-LED taustavalaistus
6. LED (FALD)
7. LED (Edge Lit) (hyödyntää paikallista himmennystä)
8. LED (Direct Lit) (ei hyödynnä paikallista himmennystä)

Kun tämä lista yhdistetään aikaisemmin mainittuun (luku 5.1) television / monitorin käyttötarkoitus – suositellut ominaisuudet -listaan ja implementoidaan oma budjetti tähän, saadaan itselle sopivin näyttö.

Valitse siis valitsemasi näyttömuodosta (televisio / monitori) paras näyttötekniologia, jonka budjettisi kattaa ja joka sisältää kaikki suositellut tekniset ominaisuudet, jotka olet saanut selville (luku 5.1). Näin sopivin näyttö on valittu.

6 Johtopäätökset

Selvitystyöstä voidaan tehdä seuraavat johtopäätökset: Näytönvalinnan suurin tekijä on budjetti. Tämän ollessaan riittävä, paras näyttöteknologia kuluttajatarcoitukseen tällä hetkellä on *QD-OLED*, joka AMOLED-tekniikkana on jo hyvä, mutta siitä vielä entistä kirkkaampi ja värikkäämpi. Micro-LED on kuitenkin hyvin pitkällä kehitteillä, ja sen hintatason laskiessa, saattaa olla parempi valinta, kuin kehittyneimmät OLED-näytöt.

Jos haluaa parhaan mahdollisen katselukokemuksen, televisio on aina vahvempi osapuoli monitoriin verrattuna, sekä kokonsa, että tehokkaamman kuvanprosessointikyvyn ansiosta. Monitorit ovat kuitenkin parempia työpöytäkäyttöön, kuten graafiseen suunnitteluun ja paljon pientä tekstiä sisältäviin toimintoihin, kilpape-laamiseen ja muuhun sisällöntuotantoon. Tästä syystä ne ovat vielä hyvin ajankohtaisia, ja tulevat olemaan tulevaisuudessa, jopa ajankohtaisempia, niiden pro-sessointikyvyn parannettua ja yhä useamman ammatin digitalisoiduttua.

Työn tavoitteet ovat muuttuneet työn aikana moneenkin kertaan, johtuen aiheen laajuudesta. Aihekokonaisuutta on täytynyt rajata enemmän kuin oli suunniteltu, jotta työ pysyisi rakenteellisesti ymmärrettävänä ja ylipäättään hyödyllisenä lukijalle.

Työn eettisyys ja luotettavuus on hyvällä tasolla. Asiat on tarkistettu monesta lähteestä ja selvitetty perusteellisesti asioiden paikkansapitävyyttä. Joistakin aiheista oli hyvin vähän tietoa, sillä yritykset eivät ymmärrettävästi halua jakaa kaikkia salaisuuksia tekniikoihin, sillä onhan kyse rahasta ja kilpailusta.

Jatkotutkimusta varten, tästä aiheesta riittää kyllä asiaa. Syvemmälle teknologi-oihin pääsee aina ja lisää on tulossa.

7 Yhteenveto

Työssä esiteltiin ja vertailtiin nykypäivän näyttötekniikat selvittämällä mitä kaupallisten nimityksien takana oikeasti on, miten kaikki liittyvät toisiinsa ja mikä näistä on mihinkin käyttötarkoitukseen sovelia. Näiden selvitettyä pystytään valita itselleen sopivin vaihtoehto.

Aluksi käytiin vertailun kannalta keskeisiä aihealueita läpi helpottamaan esittelyiden ja vertailuiden sisäistämistä, sekä ymmärtämään aihe kokonaisuudessaan. Tämän jälkeen esiteltiin kukin tänä päivänä kuluttajakäytössä oleva näyttöteknologia, johon kuului fyysisen rakenteen, toimintaperiaatteen, sekä eri tyyppien läpikäyminen markkinointiesittelyitä syvemältä. Perehtyen muun muassa sähkökemiallisiin ominaisuuksiin ja materiaaleihin.

Tämän jälkeen tuli näyttöteknologioiden väliset vertailut, jotka tehtiin mahdollisimman loogisesti ja yksinkertaisesti, jotta niistä kehkeytyisi ymmärrettävä, mahdollisimman helppolukuinen vertailu. Tämän jälkeen katsottiin tulevaisuutta kohti, luoden jonkinlaista mielikuvaa siitä, mitä tulevan pitää näyttöteknologioiden kannalta.

Lopuksi vielä vastattiin kysymykseen, ”mikä näyttöteknologia kannattaa valita?” ”Näytön valinta”-luvussa ja näin ollen työ tuli päätökseensä

Lähteet

- 1 Adams, Freddy & Barbante, Carlo. 2015. Optoelektroniikka. Tieteellinen raportti. <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/optoelectronics>. Luettu 14.11.2024
- 2 Emerging Display Market. 2024. Nettiartikkeli: <https://www.linkedin.com/pulse/emerging-display-technology-market-size-worth-usd-2973-lsitf/> Luettu: 1.11.2024
- 3 Dey, Arindam. 2013. Opinnäytetyö. https://www.researchgate.net/figure/The-FOV-of-human-eyes-is-approximately-135-vertically-and-200-horizontally-including_fig3_263161973. Luettu 9.10.2024
- 4 Clark, Roger. 2005. Päivitetty 2018. Nettiartikkeli. <https://clarkvision.com/articles/eye-resolution.html> . Päivitetty 2018. Luettu: 20.8.2024
- 5 Darrel G. Hopper. 1999. Air Force Research Laboratory. Verkkoaineisto. <https://apps.dtic.mil/sti/tr/pdf/ADA430165.pdf>. 13.06.2000. Luettu: 12.06.2024.
- 6 Kurth, Jake. 2024. Tagarno. Teknologiyritys. Nettiartikkeli. <https://tagarno.com/why-frame-rate-matters-in-digital-microscopes/>. Luettu 13.8.2024.
- 7 "Frame rate (FPS) vs Refresh Rate (Hz)". 2023. Näyttöteknologiyritys. Unilumin. <https://www.unilumin.com/blog/refresh-rate-vs-frame-rate.html>. Luettu 10.9.2024

- 8 "What is VSync?". 2024. Teknologiayritys. Lenovo. Nettiartikkeli. <https://www.lenovo.com/us/en/glossary/vsync/>. Luettu 11.11.2024
- 9 Shafer, Rob. 2024. DisplayNinja. <https://www.displayninja.com/what-is-screen-tearing/>. Luettu 21.12.2024
- 10 Adjokatse, Sampson; Fang, Hong-Hua & Loi, Maria Antionetta. 2017. Nettiartikkeli. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1369702116304102>. Luettu 31.12.2024
- 11 "DCI-P3". Päivitetty 11.11.2024. Nettiosoite: <https://en.wikipedia.org/wiki/DCI-P3>. Luettu 4.7.2024
- 12 "Bit Depth". Termin määritelmä. PCMag. <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/bit-depth>. Luettu 27.12.2024
- 13 McNamara, Michael J. 2018. Näyttötekniikka-asiantuntija. Projectorcentral. Nettiartikkeli. <https://www.projectorcentral.com/All-About-Bit-Depth.htm?page=Understanding-Bit-Depth-Specs-When-Shopping>. Luettu 27.12.2024
- 14 Babcock, Adam. 1.12.2022. Rtings. Nettiartikkeli. https://www.rtings.com/tv/tests/picture-quality/color-volume-hdr-dci-p3-and-rec-2020#test_927. Luettu 15.9.2024
- 15 Di Giovanni, Nicholas. 2021. Rtings. Nettiartikkeli. <https://www.rtings.com/tv/tests/picture-quality/wide-color-gamut-rec-709-dci-p3-rec-2020>. Luettu 16.9.2024
- 16 Yurek, Jeff. 2011. Teknologiayritys. Nanosys. <https://dot-color.com/2011/10/08/the-difference-between-color-gamut-and-bit-depth/>. Luettu 26.12.2024

- 17 Babcock, Adam. 2024. Näyttötekniologia-asiantuntijayritys. Rtings. Nettiartikkeli. <https://www.rtings.com/tv/tests/picture-quality/contrast-ratio>. Luettu 16.9.2024
- 18 Di Giovanni, Nicholas. 2022. Näyttötekniologia-asiantuntijayritys. Rtings. https://www.rtings.com/tv/tests/picture-quality/color-accuracy#test_152. Luettu 29.12.2024
- 19 De Haas, Maarten. 2018. Nettiartikkeli. <https://www.wiggle-pixel.nl/en/blog/what-are-color-spaces-color-profiles-and-gamma-correction>. Luettu 15.12.2024
- 20 "Transfer functions in imaging". https://en.wikipedia.org/wiki/Transfer_functions_in_imaging. Luettu 3.1.2025
- 21 "What is Gamma?". 2024. Näyttötekniologiayritys. BenQ. Nettiartikkeli. <https://www.benq.com/en-us/knowledge-center/knowledge/gamma-monitor.html>. Luettu 26.12.2024
- 22 Di Giovanni, Nicholas. Päivitetty 6.10.2022. Teknologiayritys: RTINGS. Nettiartikkeli. <https://www.rtings.com/tv/learn/hdr-vs-sdr>. Luettu: 25.06.2024.
- 23 Withers, Steve. 1.10.2024. Nettiartikkeli. <https://www.what-hifi.com/features/what-is-tone-mapping-how-the-hdr-tv-feature-works-and-why-its-important>. Luettu 5.10.2024
- 24 "Tone Mapping: The Techniques that makes movies beautiful". 2023. Asiantuntijaverkosto. SMPTE. Nettiartikkeli. <https://www.smpte.org/blog/tonemapping-the-techniques-that-makes-movies-beautiful>. Luettu 7.1.2025

- 25 "SMPTE STANDARD". 2014. HDR-Standardi. <https://pub.smpte.org/latest/st2084/st2084-2014.pdf>. Luettu 3.1.2025
- 26 "BT.2100-standard". 2016. HDR-standardi. https://www.itu.int/dms_pubrec/itu-r/rec/bt/R-REC-BT.2100-2-201807-I!!PDF-E.pdf. Luettu 3.1.2025
- 27 "The ins and outs of HDR - Gamma Curves". 2024. Näyttötekniologiayritys. Eizo. Nettiartikkeli. <https://www.eizoglobal.com/library/management/ins-and-outs-of-hdr/index2.html>. Luettu 2.1.2025
- 28 "Hybrid Log-Gamma". https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_log%E2%80%93gamma. Luettu 8.1.2025
- 29 Di Giovanni, Nicholas. 2022. Kuluttajatuote testausyritys. Rtings. Nettiartikkeli. <https://www.rtings.com/tv/learn/hdr10-vs-dolby-vision>. Luettu 15.9.2024
- 30 "What is HDR TV". Samsung. Tekniologiayritys. Nettiartikkeli. https://www.samsung.com/hk_en/tvs/tv-buying-guide/what-is-hdr-tv/. Luettu 25.9.2024.
- 31 "LED-Light Emitting Diode: Construction, Working, Types and Applications". <https://www.electricaltechnology.org/2022/06/led-light-emitting-diode.html>. Luettu: 21.8.2024
- 32 Bellis, Mary. Päivitetty 2021. Keksintöasiantuntija. Konsultointisivusto. ThoughtCo. Nettiartikkeli. <https://www.thoughtco.com/led-light-emitting-diode-1992081>. Luettu 12.11.2024
- 33 Perry, S. Tekla. 1995. Nettiartikkeli. Päätoimittaja. <https://spectrum.ieee.org/yellow-led-inventor>. Luettu 30.9.2024

- 34 Kitada, Chiaki. 2001. <https://www.japaninc.com/article.php?articleID=53>. Luettu 11.11.2024
- 35 "Why it was almost impossible to make the blue LED". 8.2.2024. <https://www.youtube.com/watch?v=AF8d72mA41M&t=1622s>. Katsottu 5.10.2024
- 36 Juqing, Gu; Zhen, Li & Qianqian, Li. 2023. Nettikirja: Coordination Chemistry Reviews. <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/electroluminescence>. Luettu 3.12.2024
- 37 Moretti, C & Koncar, V. 2016. Nettikirja. <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/electroluminescence>. Luettu 3.12.2024
- 38 Atiqah, A & Asrofi M. 2022. Tieteellinen artikkeli. <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/thin-film-transistor>. Luettu 16.11.2024
- 39 "Organic Light-Emitting Diode". 2024. Teknologyritys. Futaba. Nettiartikkeli. <https://www.futaba.co.jp/en/product/oled/about>. Luettu 1.12.2024
- 40 Clancy, Matt. 2022. Teknologyritys. Korvus Technology. Nettiartikkeli. <https://korvustech.com/thin-film-transistor/>. Luettu 3.12.2024
- 41 Madhu, Charu. 2014. Tiedeartikkeli. https://www.researchgate.net/publication/263002898_Performance_Evaluation_of_Thin_Film_Transistors_History_Technology_Development_and_Comparison_A_Review#pf2. Luettu 9.12.2024
- 42 IEEE. 2012. Nettiaineisto. <https://ieeexplore.ieee.org/document/6487587>. Luettu: 19.9.2024

- 43 "LCD Backlighting: History, Applications and Types". 2024. Näyttöteknologiayritys. Cevians. Nettiartikkeli. <https://www.cevians.com/lcd-backlighting-history-applications-and-types/>. Luettu 15.11.2024
- 44 Rouse, Margaret. Päivitetty 2017. Teknologia-asiantuntija. Techopedia. <https://www.techopedia.com/definition/3562/backlight>. Luettu 7.11.2024
- 45 "How does the LCD work?". 2024. Näyttövalmistaja: Tailorpixels. Nettiartikkeli. https://tailorpixels.com/how-does-the-lcd-work/#Working_Process_of_the_LCD. Luettu 10.11.2024
- 46 Dunmur, David & Walton, Harry G. Päivitetty 2024. Tiedeartikkeli. <https://www.britannica.com/technology/liquid-crystal-display/Super-twisted-nematic-displays>. Luettu 13.11.2024
- 47 Mahan, Gerald D & Widom, Michael. Päivitetty 2024. Tiedeartikkeli. <https://www.britannica.com/science/liquid-crystal>. Luettu: 14.10.2024
- 48 Babcock, Adam. 2021. Rtings. Nettiartikkeli. <https://www.rtings.com/monitor/learn/ips-vs-va-vs-tn>. Päivitetty: 27.9.2021. Luettu: 2.10.2024
- 49 Dunmur, David & Walton, Harry G. Päivitetty 2024. Tiedeartikkeli. <https://www.britannica.com/technology/liquid-crystal-display>. Luettu 14.11.2024
- 50 "TN vs IPS – What's the difference?". 2024. Nettiartikkeli. <https://newhavendisplay.com/blog/tn-vs-ips-whats-the-difference/>. Luettu 2.10.2024

- 51 Babcock, Adam. 2021. Rtings. Näyttötekniologia-asiantuntijayritys. Nettiartikkeli. <https://www.rtings.com/monitor/learn/ips-vs-va-vs-tn>. Luettu 13.11.2024
- 52 Hong, Hyunki & Shin, Hyonho. 2008. Opinnäytetyö. Seoul National University of Science and Technology / Baekseok University. https://www.researchgate.net/figure/Schematic-diagrams-of-LCD-modes-and-cause-of-viewing-angle-dependence_fig2_3453822. Luettu 18.11.2024
- 53 Jourdenais, Pierre-Olivier. 2025. Tekniologiayritys: Rtings. Nettiartikkeli. <https://www.rtings.com/tv/tests/picture-quality/local-dimming>. Luettu 20.1.2025
- 54 Chen, Zhong; Chin-Wei, Sher; Chun-Fu, Lee; Guo, Weijie; Hao-Chung, Kuo; Huang, Chen; Liang, Shijie; Lu, Yijun; Wu, Tingzhu & Yue, Lin. 2018. "Mini-LED and Micro-LED: Promising Candidates for the Next Generation Display Technology" Applied Sciences 8, no. 9: 1557. <https://doi.org/10.3390/app8091557>. Luettu 19.12.2024.
- 55 Reva, Paolo. 2017. <https://monitornerds.com/hdr-monitors-gaming/>. Luettu 19.12.2024
- 56 "QLED". PCMAG. <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/qled>. Luettu 7.12.2024
- 57 Shafer, Rob. 2024. Näyttötekniologia-asiantuntija. Nettiartikkeli. <https://www.displayninja.com/what-is-a-quantum-dot-display/>. Luettu 11.12.2024
- 58 "[Learn Display] 89. Quantum Dot". 2023. Samsung tietokirjasto. <https://global.samsungdisplay.com/31138>. Luettu 15.12.2024

- 59 Harikrishna-Mohan, Sid. 2020. Display Daily. Nettiartikkeli. <https://displaydaily.com/qd-materials-are-set-for-high-growth-here-s-why/>. Luettu 17.12.2024
- 60 Materials Science and Engineering. 2021. <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/quantum-dot>. Luettu 11.12.2024
- 61 Hsu, Fan-Chung; Qi, Jun; Yin, Victor H & You, Chenhua. 2012. <https://patents.google.com/patent/US20160070137A1/en>. Luettu 18.12.2024
- 62 Palomaki, Peter. 2024. Näyttötekniologia-asiantuntija. Nettiartikkeli. <https://palomakiconsulting.com/quantum-dots-color-filters/>. Luettu 14.12.2024
- 63 Jalalah, Mohammed; Ko, Yun-Hyuk; Lee, Seung-Jae & Park, Jea-Gun. 2018. Tieteellinen raportti. Nettiartikkeli. <https://www.nature.com/articles/s41598-018-30742-w>. Luettu 16.12.2024
- 64 Bräse, Stefan; Busch, Jasmine M; Gan, Xuemin; Hong, Gloria; Leonhardt, Celine; Seibert, Jasmin & Zhang, Zhen. 2021. Opinnäytetyö. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/adma.202005630>. Luettu 28.11.2024
- 65 "What is the difference between LCD, OLED and AMOLED screens?". 2021. Sähköinsinööri. Tech Society. Nettiartikkeli. <https://tech-society.com/what-is-the-difference-between-lcd-oled-and-amoled-screens-and-what-is-the-best/>. Luettu 1.12.2024
- 66 "JOLED". OLED-info. Nettiartikkeli. <https://www.oled-info.com/joled>. Luettu 1.12.2024

- 67 Woodford, Chris. 2022. Tiedekirjailija. Nettiartikkeli. <https://www.explainthatstuff.com/how-oleds-and-leps-work.html>. Luettu 8.12.2024
- 68 Moretti, C & Koncar, V. 2016. Nettikirja. <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/electroluminescence>. Luettu 3.12.2024
- 69 Freudenrich, Craig. 2024. Nettiartikkeli. <https://electronics.howstufworks.com/oled2.htm>. Luettu 2.12.2024
- 70 "What is the Difference Between PMOLED and AMOLED?". 2023. Näyttöteknologiayritys. Hongguang Display. Nettiartikkeli. <https://www.hongguangdisplay.com/blog/what-is-the-difference-between-pmoled-and-amoled/>. Luettu 4.12.2024
- 71 "OLED- Organic Light Emitting Diode". 2024. Näyttöteknologiayritys. DLC Display Co. <https://www.dlcdisplay.com/Aboutus/5.html>. Luettu 5.12.2024
- 72 "OLED technology: introduction and basics". 2024. Nettiartikkeli. <https://www.oled-info.com/oled-technology>. Luettu 2.12.2024
- 73 Babcock, Adam. 2024. Rtings. Nettiartikkeli. <https://www.rtings.com/tv/learn/qd-oled-vs-woled>. Luettu 2.12.2024
- 74 Li, Weizhi; Wang, Chong & Wang, Jun. Tutkimusartikkeli. <https://dl.acm.org/doi/epdf/10.1155/2014/289752>. Luettu 5.12.2024
- 75 Eisengruber, Matthew. 2023. IT-arkkitehti. Nettiartikkeli. <https://www.avforums.com/articles/what-is-micro-lens-array-mla-and-meta-technology.20854/>. Luettu 7.12.2024
- 76 Babcock, Adam. 2024. Näyttöteknologia-asiantuntijayritys. Nettiartikkeli. <https://www.rtings.com/tv/tests/longevity-burn-in-test-updates-and-results>. Luettu 6.12.2024

- 77 Shafer, Rob. 2024. Näyttötekniologia-asiantuntija. DisplayNinja. Nettiartikkeli. <https://www.displayninja.com/oled-vs-qd-oled/>.
Luettu 1.12.2024
- 78 Pass, Imogen. Tarkastanut: O’Kane, Mary. 2024. Nettiartikkeli. <https://www.ossila.com/pages/oled-burn-in>. Luettu 5.12.2024
- 79 Shaik I. Asif. Päivitetty 2023. Kuluttajatekniologia journalisti. SAM-MOBILE. Nettiartikkeli. <https://www.sammobile.com/news/qd-oled-tv-features-explained/>. Luettu 1.12.2024
- 80 Cabading, Zach. 2024. Tekniologia-yritys: HP. Nettiartikkeli. <https://www.hp.com/us-en/shop/tech-takes/differences-between-led-display-and-lcd-monitor>. Luettu 25.11.2024
- 81 ”LCD VS LED: What’s the Difference Between the Displays?”. 2024. Näyttöpaneelivalmistaja. Linsn LED. Nettiartikkeli. <https://www.linsnled.com/difference-between-lcd-and-led.html>. Luettu 25.11.2024
- 82 Chiradeep, BasuMallick. 2023. Tekninen kirjailija. Nettiartikkeli. <https://www.spiceworks.com/tech/hardware/articles/lcd-vs-led/>.
25.11.2024
- 83 Shafer, Rob. 2024. Näyttötekniologia-asiantuntija. Nettiartikkeli. <https://www.displayninja.com/oled-vs-qd-oled/>. 27.11.2024
- 84 Baker, Simon. 2024. Päätoimittaja. TFT Central. Nettiartikkeli. <https://tftcentral.co.uk/articles/exploring-oled-brightness-improvements-woled-vs-qd-oled-and-the-need-for-new-metrics-and-specs>.
Luettu 28.11.2024

- 85 Babcock, Adam. 2024. Vanhempi päätoimittaja. Rtings. Nettiartikkeli. <https://www.rtings.com/tv/learn/qd-oled-vs-woled>. Luettu 28.11.2024
- 86 Williams, Nicola. 2024. Ammattimainen tiedekirjailija. <https://www.ossila.com/pages/oled-lifetime>. Luettu. 1.12.2024
- 87 Bizzaco, Michael & Cohen, Simon. 2024. Digitaltrends. Nettiartikkeli. <https://www.digitaltrends.com/home-theater/qled-vs-oled-tv/#dt-heading-what-is-a-qled-tv>. Luettu 15.10.2024
- 88 Gariffo, Michael. Teknologiakirjailija. 2024. ZDNET. Nettiartikkeli. <https://www.zdnet.com/home-and-office/home-entertainment/neo-qled-vs-oled-which-technology-is-right-for-you/> . Luettu 15.10.2024
- 89 Greenwald, Will. 2024. Johtava analyytikko. PCMAG. Nettiartikkeli. <https://www.pcmag.com/comparisons/oled-vs-qled-whats-the-difference#oled-vs-qled-which-should-you-buy>. Luettu 15.10.2024
- 90 "OLED Encapsulation". OLED-info. Nettiartikkeli. <https://www.oled-info.com/oled-encapsulation>. Luettu 29.1.2025
- 91 Chen, Zhong; Chin-Wei, Sher; Chun-Fu, Lee; Guo, Weijie; Hao-Chung, Kuo; Huang Chen, Sung-Wen; Liang, Shijie; Lu, Yijun; Wu, Tingzhu & Yue, Lin. 2018. "Mini-LED and Micro-LED: Promising Candidates for the Next Generation Display Technology" *Applied Sciences* 8, no. 9: 1557. <https://doi.org/10.3390/app8091557>. Luettu 31.1.2025
- 92 "MicroLED vs OLED". Päivitetty 15.12.2024. MICROLED-info. Asiantuntijasivusto. Nettiartikkeli. <https://www.microled-info.com/micro-led-vs-oled>. Luettu 3.2.2025

- 93 Knot, Rosalie. 2023. Teknologiayritys. Delmic. Nettiartikkeli. <https://blog.delmic.com/microled-revolutionary-technology#References>. Luettu 25.2.2025
- 94 Chen, Zhen; Danesh, Cameron & Yan, Shuke. 2021. Tieteellinen artikkeli. <https://www.deepdyve.com/lp/iop/microled-technologies-and-applications-characteristics-fabrication-wYfvV3kEDk?key=iop-publishing>. Luettu 25.2.2025
- 95 "Driver ICs". Symmetry Electronics. Nettiartikkeli. <https://www.symmetryelectronics.com/products/semiconductors/driver-ics/#>. Luettu 25.2.2025
- 96 "Microdisplays: Mini-LED, Micro-OLED, and Micro-LED" – Tieteellinen kuvio. ResearchGate. Nettilähde: https://www.researchgate.net/figure/Schematic-representations-and-the-corresponding-structures-of-a-mini-LED-b-micro-OLED_fig2_370696955. Luettu 30.1.2025
- 97 "What is MicroLED?". Päivitetty 02.11.2024. MICROLED-info. Asiantuntijasivusto. Nettiartikkeli. <https://www.microled-info.com/introduction>. Luettu 3.2.2025
- 98 "A Future-Proof Solution for MicroLED Production". Teknologiayritys. Coherent corp. Nettiartikkeli. <https://www.coherent.com/news/blog/microled-production>. Luettu 3.2.2025
- 99 Biao, Yang; Furong, Chen; Jing, Bian; Jinlong, Hu; Ningning, Sun; Hong, Ling; Haiyang, Yu; Kaixin, Wang; Mengxin, Gai & Yuhang Ma. 2022. Tieteellinen artikkeli. <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2631-7990/ac92ee/meta>. Luettu 25.2.2025

- 100 Larsen, Rasmus. 24.8.2023. Perustaja ja päätoimittaja. FlatpanelsHD. Nettiartikkeli. <https://www.flatpanelshd.com/news.php?subaction=showfull&id=1692870528>. Luettu 5.3.2025
- 101 Michiganin yliopisto. 9.12.2024. Tieteellisiin tutkimuksiin perustuva nettiartikkeli. <https://phys.org/news/2024-12-material-faster-phosphorescence-display-tech.html>. Luettu 5.3.2025
- 102 Force, Sam. Wood, Amelia. Graafinen suunnittelija, sovellustieteilijä. Laite,- komponentti,- ja materiaalivalmistaja. Nettiartikkeli. <https://www.ossila.com/pages/what-are-pholeds>. Luettu 5.3.2025
- 103 Perry, Tekla S. 19.12.2023. Vanhempi toimittaja. IEEE Spectrum. Nettiartikkeli. <https://spectrum.ieee.org/blue-pholed>. Luettu 5.3.2025
- 104 Jaewook, Kim; Joonghyuk, Kim; Yongjun, Kim; Youngmok, Son; Youngsik, Shin; Hye, Jin Bae; Ji Whan, Kim; Sungho, Nam; Yongsik, Jung; Hyeonsu, Kim; Sungwoo, Kang; Yoonsoo, Jung; Kyunghoon, Lee; Hyeonho, Choi & Woo, Youn Kim. 18.11.2023. Nettiartikkeli. https://www.nature.com/articles/s41467-023-43408-7?utm_source=. Luettu 5.3.2025
- 105 Takeshi, Ishida; Yohei, Nakanishi; Noboru, Iwata & Makoto, Izum. 17.5.2023. Sharp korporaation johtaja. SID (Society for Information Display). Tieteellinen nettiartikkeli. <https://sid.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/msid.1395>. Luettu 10.3.2025
- 106 Schuett, Lily-Rose. 17.6.2024. Toimittaja. IDTechEx. Nettiartikkeli. <https://www.idtechex.com/en/research-article/el-gd-displays-idtechex-explores-quantum-dots/31247>. Luettu 10.3.2025

- 107 Denison, Caleb. 13.1.2024. Digital Trends. Video. <https://www.youtube.com/watch?v=eONWY3kbZc0&t=295s>. Katso-
sottu 11.3.2025
- 108 Morrison, Geoffrey. 9.11.2024. Teknologiakirjailija. CNET. Nettiartik-
keli. [https://www.cnet.com/tech/home-entertainment/nanoled-in-
ches-closer-to-being-next-big-display-tech/](https://www.cnet.com/tech/home-entertainment/nanoled-in-ches-closer-to-being-next-big-display-tech/). Luettu 11.3.2025
- 109 Palomaki, Peter. 2024. Näyttötekniologia-asiantuntija. Nettiartikkeli.
<https://palomakiconsulting.com/quantum-dots-color-filters/>.
Luettu 13.3.2024
- 110 Ren, Xinxin; Xiang, Zhang; Hongxing, Xie; Junhu, Cai; Chenhui,
Wang; Enguo, Chen; Sheng, Xu; Yun, Ye; Jie, Sun; Qun, Yan & Tai-
liang, Guo. 2022. "Perovskite Quantum Dots for Emerging Displays:
Recent Progress and Perspectives" *Nanomaterials* 12, no. 13: 2243.
<https://doi.org/10.3390/nano12132243>. Luettu 13.3.2025
- 111 Yonghong, Lin; Wenjun, Huang; Mengyuan, Zhanghu & Zhaojun,
Liu. 2023. "Ultra-thick inkjet-printed quantum dots layer for full-color
micro-LED displays," *Opt. Express* 31, 31818–31824. [https://opg.op-
tica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-31-20-31818&id=537341](https://opg.optica.org/oe/fulltext.cfm?uri=oe-31-20-31818&id=537341). Luettu
13.3.2025
- 112 Ona, Segura Lecina; Mark, A. Newton, Philippe, B. Green; Petru, P.
Albertini; Jari, Leemans; Kenneth, P. Marshall; Dragos, Stoian;
Anna, Loiodice & Raffaella, Buonsanti.
<https://pubs.acs.org/doi/10.1021/jacsau.3c00457>. Luettu 13.3.2025
- 113 "Are Cadmium-Free Quantum Dots RoHS Conform?". [https://avan-
tama.com/cadmium-free-quantum-dots-rohs-conform](https://avantama.com/cadmium-free-quantum-dots-rohs-conform). Luettu
13.3.2025

Lyhenteiden lähteet:

- 1 Alipikseli: "Subpixel". <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/subpixel>. Luettu 11.10.2024
- 2 ALLM: "Auto Low Latency Mode (ALLM)". <https://www.hdmi.org/spec21sub/autolowlatencymode>. Luettu 9.10.2024
- 3 APL: Baker, Simon. 2022. Nettiartikkeli. <https://tftcentral.co.uk/articles/oled-dimming-confusion-apl-abl-asbl-tpc-and-gsr-explained>. Luettu 1.12.2024
- 4 BBC: <https://en.wikipedia.org/wiki/BBC>. Luettu 11.9.2024
- 5 Eksitoni: European Union terminology. 1.9.2014. <https://iate.europa.eu/entry/result/1553479/all>. Luettu 6.3.2025
- 6 Elektroluminesenssi: Juqing, Gu. Zhen, Li. Qianqian, Li. 2023. Nettikirja: Coordination Chemistry Reviews. <https://www.sciencedirect.com/topics/chemistry/electroluminescence>. Luettu 3.12.2024
- 7 EOTF: Babcock, Adam. 2023. Rtings. Näyttöasiantuntijayritys. <https://www.rtings.com/tv/tests/picture-quality/pq-eotf>. Luettu 10.11.2024
- 8 Fluoresenssi: "Fluorescence". Päivitetty 31.1.2025. <https://www.britannica.com/science/fluorescence>. Luettu 4.3.2025
- 9 FOV: "Field of view". https://en.wikipedia.org/wiki/Field_of_view. Luettu 10.11.2024

- 10 Fosforesenssi: Encyclopaedia Britannica:n toimittajat. "phosphorescence". Encyclopedia Britannica, 10.12.2010. <https://www.britanica.com/science/phosphorescence>. Luettu 2.3.2025
- 11 HDMI: PCMag. Nettiartikkeli. <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/hdmi>. Luettu 11.10.2024
- 12 HDR: Di Giovanni, Nicholas. 2022. Teknologiyrittys: RTINGS. Nettiartikkeli. <https://www.rtings.com/tv/learn/hdr-vs-sdr>. Päivitetty 06.10.2022. Luettu: 25.06.2024.
- 13 HLG: "Hybrid Log-Gamma". https://en.wikipedia.org/wiki/Hybrid_log%E2%80%93gamma. Luettu 8.1.2025
- 14 ITU: <https://www.itu.int/en/about/Pages/default.aspx>. Luettu 3.1.2024
- 15 IQE: L. Sims; H.-J. Egelhaaf; J.A. Hauch; F.R. Kogler & R. Steim. 2012. Comprehensive Renewable Energy (Second Edition). <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/internal-quantum-efficiency>. Luettu 1.3.2025
- 16 Kapselointi: Shadi, Asgari; Ali, Pourjavadi; Tine, Rask Licht; Anja, Boisen & Fatemeh, Ajalloueian. 21.7.2020. Tieteellinen artikkeli. <https://www.sciencedirect.com/topics/biochemistry-genetics-and-molecular-biology/nanoencapsulation>. Luettu 10.12.2024
- 17 Kandela: Valaistussanasto. 2024. Teknoware. Valaistusratkaisuyrittys. Nettiartikkeli. <https://www.teknoware.com/fi/valaistussanasto/>. Luettu 23.11.2024

- 18 Kondensaattori: <https://peda.net/p/janne.ylinen/opetus/fysiikka/fys-3-s%C3%A4hk%C3%B6/muuta/kondensaattori>. Luettu 9.9.2024
- 19 Kuvataajuus: "What is a frame rate?". Teknologiyritys: Adobe. Net-tiartikkeli. <https://www.adobe.com/creativecloud/video/discover/frame-rate.html>. Luettu: 25.06.2024.
- 20 Luminesenssi: Ritesh, L. Kohale; Vijay, B. Pawade; S.J. Dhoble & Abdul Hakeem, Deshmukh. 2021. <https://www.sciencedirect.com/topics/materials-science/luminescence>. Luettu 13.11.2024
- 21 NHK: "About NHK WORLD-JAPAN". <https://www3.nhk.or.jp/nhkworld/en/about/>. Luettu 15.10.2024
- 22 Nit: "Nit". Termiluettelo. <https://www.pcmag.com/encyclopedia/term/nit>. Luettu 10.8.2024
- 23 Pikseli: "pixel". <https://dictionary.cambridge.org/dictionary/english/pixel>. Luettu 10.8.2024
- 24 Rekombinaatio: International Electrotechnical Commission. <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?openform&ievref=113-06-43>. Luettu 5.3.2025
- 25 SDR: Di Giovanni, Nicholas. 2022. Teknologiyritys: RTINGS. Net-tiartikkeli. <https://www.rtings.com/tv/learn/hdr-vs-sdr>. Päivitetty 06.10.2022. Luettu: 25.06.2024.
- 26 SMPTE: "Society of motion picture and television engineers". https://en.wikipedia.org/wiki/Society_of_Motion_Picture_and_Television_Engineers. Luettu 3.1.2025

- 27 Suspensio: "Suspension (chemistry). Wärtsilä. Encyclopedia of Marine and Energy Technology. <https://www.wartsila.com/encyclopedia/term/suspension-chemistry->. Luettu 12.11.2024
- 28 Syöttöviive: Shafer, Rob. 2024. DisplayNinja. Nettiartikkeli. <https://www.displayninja.com/what-is-input-lag/>. Luettu 21.12.2024
- 29 Sävykartoitus: Withers, Steve. 2024. Nettiartikkeli. <https://www.what-hifi.com/features/what-is-tone-mapping-how-the-hdr-tv-feature-works-and-why-its-important>. Luettu 5.10.2024
- 30 Vasteaika: "What is response time for monitors?". 2021. Teknologiayritys. ViewSonic. Nettiartikkeli. <https://www.viewsonic.com/library/tech/what-is-response-time-for-monitors/>. Luettu: 15.9.2024
- 31 VESA: "About VESA". <https://vesa.org/about-vesa/>. Luettu 10.11.2024
- 32 Virkistystaajuus: "What Is Refresh Rate and Why Is It Important?". Teknologiayritys: Intel. <https://www.intel.com/content/www/us/en/gaming/resources/highest-refresh-rate-gaming.html>. Luettu 21.12.2024
- 33 VRR: "What is Variable Refresh Rate (VRR)?". 2024. Sony. Nettiartikkeli. <https://www.sony.com/electronics/support/articles/00299203>. Luettu: 11.06.2024.
- 34 VSync: "What is VSync?". 2024. Teknologiayritys. Lenovo. Nettiartikkeli. <https://www.lenovo.com/us/en/glossary/vsync/>. Luettu 11.11.2024

- 35 Värialue: Di Giovanni, Nicholas. 2021. Rtings. Nettiartikkeli. <https://www.rtings.com/tv/tests/picture-quality/wide-color-gamut-rec-709-dci-p3-rec-2020>. Luettu 16.9.2024
- 36 Väriavaruus: De Haas, Maarten. 4.10.2018. Nettiartikkeli. <https://www.wigglepixel.nl/en/blog/what-are-color-spaces-color-profiles-and-gamma-correction>. Luettu 4.10.2024
- 37 Värimäärä: Babcock, Adam. 2022. Rtings. Nettiartikkeli. https://www.rtings.com/tv/tests/picture-quality/color-volume-hdr-dci-p3-and-rec-2020#test_927. Luettu 15.9.2024
- 38 WCG: "Wide-gamut RGB color space". https://en.wikipedia.org/wiki/Wide-gamut_RGB_color_space. Luettu 10.2.2025

