

Juho Pyykkönen

NÄYTTÖTYYPIT TEHOKRIITTISSÄ SOVELLUKSESSA

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta

Kandidaatintyö

Joulukuu 2019

TIIVISTELMÄ

Juho Pyykkönen: Näyttöttyypit tehokriittisessä sovelluksessa
Kandidaatintyö
Tampereen yliopisto
Tieto- ja sähkötekniikan TkK-tutkinto-ohjelma, Sähkötekniikka
Joulukuu 2019

Työssä perehdytään kolmen yleisesti käytetyn näyttötyyppin soveltuvuuteen rajoitetun tehonkulutuksen sovellukseen. Käsiteltävät näyttöttyypit ovat LCD, OLED ja EPD. Soveltuva käyttökohte voisi olla esimerkiksi puhelin, kamera tai anturin informaationäyttö.

Alussa työssä käsitellään lyhyesti näyttötekniikoiden historiaa. Seuraavana perehdytään käsiteltävien näyttötekniikoiden olennaisiin toimintaperiaatteisiin ja perehdytään osa-alueisiin, joissa tehonkulutus muodostuu ja kuinka sitä pystytään kontrolloimaan. Työn lopussa teoriaa verrataan käytännön tilanteeseen rakentamalla testikytkentä ja tekemällä havaintoja näyttöttyyppien tehonkulutuksesta ja luettavuudesta.

Pääpiirteittäin LCD-näyttö tarjoaa pitkän kehityksen tuloksena teknisesti korkeat ominaisuudet (esimerkiksi resoluutio) edulliseen hintaan. OLED-näyttö tarjoaa parhaan kuvanlaadun ja sen tehonkulutukseen voidaan vaikuttaa kuvan sisällöllä. EPD-näyttö soveltuu käyttökohteisiin, joissa hyvä luettavuus erittäin kirkkaassa valaistuksessa ja erittäin pieni virrankulutus ovat tärkeitä.

Vaikka jokaisella näyttötekniikalla on omia vahvuuksia, ei oikean näyttöttyypin valitseminen jokaiseen käyttökohteeseen ole niin suoraviivaista. Lopulliseen valintaan vaikuttaa kuvan laadun ja tehonkulutuksen lisäksi asiat kuten hinta ja saatavuus.

Avainsanat: LCD, OLED, EPD, Tehonkulutus

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck -ohjelmalla.

ALKUSANAT

Idea työn aiheeseen oli pyörinyt minulla päässä jo hieman pidemmän aikaa. Erilaisen markkinointikanavien vaikutuksesta koin, että eri näyttötekniikoiden markkinoinnissa käytetään sekavia ja osittain puutteellisia termistöjä. Mikä on LED TV? Entä TFT- tai AMOLED-näyttö? Mukaan kun vielä lisätään HDR, 4K sekä valmistajien paneelia ylistävät adjektiivit, niin soppa on valmis. Halusin siis tutustua näyttöjen pohjimmaisiiin toimintaperiaatteisiin ja niiden eroihin.

Koska lähtökohta oli erittäin laaja, täytyi sitä rajata jotenkin. Päädyin lopulta ottamaan näkökannaksi tehonkulutuksen ja pienen kokoluokan näytöt. Rajaus mahdollisti työhön sisällytettävän kokeellisen osuuden, joka pystyttiin suorittamaan ilman erikoismittalaitteita.

Vaikka aihealuetta oli jo rajattu, osoittautui se erittäin laajaksi työtä tehdessä. Erityisesti teoriaosuudessa aiheutti päänvaivaa päättää missä menee sopiva abstraktiotaso työn laajuuteen nähden. Muuten mitään isompia ongelmia ei kohdattu.

Haluan kiittää työn ohjaajaa Erja Sipilää, joka mahdollisti komponenttitilaukset kokeelliseen osuuteen sekä antoi hyvää ohjeistusta työn alusta loppuun saattamiseen asti.

Tampereella, 22. joulukuuta 2019

Juho Pyykkönen

SISÄLLYSLUETTELO

1	Johdanto	1
2	Näyttöjen historia	2
3	Näytön toimintaperiaate	4
3.1	LCD-näyttö	4
3.2	OLED-näyttö	6
3.3	Passiivi- ja aktiivimatriisi	7
3.4	TFT	8
3.5	Elektroforeesinäyttö	9
4	Näytön tehonkulutuksen muodostuminen ja kontrollointi	11
4.1	LCD:n tehonkulutus	11
4.2	OLED:n tehonkulutus	13
4.3	Elektroforeesinäytön tehonkulutus	15
4.4	Käyttökohteiden vertailu yleisesti	16
5	Näyttötyyppien vertailu käytännössä	18
5.1	Testikokoonpano	18
5.2	Testikokoonpanon rakennus	19
5.3	Tehonkulutuksen mittaukset ja havainnot	22
5.4	Luettavuus eri valaistusolosuhteissa	24
6	Yhteenveto	26
	Lähteet	28

LYHENTEET JA MERKINNÄT

AM LCD	Aktiivimatriisiohjattu nestekidenäyttö (engl. Active Matrix Liquid Crystal Display)
AMOLED	Aktiivimatriisiohjattu orgaaninen hohtodiodinäyttö (engl. Active Matrix Organic Light-emitting Diode)
CRT	Katodisädeputki (engl. Cathode Ray Tube)
DC	Tasavirta (engl. Direct Current)
EIL	Elektronien injektointitaso (engl. Electron Injection Layer)
EML	Emissiotaso (engl. Emission Layer)
EPD	Elektroforeesinäyttö (engl. Electrophoretic Display)
ETL	Elektronien siirtotaso (engl. Electron Transport Layer)
FPD	Litteä näyttö (engl. Flat Panel Display)
HIL	Aukkojen injektointitaso (engl. Hole Injection Layer)
HTL	Aukkojen siirtotaso (engl. Hole Transport Layer)
IOT	Esineiden internet (engl. Internet-Of-Things)
LC	Nestekide (engl. Liquid Crystal)
LCD	Nestekidenäyttö (engl. Liquid Crystal Display)
LED	Hohtodiodi (engl. Light-emitting Diode)
MIT	Massachusetts Institute of Technology
OLED	Orgaaninen hohtodiodinäyttö (engl. Organic Light-emitting Diode)
PDP	Plasmanäyttö (engl. Plasma Display Panel)
PM LCD	Passiivimatriisiohjattu nestekidenäyttö (engl. Passive Matrix Liquid Crystal Display)
PMOLED	Passiivimatriisiohjattu orgaaninen hohtodiodinäyttö (engl. Passive Matrix Organic Light-emitting Diode)
RGB	Punainen, vihreä, sininen (engl. Red, Green, Blue)
RGBW	Punainen, vihreä, sininen, valkoinen (engl. Red, Green, Blue, White)
SPI	SPI-sarjaliikenneprotokolla (engl. Serial Peripheral Interface)
TFT	Ohutkalvotransistori (engl. Thin Film Transistor)
TN	Kiertonemaattinen (engl. Twisted Nematic)

1 JOHDANTO

Näyttötekniikat ovat oleellinen osa nykypäivän elektronisia laitteita. Näyttö voi olla laitteessa viestimässä käyttäjälle järjestelmän tilaa, olla osana järjestelmän ohjauksessa tai olla laitteen keskeisin osa, jolloin muut toiminnallisuudet pohjautuvat olemassa olevan näytön ympärille.

Tässä opinnäytetyössä tarkastellaan erilaisia litteitä näyttötekniikoita (FPD, engl. Flat Panel Display) ja niiden soveltuvuutta käyttökohteisiin, joissa vaaditaan rajoitettua tehonkulutusta. Tällaisia kohteita voisivat olla esimerkiksi mobiilit akulla toimivat laitteet, kuten puhelimet, kellot ja kamerat tai itsenäiset esineiden internet -anturit (IOT, engl. Internet Of Things), joissa on pieni näyttö esimerkiksi statistiikan esittämistä varten. Käyttökohde voisi olla myös esimerkiksi elektroninen hintanäyttö, joka saa virtansa akusta tai paristosta. Kaikissa käyttökohteissa yhteistä on näytön pieni koko ja jokseenkin rajoitetut tehonkulutusvaatimukset. Kuitenkin käyttökohteesta riippuen näytön muilla ominaisuuksilla, kuten värintoisto, luettavuus, paksuus, vasteaika ja hinta voi olla suuri vaikutus näyttötyypin valinnassa. Tässä työssä keskitytään näyttöihin, joissa on pikselirakenne eli näyttöjen kuva tuotetaan pikselimatriisilla, joka mahdollistaa tekstin lisäksi myös grafiikan esittämisen.

Työssä käsitellään kolmen yleisesti käytetyn näyttötyypin nestekidenäytön (LCD, engl. Liquid Crystal Display), orgaanisen hohtodiodinäytön (OLED, engl. Organic Light Emitting Diode) ja elektroforeesinäytön (EPD, engl. Electrophoretic Display) keskeiset toimintaperiaatteet ja perehdytään niiden osa-alueisiin, joissa tehonkulutus muodostuu. Lisäksi tarkastellaan, kuinka kyseisiä alueita pystytään kehittämään tehonkulutuksen pienentämiseksi.

Työn alussa käydään lyhyesti läpi näyttöjen historia. Kolmannessa kappaleessa keskitytään käsiteltävien näyttötyyppien toimintaperiaatteisiin yleisellä tasolla. Seuraavassa kappaleessa tarkastellaan ominaisuuksia, jotka vaikuttavat näyttötyyppien tehon kulutukseen, käydään läpi keinoja, joilla tehonkulutusta ja näyttöjen ominaisuuksia voidaan parantaa sekä käsitellään niille soveltuvia käyttökohteita laajassa mittakaavassa. Työn lopussa on kokeellinen osuus, jossa rakennetaan testikokoonpano kolmen näytön ja mikrokontrollerien avulla ja vertaillaan näyttötyyppejä käytännössä eri osa-alueilla. Yhteenvedossa palataan alkuperäiseen ydinkysymykseen ja pohditaan kuinka eri näyttötyyppien ominaisuudet soveltuvat teorian ja kokeellisen osuuden perusteella tässä työssä rajattuun tuotekategoriaan.

2 NÄYTTÖJEN HISTORIA

Katodisädeputki (CRT, engl. Cathode Ray Tube) kehitettiin noin 100 vuotta sitten ja oli käytössä päätoimisena näyttötekniikkana aina 2000-luvun alkuun asti. Pitkän kehityksen tuloksena CRT:n valmistuskustannukset olivat matalat ja sitä käytettiin käytännössä kaikissa näyttöä käyttävissä laitteissa. Katodisädeputkella saavutettiin hyvälaatuinen kuva, mutta sen fyysinen koko ja tehonkulutus olivat suuria. [1, s.1]

Katodisädeputken suuren koon vuoksi korvaavia ohuita näyttötekniikoita yritettiin kehittää kuten ohut-CRT (engl. flat CRT) ja Plasma (PDP, engl. Plasma Display Panel). Viimein 1990-luvulla Plasma- ja LCD (engl. Liquid Crystal Display)-tekniikoilla saatiin luotua ohuita näyttöjä, joista oli haastajaksi CRT:lle. [1, s.1] Hieman myöhemmin 2000-luvun alussa orgaaninen näyttötekniikka (OLED, engl. Organic Light Emitting Diode) saavutti myös kaupalliseen valmistukseen soveltuvan tason [2, s.22].

Nestekiteet löysi alun perin Itävaltalainen kasvitieteilijä Friedfich Reinitzer vuonna 1888. Kesti kuitenkin 1960-luvulle asti ennen kuin nestekidettä pystyttiin käyttämään näyttötekniikassa, jolloin kehitettiin ensimmäinen LCD-näyttö. Ensimmäinen LCD-näyttö perustui valon siroamiseen näytön pinnasta. Myöhemmin LCD-näytöissä laajasti käytettävä TN-tekniikka (engl. Twisted Nematic) kehitettiin 1970-luvulla, jolloin myös ensimmäiset LCD-näyttöä käyttävät kuluttajalaitteet saapuivat markkinoille. [1, s.1-2]

LCD:ta ruvettiin käyttämään paljon pienissä kuluttajatuotteissa kuten taskulaskimissa ja kelloissa. Teknisesti näytöt olivat heijastavia, yksivärisiä alfanumeerisia näyttöjä, jotka muodostuivat yksittäin ohjattavista segmenteistä. Tekniikan kehittyessä segmenteistä siirryttiin pikselimatriiseihin, jolloin näytöllä esitettävä informaation määrä kasvoi. Ensimmäinen kaupallinen pikselimatriisilla varustettu taskutelevisio esiteltiin 1983. Näyttö käytti kuitenkin vaikeasti valmistettavia poly-Si-transistoreita pikseleiden ohjaukseen. Samoihin aikoihin kehitetty a-Si-transistori soveltui tehtävään paremmin, josta myöhemmin tuli pääasiallinen tekniikka sitä käyttävän ensimmäisen LCD-näytön julkaisun 1984 jälkeen. [1, s.2-4]

Valoa emittoivia orgaanisia aineita löydettiin ensimmäisen kerran 1953, aluksi kuitenkin tarvittavat jännitteet olivat suuria ja tuotettu valon intensiteetti heikkoa, joten tekniikan soveltuvuus näyttöihin oli lähinnä teoreettista. Kesti vuoteen 1987 asti ennen kuin C. W. Tang ja S. A. VanSlyuke raportoivat valon emittointia kehittämällään laitteistolla, jossa kaksi orgaanista tasoa oli ladottu anodin ja katodin väliin. Vaikka tulokset olivat vielä heikkoja, riitti se herättämään kiinnostusta OLED:n kehittämisen aloittamisesta. [2, s.20]

Alkusysäyksen jälkeen OLED:n kehitys oli varsin nopeaa. Ensimmäinen valkoista valoa emittoiva OLED julkistettiin vuonna 1994 ja korkeaan sisäiseen hyötysuhteeseen yltävä fosforesenssi-OLED vuonna 1998. Ensimmäinen OLED-näyttöä käyttävä kaupallinen tuote oli 1997 julkaistu autoradio. [2, s.23]

2000-luvun alussa aktiivimatriisiohjauksen soveltaminen OLED:iin mahdollisti isommat näytöt. OLED kehittyi myös muilla osa-alueilla, kuten kirkkaus, värintoisto ja rakenteen paksuus. Ensimmäinen OLED televisio julkaistiin 2007 ja samana vuonna OLED paneleita käytettiin jo matkapuhelimien näytöissä. [2, s.25-26]

Elektroforeesinäyttöjen historia alkaa vuodesta 1973, kun tutkijaryhmä julkaisi artikkelin, jossa he olivat kehittäneet uudenlaisen näytön. Näytössä tutkijat olivat asettaneet partikkeleita värjättyyn öljyyn. Sähkökentän suunnasta riippuen partikkelit siirtyivät näytön pintaan tai pohjaan, jolloin pinnan väri oli joko partikkelien värinen tai öljyn värinen. Kehityksessä kohdatut tekniset ongelmat ja samanaikainen suuri panostus LCD:n kehitykseen kuitenkin hiljensivät elektroforeesinäytön kehityksen lähes kokonaan. [3, s.135]

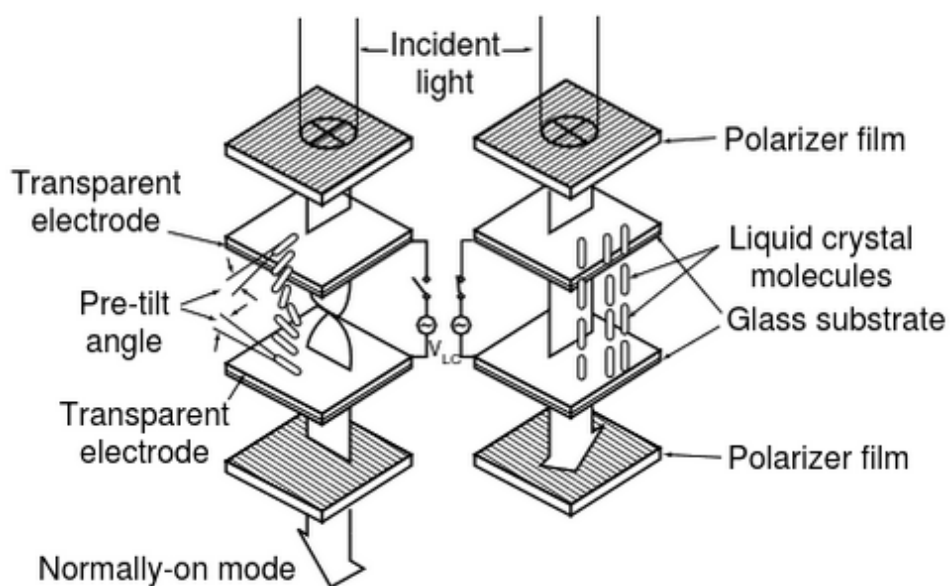
90-luvun lopulla tutkijaryhmän saavutukset Massachusetts Institute of Technology:ssa (MIT) nosti elektroforeesinäytön kehityksen uudestaan pinnalle. Tutkijat olivat kehittäneet tekniikan, jossa partikkelit sijoitettiin mikrokapseleissa olevaan öljyyn. [3, s.135] Vuonna 1997 samasta laitoksesta ponnistanut E Ink Corporation jatkoi tekniikan kehittämistä. Yhtiö esitteli ensimmäisen aktiivimatriisiohjatun elektroforeesinäytön 2001 ja ensimmäinen kaupallinen elektroforeesinäyttöä hyödyntävä laite julkaistiin 2004. [4]

3 NÄYTÖN TOIMINTAPERIAATE

Käytössä olevia FPD-näyttötyyppejä on useita erilaisia. Näyttötyypit voidaan jakaa kahteen luokkaan sen perusteella, ovatko näyttöpaneelin pikselit valoa emittoivia vai ei. Emittoivia näyttötyyppejä ovat muun muassa PDP, LED (Light Emitting Diode) ja OLED, kun taas ei-emittoiva on LCD. Emittoivissa näytöissä jokainen pikseli itse tuottaa valoa, jonka ihmisen silmä voi tulkita informaationa. Ei-emittoivassa näytössä pikseli ei tuota valoa, vaan toimii kytkimenä, joka säätelee sen läpi pääsevän valon määrää. [5, Preface] EPD on myös ei-emittoiva näyttötyyppi, mutta sen toiminta perustuu ympäröivän valon sironnaan näytön pinnasta. [1, s.211]

3.1 LCD-näyttö

LCD on ei-emittoiva näyttötyyppi, joten LCD-paneelin toiminta perustuu paneelin läpi kulkevan valon kontrollointiin. LCD-paneelin rakenne koostuu kahdesta lasi- tai muovikalvosta, joiden pinnoilla on valoa polarisoivat kalvot. Kalvojen väliin on asetettu ohut kerros (noin 2-10 μm) nestekidemolekyylejä (LC, engl. Liquid Crystal). Periaatekuva rakenteesta on esitetty kuvassa 3.1. [1, s.10]



Kuva 3.1. LC-rakenne [1, s.15].

Kuvan LCD:n rakenne on niin sanottu "normally white", eli polarisoivat kalvot ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden. Kalvojen välissä olevien LC-molekyyliden ollessa levossa, ovat molekyylit asettuneet 90 astetta kiertävään spiraaliin. Spiraalirakenne taittaa ensimmäisen kalvon läpi kulkeneen polarisoituneen valon kulmaa, jolloin valo läpäisee seuraavan polarisaatiokalvon. Täten pikseli on "päällä". [1, s.15]

Kun tasojen väliin kytkekään sähkökenttä, aiheuttaa se molekyyliden kääntymisen. Kääntyneet molekyylit eivät enää taita valoa, joten polarisoitunut valo ei läpäise jälkimmäistä polarisaatiokalvoa. Tällöin pikseli on "pois päältä". [1, s.15]

LCD:n rakenne voi olla myös niin sanottu "normally black". Tällöin polarisaatiokalvot on asetettu yhdensuuntaisesti toisiinsa nähden. Tässä rakenteessa sähkökentän kytkeminen, ja sitä seuraava molekyyliden kääntymisen, päästää valon toisen polarisaatiokalvon läpi. [1, s.16]

LC-molekyyliden kapasitanssin takia pitkään jatkuva samansuuntainen jännite saa aikaan tasavirtakomponentin (DC, engl. Direct Current) pikseliin, mikä aiheuttaa pikselin kiinnipalamista [6]. DC-komponentin muodostumisen estämiseksi ohjausjännitteen polariteettia käännetään tietyn väliajoin [1, s.24]. Koska LC-molekyyliden suunta ei riipu sähkökentän polariteetista, vaan sen kulmasta molekyyliin nähden [1, s.7–8], polariteetin vaihtelu on mahdollista.

Värien tuottamiseksi LCD-näytön pikselit on jaettu yleensä kolmeen alipikseliin (punainen, vihreä ja sininen), joista jokainen on varustettu tiettyä aallonpituutta (väriä) läpäisevällä suodattimella. Jokaista alipikselin läpäisevää valon intensiteettiä ohjaamalla saadaan luotua kaikki mahdolliset värit. [5]

Jotta LCD-näytöllä muodostettava informaatiota voidaan tulkita, vaaditaan kalvojen läpi kulkemaan valoa kohti käyttäjää. LCD-näytöt voidaan jakaa kolmeen luokkaan vaadittavan valon toteutustavan mukaan: taustavalaistuun, heijastavaan ja puoliheijastavaan. Taustavalaistun LCD sisältää nimensä mukaisesti taustavalon paneelin takana, mikä luo vaadittavan valon paneelin lävitse. Yleisesti esimerkiksi puhelimissa ja monitoreissa on käytössä tämä näyttötyyppi. Taustavalaistun paneelin tehonkulutuksesta suurin osa muodostuu taustavalosta, joten se rajoittaa näytön käyttökohteita. Toisaalta taustavalo mahdollistaa näytön käytön myös hämärässä valaistuksessa. [1, s.58–59]

Heijastava LCD sisältää paneelin takana peilin, joka heijastaa paneelin läpi tulevan ympäristön valon uudestaan kohti käyttäjää. Tällöin erillistä taustavaloa ei tarvita ja tehonkulutus on vain murto-osa taustavalaistun LCD-paneeliin nähden. Tätä näyttötyyppiä on käytetty yleisesti esimerkiksi taskulaskimissa. Huonona puolena paneeli tarvitsee ympäröivää valoa, joten sen käyttö hämärässä on käytännössä mahdotonta. [1, s.58–59]

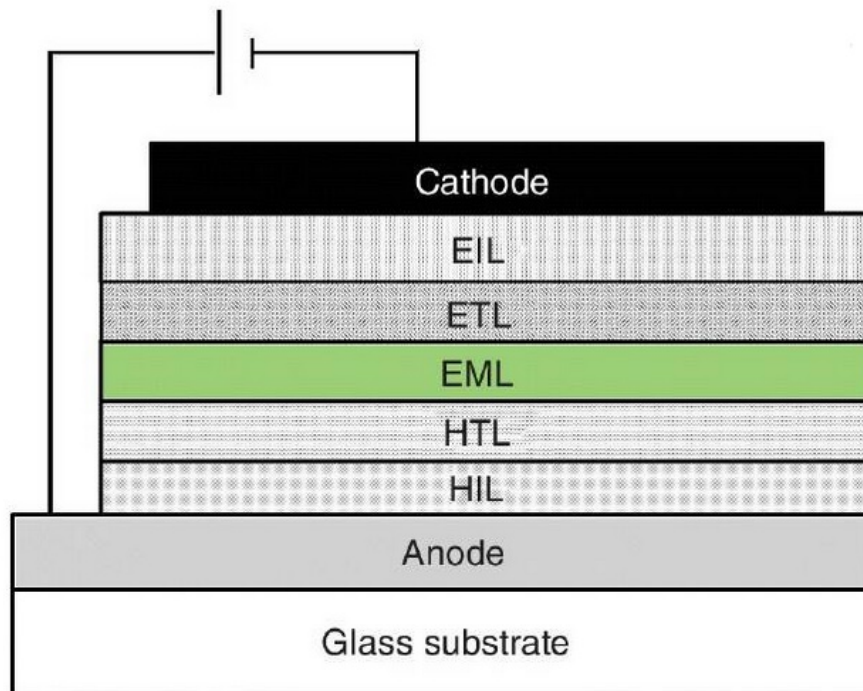
Puoliheijastavassa paneelissa jokainen pikseli on jaettu heijastavaan ja taustavalon läpäisevään osaan. Valoisassa ympäristössä tehonkulutus on matala, koska taustavaloa ei tarvita, mutta käyttö onnistuu myös hämärässä taustavalon ansiosta. Pikselien heijastavuuden ja läpipäästävyuden suhdeluku vaihtelee riippuen tavoitelluista ominaisuuksista eri valaistuksissa. Tyypillisiä suhdelukuja ovat esimerkiksi 30:70 ja 50:50. [7, s.13]

3.2 OLED-näyttö

Toisin kuin LCD, OLED on rakenteeltaan emittoiva, eli se ei tarvitse erillistä valonlähdettä toimiakseen. Yksinkertaistettuna OLED:n rakenne koostuu kolmesta tasosta, jotka on ladottu päällekkäin: anodi, katodi ja niiden välissä oleva orgaaninen taso. [2, s.38]

OLED:n pohjimmainen toimintaperiaate muistuttaa hyvin paljon normaalia LED:ia. Kun katodin ja anodin välille kytketään jännite, anodi siirtää positiivisesti varautuneita aukkoja ja katodi negatiivisesti varautuneita elektroneita kohti orgaanista tasoa. Aukot ja elektronit rekombinoituvat orgaanisessa tasossa, mikä muodostaa valon emittointia. [2, s.38]

Orgaaninen taso on kemiallisilta ominaisuuksiltaan sellainen, että se kiihdyttää elektronien ja aukkojen rekombinoitumista. Käytännössä orgaaninen taso koostuu useammasta tasosta, jotta rakenne saadaan täyttämään näytön vaatimukset muun muassa tehonkulutuksen, käyttöiän ja värien toiston osalta. [2, s.41–42] Tasot on havainnollistettu kuvassa 3.2.



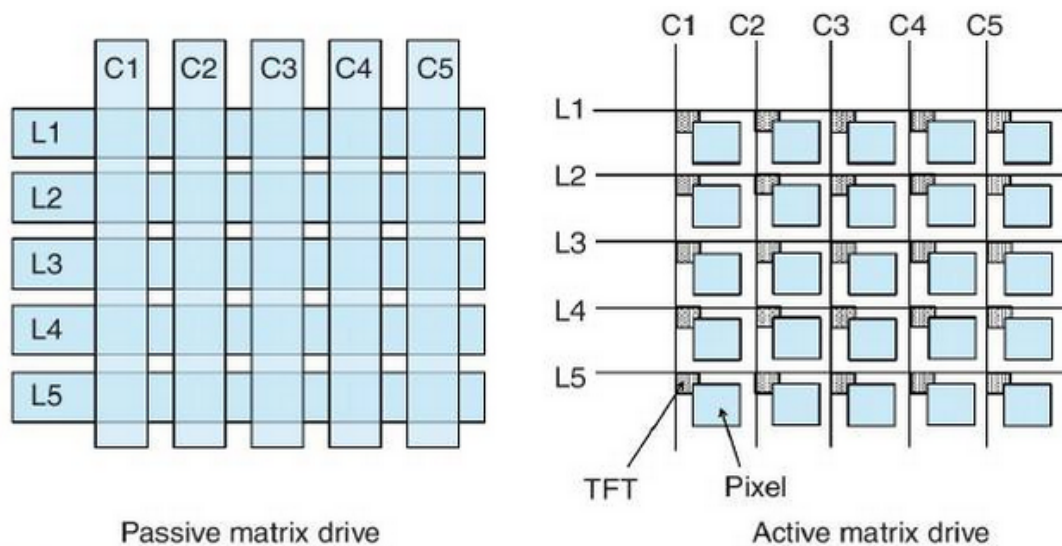
Kuva 3.2. OLED näytön orgaaniset tasot [2, s.42].

Aukkojen injektointitason (HIL, engl. Hole Injection Layer) tarkoituksena on madaltaa anodin ja orgaanisen tason välistä energiaeroa, jolloin aukkojen irtoamiseen vaadittava jännite pienenee. Aukkojen siirtotason (HTL, engl. Hole Transport Layer) tarkoitus on siirtää aukot emissiotasoon (EML, engl. Emission Layer), jossa varsinainen emittoituminen tapahtuu. Emissiotason materiaalivalinnoilla on suurin vaikutus emission lopputulokseen, muun muassa väriin. Elektronien kuljetustaso (ETL, engl. Electron Transport Layer) siirtää HIL:n tavoin elektroneja kohti emissiotasoa. Elektronien injektointitason (EIL, engl. Electron Injection Layer) tarkoitus on HIL:n tavoin madaltaa energiaeroa katodin ja orgaanisen tason välillä. [2, s.60–86]

Koska OLED tuottaa valoa orgaanisten materiaalien avulla, voidaan tarvittavat värit muodostaa eri orgaanisia materiaaleja sisältävillä alipikseleillä. Toinen tapa värien luomiselle on tuottaa orgaanisesti valkoista valoa, joka sitten suodatetaan halutun väriseksi suodatinkalvon avulla. [2, s.41-43]

3.3 Passiivi- ja aktiivimatriisi

OLED- ja LCD-näytöt voidaan jakaa kahteen luokkaan niiden ohjaustekniikan perusteella: Passiivimatriisiohjattu (PMOLED (engl. Passive Matrix Organic Light Emitting Diode), PM LCD (engl. Passive Matrix Liquid Crystal Display)) ja aktiivimatriisiohjattu (AMOLED (engl. Active Matrix Organic Light Emitting Diode), AM LCD (engl. Active Matrix Liquid Crystal Display)). [5, s.47] Ohjausrakenteet on havainnollistettu kuvassa 3.3.



Kuva 3.3. Passiivi- ja aktiivimatriisin rakenne [2, s.209].

Passiivimatriisilla ohjatussa näytössä näyttö koostuu pysty- ja vaakasuoraan asetetuista johtimista, joiden risteyskohdassa sijaitsevat pikselit. Johtimet muodostavat näytön rivi- ja sarakejohtimet. Haluttua pikseliä pystytään ohjaamaan syöttämällä signaali sitä vastaviin rivi- ja sarakejohtimiin. Koko näyttöä ohjataan sarakekohtaisesti multipleksaamalla, eli näytön yksi sarake on kerrallaan aktiivinen. Ohjaussignaalin ollessa kuitenkin tarpeeksi nopea ihmissilmä näkee kuin näyttö olisi päällä koko ajan. [1, s.48]

Koska passiivimatriisissa vain yksi sarake on aktiivinen kerrallaan, on pikseleiden päälläoloaika suoraan verrannollinen sarakkeiden lukumäärään. Eritoten ongelmia se aiheuttaa OLED:ssa, jossa näytön keskimääräisen kirkkauden ylläpitäminen tarkoittaa suurempia pikselikohtaisia kirkkauksia, mikä johtaa suurempaan virrankulutukseen ja lyhyempään pikseleiden käyttöikänsä. [2, s.210] LCD:ssa passiivimatriisiohjauksen ongelma on ylikuumuminen (engl. Crosstalk), jolloin pikselin ohjaussignaali häiritsee myös viereisiä pikseleitä, mikä huonontaa näytön kontrastia [5, s.47]. Nestekiteiden hitaan vasteajan takia passiivimatriisiohjattu LCD-näyttö on herkkä haamukuville (engl. Ghosting) ja liikkeen peh-

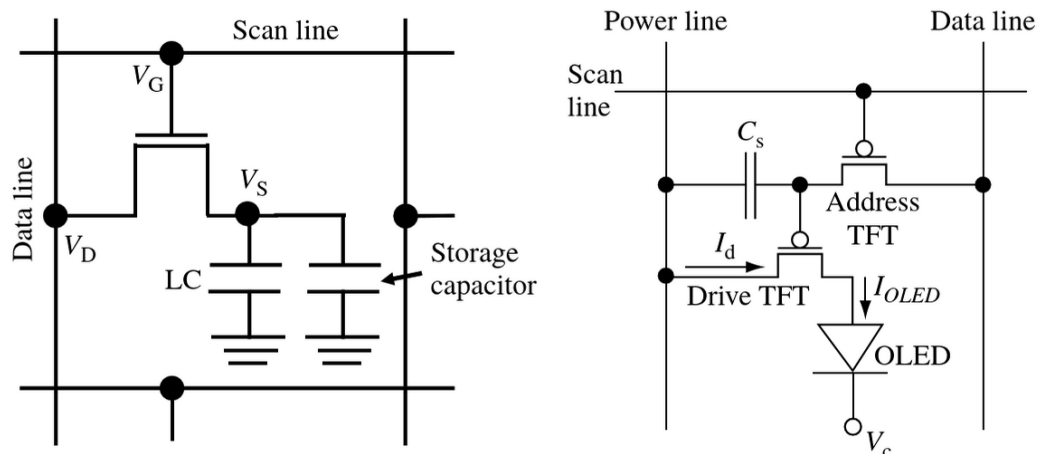
meydelle (engl. Motion Blur) [5, s.50]. Näytön resoluution kasvaessa yksittäisen pikselin ohjausjakson aika lyhenee, jolloin passiivimatriisiohjauksen ongelmat korostuvat.

Aktiivimatriisiohjaus perustuu ohutkalvotransistori-tekniikkaan (TFT, engl. Thin Film Transistor) ja on pääpiirteittäin vastaava sekä OLED:ssä että LCD:ssä. Aktiivimatriisissa jokainen pikseli koostuu sekä anodista että katodista (OLED) tai erillisestä LC-solusta, sekä sitä ohjaavasta TFT-transistorista. Aktiivimatriisissa jokaista pikseliä ohjaa oma TFT-transistori. TFT-transistoreita ohjataan vastaavalla tavalla rivi- ja sarakekohtaisesti multipleksaamalla, mutta transistorirakenteen ansiosta pikseli säilyttää tilansa myös sinä ajanjaksona, kun siihen ei kohdistu ohjaussignaalia. [2, s.208-210]

3.4 TFT

TFT on aktiivimatriisiohjautuissa LCD- ja OLED-näytöissä käytettävä tekniikka, jossa jokaisella pikselillä on oma ohjaustransistorinsa. LCD näytöissä ohjaussignaalin ollessa pikselin kohdalla TFT-transistori kytkee jännitteen LC-soluun, ja saa molekyylit kääntymään. LC-solu on itsessään kapasitiivinen, mutta sen rinnalla on yleensä myös erillinen kondensaattori varauksen ylläpitämiseen. Täten solu pysyy aktiivisena myös sen jälkeen, kun ohjaussignaali ei siihen enää vaikuta. [5, s.50]

OLED tekniikka on virtaohjattu, joten TFT-rakenteen täytyy olla hieman monimutkaisempi LCD:hen verrattuna. AMOLED:n TFT-rakenteessa on erillinen virtajohdin, josta OLED-pikselille syötettävää virtaa ohjataan kahden TFT-transistorin avulla. Datalinjalla ohjataan ohjaustransistoria, joka puolestaan ohjaa varsinaista ajotransistoria. Ohjaustransistorin rinnalla on myös kondensaattori, jolla mahdollistetaan transistorien päällä olo, vaikka ohjaussignaali ei enää vaikuttaisikaan kyseiseen soluun. TFT:n rakenne molemmissa tapauksissa on havainnollistettu kuvassa 3.4. [5, s.52]

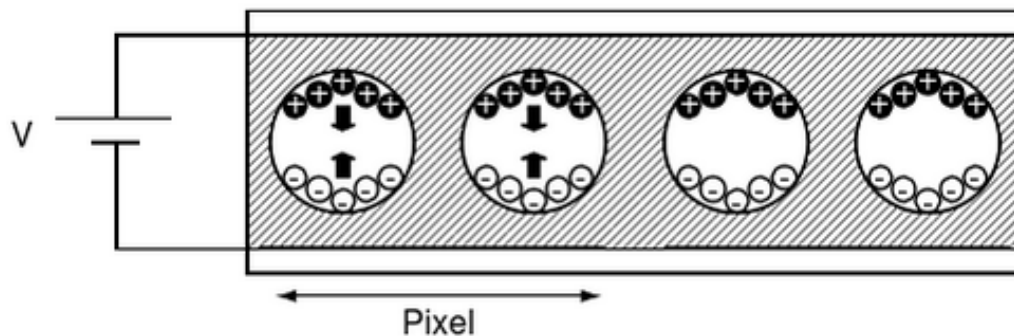


Kuva 3.4. AM LCD ja AMOLED TFT-rakenne [5, s.51-52].

TFT-rakenteella saavutetaan yleisesti parempilaatuinen näyttö passiiviohjaukseen verrattuna. LCD:ssa ylikuuluminen vähenee ja OLED:ssa yksittäisten pikselien kirkkauksia voidaan laskea, mikä parantaa käyttöikä ja laskee virrankulutusta. Myös paneelien pikselien fysikaalisia eroavaisuuksia voidaan kompensoida pikselikohtaisesti, jolloin näytöstä saadaan tasalaatuisempi kuva. [5, s50–53] Ylimääräinen transistorirakenne kuitenkin monimutkaistaa paneelin valmistusta, mikä tekee näytöstä kalliimman.

3.5 Elektroforeesinäyttö

Elektroforeesinäyttö on ei-emittoiva näyttötyyppi, jonka toiminta perustuu ympäröivän valon heijastumiseen ja absorboitumiseen paneelin pinnasta. Paneelin pinta ja valon heijastuminen vastaavat hyvin paljon perinteistä paperia. Elektroforeesinäytön rakenne koostuu pienistä kapseleista, joiden sisällä on varattuja ja värjättyjä hiukkasia kirkkaassa nesteessä. [1, s.211] Näytön rakenne on esitetty kuvassa 3.5, jossa positiivisesti varatut hiukkaset ovat mustia ja negatiivisesti varatut valkoisia.



Kuva 3.5. Elektroforeesinäytön rakenne [1, s.211].

EPD-näytön toiminta perustuu nimensä mukaisesti elektroforeesiin, eli varatut hiukkaset pyrkivät liikkumaan sähkökentän mukaan kohti varausta. Riippuen sähkökentän suunnasta, saadaan paneelin pintaan johdettua valkoisia tai mustia partikkeleita, joilla luodaan vastaavasti musta tai valkoinen pikseli. Rakenteensa ansiosta elektroforeesinäytön luotavuus on lähellä normaalia paperia. [8] Koska hiukkaset ovat nesteessä, jolla on äärellinen viskositeetti, pitää neste hiukkaset paikallaan, vaikka ohjaava sähkökenttä poistettaisiin [9]. Elektroforeesinäyttöä ohjataan yleensä LCD-näyttöä vastaavalla TFT-rakenteella [1, s. 212].

Värintoistoltaan elektroforeesinäyttö on perinteisesti mustavalkoinen. Pikselin tummuus riippuu siihen kohdistuvan sähkökentän voimakkuudesta, joten myös harmaansävyjä pystytään tuottamaan [9]. Näyttötekniikkaa aktiivisesti kehittävä yritys E Ink Corporation on kehittänyt viime vuosina myös kolmivärisiä (musta, valkoinen ja punainen) näyttöjä ja kaikkien värien toiston mahdollistavan viisivärisen (valkoinen, keltainen, syaani ja magenta) näytön [10].

Toisin kuin LCD- tai OLED-näytöissä, joissa pikselin tilan saa muutettua yhdellä ohjaussignaalin muutoksella, on EPD-näytön ohjaaminen kolmivaiheinen prosessi. Kun kuvaa vaihdetaan, suoritetaan ensimmäisenä näytön resetointi. Resetoinnissa kaikki ohjattavat pikselit asetetaan valkoiseksi tai mustaksi, jotta niillä on sama lähtötilanne riippumatta edellisestä tilasta. Seuraava vaihe on aktivointi, jossa pikselit käytetään mustana tai valkoisena ja asetetaan takaisin valkoiseksi tai mustaksi. Aktivoinnin tarkoituksena on herkistää hiukkaset, koska hiukkasten herkkyys sähkökentälle vaihtelee ajan mukaan. Ilman aktivointia edellinen kuva saattaisi jäädä näytölle haamukuvana. Kolmas vaihe on varsinainen ajovaihe, jossa pikseleille ohjataan halutut tilat. [11] Rakenteensa takia EPD-näyttö on todella hidas. Yksi mustasta valkoiseen siirtyminen kestää noin 200 millisekuntia [1, s.212], joten yhdistettynä usean vaiheen vaativaan ohjaukseen on kuvan päivittymisellä sekuntien suuruusluokan viive.

4 NÄYTÖN TEHONKULUTUKSEN MUODOSTUMINEN JA KONTROLLOINTI

Tässä kappaleessa perehdytään näyttötyyppien ominaisuuksiin, jotka vaikuttavat kyseisen näytön tehonkulutukseen. Saman näyttötekniikan eri toteutustapojen tehonkulutusta vertailtaessa hyvä tehonkulutuksen yksikkö on lm/W, joka kuvaa tuotettua valon määrää (Luumen) kulutetulla sähköteholla (Watti). Yksikön käyttäminen eri näyttötekniikoiden välisiin vertailuihin ei ole ideaalinen näyttöjen erilaisesta rakenteesta johtuen. Kokonaistehonkulutus muodostuu varsin eri osissa näyttökomponentteja riippuen vertailtavasta näyttötekniikasta. LCD-näytön tapauksessa suurin tehoa kuluttava komponentti on taustavalon valo [1, s.110], kun OLED:ssa suurin tehoa kuluttava komponentti on itse valoa tuottava OLED-pikseli [12].

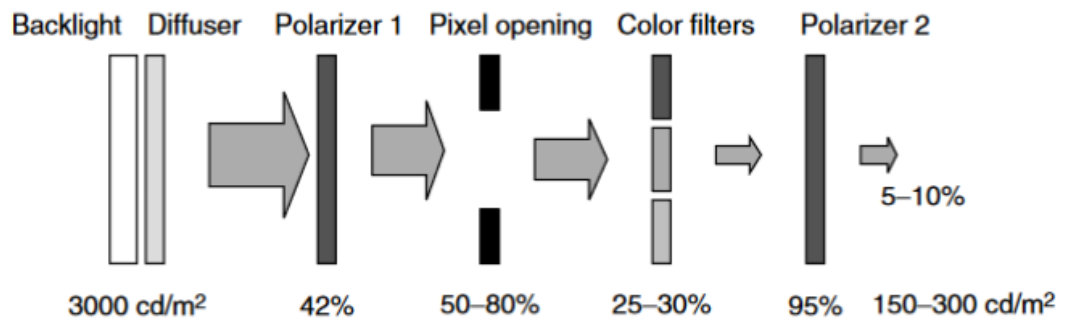
4.1 LCD:n tehonkulutus

Taustavalaistussa AM LCD-näytössä paneelin kokonaistehonkulutuksen muodostuminen voidaan jakaa taustavaloon, LC-rakenteeseen ja ohjauselektronikkaan. Taustavalon tehonkulutus on suhteellisesti suurin, ollen noin 70% koko paneelin tehonkulutuksesta. [1, s.109–110]

LCD-paneelin rakenne koostuu kerroksista, joiden läpi taustavalon on kuljettava. Taustavalon kulkiessa kahden polarisaattorin, LC-rakenteen ja värisuodattimien läpi, absorboi jokainen taso osan valon intensiteetistä, jolloin lopulta näytöstä emittoituva valon intensiteetti on vain noin 5-10 % alun perin taustavalon tuottamasta. [1, s.117–119] Rakennetta on havainnollistettu kuvassa 4.1.

Koska taustavalon osuus tehonkulutuksessa on suuri ja sen häviöt näyttörakenteessa suuria, on luonnollista pyrkiä kehittämään näytön eri kerroksia paremmin valoa läpäiseviksi. Parantamalla valon läpäisyä näyttörakenteen läpi mahdollistetaan suurempi kirkkaus samalla tehonkulutuksella tai vaihtoehtoisesti voidaan käyttää himmeämpää taustavaloa, mutta saavuttaa sama lopullinen näytön kirkkaus.

Optimointi voidaan aloittaa värisuodattimesta. Värisuodattimen rakennetta voidaan muuttaa käyttämällä heikompia väripigmenttejä tai ohentamalla suodatinta, jotka molemmat parantavat valon läpäisyä. Nämä toimenpiteet kuitenkin myös leventävät suodattimien spektriä, mikä huonontaa näytön värientoistokykyä. [1, s.140] Käyttökohteesta riippuen

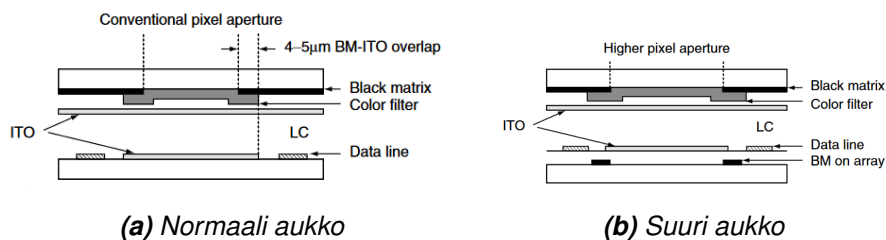


Kuva 4.1. Taustavalon häviöt LCD-näytössä [1, s.119].

huonompi värientoistokyky voi olla kuitenkin hyväksyttävää esimerkiksi puhelimessa tai laskimessa.

Toinen kehitettävä kohde on pikselirakenteen aukon (engl. Aperture, Pixel Opening) parantaminen. Aukko on se pinta-ala pikseliä kohti, josta taustavalo pääsee kulkemaan läpi ja sitä rajoittaa pikselin TFT-rakenne. Perinteisen LCD-pikselin rakenne on esitetty kuvassa 4.2(a). Osa pikselin pinta-alasta joudutaan täyttämään valoa läpäisemättömällä mustalla matriisilla (engl. Black Matrix), jolla estetään taustavalon hohtaminen TFT-rakenteen läpi. Perinteisessä LCD-pikselissä musta matriisi joudutaan asettamaan osittain limittäin aukon päälle, jolla estetään taustavalon vuotaminen pikselin reunoista, jolloin aukon koko rajoittuu noin 55%:iin. [1, s.141]

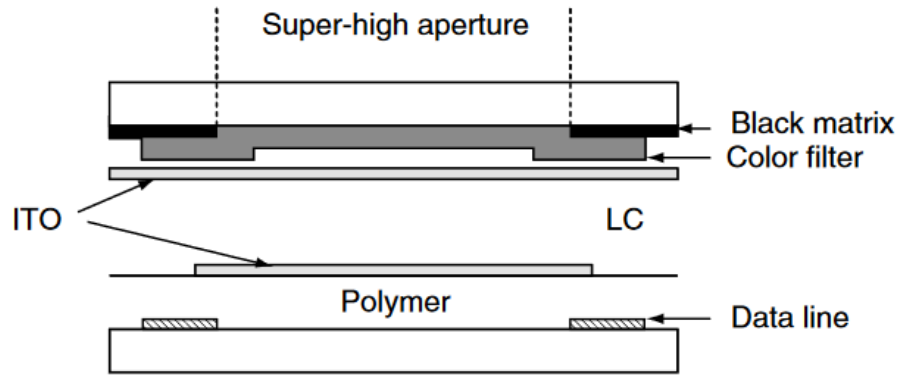
Valon vuotamista voidaan rajoittaa niin sanotulla Black-Matrix-on-array-rakenteella, jolloin mustasta matriisista tehdään valoa läpäisemätön matriisirakenne jo LC-rakenteen alle. Rakenne on havainnollistettu kuvassa 4.2(b). Tällä reunoilta vuotava valo saadaan estettyä jo ennen LC-rakennetta, jolloin pikselin päällä olevaa mustaa matriisia voidaan leventää, ja täten aukkoa suurentaa noin 65%:iin. [1, s.141]



Kuva 4.2. Normaali ja super-high aukko LCD-näytössä [1, s.142].

Aukkoa saadaan vielä suurennettua noin 80%:iin siirtämällä TFT:n datajohtimet LC-rakenteen vierestä sen alle. Tällöin LC-rakennetta voidaan leventää ja datajohtimet estävät myös taustavalon hohtamisen, jolloin alempi musta matriisi voidaan poistaa. [1, s.142] Rakenne on havainnollistettu kuvassa 4.3.

Perinteisen kolmen värin RGB (punainen, vihreä, sininen, (engl. Red, Green, Blue)) alipikseliasetteluun sijaan voidaan käyttää myös neljän värin RGBW (punainen, vihreä, sininen, valkoinen (engl. Red, Green, Blue, White)) alipikseliasettelua. RGBW-asettelussa



Kuva 4.3. Erittäin suuri aukko [1, s.143].

jokaiseen pikseliin on lisätty neljäs valkoinen alipikseli, joka ei sisällä ollenkaan värisuodatinta. Tällaisella rakenteella pikselin maksimikirkkautta saadaan kasvatettua jopa 50% ja tarvittavaa taustavalon tehoa vähennettyä jopa 18% [13]. Huonona puolena näytön ohjauselektronikka monimutkaistuu, koska sen täytyy muuntaa sisääntulosignaalin RGB-väriavaruus RGBW-väriavaruudeksi. Myös suuremmasta valkoisen valon osuudesta johtuen näytön värientoistokyky heikkenee hieman. [1, s.144-145]

LCD-rakenteeseen saatetaan lisätä myös erilaisia lisäkalvoja, joilla tavoitellaan parempia ominaisuuksia. Yksi on niin sanottu kirkkaudenparannuskalvo (engl. Brightness Enhancement Film), joka asetetaan taustavalon ja LC-rakenteen väliin. Kirkkaudenparannuskalvo koostuu noin 20-50 μm prismoista, joiden tarkoitus on taittaa taustavalosta siroutuvat valonsäteet joko kohti käyttäjää tai takaisin taustavaloon. [1, s.146]

Edellisissä vaihtoehdoissa taustavalon kirkkaus pidettiin vakiona, ja keskityttiin LCD-rakenteen muokkaamiseen. On kuitenkin mahdollista myös käyttää taustavaloa, jonka kirkkautta pystytään säätämään aluekohtaisesti. Tällöin kuvassa olevissa tummissa kohdissa voidaan käyttää himmeämpää taustavaloa, mikä vähentää tehonkulutusta ja myös parantaa näytön kontrastia. [14]

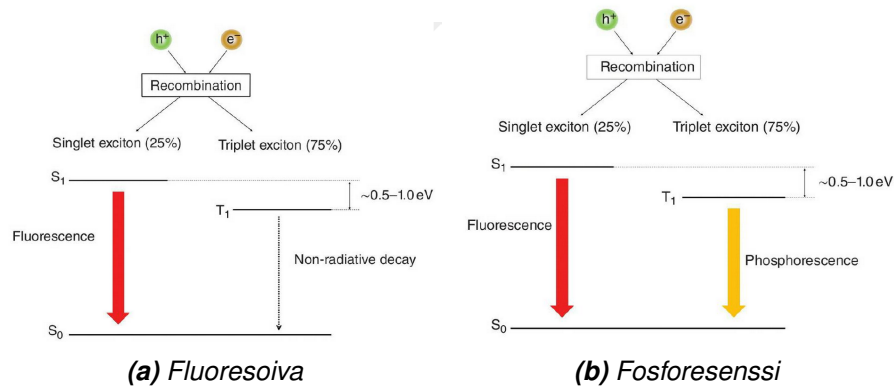
Lähteen [14] mukaan taustavalonhimmennysalgoritmia käyttämällä saavutetaan noin 14–40% tehon säästö taustavalossa. Kyseisen tekniikan käyttäminen vaatii kuitenkin monimutkaisemman taustavalorakenteen ja ohjauselektronikan kuin perinteinen taustavalo.

4.2 OLED:n tehonkulutus

OLED:n hyötysuhteen muodostuminen voidaan jakaa sisäiseen ja ulkoiseen hyötysuhteeseen. Sisäinen hyötysuhde ilmaisee, kuinka paljon energiasta emittoidaan näkyvänä valona, ja kuinka paljon kuluu muuhun säteilyyn näkymättömillä aallonpituuksilla. [2, s.54]

Kun OLED:n orgaanisessa tasossa tapahtuu elektronien rekombinoituminen, virittyvät elektronit niin kutsuille singlet- (S1) ja triplet (T1) -tasoille, jakaantuen niille suhteessa 1:3. Fluoresoivassa rakenteessa vain S1 tasolta purkautuvat elektronit säteilevät näky-

vällä aallonpituudella olevaa valoa, eli tällöin OLED:n sisäinen hyötysuhde on 25%. Fosforesenssirakenteella saadaan myös T1 tasolta purkautuvat elektronit emittoimaan näkyvää valoa, jolloin OLED:n sisäinen hyötysuhde saadaan teoriassa lähelle 100%:ia. [2, s.45–50] Periaatteet on havainnollistettu kuvassa 4.4.



Kuva 4.4. Fluoresoiva ja fosforesenssi OLED periaate [2, s.46, 48].

Ulkoinen hyötysuhde määrittää, kuinka paljon emittoidusta valosta varsinaisesti kulkeutuu näytöstä ulos. Ulkoista hyötysuhdetta rajoittavat sisäiset heijastukset ja absorptiot orgaanisten aineiden ja metallien rajapinnoissa, hyötysuhteen ollessa perinteisesti noin 20-30%. Ulkoista hyötysuhdetta voidaan parantaa esimerkiksi lisäämällä rakenteeseen linsejä tai heijastuksia sirottavia kalvorakenteita. Tällöin OLED:n ulkoinen hyötysuhde on saatu kasvatettua jopa 50%:iin. [15]

Taulukkoon 4.1 on kerätty lähteen [12] sivulla 202 olevasta taulukosta sarakkeet AMOLED:n ja AM LCD:n tehonkulutuksesta. Taulukko vertaa tehonkulutusta niin sanotuissa mikronäytöissä (engl. Microdisplay), jonka vuoksi suuruusluokka on milliwatteja. Tehojen suhde on kuitenkin vertailukelpoinen isommissakin näytöissä.

Kuten taulukosta näkee, on AMOLED:n kokonaistehonkulutus LCD:hen nähden huomattavasti pienempi. Suurin tekijä on AMOLED:n itse-emittoiva rakenne, jolloin erillistä taustavaloa ei tarvita.

Toisena huomiona on TFT-rakenteen hieman pienempi tehonkulutus. TFT:n tehonkulutus painottuu pääasiassa pikseleiden lähteen (engl. Source) ohjaukseen kuluvaan tehoon, ollen verrannollinen lähteen ohjausjännitteeseen. Perinteinen LCD:n lähteen ohjausjännite on $-5\text{ V} - 5\text{ V}$, jossa negatiivinen jännite vaaditaan sähkökentän polariteetin vaihtelun vuoksi. Vastaava AMOLED:n lähteen ohjausjännite on $0,5\text{ V} - 3\text{ V}$. [6] Pienemmän jännitealueen vuoksi AMOLED:n TFT-rakenne kuluttaa vähemmän tehoa.

Itse-emittoiva rakenne ja AMOLED:n jokaisen pikselin erikseen ohjattavuus mahdollistaa LCD:hen nähden uniikin tavan vaikuttaa tehonkulutukseen. AMOLED:n pikselin tehonkulutus on vahvasti riippuvainen sen kirkkaudesta. Pois päältä oleva musta pikseli ei kuluta ollenkaan tehoa, kun täysin valkoinen pikseli kuluttaa jopa tuplasti LCD:hen nähden. [16] Tätä ominaisuutta voidaan käyttää hyödyksi ja muokata näytöllä näkyvää kuvaa siten, että tummia alueita on enemmän kuin alkuperäisessä kuvassa.

Taulukko 4.1. AMOLED:n ja AM LCD:n tehonkulutus vertailtuna [12, s.202].

	AMOLED	AM LCD
Paneeli (mW)	50	50
TFT (mW)	100	150
Taustavalo (mW)	0	150
Yhteensä (mW)	150	350

Yksi lähestymistapa on näytön osittainen himmennys [16]. Jos käytetään oletusta, että suurin osa käyttäjän informaatiosta on näytön keskellä, voidaan näytön ylä- tai alareunaa himmentää [17]. Kosketusnäyttösovelluksessa voidaan käyttää myös algoritmia, joka himmentää näytössä sormen alle jäävän osan [18].

Chun-Han Lin et.al [19] tekemässä tutkimuksessa AMOLED:n tehonkulutusta pyrittiin vähentämään parantamalla näytettävän kuvan kontrastia. Koska ihmissilmä reagoi herkemmin kirkkauden muutoksiin kuin absoluuttiseen väriin, kontrastin suurentamisen kuvassa aistitaan parantavan kuvan laatua. Tätä ominaisuutta ja AMOLED:n tehonkulutuskäyrää hyödyntämällä tutkimuksessa luotiin algoritmi, joka yksinkertaistettuna tummensi kuvan tummia kohtia, mutta ei radikaalisti kirkastanut vaaleita. Lopputuloksena algoritmilla saatiin noin 16%–38%:n vähennys tehonkulutuksessa kuvan laadun pysyessä vähintään ennallaan, mutta yleensä parantuessa. Haittapuolena algoritmi on varsin monimutkainen ja vaatii paljon laskentakykyä ohjauselektronikalta.

4.3 Elektroforeesinäytön tehonkulutus

Elektroforeesinäyttö säilyttää viimeisen tilansa, vaikka siihen kohdistuva ohjaussignaali sammutettaisiin. Tehonkulutuksen kannalta tämä tarkoittaa, että kun esitetään staattista kuvaa, näyttö ei kuluta ollenkaan tehoa. Koska perinteisesti elektroforeesinäytössä ei ole myöskään mitään valonlähdettä, rajoittuu näytön tehonkulutus pikseleiden päivityshetkeen ja ohjauselektronikkaan.

Erilaiset kehityskohteet elektroforeesinäytöissä painottuvatkin vasteajan lyhentämiseen, käyttöjännitteen madaltamiseen ja värientoistokykyyn. Tällä hetkellä perinteisen mustavalkoisen elektroforeesinäytön vasteaika on noin 160-300 ms ja käyttöjännite noin 15 V [9]. Erityisesti hidat vasteajat rajoittavat näytön käyttökohteet staattiseen, tai hyvin hitaasti päivittyvään kuvaan, mikä rajaa videokuvan toiston käyttökohteiden ulkopuolelle.

Erilaisia lähestymisiä käyttöjännitteen madaltamiseksi ja vasteajan lyhentämiseksi on esitetty. Kapseleiden sisällä olevan nesteeseen viskositeetin laskeminen parantaa hiukkasten liikkumista nesteessä, mikä parantaa vasteaika. Viskositeetin laskeminen kuitenkin vähentää näytön pysyvyyttä. Kehittyneempi tekniikka on vähentää nesteeseen viskositeettia näytön päivityksen ajaksi käyttäen IER-efektiä (engl. Inverted Electrorheological), jossa nesteeseen viskositeettia saadaan muutettua ympäröivällä sähkökentällä. [9]

Toinen lähestymistapa on käyttää kehittyneempää ohjaussignaalia, jolloin näytön päivitymiseen kuluva aikaa saadaan lyhennettyä. Esimerkiksi resetoituvaihetta voidaan optimoida siten, että näyttö asetetaan joko mustaksi tai valkoiseksi, riippuen siitä, onko edellisessä kuvassa enemmän mustia vai valkoisia pikseleitä. [9]

4.4 Käyttökohteiden vertailu yleisesti

LCD on tässä työssä käsiteltävistä näyttötyypeistä vanhin ja pisimpään kehityksessä ollut. Valmistajat ovat siten voineet optimoida tuotantoprosesseja ja suurten tuotantomäärien vuoksi LCD:n valmistuskustannukset ovat alhaiset. [1, s.1-5] LCD onkin vielä käytetyin näyttötyyppi elektroniikassa, koska sillä saavutetaan riittävät ominaisuudet suurimpaan osaan käyttökohteista. Ajan saatossa LCD:n heikkouksia, muun muassa värinvalvonta, katselukulmat, taustavalon vuoto ja vasteaika, on saatu kehitettyä ja nykyaikaiset LCD-paneelit tuottavat riittävän hyvän kuvan suurimpaan osaan käyttökohteista [1, s.5].

LCD vaatii kuitenkin yhä taustavalon, joka yhdistettynä sekä LC- että TFT-rakenteisiin, tekee näytöstä suhteellisen paksun, sekä tekee tehonkulutuksen optimoimisen hankalaksi. LCD-paneeli on kuitenkin sen hinta huomioon ottaen kilpailukykyinen vaihtoehto elektroniikan laitteisiin. LCD sopii hyvin laitteisiin, joissa haetaan matalia kustannuksia, kuten esimerkiksi puhelimet. LCD on myös pääasiainen näyttötyyppi suuremmissa paneeleissa kuten tietokoneet ja televisiot, joissa AMOLED-paneelin käyttäminen nostaisi tuotteen hintaa liikaa.

AMOLED on kehittynyt viimeisen 10 vuoden aikana huimasti, ja on yleistymässä LCD:n rinnalle esimerkiksi puhelinten näyttötyyppinä. Tällä hetkellä monet valmistajien lippulaivamallin älypuhelimet käyttävät AMOLED paneelia. AMOLED:n vahvuuksia LCD:n nähden ovat muun muassa paremman katselukulmat, parempi kontrasti, kirkkaammat värit ja ohuempi sekä taivutettava rakenne [7, s.384].

Itse-emittävän rakenteen ansiosta AMOLED on hyvä näyttötyyppi esimerkiksi älykelloihin, joissa on koteloinnin takia pienet akut. Kellon ohjelmisto voidaan optimoida siten, että suurin osa valikkorakenteista ja ruuduista pohjautuu mustaan taustaan, jolloin päällä olevia pikseleitä on vain murto-osa koko näytön pikseleistä. Samaa ominaisuutta käytetään myös esimerkiksi älypuhelimien yö-tiloissa, joissa suurin osa valikoista ja palkeista muuttuu tummiksi, jolla saadaan vähennettyä AMOLED paneelin tehonkulutusta.

AMOLED:n rakenne mahdollistaa myös taivutetut ja taivutettavat näytöt. Taivutettuja näyttöpaneeleja on ollut kuluttajatuotteissa saatavilla jo muutaman vuoden ja varsinaisia taivutettavalla näytöllä olevia puhelimia on tullut markkinoille kuluneena vuotena [20].

Suuremmissa näytöissä AMOLED:n käyttöä rajoittavat vielä ongelmat käyttöiän ja kiinnipalamisen kanssa. Koska OLED tekniikka perustuu orgaanisiin aineisiin, on sillä rajallinen käyttöaika. OLED-pikselit himmenevät jatkuvasti ollessaan päällä, ja yleensä valmistajat ilmoittavat paneelin käyttöiäksi hetken, jolloin pikselit ovat himmentyneet 97% alkuperäisestä kirkkautestaan.

räisestä. Pikselien himmentyminen johtaa myös niin sanottuun kiinnipalamisefektiin. [2, s.199] Jos näytöllä toistetaan useasti esimerkiksi tiettyä kuviota tummalla taustalla, päällä olevat kuvion pikselit himmenevät käytettäessä, mutta ympärillä olevat sammutetut pikselit eivät. Jos näytöllä sen jälkeen toistetaan jotain toista kuvaa, voi aiemmin näytetty kuvio näkyä kuvan päällä haamukuvana. Erityisesti tietokonekäytössä tämä on ongelma, koska tietokoneiden käyttöjärjestelmät sisältävät paljon staattisia palkkeja, jotka voivat olla pitkiä aikoja paikoillaan.

Elektroforeesinäyttö on ominaisuuksiltaan varsin erilainen, eikä se tällä hetkellä varsinaisesti kilpaile samoista käyttökohteista LCD:n ja AMOLED:n kanssa. Koska elektroforeesinäytön vasteaika on erittäin hidas LCD:hen ja AMOLED:iin nähden, ei se sovellu esimerkiksi videon toistoon tai nopean vasteajan vaativaan käyttöön. Vaikka näyttötekniikalla on jo demonstroitu [21] noin 5 kuvaa/sekunti toistavaa videota, ei tekniikka ole videontoistoon vielä valmis moneen vuoteen.

Elektroforeesinäytön ominaisuudet painottuvatkin virran kulutukseen ja luettavuuteen. Koska kyseessä on heijastava näyttö, on sen luettavuus esimerkiksi auringonpaisteessa ylivoimainen LCD:hen ja AMOLED:iin nähden. Monien tutkimusten [22] mukaan elektroforeesinäytön luettavuus on miellyttävämpi silmälle kuin valoa emittoivissa näytöissä. Näyttötyyppi onkin saavuttanut suosion sähköisissä kirjanlukulaitteissa. Näyttö soveltuu niihin hyvin, koska näytettävä sisältö pysyy kohtuullisen pitkään staattisena ja hyvä luettavuus on tärkeä. Näyttötyypin ansiosta myös laitteiden akunkesto on hyvin pitkä, jopa viikkoja [23].

Elektroforeesinäyttö soveltuu esimerkiksi älykelloihin ja kaupoissa käytettäviin elektronisiin hintanäyttöihin. Näissä käyttökohteissa näytön matala tehonkulutus on tärkeässä roolissa.

5 NÄYTTÖTYYPPIEN VERTAILU KÄYTÄNNÖSSÄ

Työn viimeisessä osuudessa tarkastellaan kolmen näyttötyypin LCD, OLED ja EPD ominaisuuksia käytännössä testikokoonpanon avulla. Osuudessa käydään läpi käytettävät komponentit, testikokoonpanon rakentaminen, mittaukset ja havainnot sekä pohdintaa tuloksista.

5.1 Testikokoonpano

Testikokoonpanon näyttöjen ohjaukseen valittiin Arduino Nano. Työhön soveltuvia mikrokontrollereita olisi ollut useita, mutta päätin käyttää Arduinoa, koska sitä käytetään laajasti erilaisissa prototyyppisovelluksissa. Laajan käytön ansiosta Arduinolle on saatavilla paljon materiaalia ja ohjeistusta. Myös oma aikaisempi käyttökokemus puolsi Arduinon käyttöä.

Lähdettäessä miettimään sopivia näyttöjä testikokoonpanoon halusin rajata vaihtoehdot näyttöihin, jollaisia voisi olla käytössä esimerkiksi akulla toimivissa ja kannettavissa laitteissa. Vertailtaviksi näyttötekniikoiksi muodostui luonnollisesti tässä työssä käsiteltävät LCD, OLED ja E-Ink. E-Ink on elektroforeesinäytölle vakiintunut nimitys sitä kehittävän E-Ink Corporation:n mukaan. Vaihtoehtoja selatessa päätin sopivaksi näytön halkaisijaksi noin 3 tuumaa ja hintaluokaksi noin 30 euroa. Yksi kriteeri näytön valinnassa oli, että se täytyi saada toimimaan Arduinon kanssa kohtuullisella vaivalla. Käytännössä tämä tarkoitti, että näyttöpaneelissa täytyi olla integroituna jokin ohjauspiiri, jolle löytyy dokumentaatiota ja kirjastoja Arduinolle, jolloin näytön varsinaiseen fyysisen tason ohjaukseen ei tarvitse koskea.

Taulukkoon 5.1 on koottu valmistajien datalehdistä [24][25][26] tietoja, jotka ovat oleellisia tämän työn mittakaavassa. Testauksien ja arviointien kannalta tärkeimpiä parametreja ovat koko, resoluutio ja tehonkulutus. Työn mittakaavassa ohjainpiirien keskinäisillä eroavaisuuksilla ei ole suurta merkitystä. Datalehdissä on esitetty myös näyttöjen laadullisia mittauservoja esimerkiksi kontrastin ja väriavaruuksien suhteen, mutta ne ajateltiin olevan turhan syvällisiä tietoja tämän työn teoriatasoon nähden.

Valikoiduista näytöistä LCD on teknisesti kehittynein. LCD-näyttö sisältää TFT-rakenteen, eli se on aktiivimatriisiohjattu. LCD-näytön resoluutio on kolmikosta suurin, sen väriavaruus on täysi RGB ja näyttö sisältää myös kosketuspaneelin. LCD:n pinta on muovia. OLED-näyttö on kuvasuhteeltaan matala ja leveä, ja sen resoluutio on esimerkiksi

Taulukko 5.1. Työssä käytettävät näytöt.

Tekniikka	AM LCD	OLED	E-Ink
Valmistaja	Multi-inno Technology CO.	Display Elektronik GmbH	Waveshare Electronics
Malli	MI0283QT-9A	DEP 100032A-W	2.9inch e-Paper Module
Halkasija	2,83"	2,4"	2,9"
Mitat (mm)	57,6 x 43,2	58,95 x 19,5	66,89 x 29,05
Resoluutio (px)	320 x 240	100 x 32	296 x 128
Ohjauspiiri	IL19341	RS0010	IL3820
Max kirkkaus	240	60	-
Tehonkulutus	220 mW	X	0,017 / 40 mW [1]

X: Ei ilmoitettu, [1]: Tehonkulutus staattisena/päivityshetkellä.

LCD:hen nähden heikko. Toisaalta OLED-näytön pinta on valmistettu kokeilun perusteella lasista. Käytettävä OLED on passiiviohjattu ja se kykenee toistamaan vain valkoista väriä. E-Ink on sekä kuvasuhteeltaan että resoluutioltaan kahden edellisen välimaastossa. Värintoistoltaan elektroforeesinäyttö on monokromaattinen, eli näyttö kykenee toistamaan vain mustia ja valkoisia pikseleitä. E-Ink näytön pinta on muovia.

5.2 Testikokoonpanon rakennus

Työn kokeellinen osuus alkoi testikokoonpanon rakentamisella koekytkentälevyille, joista jokainen näyttö ja sitä ohjaava mikrokontrolleri muodostaa yksittäisen kokonaisuuden. Ensimmäisenä käsiteltäväksi otettiin LCD-näyttö. Näytön valmistajan datalehdessä [24] kerrotaan näytössä käytettävä ohjainpiiri. Piirin selvittyä alkoi sopivan kirjaston etsiminen. Samaa ohjainpiiriä käytetään Adafruit:n Arduinolle tarkoitettussa näyttömoduulissa, joten Adafruit:n tuottamia kirjastoja Adafruit_ILI9341 ja Adafruit_GFX pystyttiin käyttämään näytön ohjaukseen.

Näytön ohjainpiiri sisältää useita kommunikaatioprotokollia mikrokontrollerin ja näytön ohjainpiirin välillä, joista käytettävä protokolla valitaan näytön IM0–IM3-pinnien kytkentäkombinaatiolla loogiseen ykköseen ja nollaan. Valittu Adafruit:n kirjasto käyttää kommunikaatioprotokollana SPI:ta (engl. Serial Peripheral Interface), joten näytön datalehdessä mukaisesti valittiin kytkentäkombinaatio, jolla ohjainpiirille kerrotaan protokollaksi SPI.

Koska Arduino käyttää loogisina jännitetasoina 0–5 V ja näyttö 0–3,3 V, tarvittiin Arduinon ja näytön välille logiikkamuunnin, jolla ohjaussignaalien jännitetasot muunnetaan sopiviksi. Logiikkamuuntimena käytettiin valmismoduulia, joka koostuu yksinkertaisesta yhden kanavatransistorin ja kahden vastuksen kytkennästä. Kun näytön kommunikaatioprotokolla oli saatu valittua, kytkettiin loput SPI:n pinnit näytöstä logiikkamuuntimen kautta Arduinon IO-pinneihin. Koska näytön ohjainpiiri tukee monia erilaisia kommunikaatio-

protokollia, on näytössä iso rivi pinnejä, joista SPI käyttää vain kuutta. Osalla pinneistä on eri käyttötarkoitus riippuen käytettävästä kommunikaatioprotokollasta, joten niiden merkinnät olivat välillä tulkinnanvaraisia. Datalehden avulla oikeat SPI-pinnit kuitenkin löytyivät, ja ne kytkettiin Arduinon IO-pinneihin.

Kun kytkentä näytön ja Arduinon välillä oli tehty, seuraava tehtävä oli Arduinon ohjelmointi. Valittu kirjasto toimi hyvin näytön kanssa, ja kirjaston tarjoamaa funktiota käyttämällä saatiin piirrettyä XBitMap-muotoinen kuva näytölle. XBitMap on muoto, jossa jokaisen pikselin arvo esitetään yhdellä bitillä ja koko kuvan pikselien arvot on koottu yksinkertaiseen C-kielen taulukkoon kahdeksan bitin alkiaina. Haluttu kuva saatiin muunnettua yleisestä tiedostomuodosta (esimerkiksi .png) vaadittuun XBitMap muotoon käyttämällä ilmaista converio.co-sivustoa ja kopioimalla saatu heksadesimaaleja sisältävä taulukko ohjelman koodiin.

Viimeisenä LCD-näytössä täytyi kytkeä taustavalo. Näytön taustavalo on toteutettu LED-tekniikalla ja sen anodi sekä katodi oli kytketty näytön LED-A ja LED-K-pinneihin. Taustavalo kytkettiin Arduinon tarjoamaan 5 voltin käyttöjännitteeseen käyttäen 22 ohmin etuvastusta, jolla taustavalon virta rajoitettiin noin 60 milliampeeriin, joka on noin 75% valmistajan ilmoittamasta suurimmasta sallitusta 80 milliampeerista.

Seuraavana käsiteltäväksi otettiin OLED-näyttö. Näytön valmistajan datalehteä [25] lukiessa ilmeni, että paneeli on jaettu keskeltä kahteen loogiseen lohkokon, joiden molempien ohjaukseen on oma ohjainpiiri. Kytkentä on tehty siten, että molemmat ohjainpiirit ohjaavat 100x16-pikselin kaistaletta näytössä. Datalehti on kuitenkin monilta osin puutteellinen, ja muun muassa tieto, kuinka ohjainpiirien varsinainen ohjaus toimii, oli niukkaa.

OLED-näytössä käytettävää ohjainpiiriä on käytetty myös Adafruit:n valmistamassa OLED-moduulissa, joten sille löytyi Adafruit_characterOLED-master -niminen kirjasto. Kirjaston käyttö ei ollut kuitenkaan aivan suoraviivaista. Ohjainpiirin valmistajan datalehteä [27] lukiessa selvisi, että ohjainpiiri sisältää kaksi toiminnallista moodia: kirjasinmoodi ja graafinen-moodi. Kirjasinmoodissa ohjainpiiriin sisäinen muisti sisältää listan aakkosista sekä välimerkeistä, ja mikrokontrollerilla valitaan merkkejä ohjainpiirin muistista, joita ohjainpiiri piirtää näytölle mikrokontrollerin ohjeiden mukaan. Graafisessa moodissa mikrokontrolleri syöttää ohjainpiirille 100x16 taulukon pikseleiden arvoista, jotka ohjainpiiri piirtää näytölle.

Saatavilla oleva kirjasto käytti ohjainpiirin kirjasinmoodia, näytölle haluttiin kuitenkin piirtää itse valitsemaa grafiikka, jotta näyttöjen keskinäinen vertailu olisi mielekkäämpää. Käytännössä muita kirjastoja ei ollut saatavilla, joten valitun kirjaston käyttöä päätettiin jatkaa. Seuraavana haasteena oli siis näytön saaminen toimintaan graafisessa moodissa. Graafisen moodin käytöstä oli ohjainpiirin datalehdessäkin varsin vähän informaatiota. Näytön käynnistyshetkellä mikrokontrollerin näytölle suorittamassa alustussekvenssissä on eroavaisuuksia, riippuen käytetäänkö kirjasin- vai graafista moodia. Perehtyessä kuinka valittu kirjasto toimii, täytyi kirjastoon tehdä muutoksia, jotta näytön graafisen moodin sai toimimaan. Kirjastoon tehtyjä muutoksia oli muun muassa näytön alustusse-

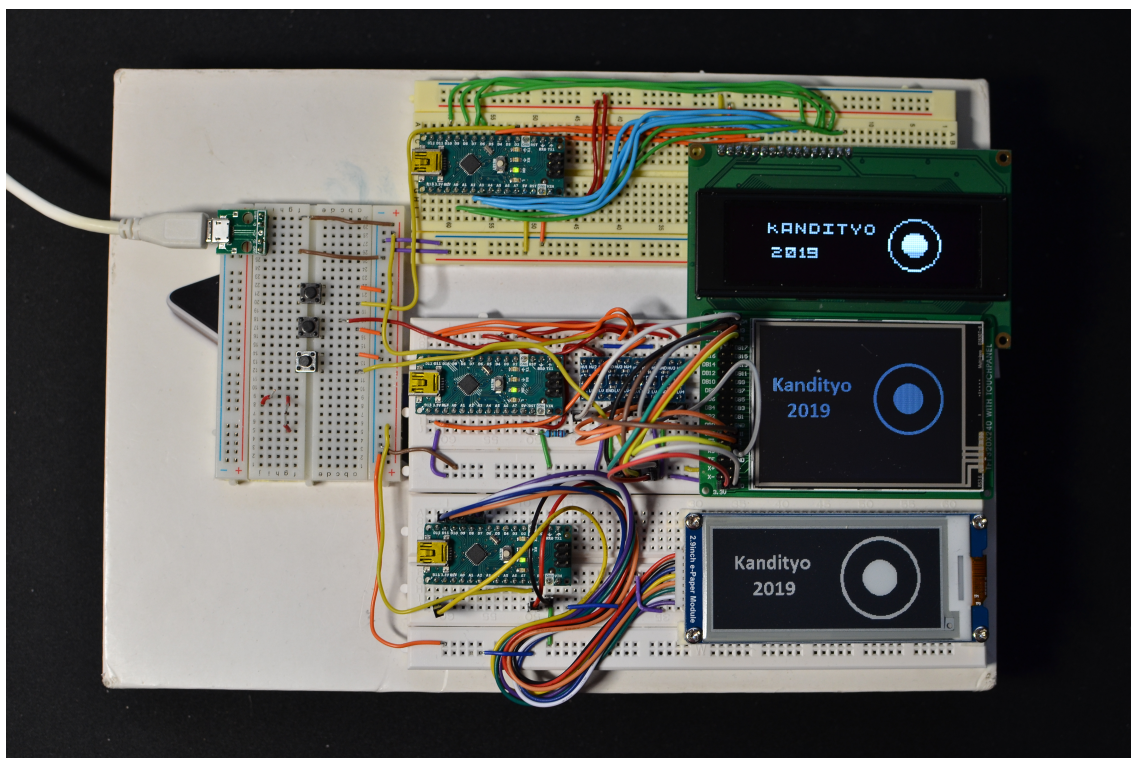
kvenssin muuttaminen ja neljäbittisen dataväylän vaihtaminen kahdeksanbittiseen. Kirjastoon piti lisätä myös toiminnallisuudet kahden ohjainpiirin rinnakkaiseen käsittelyyn ja taulukkomuotoisen kuvadatan syöttämiseen näytölle siten, että se myös näkyi näytöllä oikein.

Fyysisiltä kytkennöiltä käytetty OLED-näyttö oli helppo. Näytössä on kolme kontrollipinniä, kahdeksan datapinniä ja kaksi piirinvalintapinniä, joista kaikki kytkettiin Arduion IO-pinneihin. Näytöllä toistettava kuva on ohjelmakoodissa C-kielen taulukossa, mikä saatiin luotua image2lcd-ohjelmaa käyttäen.

Viimeisenä toimintaan saatettava oli Waveshare:n valmistama E-Ink-näyttö. Valmistajan tuotteen ohjesivulla [28] oli hyvät materiaalit näytön käyttöön Arduionilla. Näyttö käyttää kommunikointiin mikrokontrollerin kanssa SPI:ta, joten kytkettäviä datajohtimia oli kuusi. Kytkennät tehtiin valmistajan ilmoittamalla tavalla Arduion IO-pinneihin, jotka ovat myös Arduion sisäisen SPI-lohkon pinnit. Valmistajan kirjastoja epdiff ja epdpaint käyttämällä näytölle saatiin piirtymään kuva.

Myös waveshare:n kirjasto käyttää tiedostomuotonaan C-kielen taulukkorakenteeseen sijoitettua pikselidataa. Kuvan kääntämiseen vaadittuun muotoon käytettiin image2lcd-ohjelmaa.

Lopullinen testikokoonpano muodostui asettamalla yksittäiset näyttöjen testikytkentälevyt vierekkäin pahvin palan päälle. Kuvassa 5.1 on esitetty testikokoonpano, jossa näytöt ylhäältä alaspäin lueteltaessa: OLED, LCD ja E-Ink.



Kuva 5.1. Testikokoonpano

Kokoonpanoon lisättiin neljäs koekytkentälevy, jolle asetettiin kolme painonappia ja mikro-USB -liitin. Jokaiseen Arduinoon yhdistettiin yksi painonappi Interrupt-pinniin, ja niiden koodiin lisättiin kohta, joka vaihtaa näytöllä näkyvää kuvaa nappia painettaessa. Mikro-USB-liitin lisättiin, jotta näyttöjen tehonkulutuksia olisi helpompi mitata.

5.3 Tehonkulutuksen mittaukset ja havainnot

Näyttöjen tehonkulutuksien mittaaminen suoritettiin tarkastelemalla yhtä näyttöä kerrallaan. Näytöistä mitattiin koko kokoonpanon tehonkulutus, sisältäen Arduinon, näyttöpaneelin sekä näytön ohjauselektronikan. Mittaukset suoritettiin näyttämällä näytöllä kolme eri kuvaa, jotta pystytään vertailemaan, vaikuttaako näytettävä kuva tehonkulutukseen. Kuvina käytettiin kuvassa 5.1 näkyvää kuviota, jonka tarkoituksena on simuloida oikeaa käyttökohdetta. Kuva sisältää sekä tekstiä, että yksinkertaista grafiikkaa. Toisena kuvana käytettiin täysin valkoista kuvaa ja kolmantena täysin mustaa kuvaa.

Jännitelähteenä mittauksissa käytettiin 5 Voltin USB-laturia. Jännitelähteen syöttämä jännite mitattiin suoraan mikro-USB -liittimen navoista HP MULTIMETER 972A -yleismittarilla ja kokoonpanon virta KENWOOD DLE 1041 -yleismittarilla. Tulokset on esitetty taulukossa 5.2.

Taulukko 5.2. *Tehonkulutuksen mittaustulokset.*

	Normaali kuva		Valkoinen kuva		Musta kuva	
	Jännite (V)	Virta (mA)	Jännite (V)	Virta (mA)	Jännite (V)	Virta (mA)
LCD	4,5	75,0	4,4	71,5	4,5	75,1
OLED	4,5	71,6	4,4	113,0	4,7	56,6
E-Ink	4,9	20,2	4,9	19,2	4,9	19,8

Koska mittauksissa oli mukana myös näyttöä ohjaavan Arduinon tehonkulutus, pyrittiin se eliminoimaan mittauksissa mittaamalla myös pelkän Arduinon tehonkulutus. Jokainen Arduino irrotettiin kytkennästä ja mitattiin Arduinon yli oleva jännite ja virrankulutus. Tulokset on esitetty taulukossa 5.3, johon on lisätty laskennallinen tehonkulutus milliwatteina.

Taulukko 5.3. *Arduinon tehonkulutus.*

	Jännite (V)	Virta (mA)	Teho (mW)
LCD	4,8	19,9	95,5
OLED	4,6	16,7	76,8
E-Ink	4,9	16,8	82,3

Lopulliset tulokset saatiin laskemalla mitatuista taulukon 5.2 tuloksista kokonaistehonkulutukset, ja vähentämällä tuloksista taulukossa 5.3 näkyvät Arduinoiden tehonkulutukset. Lopulliset tulokset on esitetty taulukossa 5.4.

Taulukko 5.4. Lasketut näyttöjen tehonkulutukset.

	Normaali kuva Teho (mW)	Valkoinen Kuva Teho (mW)	Musta kuva Teho (mW)
LCD	242,0	219,1	242,4
OLED	245,4	420,4	189,2
E-Ink	16,7	11,8	14,7

Mittauksissa ilmeni paljon vaihtelua, joka luo virhettä lopullisiin tuloksiin. Mittaustuloksia tarkasteltaessa yksi selvä virhelähde on vaihteleva jännite. Käytetty jännitelähde ei kyennyt tuottamaan vakiojännitettä, vaan jännite riippui kuormasta. Osasyynä jännitteen vaihteluun saattoi olla myös käytetyt koekytkentälevyt ja johtimet, jolloin kytkennässä oli paljon liitoksia ja ohuita johtimia. Saadut Arduinoiden tehonkulutuksen tulokset eivät ole myöskään aukottomia, koska oikeasti tehonkulutukseen vaikuttaa myös IO-pinneissä oleva kuorma. Arduinoiden tehonkulutus mitattiin kuitenkin ilman kuormaa.

Saadut näyttöjen tehonkulutukset sisältävät sekä näyttöpaneelin, että näyttömoduulin sisältävän ohjauspiirin tehonkulutuksen. Jopa saman ohjauspiirin tehonkulutus voi vaihdella riippuen esimerkiksi näytön resoluutiosta, toistettavasta sisällöstä ja piirin käyttämisestä virranhallintaominaisuuksista. Työssä käytettyjen näyttömoduuleiden ohjainpiireistä E-Ink ja LCD tuki datalehtien [26][24] mukaan jonkinlaista lepotilaa, jolla ohjainpiirin tehonkulutusta pystyisi laskemaan. Kuitenkin OLED-moduulissa käytetty RS0010 ei datalehtien [25] mukaan sisältänyt lepotilaa, jolla näytön ollessa aktiivinen olisi tehonkulutusta voinut pienentää. Tästä syystä ohjainpiirit päätettiin pitää aktiivisena mittauksen aikana.

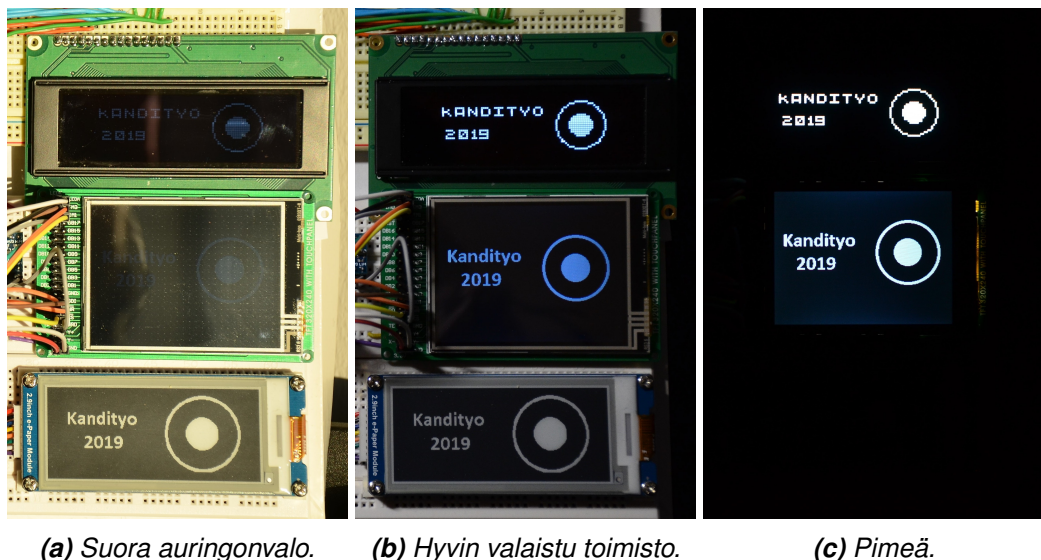
Edellä mainittujen syiden takia tulokset ovat enemmän suuntaa antavia, kuin absoluuttisia. Tuloksista on kuitenkin nähtävissä eri näyttötyyppien piirteitä tehonkulutuksen kannalta. Vertailtaessa näyttötyyppien tehonkulutuksia keskenään, on E-Ink -näytön tehonkulutus vain murto-osa LCD:sta ja OLED:sta, eikä toistettava kuva oleellisesti vaikuta näytön tehonkulutukseen. Teoriassa E-Ink -näytön tehonkulutus pitäisi olla lähellä nollaa, kun kuva pysyy staattisena. Myös taulukkoon 5.1 merkattu valmistajan ilmoittama tehonkulutus on vain 0,017 milliwattia. Näin ollen voidaan arvioida, että mitattu tehonkulutus painottuu lähinnä näytössä käytettyyn ohjauspiiriin.

LCD-näytön tehonkulutus pysyy samassa suuruusluokassa riippumatta toistettavasta kuvasta ja on hyvin linjassa valmistajan ilmoittamaan (taulukko 5.1). Täysin valkoisella kuvalla tehonkulutus on hieman pienempi, mitä ehkä voi perustella, jos näytön LC-rakenne on niin sanottu normally white -tyyppiä, eli ilman ohjausta pikseli on valkoinen. Valmistajan datalehdessä [24] LC-rakenteen tyyppiä ei kuitenkaan mainita. Huomion arvoisena seikkana on muistettava, että LCD-näytön tehonkulutuksesta suurin osa muodostuu taustavalosta. Tässä mittauksessa taustavalon virta oli noin 75% valmistajan ilmoittamasta maksimiarvosta. Eli tehonkulutusta voi laskea himmentämällä taustavaloa, tai vaihtoehtoisesti kirkkaammalla taustavalolla tehonkulutus nousee hieman.

OLED-paneelin tehonkulutus vaihtelee riippuen toistettavasta kuvasta, joka teorian perusteella oli odotettavissa. Normaalaa käyttökohdetta imitoivassa kuvassa tehonkulutus oli samaa luokkaa LCD:n kanssa. Täysin mustalla näytöllä tehonkulutus oli noin 22,9% pienempi ja täysin valkoisella näytöllä peräti 71,3% suurempi kuin normaalia käyttöä imitoivalla kuvalla. Teoriassa mustan näyttöpaneelin virrankulutus pitäisi olla erityisen pientä, joten mustan näytön mittaustulos vaikuttaa aika suurelta. Voi olla, että näyttöpaneelissa käytetty ohjauspiiri ei ole tehonkulutukseltaan paras mahdollinen.

5.4 Luettavuus eri valaistusolosuhteissa

Näyttöjen käytännön suorituskykyä testattiin vertailemalla näyttöjen luettavuutta eri valaistusolosuhteissa. Kuvassa 5.2 on esitetty vertailut suorassa auringonpaisteessa, hyvin valaistussa työhuoneessa ja pimeässä.



Kuva 5.2. Näyttöjen luettavuuden vertailu.

Kirkkaassa auringonpaisteessa OLED- ja LCD-näyttöjen luettavuus oli varsin heikko. Kirkkaassa valossa paneelien kiiltävä pinta aiheuttaa heijastuksia eikä paneelien tuottama valon intensiteetti riitä kumoamaan heijastusten intensiteettiä. Paneeleissa todennäköisesti on joitain heijastuksien vähentämiseen tarkoitettuja kalvoja, joilla luettavuutta on pyritty parantamaan. Verrattuna E-Ink -näyttöön luettavuus on kuitenkin heikko. E-Ink:n luettavuus auringonpaisteessa on erittäin hyvä, joskin musta väri alkaa näyttämään enemmän harmaalta.

Kuvan 5.2 b-kohdassa valaistus mukaillee loisteputkilla valaistua toimistotilaa. Tällaisessa valaistuksessa kaikkien kolmen näytön luettavuus on varsin hyvä, eikä mikään näyttötyyppi erotu erityisemmin parhaimmaksi. Ihmissilmällä on kuitenkin taipumus kohdistaa katse kirkkaisiin valoihin, joten LCD ja OLED saattaa herättää käyttökohteesta riippuen enemmän huomiota kuin ympäristöön helpommin sulautuva E-Ink.

Pimeässä E-Ink näyttö on ymmärrettävästi ilman erillistä valonlähdettä lukukelvoton. Vertailu OLED:n ja LCD:n välillä painottuu myös enemmän kuvan laatuun ja kontrastiin, kuin luettavuuteen, koska luettavuus on molemmilla näytöillä hyvä. OLED menee kuvan laadussa pidemmälle, koska sen itse-emittoivan rakenteen ansiosta musta on mustaa. LCD:ssa mustat alueet hohtavat taustavaloa lävitseen, joka tekee mustasta enemmän harmaata. Taustavalon vuotoa on myös havaittavissa näytön oikeassa reunassa.

6 YHTEENVETO

Ottamalla huomioon kappaleissa 3, 4 ja 5 käsitellyjä asioita, voi tehdä eräänlaisia johtopäätöksiä eri näyttötekniikoiden soveltuvuudesta eri käyttökohteisiin. Tämän työn käyttökohteita voisi olla esimerkiksi akulla toivat mobiililaitteet, kuten puhelimet, kellot ja kamerat. Näitä käyttökohteita yhdistävät näytön laadulliset vaatimukset muun muassa kirkkauden, vasteajan ja värintoiston osalta. Käyttökohde voisi olla myös omalla akulla tai paristolla toimiva laite, jonka tärkein vaatimus on pieni virrankulutus, eikä esimerkiksi vasteajalla tai värintoistolla ole niin suuria vaatimuksia. Tällainen voisi olla esimerkiksi kaupan elektroninen hintanäyttö tai IOT-laitteen statistiikkaa esittävä informaationäyttö.

Ensimmäisessä tuotekategoriassa, joka sisältää muun muassa puhelimet ja kamerat, näytön kuvanlaadulliset ominaisuudet ovat tärkeitä. Niinpä tällä hetkellä vaihtoehtoina on käytännössä LCD ja OLED. Kappaleen 5 luettavuustestien perusteella OLED-paneeli kykenee parempaan kuvanlaatuun kuin LCD. Niinpä parasta kuvanlaatua etsittäessä OLED olisi vahvoilla. Lopulliseen valintaan voi kuitenkin vaikuttaa monet muut tekijät kuten hinta ja saatavuus. LCD on tekniikkana OLED:ia vanhempi, mikä näkyy kehittyneissä valmistustekniikoissa ja lopulta näytön hinnassa. Kuten tässäkin työssä pystyi näkemään, samalla rahallisella summalla sai teknisesti, esimerkiksi resoluution ja väriavaruuden osalta, kehittyneemmän LCD-näytön kuin OLED-näytön. Hinta voikin olla suuressa roolissa lopullista valintaperustetta tehdessä. Pitkän kehityksen tuloksena LCD:lla mahdollistetaan hyvin moneen käyttökohteeseen riittävä kuvanlaatu. OLED on vahvempi silloin, kun etsitään viimeiseen asti parasta kuvanlaatua. Virran kulutuksen kannalta sekä LCD että OLED ovat samassa suuruusluokassa. Molempien virrankulutukseen pystytään vaikuttamaan myös käytön aikana, LCD:ssa taustavalon kirkkautta säätämällä ja OLED:ssa näytettävällä sisällöllä. Kuitenkin esimerkiksi puhelimesta tai kamerasta itse sisältö on tärkeä, jolloin OLED:n virtaa säästävää kuvanmuokkausta ei välttämättä hirveästi päästä soveltamaan, on sekä LCD että OLED tehonkulutukseltaan samassa suuruusluokassa.

Toinen esitetty käyttökohde, jossa tärkein ominaisuus on matala tehonkulutus, ja näytön kuvanlaadulliset ominaisuudet ovat sivuroolissa, näytön valintaperusteet voivatkin olla hyvin erilaiset. Käyttökohde voi olla esimerkiksi anturi, joka on suurimman osan ajasta itsenäisenä ja näytön käyttötarkoitus on statistiikan esittäminen. Näyttö voidaan suunnitella käynnistymään vain silloin, kun esimerkiksi asentaja painaa nappia ja haluaa tarkastella tietoja, jolloin suurimman osan ajasta näyttö on sammutettuna. Tällaisessa käyttökohteessa kaikki kolme näyttötekniikka voisi olla soveltuvia. Jos asentajalla oletetaan olevan käytössä esimerkiksi taskulamppu ei E-Ink:n heijastava rakennekaan olisi ongelma. Vaik-

ka tässä käyttökohteessa näytön kuvanlaadullisilla ominaisuuksilla ei olekaan niin suurta merkitystä, pystyisi LCD:ta tai OLED:ia käytettäessä hyötymään näytön laajemmasta väriavaruudesta E-Ink:iin nähden esimerkiksi selkeyttämään datan esittämistä. Myös jos näytön halutaan olevan luettavissa myös pimeässä ilman apuvälineitä, jää vaihtoehtoiksi LCD ja OLED.

Jos käyttökohteessa näytön sisältö pitää olla jatkuvasti luettavissa, mutta virrankulutus pitää minimoida, on E-Ink vahvoilla. Tällainen käyttökohde voisi olla esimerkiksi kaupan elektroninen hintanäyttö. Näytön elektroniikka voisi olla lepotilassa suurimman osan ajasta, paitsi silloin kun näytön sisältö päivitetään, esimerkiksi kerran vuorokaudessa. Tällaisella ratkaisulla laite olisi pois päältä suurimman osan ajasta, jolla saavutettaisiin erittäin pitkä akunkesto.

Loppupeleissä oikean näyttötekniikan valitsemiseen on vaikeata tehdä pysyvää rajaa, ja näyttöjä voidaan jakaa eri käyttötarkoituksiin vain periaatteellisella tasolla. Käytännössä näyttöä valittaessa muuttujia on niin paljon, että jokainen projekti tai tuote on loppupeleissä yksilö, ja näytön valintaa pitää tarkastella sen hetkisen saatavuuden, hinnan, tehonkulutuksen tai vastaavien oleellisten ominaisuuksien perusteella ja tehdä valinta sen mukaan mikä tuotteeseen parhaiten soveltuu.

LÄHTEET

- [1] Boer, W. den. *Active Matrix Liquid Crystal Displays : Fundamentals and Applications*. Elsevier Science & Technology, 2005, 252.
- [2] Kodon, M. *OLED display and lighting*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2017, 361 p.
- [3] Heikenfeld, J., Drzaic, P., Yeo, J.-S. ja Koch, T. Review Paper: A critical review of the present and future prospects for electronic paper. *Journal of The Society for Information Display* 19.2 (2011), 129–156.
- [4] *history*. Luettu 3.12.2019. URL: <http://www.einkcorp.co/history.html>.
- [5] Lee, J.-H., Liu, D. N. ja Wu, S.-T. *Introduction to flat panel displays*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2008, 282 p.
- [6] Wang, T.-H., Liu, K., Dai, Y.-Y., Yeh, C., Chen, W., Chen, C.-J., Tsao, C., Li, Y.-H., Shih, L.-W. ja Lih, J. Ultra Low Power AMOLED for Wearable Application. *SID Symposium Digest of Technical Papers* 48.1 (2017), 1919–1921. URL: <http://web.b.ebscohost.com/ehost/detail/detail?vid=0&sid=d3e5eba0-9990-4f9f-ab07-d6b4481a08ee%5C%40pdv-sessmgr05&bdata=JkF1dGhUeXB1PWVnb2tpZSxpcCx1aWQmc2l0ZT1laG9zdC1saXZlJnNjb3B1PjNpdGU%5C%3d#AN=123395384&db=aci>.
- [7] Bhowmik, A. K., Li, Z. ja Bos, P. J. *Mobile Displays: Technology and Applications*. J. Wiley & Sons, 2008, 625 p.
- [8] Chen, Y., Au, J., Kazlas, P., Ritenour, A., Gates, H. ja McCreary, M. Flexible active-matrix electronic ink display. *Nature; London* 423.6936 (2003), 136. URL: <http://dx.doi.org.libproxy.tuni.fi/10.1038/423136a>.
- [9] Zhang, Y.-D., Hu, W.-J., Qiu, Z.-G., Xu, J.-Z., Yang, M.-Y., Gu, Y.-F., Cao, J.-X., Chen, P., Liu, G.-S. ja Yang, B.-R. Backflow Effect Enabling Fast Response and Low Driving Voltage of Electrophoretic E-ink Dispersion by Liquid Crystal Additives. *Scientific Reports (Nature Publisher Group)* 9 (2019), 1–8. URL: <https://libproxy.tuni.fi/login?url=https://search-proquest-com.libproxy.tuni.fi/docview/2298761431?accountid=14242>.
- [10] *Electronic Ink*. luettu 2019-10-28. URL: <https://www.eink.com/electronic-ink.html>.
- [11] W., K. ja J., T. Driving Method of Three-Particle Electrophoretic Displays. *IEEE Transactions on Electron Devices* 65.3 (2018), 1023–1028.
- [12] François, T. *OLED Microdisplays : Technology and Applications*. John Wiley & Sons, Incorporated, 2014, 288.
- [13] Hammer, M. ja Hinnen, K. J. G. Local Luminance Boosting of an RGBW LCD. *JOURNAL OF DISPLAY TECHNOLOGY* 10.1 (2014), 33–42. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=6583224>.

- [14] Cho, H. ja Kwon, O.-K. A backlight dimming algorithm for low power and high image quality LCD applications. *IEEE Transactions on Consumer Electronics* 55.2 (2009), 839–844. URL: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/document/5174463>.
- [15] Song, J., Kim, K.-H., Kim, E., Moon, C.-K., Kim, Y.-H., Kim, J.-J. ja Yoo, S. Lensfree OLEDs with over 50% external quantum efficiency via external scattering and horizontally oriented emitters. *Nature Communications* 9 (2018), 1–10. URL: <https://libproxy.tuni.fi/login?url=https://search-proquest-com.libproxy.tuni.fi/docview/2086677866?accountid=14242>.
- [16] Mian, D. ja Lin, Z. Chameleon: A Color-adaptive Web Browser for Mobile OLED Displays. *Proceedings of the 9th International Conference on Mobile Systems, Applications, and Services*. MobiSys '11. ACM, 2011, 85–98. URL: <http://doi.acm.org.libproxy.tuni.fi/10.1145/1999995.2000004>.
- [17] Tan, K. W., Okoshi, T., Misra, A. ja Balan, R. FOCUS:A usable & effective approach to OLED display power management. In *Proceedings of the ACM*. UbiComp. 2013, 573–582.
- [18] Xiang, C., Kent W, N., Hucheng, Z., Liu, Y. ja Yiran, C. FingerShadow: An OLED power optimization based on smartphonetouch interactions. In *Proceedings of the USENIX HotPower*. 2014, 6:1–6:5.
- [19] Lin, C.-H., Kang, C.-K. ja Hsiu, P.-C. Quality-Enhanced OLED Power Savings on Mobile Devices. *ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems* 24.1 (2019). URL: <https://dl-acm-org.libproxy.tuni.fi/citation.cfm?doid=3293467.3243215>.
- [20] *Samsung Galaxy Fold*. Luettu 13.12.2019. URL: <https://www.samsung.com/fi/smartphones/galaxy-fold/>.
- [21] Kao, W.-C., Liu, C.-H., Liou, S.-C., Tsai, J.-C. ja Hou, G.-H. Towards Video Display on Electronic Papers. *Journal of Display Technology* 12.2 (2016), 129–135.
- [22] Heilmann, J. Electronic Paper. *International Preservation News* 48 (2009), 17–19.
- [23] *All-new Kindle*. Luettu 22.11.2019. URL: https://www.amazon.com/gp/product/B07DLPWYB7/ref=s9_acsd_al_bw_c_x_1_w?pf_rd_m=ATVPDKIKXODER&pf_rd_s=merchandised-search-2&pf_rd_r=KPS68MTQXTPJDEYZNVJB&pf_rd_t=101&pf_rd_p=3a2953ed-4b39-4d77-ad5d-39fa4ce449a8&pf_rd_i=6669702011.
- [24] LTD, M.-i. T. co. *LCD MODULE SPECIFICATION*. 2015. URL: <http://www.panelook.com/upload/product/128283/201712078269.pdf>.
- [25] GmbH, D. E. *OLED-MODULE DEP 100032A-W*. 2014. URL: <https://www.tme.eu/Document/8159d565e11df515490fc532e440cdf7/DEP100032A-W.pdf>.
- [26] Rm, W. E. *SPECIFICATION*. 2017. URL: https://www.waveshare.com/w/upload/e/e6/2.9inch_e-Paper_Datasheet.pdf.
- [27] Raystar. *IC SPECIFICATION Model No. RS0010*. 2011. URL: <https://www.tme.eu/Document/746174d0ddac05c785c5271afce6c05c/RS0010.pdf>.
- [28] *2.9inch e-Paper Module*. Luettu 28.11.2019. URL: https://www.waveshare.com/wiki/2.9inch_e-Paper_Module.