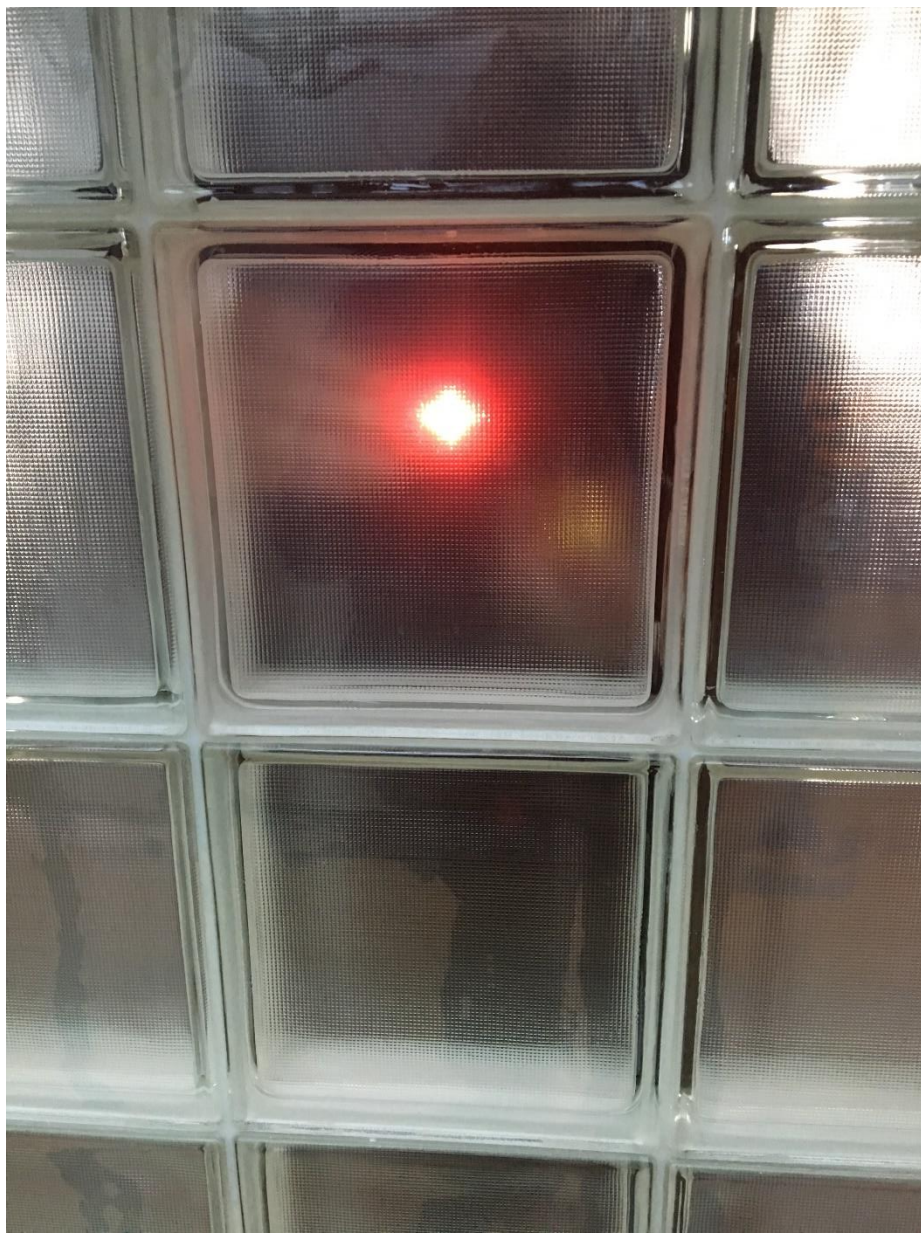


Janne Määttä TTV14SA

Led-matriisin rakentaminen



Insinööri (AMK)

Tieto- ja viestintäteknikka
insinööri tutkinto

Syksy 2020



KAMK • University
of Applied Sciences

Tiivistelmä

Tekijä: Janne Määttä

Työn nimi: Led-matriisin rakentaminen

Tutkintonimike: Insinööri (AMK), Tieto- ja viestintätekniikka

Asiasanat: Insinööri, LED, Led-matriisi, suunnitelma

Tämän työn tarkoituksena on laatia suunnitelma led-matriisin rakentamiselle. Työssä käydään läpi osien ja työmenetelmien teoriaa ja käytännön toteutusta, joiden pohjalta lukijan pitäisi kyetä toistamaan työmenetelmät ja sitä kautta tehdä oma versio työstä. Työn tilaajana toimi toinen opiskelija ja työ tehtiin hänen yrityksensä tarpeisiin.

Työ tehtiin kytkentäalustaan, koska siinä sitä on helppo muokata ja syntyvien kytkentävirheiden korjaus on helpompaa. Kytkentää ohjataan mikrokontrollerilla (tässä tapauksessa Arduino Uno) ja ohjainpiirillä ja ohjelmointi suoritetaan mikrokontrollerille kirjoitettavalla ohjelmalla. Mikäli työstä haluaa langattomasti ohjattavan, voidaan siinä käyttää Bluetooth HC-06-moduulia antamaan kytkennällä Bluetooth ominaisuuden.

Työn pääasiallisena tavoitteena oli tehdä 100 ledin matriisi mahdollisimman kustannustehokkaasti ja yleishyödyllisesti ja samalla selvittää, miten ledit toimivat ja miten eri ympäristötekijät vaikuttavat niiden toimintaan. Työssä käydään läpi myös mahdollisia kehitysideoita keskenjääneelle kokonaisuudelle.

Abstract

Author: Janne Määttä

Title of the Publication: Building a Led-matrix

Degree Title: Bachelor of Engineering

Keywords: Engineering, LED, Led-matrix

The purpose of this Bachelor's thesis was to create a guide for building a led matrix. The guide goes through the parts, work methods and necessary theory for the work which should allow the reader to replicate the work and make their own version of the project. This work was done for another student and the company he owns.

Most of the work was done on connection base in order to make it easier to fix and modify. It's controlled with Arduino Uno microcontroller unit and leds are also controlled through separate control chip which are programmed with a program specifically used to program Arduino. If it is necessary to have wireless controls you can use HC-06 Bluetooth module to give the work Bluetooth properties.

The main goal of the work was to create a led matrix consisting of 100 leds as cost efficiently as possible and also to find out how leds work and how different environmental variables affect them. The work also goes through possible ideas for improving it.

Sisällysluettelo

1.	Johdanto	6
2.	RGB-ledit.....	7
2.1	Värit	7
2.2	Värien sekoittuminen.....	9
2.3	Myötä- ja kynnysjännite.....	10
2.4	Ledit tuottavat lämpöä.....	11
2.4.1	Lämmön vaikutus ledeihin	11
2.4.2	Lämmön pois siirtäminen.....	12
2.5	Ledien tuottaman valon värin muutos ajan kanssa	14
3.	Lasi ja sen ominaisuudet.....	16
4.	Ledien ohjaus.....	18
4.1	RGB-ledien tyypit	18
4.2	Virtalähde	19
4.3	V_{LED} , eli virtalähteen jännitekapasiteetti	20
4.4	LED-ohjaimen topologia.....	21
4.5	Suoraohjausmetodi	21
4.6	Aikamultipleksausmetodi.....	21
4.7	Autonominen toiminta.....	26
4.7.1	Etuvastuksen mitoitus.....	27
4.7.1	V_{LED} in mitoitus	28
5.	Työn toteutus	29
5.1	Käytettävät komponentit	30
5.1.1	Arduino Uno mikrokontrolleri.....	31
5.1.2	Bluetooth HC-06 moduuli	32
5.1.3	TLC5971/TLC59711 LED-ohjainpiiri	32

5.2	Ohjelmakehitys.....	33
5.2.1	Ledien ohjauskoodi	33
5.2.2	Pulssinleveysmodulaatio (PWM)	35
5.2.3	Analoginen ledien himmennys.....	36
5.2.4	LED-ohjainpiiri	37
5.3	Ledit lasin takana.....	38
5.4	Prototyypin valmistus	39
5.4.1	Koekytkenän laajennus	42
5.4.2	Piirien yhteen liittäminen.....	43
5.4.3	Prototyypin valmistus protolevyille	45
5.4.4	Takaisin kytkentäalustalle	46
6.	Pulmia ja ratkaisuja.....	47
6.1	Ongelmien ratkaisesta	47
6.2	Kondensaattorien ongelmat	48
6.3	Piirien juottaminen alustaan	48
6.4	Rikkoutunut piiri.....	48
6.4.1	Mikä voi aiheuttaa piirin rikkoutumisen?	49
6.5	Palamattomat ledit	49
7.	Pohdintoja	50
8.	Yhteenveto	51

Termistöä

AC-to-DC-muunnos	Vaihtojännitteen muuntaminen tasajännitteeksi
Bernoullin laki	Kaasun ja nesteen virtaukseen liittyvä fysiikan laki, jonka mukaan virtauksessa nopeuden kasvaessa paine alenee.
LED	Light Emmiting Diode eli valoa tuottava diodi.
Maa	Elektronikassa maalla tarkoitetaan poistumistietä, jota pitkin virta ja signaali palaavat takaisin alkuun ja jälleen kierto. Kyseinen määritelmä pätee vain alle 50 voltin kytkentöihin.
PWM	Pulssinleveysmodulointi on modulointitapa, jossa kuormaan menevää jännitettä säädetään muuttamalla pulssisuhdetta.
Snellin laki	Taittumislaki, joka kuvaa valon taittumista kahden aineen rajapinnalla.
SRAM	Staatinen RAM-muisti on puolijohdetekniikalla toteutettu muistityyppi, joka säilyttää sille tallennetun ohjelman pitkiä aikoja ilman virkistystä ja suorittaa sen niin kauan kuin laitteessa (esim. Arduino) kulkee virta tai sen tilalle ajetaan uusi ohjelma.
Venturi-ilmiö	Bernoullin lakiin liittyvä ilmiö, jossa virtaavan aineen nopeus kasvaa ja paine pienenee sen kulkiessa kavennetun putken läpi.

Alkusanat

Työ alkoi suunnitelmana tehdä LED-näyttö lasiseinään, mistä voisi nähdä mm. kellonajan. Pikkuhiljaa työ muokkautui niin, että näyttö tehtäisiin lasiseinän sijasta lasitiilistä tehtyyn seinään ja tällä tavalla tehtynä jokainen lasitiili olisi oma pikselinsä.

Haluaisin kiittää seuraavia henkilöitä:

Henri Partasta, jolta sain työn aiheen. Henri on itsessään melkoinen ideasampo, ja vaikka osa ideoista ei aina toteudu, on niistä ollut ilo keskustella hänen kanssaan.

Markku Karppista, joka auttoi aiheeseen liittyvien kysymysten ratkomisessa, työn tarkistamisessa ja toteutuksessa.

Ohjaavaa opettajaani Asko Kinnusta, joka ohjasi työtäni ja auttoi tarkistamalla työtä ja ehdottamalla tarvittaessa lähteitä työtä varten.

Aino Honkasta, joka esitteli minulle hänen ryhmänsä tekemän LED-pöydän ja antoi käyttää sitä esimerkkinä työssäni.

Harri Honkasta, joka auttoi led-ohjaimen valitsemisessa, kytkennän mitoittamisessa ja antoi käyttää mikroskooppiaan kytkentöjen juottamiseen ja tarkistamiseen.

Konsta Siekkeliä, joka auttoi kytkennän testausohjelman tekemisessä ja tarkistamisessa.

1. Johdanto

Miettiessäni ja etsiessäni työlleni aihetta sain Henri Partaselta ehdotuksen suunnitella led-matriisi, jonka voisi kiinnittää rakennuksen sisä- tai ulkoseinään ja missä voisi näyttää kellonajan tai pyörittää tekstiä.

Ensin suunnitelmana oli luoda 100 ledin 10x10 matriisi, mutta se tavoite pienennettiin myöhemmin 25 ledin 5x5 matriisiin. Ajatuksena oli, että tehdään pienempi työ, mistä on helpompi selvittää käytetyn ohjainpiirin tuomat rajoitukset ja sitä mukaa kasvattaa matriisin kokoa. Yhtenä ajatuksena työlle oli myös Bluetooth ohjattavuus ja sitä kautta etähallinta, mutta sen jätin pois työn fyysisen toteutuksen tieltä.

Ohjelmointialustaa miettiessä vaihtoehtoina olivat Raspberry Pi ja Arduino. Henri olisi halunnut käyttää Raspberry Pi kehitysalustaa, joka olisi tarjonnut hyvin tehoa ja joustavuutta ohjelmoinnin ja virran jaon osalta, mutta sen kytkeminen olisi ollut turhan monimutkaista. Valitsimme Arduinon, koska se tarjoaa yhtä hyvin joustavuutta ja on huomattavasti halvempi ja helpommin saatavilla oleva vaihtoehto.

Seuraavaksi oli valittava työssä käytettävä ohjainpiiri. Tähän osaan sain apua piireistä enemmän tietävältä Harri Honkaselta, jonka kanssa aloimme rajata olemassa olevista piireistä sopivinta. Valikoima ei ollut kovin laaja ja lopulta valitsimme TLC59711-ohjainpiirin. TLC59711 on 20 pinninen piiri, missä 12 pinniä on tarkoitettu ledien ohjaamiseen (kolme kullekin perusvärille). Jokainen pinni kykenee ohjaamaan 3-5 lediä, mutta vain ryhminä, mikä tekee yksittäisten ledien ohjaamisesta vähintäänkin hankalaa.

Työtä varten oli otettava enemmän selvää ledeistä ja niiden toiminnasta ja millaisia rajoituksia niiden toimintaan liittyy. Tällä tavalla halusin laajentaa omaa tietämystäni, mutta myös selvittää, miksi asioita on tehtävä tavalla, millä ne on tehty ja tehdään yleisestikin. Myöhemmin asiaan tuli mukaan myös lasitiilet, minkä takia minun oli otettava selvää, miten valo käyttäytyy osuessaan lasiin ja kulkiessaan sen läpi. Varsinaisen fyysisen työn olen rakentanut leipäpöydälle, koska siinä sitä on helppo muokata mahdollisten kytkentävirheiden varalta.

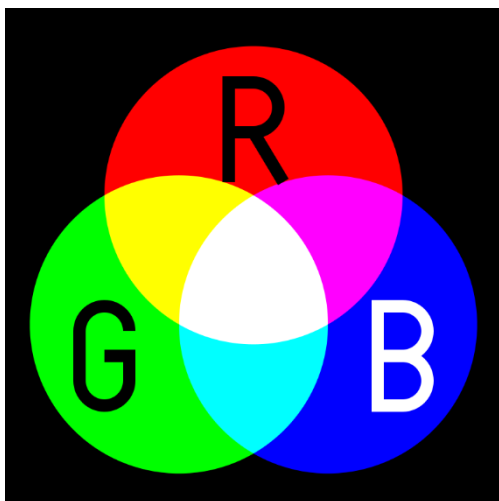
2. RGB-ledit

Valoa tuottavat diodit eli hohtodiodit, tai yksinkertaisesti ledit, ovat puolijohdekomponentteja, jotka tuottavat valoa, kun niiden läpi johdetaan sähkövirta. Normaalit ledit kykenevät tuottamaan vain yhdenväristä valoa, mutta erikoistuneemmat RGB-ledit kykenevät tuottamaan useita eri värejä.

Mistä ledit sitten saavat erilaisen värityksen? Väri määrittyy ledin valmistukseen käytetyn puolijohdemateriaalin mukaan, mikä myös määrittää ledin tarvitseman etujännitteen (V_F) suuruuden. Yleisimmät materiaalit ovat Indium Gallium Nitridi (Indium Gallium Nitride, InGan) ja Alumiini Gallium Indium Nitridi (Aluminium Gallium Indium Nitride, AlGaInP tai AlInGaP), jotka molemmat ovat seoksia nimessä mainituista metalleista. InGan:ä käytetään sinisten, valkoisten, vihreiden (true green) ja UV-ledien valmistuksessa ja AlGaInP:ä käytetään punaisten, keltaisten ja oranssien ledien valmistuksessa [1].

2.1 Värit

RGB-ledit ovat ledejä, joissa on yhdessä kolme eriväristä lediä: punainen (R), vihreä (G) ja sininen (B). Tämän takia RGB-ledi voi tuottaa useaa eriväristä valoa, esim. keltaista ja violettiä ja useita eri värien sävyjä, yhdistelemällä kolmea perusväriä eri kirkkauksilla (kuva 1). Ledit ovat myös hyvin lähellä toisiaan, minkä takia ihmissilmä ei erota niitä erikseen vain niiden tuottaman väriyhdistelmän [2].



Kuva 1. Värien sekoittuminen RGB-LED-eillä. Vihreä korvaa keltaisen perusvärinä, verrattuna perinteiseen väriympyrään [2].

Toisin kuin perinteisessä väripaletissa, missä kolme perusväriä ovat punainen, sininen ja keltainen, elektroniikassa perusvärit ovat punainen, sininen ja vihreä. Tämä johtuu siitä, että vihreällä saadaan tehtyä enemmän eri värejä ja värisävyjä, kun sitä sekoitetaan muihin väreihin.

Typical LED Characteristics			
Semiconductor Material	Wavelength	Colour	V_F @ 20mA
GaAs	850–940nm	Infra-Red	1.2v
GaAsP	630–660nm	Red	1.8v
GaAsP	605–620nm	Amber	2.0v
GaAsP:N	585–595nm	Yellow	2.2v
AlGaP	550–570nm	Green	3.5v
SiC	430–505nm	Blue	3.6v
GaInN	450nm	White	4.0v

Kuva 2. Erivärisillä ledeillä on omat lähtöjännitteet ja niiden puolijohdeet myös valmistetaan eri materiaaleista. Termit vasemmalta oikealle: puolijohdemateriaali, aallonpituus, väri ja myötäjännite [2].

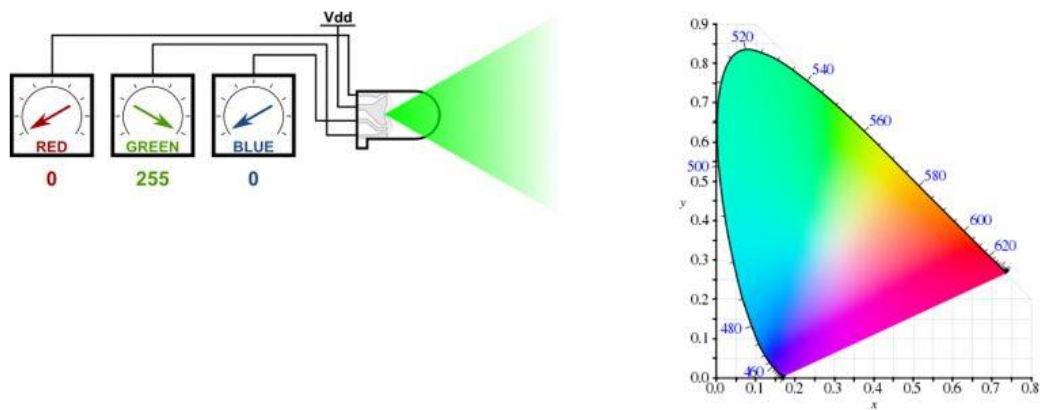
Monet RGB-ledit voivat vaatia jokaiselle eri värille myös erilaiset myötäjännitteet. Tällöin on varmistettava, että ledit saavat tarpeeksi virtaa toiminnan takaamiseksi ja virrat jakautuvat tasaisesti.

Ledejä valittaessa kannattaa hinnan lisäksi kiinnittää huomiota myös ledien laatuun. Paremmista materiaaleista valmistetut ja hyvin muotoillut ledit kestävät paremmin lämpöä ja toimivat pidempään.

2.2 Värien sekoittuminen

Värien voimakkuutta ledeissä tarkastellaan asteikolla 0-255, missä 0 on olematon ja 255 on täysimääräinen väri. Jokaisella kolmella värillä, punainen, vihreä ja sininen, on oma laskuri, joka seuraa värin voimakkuutta. Esimerkiksi mikäli vihreän arvo on 255 ja punaisen ja sinisen arvot ovat 0, kuvan 3 vasemmanpuoleisen osan mukaisesti, näyttää ledi pelkästään vihreää valoa. Jokaisen värin arvon ollessa 255 syntyy valkoista valoa ja arvolla 0 ledit eivät tuota valoa.

Näyttämällä kaikkia kolmea väriä eri voimakkuuksilla saadaan aikaan laaja väriskaala aina eri väreistä eri värisävyihin. Kuvan 3 oikeanpuoleinen osa on CIE:n (The International Commission of Illumination) väriavaruusmalli, jonka ensimmäinen versio kehitettiin vuonna 1931, johon useimmat myöhemmät mallit pohjautuvat.

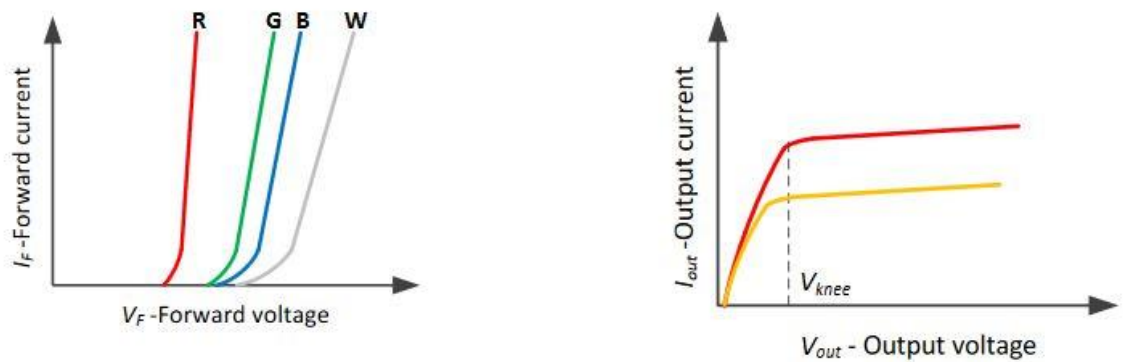


Kuva 3. Värien sekoittuminen Ja värien sijainti XYZ-värikartassa (numerot ovat nanometrejä) [3]

RGB-ledien väriskaala on hyvin laaja ja skaalan laajuus riippuu siitä miten ne ohjelmoidaan toimimaan. Esimerkiksi antamalla jokaiselle ledille 8-bittisen arvon voidaan niillä näyttää 16,8 miljoonaa väriä ja korkeammilla arvoilla tämä luku voidaan nostaa paljon korkeammaksi. [3]

2.3 Myötä- ja kynnysjännite

Myötäjännitteellä (V_F) tarkoitetaan jännitettä, joka kulkee ledin läpi anodista katodiin. Myötävirta vaihtelee ledin värin mukaan, kuten kuvasta 4 ja Yleistä-kohdan kuvasta 2 on nähtävissä.



Kuva 4. Myötä- ja kynnysjännite taulukot [3]

Kynnysjännitteellä (V_{knee}) tarkoitetaan jännitettä, jonka ledi tarvitse tullakseen johtavaksi. Jännitteen ollessa liian alhainen ledi ei johda virtaa ja ei loista, mutta liian suuri jännite aiheuttaa liiallisen virrankulutuksen ja voi pahimmillaan aiheuttaa ledin tuhoutumisen.

2.4 Ledit tuottavat lämpöä

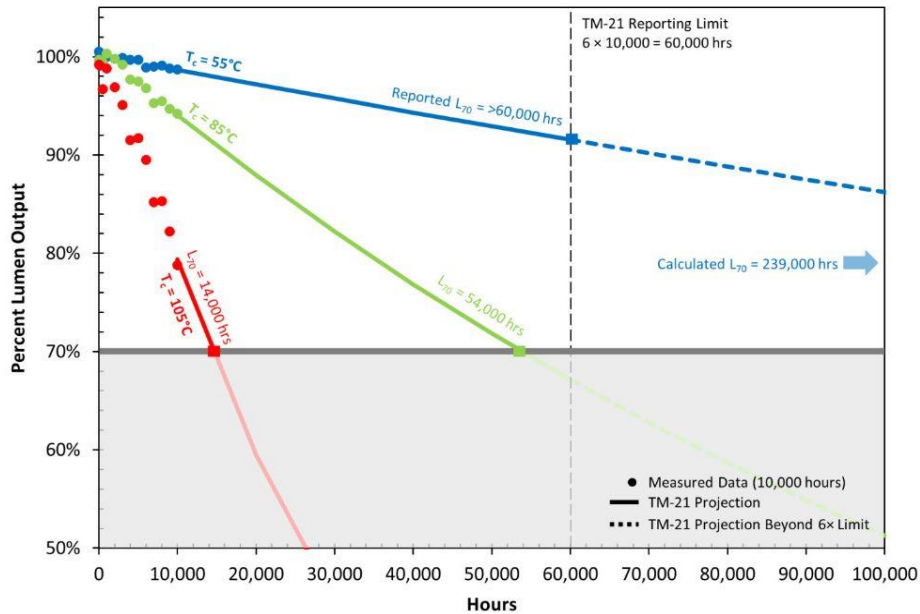
Toisin kuin vanhanaikaiset halogeeni- ja hehkulamput ledit eivät tuota lämpöä infrapunasäteilynä, minkä takia niiden valonsädekimppu ei tunnu lämpimältä sitä kosketettaessa. Tämän takia voisi luulla, että ledit eivät tuota lainkaan lämpöä. Todellisuudessa ledien sisältämä puolijohdekytkentä on varsin epätaloudellinen, sillä se kykenee käyttämään vain 5-40 % saamastaan virrasta tehokkaasti ja n. 65–90% ledeille tulevasta virrasta muuttuu lämmöksi [4].

2.4.1 Lämmön vaikutus ledeihin

Lämpö on todella suuri ongelma ledeille. Niiden suorituskyky heikkenee, ja niiden tuottaman valon väri voi muuttua korkeissa lämpötiloissa. Pitkäaikainen altistuminen voi aiheuttaa nopeaa suorituskyvyn heikkenemistä ja ennen pitkää ledien rikkoutumisen.

Kuvassa 5 on nähtävissä, miten ledin kyky tuottaa valoa muuttuu lämpötilan kasvaessa. Matalassa lämpötilassa (sininen viiva, lämpötila 55-astetta celsiusta) ledin elinikä voi olla yli 60000 tuntia (melkein 7 vuotta) ja teoriassa elinikä voi olla jopa 239000 tuntia (n. 27 vuotta).

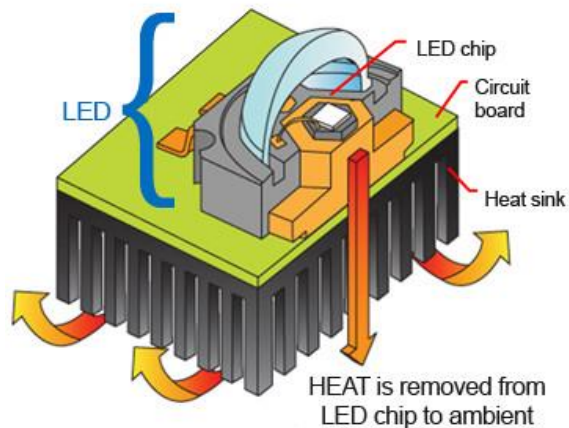
Korkeissa lämpötiloissa (punainen viiva, lämpötila 105-astetta celsiusta) ledin elinikä voi pudota vain 14000 tuntiin (hieman yli 1,5 vuotta) ja teoriassa elinikä olisi maksimissaan n. 26000 tuntia (n. 3 vuotta) [5].



Kuva 5. Lämpötilan vaikutus lediin, TM-21 koteloinnilla. Pystysuoralla rivillä on valontuotto prosentteina (yksikkönä lumeni) ja vaakasuoralla ledin elinikä tunneissa. [5]

2.4.2 Lämmön pois siirtäminen

Ledien tuottama lämpö olisi johdettava pois ledeistä. Tämä voidaan tehdä esimerkiksi piirilevyn pohjaan kiinnitettävän jäähdytys-elementin avulla tai tuulettimella. Tarvittaessa voidaan käyttää myös useampaa menetelmää yhdessä.



Kuva 6. Jäähdytyslementti asennettuna ledin ja piirilevyn väliin, jotta ylimääräinen lämpö saadaan johdettua pois [5].

Jäähdytyslementit valmistetaan yleensä metallista sen hyvän lämmönjohtokyvyn takia. Yleisin käytetty materiaali on alumiini sen suhteellisen helpon saatavuuden ja halvan hinnan takia. Kupari on materiaalina kalliimpi vaihtoehto, mutta se johtaa lämpöä alumiinia paremmin. Jäähdytyslementtejä voidaan valmistaa myös komposiittimateriaaleista, mutta niitä suositellaan käytettäväksi vain vähän lämpöä tuottavissa kytkennöissä. Jäähdytyslementit myös värjätään lämmön paremman siirtymisen takaamiseksi [6].

Jäähdytyslementti ohjaa lämmön itsensä kautta ympäröivään ilmaan, jolloin ilman lämpötila kasvaa. Mikäli ilman lämpötila kohoaa samalla tasolla jäähdytyslementin kanssa, lämpö ei enää siirry.

Kuvassa 7 on nähtävissä kaksi yleistä tuuletinmallia.

- Perinteisenmalliset tuulettimet (vasemmanpuoleinen)
 - Puhaltavat suuria määriä ilmaa, mutta pienemmällä paineella.
 - Käyttävät propellia ilman siirtämiseen.
 - Käytetään esimerkiksi tietokoneiden yleistuulettimina.
 - Voivat aiheuttaa pyörteitä.
- Puhallinmalliset tuulettimet (oikeanpuoleinen)
 - Puhaltavat suuria määriä ilmaa pienemmällä paineella perinteiseen tuulettimeen verrattuna.
 - Käytetään esimerkiksi näytönohjaimien jäähdyttämiseen.
 - Hyödyntävät Venturi-ilmiötä ilman siirtämisessä estääkseen pyörteiden syntymistä.

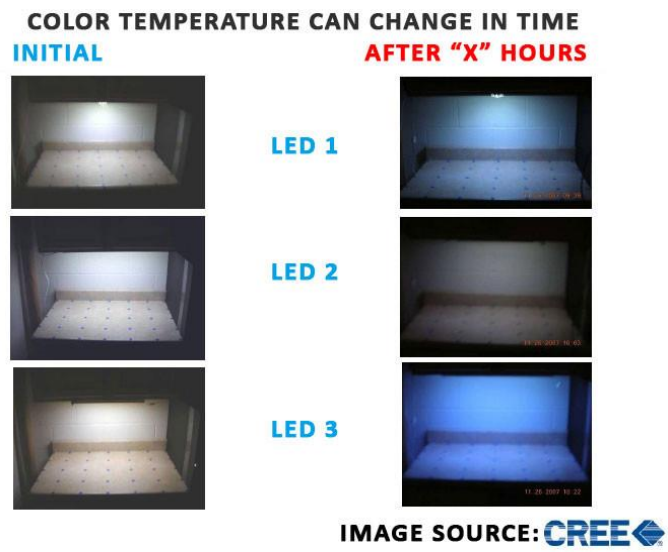


Kuva 7. Kaksi erimallista tuuletinta, vasemmanpuoleinen on perinteisen mallinen tuuletin ja oikeanpuoleinen on puhallin mallinen tuuletin

Tuuletin on toinen yleinen vaihtoehto poistamaan lämpöä kytkennästä. Tällöin elektroniikan ympäröimä lämmin ilma korvataan viileällä ilmalla puhaltamalla lämmin ilma pois. Tuulettimia voidaan ajatella alhaisella paineella toimivina ilmapumppuina; tuulettimen propelli muuntaa moottorin tuottaman väännön pyörimisliikkeeksi, jonka avulla se siirtää ilmaa. Useimpien tuulettimien lavat muistuttavat muodoltaan lentokoneen siipiä ja näin seuraavat samoja aerodynamiikan lakeja [7].

2.5 Ledien tuottaman valon värin muutos ajan kanssa

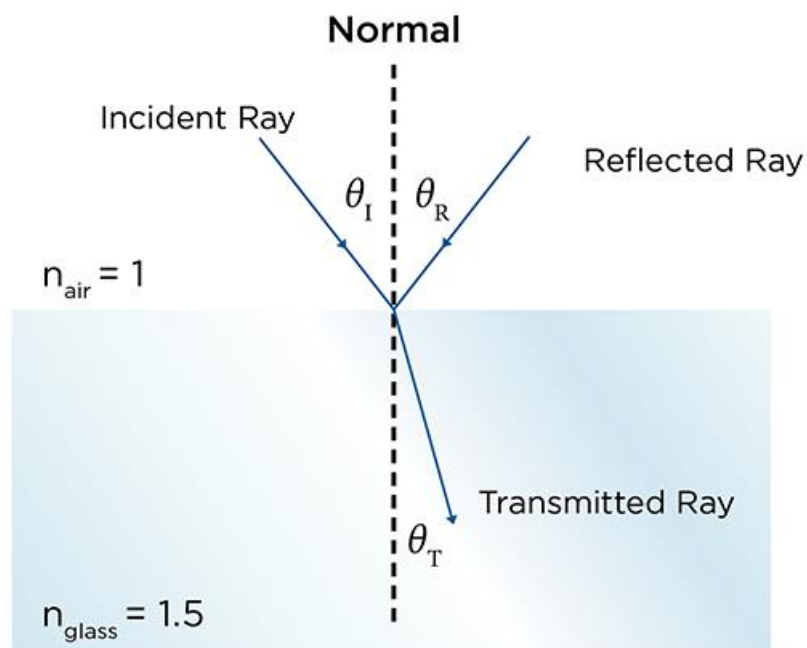
Ledin tuottaman värin muutos on näkyvin merkki ledin vanhenemisesta. Muutos voi näkyä ledin tuottaman valon värin viilenemisenä (ledit 1 ja 3) tai samenumina (ledi 2). Valon värin muutokseen vaikuttavat lämmön lisäksi myös aika minkä ledi on toiminnassa. Normaalilla käytöllä ledien keston testaamisessa menisi aivan liian kauan, minkä takia ledejä vanhennetaan keinotekoisesti, esimerkiksi altistamalla ne voimakkaalle lämmölle tai jännitteelle. Tällä tavalla saadaan suhteellisen lyhyessä ajassa selville, miten hyvin ledit kestävät kärjistettyjä olosuhteita ja sitä kautta kyetään arvioimaan niiden elinikä normaalissa käytössä.



Kuva 8. Ledin tuottaman valon väri muuttuu ajan myötä.

3. Lasi ja sen ominaisuudet

Lasi heijastaa ja hajauttaa valoa ja lasin paksuus ja muoto vaikuttavat valon taittumiseen. Siksi on tärkeää huolehtia, että työssä käytetään sopivan tyyppistä lasia tai vähintäänkin otetaan selvää käytettävän lasin ominaisuuksista.



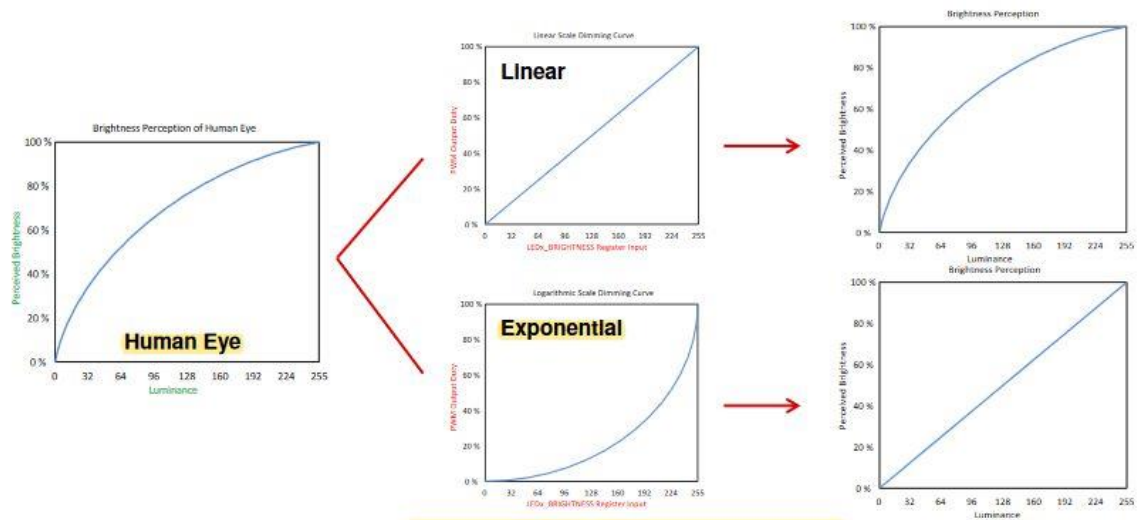
Kuva 9. Lasi heijastaa valon takaisin samassa kulmassa missä se saapuu. Valo myös taittuu kulkiessaan aineen läpi ja taittokulma riippuu aineiden tiheydestä.

Valon saavuttaessa kahden aineen rajapinnan, esimerkiksi ilma ja lasi, 4% valosta heijastuu takaisin tulokulman θ_I suuruisessa heijastuskulmassa θ_R . Loput siirtyy Snellin lain mukaisesti aineiden rajapintojen läpi eteenpäin θ_T . Lasin tapauksessa sen koostumus ja sameus vaikuttavat miten valo liikkuu sen läpi. [8]

Valon kirkkaus ihmisen näkökulmasta

Ihmissilmä kokee siihen tulevan valon kirkkauden hyvin mielenkiintoisella tavalla. Ihmissilmä ei koe sitä lineaarisesti vaan eksponentiaalisesti ja on sitä kautta herkimmillään alhaisessa valaistuksessa. Tästä syystä valaistuksessa käytetään eksponentiaalista himmennystä, ihmissilmä kokee sen lineaarisena ja se myös näyttää täyteläisemmältä.

Kuvassa 10 on kuvattuna, miten ihmissilmä näkee valaistuksen himmentymisen, sen tapahtuessa lineaarisena ja eksponentiaalisena. Ensimmäisessä käyrässä vasemmalta kuvataan miten ihmissilmä näkee valaistuksen, vaakasuorassa on esitetty valonmäärä asteikolla 0-255 ja pystysuorassa on esitetty miten ihmisen silmä koee kirkkauden asteikolla 0-100 %. Kahdessa seuraavassa käyrässä on esitetty valon muutos, ylempässä lineaarisena ja alemmassa eksponentiaalisena. Viimeisissä käyrissä kuvataan miten ihmissilmä koee lineaarisen ja eksponentiaalisen muutoksen, mistä näemme, että silmä koee eksponentiaalisen muutoksen lineaarisena.



Kuva 10. Ihmissilmän reaktiot valon muutokselle lineaarisesti ja eksponentiaalisesti [2]

4. Ledien ohjaus

LED ohjain on laite, jolla voidaan ohjata ja organisoida ledien toimintaa. Ohjaimen avulla voidaan saavuttaa paljon monimutkaisempia ja tarkempia värillisiä ja kuviollisia kokonaisuuksia, jopa kokonaisia animaatioita. Ajureita käytetään teollisissa, kaupallisissa ja yksityisissä elektroniikkasovelluksissa helpottamaan, tarkentamaan ja parantamaan elektroniikan toimintaa. Ohjaimen valintaan vaikuttaa mm. käytettävien ledien tyyppi, virtalähde, käytettävä topologia ja tietynlaiset erityistarpeet.

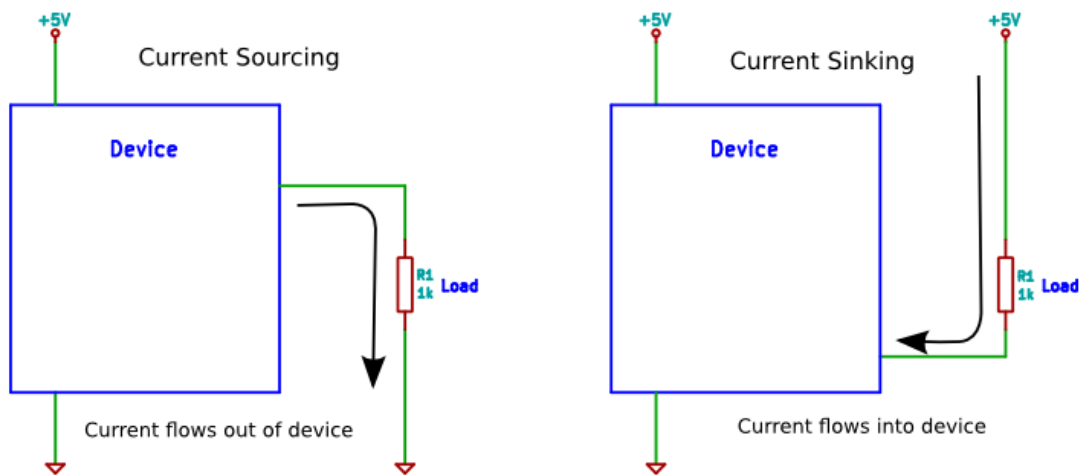
4.1 RGB-ledien tyypit

RGB-LED:jä on kahta tyyppiä: ledit, joilla on yhteinen anodi (virta) ja joilla on yhteinen katodi (maa). Kuvassa 11 on esitettyinä näiden kahden eri ledi tyyppin kytkentätavat. Yhteiseen anodiin menevät ledit yhdistetään oikeanpuoleisen kytkentäkaavion mukaan, ns. ”virtanielu” kytkennällä, ja yhteiseen katodiin menevät ledit yhdistetään vasemmanpuoleisen kytkentäkaavio mukaan, ns. ”virtalähtö” kytkennällä. [2]



Kuva 11. Ledien kytkentätyypit: vasemmalla yhteinen anodi ja oikealla yhteinen katodi

Työssä on mahdollista myös käyttää kahdenlaista kytkentää virran kulun kanssa. ”Virtalähtö”-kytkennässä sähkövirta kulkee ensin ohjaimen läpi ja seuraavaksi kuorman yli kohti maata. ”Virtanielu”-kytkennässä sähkövirta kulkee ensin kuorman yli ja sitten ohjaimen ja maahan. Tässä työssä on käytetty ”virtalähtö”-kytkentä mallia, eli LED-kytkennän läpi kulkeva virta tulee Arduinolta päin ja johdetaan LED:n jälkeen maapotentiaaliin. [9]

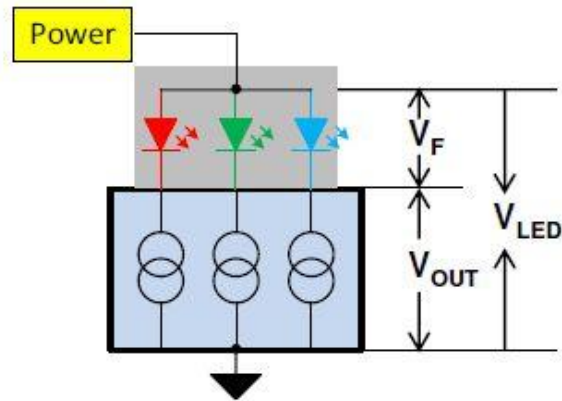


Kuva 12. Ledien kytkentä tapa vaikuttaa myös siihen miten jännite ja virta lasketaan, riippuen tuleeko jännite erikseen ledeihin ja sitten laitteeseen vai tuleeko jännite laitteen kautta ledeihin.

4.2 Virtalähde

Kytkeä suunnittelussa on tärkeää huomioida miten paljon jännitettä kytkentä vaatii kokonaisuutena ja valita näihin tarpeisiin sopiva virtalähde LED ohjaimen virran lähteenä voidaan käyttää mm. verkkovirtaa, virtapankkia tai USB-kaapelin kautta vaikka tietokonetta. Verkkovirran kanssa on huolehdittava, että käytetään tasavirta (DC) adapteria. Litium-ioni ja AA paristojen käyttöä kannattaa välttää, koska ne eivät tuota tarpeeksi jännitettä RGB-ledien tarpeisiin. Mikäli niitä halutaan välttämättä käyttää, on varmistettava, että käytettävä ohjain omaa muuntajan, joka muuttaa jännitteen tarvittavalle tasolle.

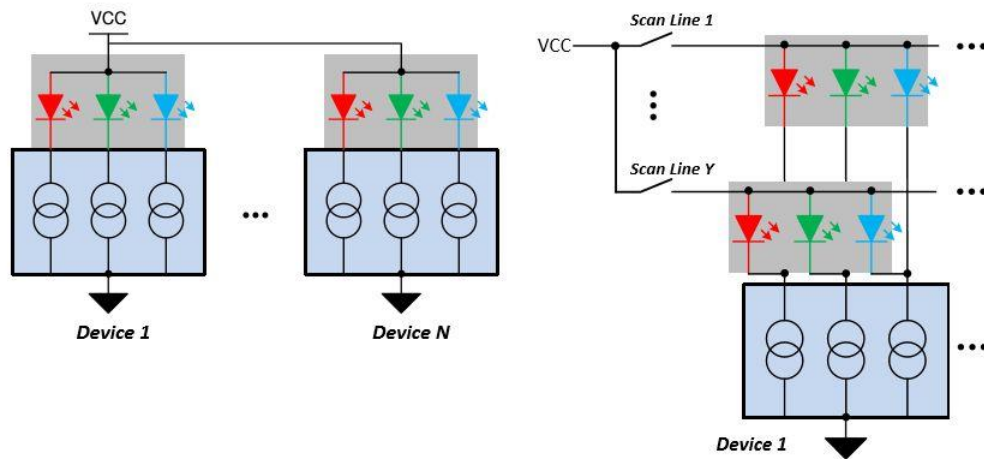
4.3 V_{LED} , eli virtalähteen jännitekapasiteetti



Kuva 13. V_{LED} ja mistä osasista se muodostuu. [2]

Yksinkertaistettuna V_{LED} on jännite, jonka virtalähteen on vähintään tuotettava kytkennän toimimiseksi. Siihen kuuluvat käytettävien ledien myötäjännitteet V_F ja laitteen tarvitsema jännite V_{OUT} .

4.4 LED-ohjaimen topologia



Kuva 14. Sarjaan kytkettävä (oikealla) ja rinnakkain kytkettävä (vasemmalla) topologia.

Ohjaimen topologia valitaan kytkentään käytettävien ledien lukumäärän mukaan. Mikäli ledejä on korkeintaan 100 kappaletta, käytetään suoraohjausmetodia (Direct Driving) ja suuremmilla määrillä käytetään Aika-multipleksausmetodia (Time-Multiplexing Driving). [2]

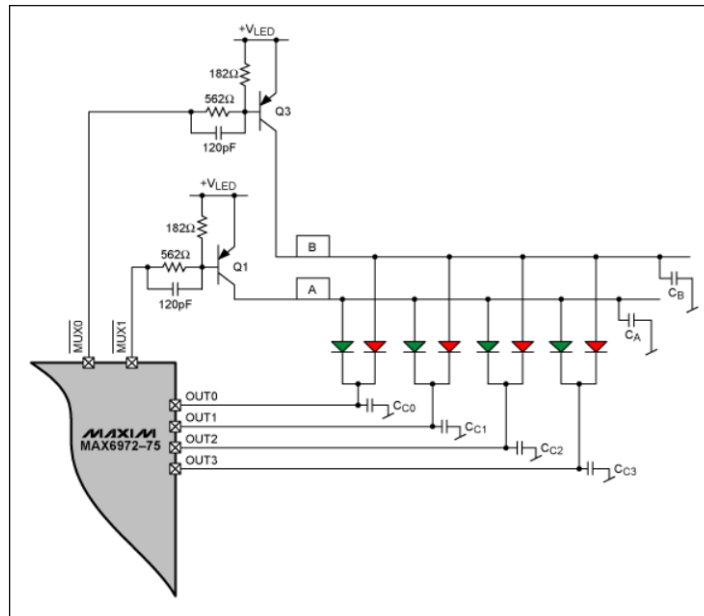
4.5 Suoraohjausmetodi

Suoraohjausmetodissa ohjaimet kytketään sarjaan, jolloin niitä on helppo ohjata. Suoraohjausmetodissa signaali välittyy jokaiselle sarjaan kytketylle laitteelle samaan tapaan kuin jännite siirtyy sarjaan kytkettyihin komponentteihin. Metodi on yksinkertainen ja toimiva, mutta tarvittavien laitteiden määrä voi kasvaa todella suureksi.

4.6 Aikamultipleksausmetodi

Aikamultipleksausmetodilla ohjaimet kytketään rinnakkain, jolloin tarvittavien laitteiden määrä voi olla huomattavasti pienempi verrattuna suoraohjausmetodiin. Aikamultipleksaus hyödyntää kanavatransistoria (FET) rinnankytkettyjen laitteiden signaalinlähetyksessä

vuorottelemalla jokaisen linjan (scan line) syöttöä. Linjan saadessa signaalin ledit palavat ja signaalin siirtyessä seuraavaan linjaan ledit sammuvat.

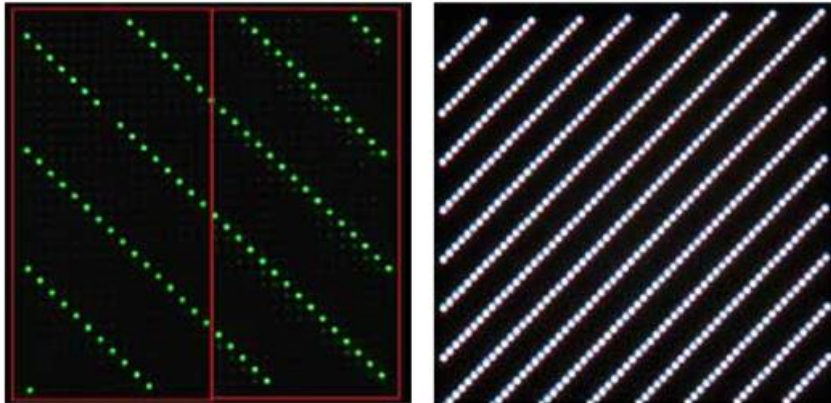


Kuva 15. Esimerkki aika-multipleksaus kytkennästä [9]

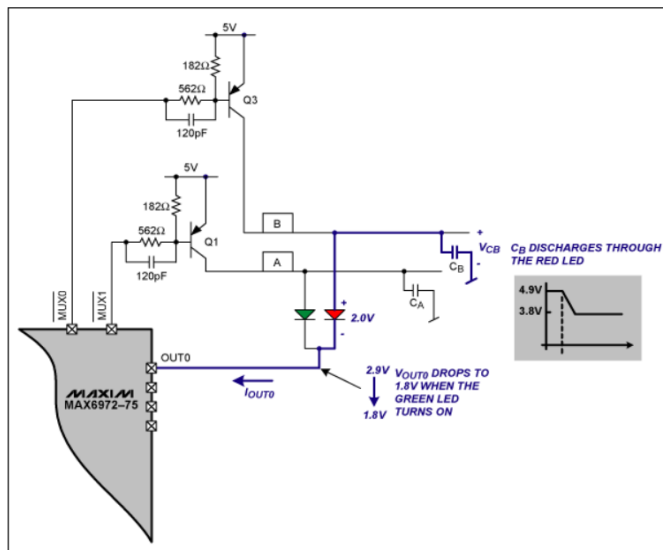
Aikamultipleksausmetodin ongelmia

Vaikka aikamultipleksaus on kustannustehokas metodi, sen kanssa tulee olla hyvin tarkka. Kytkentöjä suunnitellessa on huolehdittavaa, että ne tehdään huolella. Huonosti tehdyillä kytkennöillä voi olla monia ei haluttuja vaikutuksia.

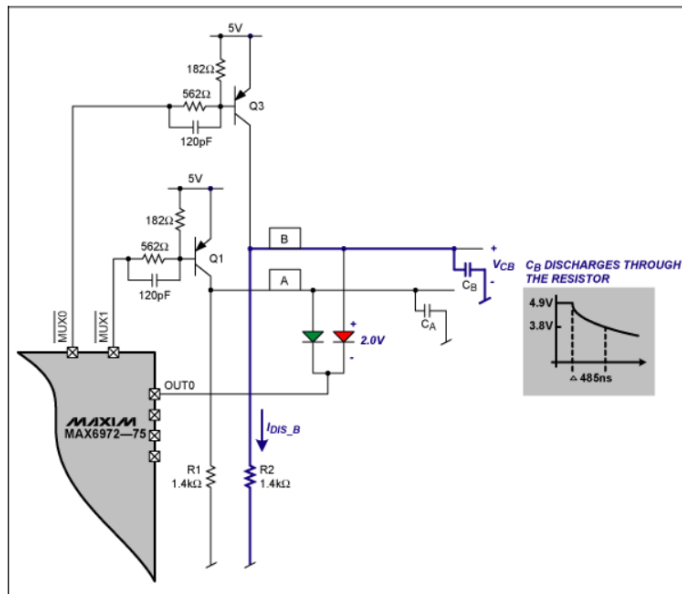
Ghost eli haamuefekti on ilmiö elektroniikassa missä yksittäinen ledi tai useammat ledit loistavat himmeästi, vaikka niiden ei pitäisi olla päällä. Tämä johtuu siitä, että kyseiset ledit saavat jostain syystä minimi määrän virtaa mikä mahdollistaa niiden himmeän loistamisen.



Kuva 16. Esimerkit LED-matriiseista missä toisessa on haamu efekti (vasemmalla) ja toisessa sitä ei ole (oikealla) [10]



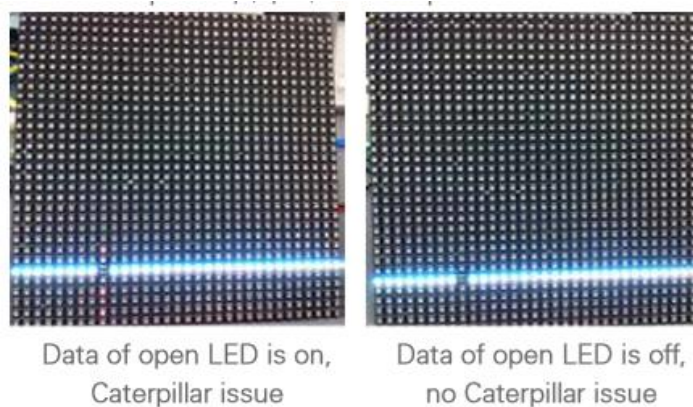
Kuva 17. Haamuefektin aiheuttaa mm. kuvan mukainen kytkentä, missä kondensaattoriin C_b muodostuva parasitiivinen kapasitanssi purkautuu punaisen ledin kautta aiheuttaen sen himmeään loistamisen. [9]



Kuva 18. Yksi korjaustapa on antaa kondensaattoriin varautuvalle varaukselle toinen kulkuväylä purkautua, esimerkiksi kuvan mukaisella tavalla. [9]

Haamuilmiö on mahdollista eliminoida muuttamalla käytettävää koodia kiertämään ongelma tai muuntamalla kytkentää niin, että parasiittisen kapasitanssin aiheuttama varaus ei purkaudu ledien kautta. [11]

Caterpillar eli toukka-ilmiössä missä osa pysty- tai vaakasuoraa lediriviä loistaa himmeästi vaikka Ledien pitäisi olla pois päältä. Ilmiö syntyy, kun ledirivistä jätetään yksittäinen ledi pois päältä (ns. avoimeksi, open) ja kyseisen ledinriviin, pysty- tai vaakasuuntaan, syntyy matoa muistuttava himmeästi loistava ledisarja. Caterpillarin poistamiseen pätevät pitkälti samat asiat kuin haamu ilmiön kanssa: ohjelmoidaan ohjain tai muutetaan kytkentää niin, että hajakapasitanssiin syntyneen varauksen aiheuttama virta pääsee poistumaan kytkennästä toista reittiä.

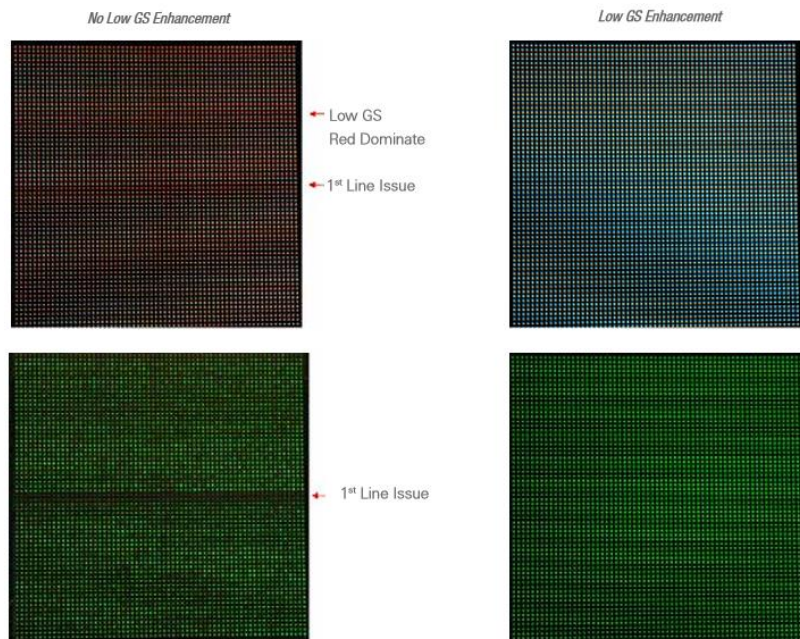


Kuva 19. Vaakasuoran ledirivin yksittäisestä kohdasta syntyvä toukkailmiö (vasemmanpuoleinen matriisi) on saanut nimensä ilmiön ulkonäöstä (muistuttaa toukkaa). [10]

Low Grayscale eli harmaasävy on ilmiö missä matriisin väripaletti koostuu voimakkaasti harmaan sävyistä. Harmaasävyä voidaan säätää ohjelmoinnin yhteydessä ja se voidaan siten tasapainottaa, jolloin väripaletti tulee paremmin näkyviin.

Color Shift eli värisiirtymä on ilmiö missä matriisia dominoi pääasiallisesti yksittäinen väri (ylemmän kuvaparin tapauksessa hallitseva väri on, ennen korjausta, punainen), jolloin muut värit jäävät pois näkyvistä. Värisiirtymää voi esiintyä yhdessä harmaasävyilmiön kanssa. Ilmiö on mahdollista korjata ohjelmoinnin yhteydessä säädettäessä värien sävyjä.

1st Line Issue eli ensimmäisen rivin ongelma on ilmiö missä matriisin keskimmäiset ledirivit palavat joko himmeämmin tai eivät syty ollenkaan, minkä takia myös muut ledit voivat joko palaa normaalia himmeämmin tai jäädä kokonaan syttymättä. Ongelma voi olla kytkennällinen tai ohjelmoinnin kautta ratkaistavissa.



Kuva 20. Ylemmässä matriisi parissa vasemman puoleisessa matriisissa on värisiirtymää (punainen hallitseva) ja harmaasävyä (harmahtavat osat voimakkaita). Alemmassa parissa vasemmalla on nähtävissä ensimmäisen rivin ongelma (keskimmäiset kaksi lediriviä ovat pois päältä ja muitakin

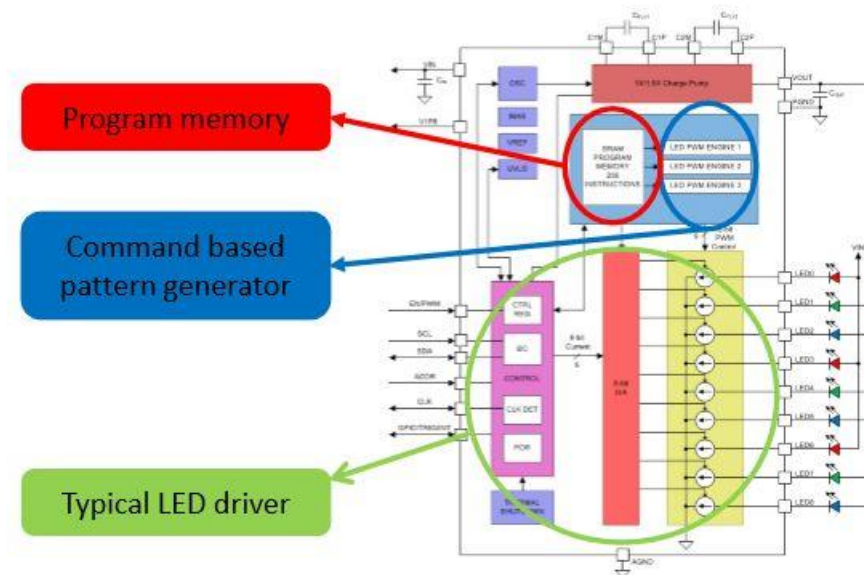
4.7 Autonominen toiminta

Älykodeissa ja muiden älylaitteiden kanssa on tärkeää huolehtia, että laitteet ovat käyttäjäystävällisiä ja niiden toiminta tuntuu luonnolliselta. Tämä voidaan saavuttaa mm. yksinkertaisilla käyttöjärjestelmillä ja ohjelmoimalla esim. ledien kirkkauden ja värin muutokset näyttämään luonnollisilta (katso osio 1.4).

Kuvan 21 diagrammissa on esitetty kolme osiota mitkä mahdollistavat ledmatriisin ohjelmoinnin ja autonomisen toiminnan: Lukumuisti (program memory), komentogeneraattori (command based pattern generator), LED ohjain (LED driver).

- Lukumuistiin tallennetaan käytettävä ohjelma, jolla määritellään miten ledit toimivat.
- Komentogeneraattori suorittaa sille ohjelmoitua komentoja, joilla ohjataan ledejä.

- LED ohjain on laite, jolla voidaan ohjata ja organisoida ledien toimintaa mikrokontrollerin (MCU) ollessa lepotilassa.



Kuva 21. Funktio diagrammi ledigridin autonomiasta. Kyseinen gridi toimii ohjelmoitavalla valomoottorilla, johon voidaan ohjelmoida halutunlaiset valoasetukset. [2]

Ledien ohjaukseen on suositeltavaa käyttää erillistä ohjauspiiriä, jotta vältetään mahdolliset ylikuormittumiset mikrokontrolleripiirin ylikuormittumiset. Ohjainpiirin käytöllä vältetään myös turhanpäiväinen virrankulutus, sillä pelkällä mikrokontrollerilla virran kulutus voi olla todella paljon suurempi verrattuna mikrokontrollerin ja ohjainpiirin yhteiskäyttöön.

4.7.1 Etuvastuksen mitoitus

Jotta ledi saadaan tuottamaan valoa, on sen yli kuljettava tietyn suuruinen jännite ja virta. Tällöin ledi saadaan tuottamaan valoa tietyllä voimakkuudella. Jos ledin kirkkautta halutaan muuttaa, on sen yli kulkevaa jännitettä muutettava, jolloin muuttuvat myös ledin yli kulkeva virta ja kirkkaus. Ledit vaativat AINA vastuksen eteensä, jotta ne eivät pala loppuun yhdessä välähdyksessä.

Esimerkiksi: Lähdejännitteen suuruus on 12 voltia, punainen ledi tarvitsee 2,1 voltin myötäjännitteen ja 20 milliampeeria myötävirran toimiakseen. Tarvittavan vastuksen suuruus lasketaan seuraavalla kaavalla:

$$R = \frac{V_s - V_f}{I}$$

missä R=vastuksen suuruus, V_s =lähdejännitteen suuruus, V_f =myötäjännitteen suuruus, I=virta.

HUOM! 1 A = 1000 mA = 1/1000 A, esimerkiksi 20 mA = 0,02 A

$$R = \frac{12 - 2,1}{0,02} = 495\Omega$$

Eli tässä tapauksessa saisimme vastuksen suuruudeksi 495 ohmia. Ja mikäli täsmällistä suuruutta omaavaa vastusta ei ole valitaan lähimmän arvon omaava vastus.

Myötäjännitteen suuruus riippuu ledin väristä ja eriväristen ledien vaatimat virran ja jännitteen suuruudet löytyvät yleensä valmistajien sivuilta ja ledien dokumentaatioista. Tässä tapauksessa värien mukainen myötäjännite löytyy kuvasta 2. Huomatkaa tosin, että kuvan 2 myötäjännitteet ovat voimassa 20mA virralla ja ledien vaatimukset vaihtelevat valmistajan mukaan.

4.7.1 V_{LED} in mitoitus

V_{LED} on kokonaisjännite, jonka määrittävät ledin myötäjännitteen ja kynnsjännitteen suuruus ja se lasketaan yhtälöllä:

$$V_{LED} = V_F + V_{OUT}$$

missä V_F = myötäjännite ja V_{OUT} = kynnsjännite.

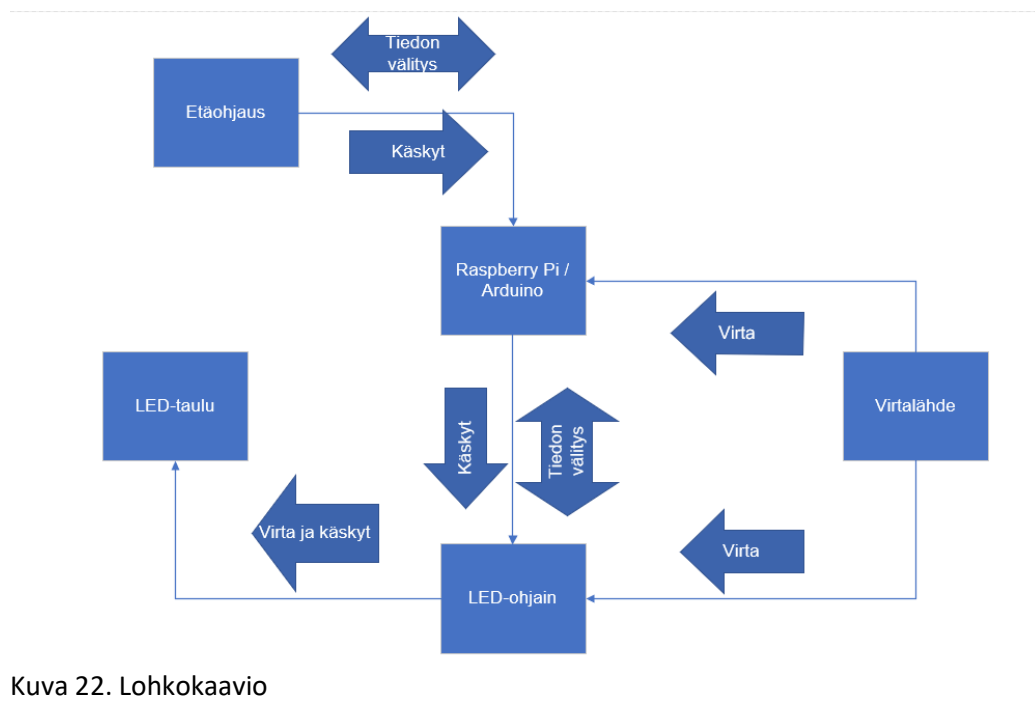
Ledin virtalähteen pitää kyetä tuottamaan ylläolevan yhtälön mukainen määrä jännitettä, jotta kytkentä toimisi.

5. Työn toteutus

Työn suunnittelussa kannattaa eriyttää eri tekijät omiksi osioikseen, mikä onnistuu parhaiten lohkokaavio avulla. Huomioikaa, että tämä työ toteutetaan pääasiallisesti ilman etäohjausta.

Ledinäyttö koostuisi kuvan 22 mukaisista osioista:

- Virtalähde: tuottaa virtaa, jonka avulla laitteet toimivat.
 - LED-ohjaimelle ja Raspberry Pille/Arduinolle mahdollisesti omat virtalähteet?
 - Käytetäänkö verkkovirtaa vai akkua?
- Raspberry Pi/Arduino: Ohjelmoitava alusta, joka huolehtii ohjelman pyörittämisestä ja näytön sisällöstä.
 - Etäohjaus on melko helposti toteutettavissa Raspberryllä ja Arduinolla. Arduinolle on olemassa valmis etäohjauksen mahdollistava Bluetooth sarjaliitin.
- LED-ohjain: Säätelee ledien yli kulkevaa jännitettä ja virtaa ja sitä kautta ledien kirkkautta.
- LED-taulu: Näyttö, jossa näkyy Raspberryn/Arduinon pyörittämän ohjelma.
 - Kootaanko alusta asti itsenäisesti vai valmistetaanko segmenteistä?



Kuva 22. Lohkokaavio

Projektin yhtenä inspiraationa toimii kuvan 23 mukainen LED-pöytä. Kuvan pöydän ovat rakentaneet Kajaanin Ammattikorkeakoulun Älykkäidenjärjestelmien (ÄJ) insinööriopiskelijat ja he antoivat minun käyttää heidän työtään esimerkkinä.



Kuva 23. Aino Honkasen ryhmän [12] tekemä LED-pöytä, joka toimii pohjana tälle projektille.

Pöytä on rakennettu IKEAn Lack-pöytään, kaivertamalla keskus pois, ja sen virtalähteenä toimii virtapankki (power bank). Älynä toimii Arduino Mega, johon on liitetty Bluetooth HC06-piiri etäohjaukselta varten. Pöydässä on käytetty ledinauhoja ja pikselit on luotu erottamalla ledit kennostolla. [12]

Tässä vaiheessa mainittakoon, että näytössä käytetään yksittäisiä ledejä ohjelmoitavan ledinauhan sijaan. Tämä muutos tehdään siksi, että yksittäisiä ledejä on helpompi asetella paikoilleen ilman ylimääräistä katkomista ja sommittelua.

5.1 Käytettävät komponentit

Käytettävien komponenttien valinta on oma prosessinsa työn teossa. Yleisesti kannattaa valita komponentteja mitä on hyvin saatavilla, ja mitkä sopivat parhaiten työhön nähden. Huomioon on otettava työn laajuus, vaativuus ja käyttötarkoitus.

5.1.1 Arduino Uno mikrokontrolleri

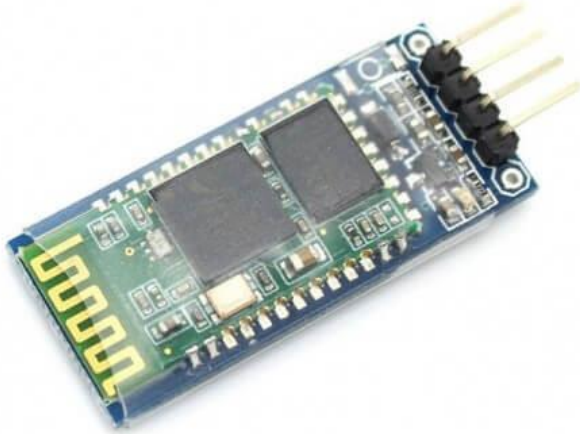


Kuva 24. Arduino Uno REV3 (Kuva voi erota työssä käytetystä mallista)

Arduino Uno on ATmega328P mikrokontrolleriin perustuva mikrokontrolleri. Alustassa on 14 digitaalista sisään- ja ulostulopinniä, joista kuutta voidaan käyttää pulssinleveysmodulaatioon, 6 analogista pinniä, 32 kB flash-muistia ja 2 kB SRAMia. [13]

Arduino Uno on yleisesti käytetty mikrokontrolleri niin opetuksessa kuin yksityisissä käyttötarkoituksissa sen halvan yksikköhinnan ja käytettävyyden takia. Siinä on tarpeeksi muistia ja pinnejä käytettäväksi niin yksinkertaisissa kuin monimutkaisimmissa kytkennöissä.

5.1.2 Bluetooth HC-06 moduuli



Kuva 25. Bluetooth HC-06 moduuli

Bluetooth HC-06 on Bluetooth moduuli (Bluetooth 2.0 standardi), jonka voi liittää Arduinoon antamaan sille kyvyn kommunikoida toisten laitteiden kanssa Bluetoothin avulla. Toisin kuin HC-05 Bluetooth moduuli, HC-06 kykenee vain ottamaan vastaan käskyjä, ei lähettämään niitä.

5.1.3 TLC5971/TLC59711 LED-ohjainpiiri

TLC5971 on 12 kanavainen ja 16-bittinen ohjainpiiri, jonka pääasialliset käyttökohteet ovat RGB-LED-näytöt, esimerkiksi elektroniset autojen kojelaudat. Piirissä on 12 ulostuloa, jotka voidaan tarvittaessa ohjelmoida erikseen toimimaan tarpeiden mukaan. Jokainen ulostulo kykenee käsittelemään 60 mA virtaa, mikä vastaa 3-5 lediä per kanava. Piirin sisäinen jänniteohjain kykenee käsittelemään jännitettä 6-17 voltin alueella ja 3-5,5 voltia suoraa virtaa. Piiri myös kykenee lopettamaan toimintansa itsenäisesti, mikäli sen sisäinen lämpötila kasvaa liian suureksi. [14]

TLC59711 vastaa ominaisuuksiltaan TLC5971-piiriä, mutta kykenee käsittelemään jännitettä hieman suuremmalla jännitealueella, 4-17 voltia, ja tarvittaessa voi käyttää esim. 15 voltin

jännitelähdettä tandemissa 3,3-5 voltin jännitteen kanssa. Piirin virran käsittely ominaisuudet ovat identtiset TLC5971:n kanssa.

5.2 Ohjelmakehitys

Arduinoa ohjelmoidessa käytetään Arduinon kotisivuilla jaettavaa ohjelmaa. Ohjelma ei vaadi mitään tiettyä käyttöjärjestelmää toimiakseen ja sitä voikin näin helposti käyttää niin Windowsilla, Linuxilla kuin Macilla. Ohjelmointikieltenä toimivat C ja C++, mutta muitakin kieliä voi käyttää, esimerkiksi Javaa.

5.2.1 Ledien ohjauskoodi

Led matriisia ohjataan Arduinolle kirjoitetulla ohjelmalla. Prototyypissä olen käyttänyt Bill Earlin ohjeistuksessaan käyttämää testauskoodia kytkennän testaukseen. [14]

Koodi toimii seuraavasti: Arduino lähettää piireille signaalin käyttää ledejä ensin päällä lyhyen aikaa, kytkentä järjestyksen mukaan, minkä jälkeen se määrää jokaisen ledin päälle ja voimistaa niiden kirkkautta pikkuhiljaa. Kaikkien ledien saavutettua maksimi kirkkauden koodi kiertää takaisin alkuun. RGB-ledejä käytettäessä koodi käy läpi kaikki värit.

```

tlc59711test | Arduino 1.8.10
File Edit Sketch Tools Help

tlc59711test$
/*****
This is an example for our Adafruit 12-channel PWM/LED driver

Pick one up today in the adafruit shop!
-----> http://www.adafruit.com/products/

These drivers uses SPI to communicate, 2 pins are required to
interface: Data and Clock. The boards are chainable

Adafruit invests time and resources providing this open source code,
please support Adafruit and open-source hardware by purchasing
products from Adafruit!

Written by Limor Fried/Ladyada for Adafruit Industries.
BSD license, all text above must be included in any redistribution
*****/

#include "Adafruit_TLC59711.h"
#include <SPI.h>

// How many boards do you have chained?
#define NUM_TLC59711 1

#define data 11
#define clock 13

Adafruit_TLC59711 tlc = Adafruit_TLC59711(NUM_TLC59711, clock, data);
//Adafruit_TLC59711 tlc = Adafruit_TLC59711(NUM_TLC59711);

void setup() {
  Serial.begin(9600);

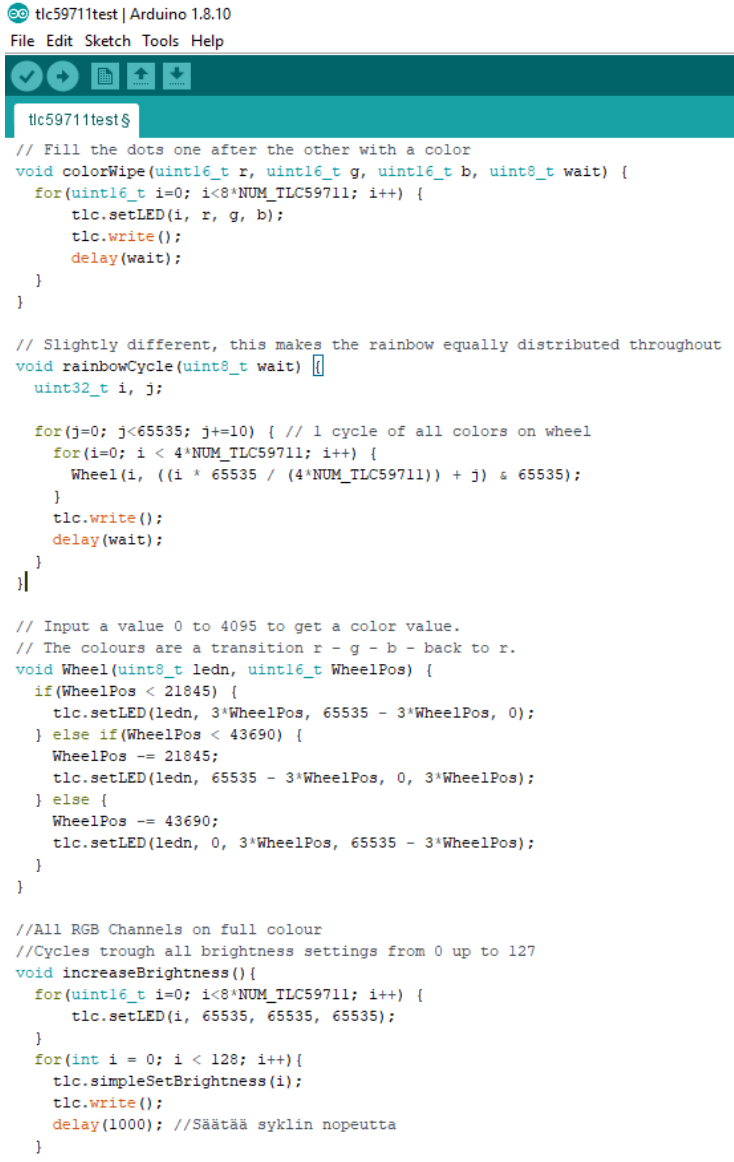
  Serial.println("TLC59711 test");
  pinMode(10, OUTPUT);
  tlc.begin();
  tlc.write();
}

void loop() {
  colorWipe(65535, 0, 0, 100); // "Red" (depending on your LED wiring)
  delay(200);
  colorWipe(0, 65535, 0, 100); // "Green" (depending on your LED wiring)
  delay(200);
  colorWipe(0, 0, 65535, 100); // "Blue" (depending on your LED wiring)
  delay(200);

  increaseBrightness();
}

```

Kuva 26. Työssä käytetty koodi 1/2



```

tlc59711test | Arduino 1.8.10
File Edit Sketch Tools Help

tlc59711test$
// Fill the dots one after the other with a color
void colorWipe(uint16_t r, uint16_t g, uint16_t b, uint8_t wait) {
  for(uint16_t i=0; i<8*NUM_TLC59711; i++) {
    tlc.setLED(i, r, g, b);
    tlc.write();
    delay(wait);
  }
}

// Slightly different, this makes the rainbow equally distributed throughout
void rainbowCycle(uint8_t wait) {
  uint32_t i, j;

  for(j=0; j<65535; j+=10) { // 1 cycle of all colors on wheel
    for(i=0; i < 4*NUM_TLC59711; i++) {
      Wheel(i, ((i * 65535 / (4*NUM_TLC59711)) + j) % 65535);
    }
    tlc.write();
    delay(wait);
  }
}

// Input a value 0 to 4095 to get a color value.
// The colours are a transition r - g - b - back to r.
void Wheel(uint8_t ledn, uint16_t WheelPos) {
  if(WheelPos < 21845) {
    tlc.setLED(ledn, 3*WheelPos, 65535 - 3*WheelPos, 0);
  } else if(WheelPos < 43690) {
    WheelPos -= 21845;
    tlc.setLED(ledn, 65535 - 3*WheelPos, 0, 3*WheelPos);
  } else {
    WheelPos -= 43690;
    tlc.setLED(ledn, 0, 3*WheelPos, 65535 - 3*WheelPos);
  }
}

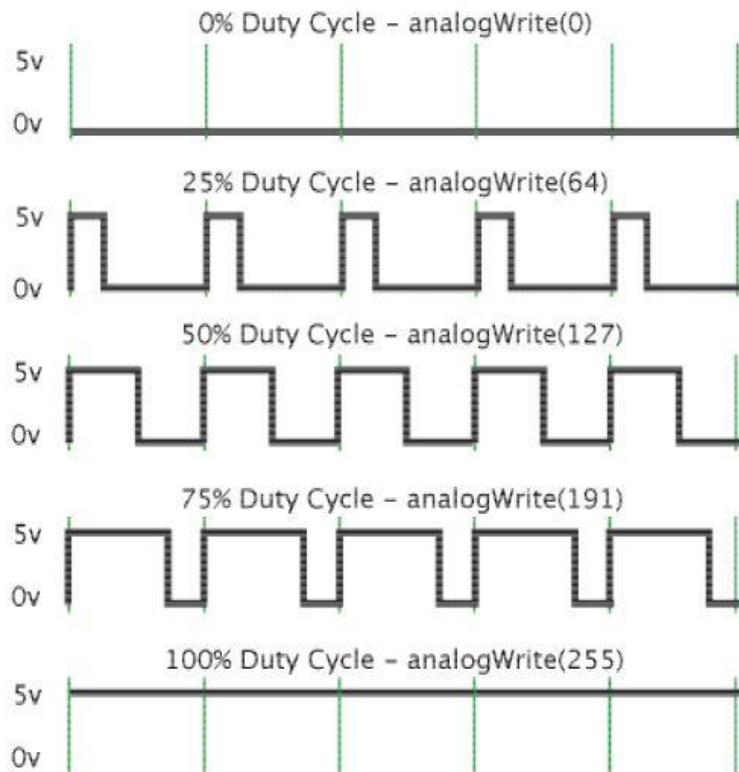
//All RGB Channels on full colour
//Cycles through all brightness settings from 0 up to 127
void increaseBrightness(){
  for(uint16_t i=0; i<8*NUM_TLC59711; i++) {
    tlc.setLED(i, 65535, 65535, 65535);
  }
  for(int i = 0; i < 128; i++){
    tlc.simpleSetBrightness(i);
    tlc.write();
    delay(1000); //Säätää syklin nopeutta
  }
}

```

Kuva 27. Työssä käytetty koodi 2/2

5.2.2 Pulssinleveysmodulaatio (PWM)

Pulssinleveysmodulaatiossa säädetään ohjattavaan piiriin syötettävää tehoa muuttamalla ohjaussignaalin, digitaalisen kanttiaallon, pulssisuhdetta. Pulssisuhdetta voidaan säätää asteikolla 0...100 % tietyin portain (Kuva 28). Pulssinleveysmodulaatiota käytetään hyvin laajasti erilaisten toimilaitteiden, kuten esim. DC-moottorien, ohjaukseen.[15]



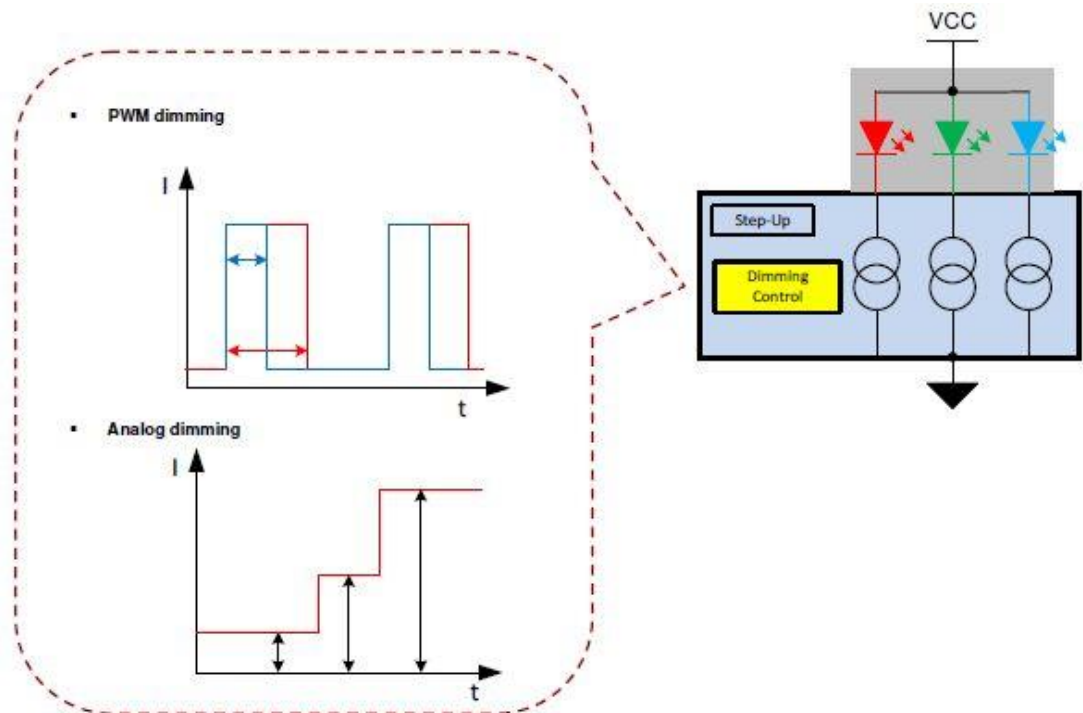
Kuva 28. Pulssinleveysmodulaation toimintaperiaate

Pulssinleveysmodulaatiolla lediä voidaan säätää tehoasteella 0-255, missä 0 = ledit pois päältä ja 255 = ledit palavat jatkuvasti. Pulssinleveyttä säätelemällä ledit voidaan saada näyttämään olevan koko ajan päällä. Todellisuudessa ledit välkkyvät päälle ja pois niin nopeasti, että ihmissilmä ei ehdi erottaa sitä.

Kokonaisuudessa käytettävissä olisi 256 eri väriä ja värisävyä, jolloin eri väriyhdistelmiä olisi täten $256 * 256 * 256 \approx 16$ miljoonaa eri värisävyä. [15; 3.5]

5.2.3 Analoginen ledien himmennys

Analogisessa himmennyksessä (Dimming) ledien saaman virran määrää muutetaan, jolloin ledien tuottama valo himmenee tai voimistuu.

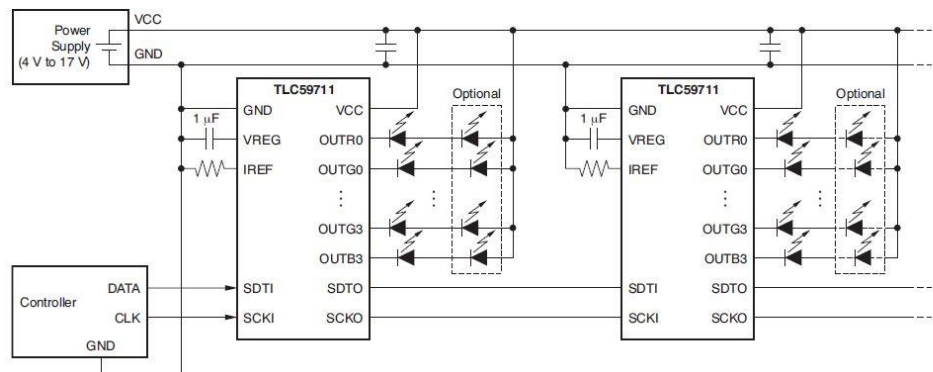


Kuva 29. Pulssinleveysmodulaation (ylempi kuvain) ja analogisen himmennyksen (alempi kuvain) ero [3]

Menetelmä on yksinkertainen ja helppo tapa manipuloida ledien väriä ja sillä saadaan helpoiten tuotettua tasapaino joidenkin värien vaaleudessa. Analogisella himmennyksellä on kuitenkin vaikea saada aikaan hyvää resoluutiota luodulle kuvalle, mikä yleensä rajoittuu 8-bittiin. [3]

5.2.4 LED-ohjainpiiri

LED-ohjainpiirinä käytetään aiemmin mainittua TLC59711-piiriä. Se kykenee käsittelemään ja ohjaamaan virtaa hyvin useammalle ledisarjalle. Pelkästään Arduinin 5 voltin virran avulla sillä voi ohjata 12 lediä. Huomioon on kuitenkin otettava, että sarjaan liitettävien ledien määrä on riippuvainen kytkentään tulevan jännitteen suuruudesta. Korkeampi jännite sallii suuremman ledi määrän käytön.



Kuva 30. TLC59711 kytkentäkaavio

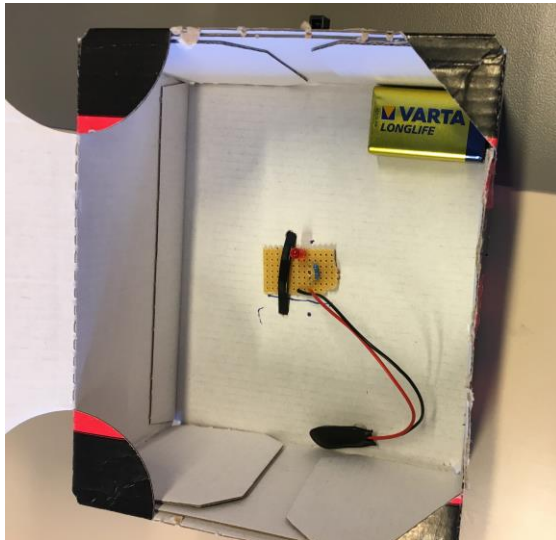
Ohjainpiirejä voidaan myös sarjottaa yhdistämällä ensimmäisen piirin kellon ja datan ulostuloportit seuraavan piirin kellon ja datan sisääntuloporttiin. Tätä kautta kytkentää voidaan ohjata useammalla piirillä, jolloin saadaan käyttöön enemmän Ledejä.

5.3 Ledit lasin takana

Erilaiset lasitiilet näyttävät valon eritavoilla niiden takaa. Lasitiilen sopivuus työhön voidaan testata yksinkertaisella ledikytkennällä ja pahvilaatikolla (pahvilaatikkoa voidaan käyttää sellaisenaan tai oikeaan muotoon leikattuna).

Kuvassa 31 on nähtävissä kyseinen laite. Se koostuu punaisesta ledistä, 510 ohmin vastuksesta ja virtalähteenä toimivasta 9 voltin paristosta. Kytkentä on pienikokoinen, helposti mukana kuljetettava ja helposti korjattavissa. Kytkennässä voi halutessaan käyttää 470 ohmin vastusta, mikäli ledi ei loista tarpeeksi kirkkaasti.

Kuvassa 32 testattiin ledin valon käyttäytymistä rajaamattomassa ja rajatussa ympäristössä. Kuvat on otettu luokan TA1-1L160 seinän lasitiilistä. Niistä voimme nähdä miten idea toimii tämän tyyppisissä lasitiilissä. Jotta valo hajautuisi paremmin, voidaan käyttää erityyppisiä lasitiiliä.



Kuva 31. Yksinkertainen laatikko viritelmä, jonka avulla testattiin ledin valon toiminta ilman rajausta ja rajauksen kanssa.

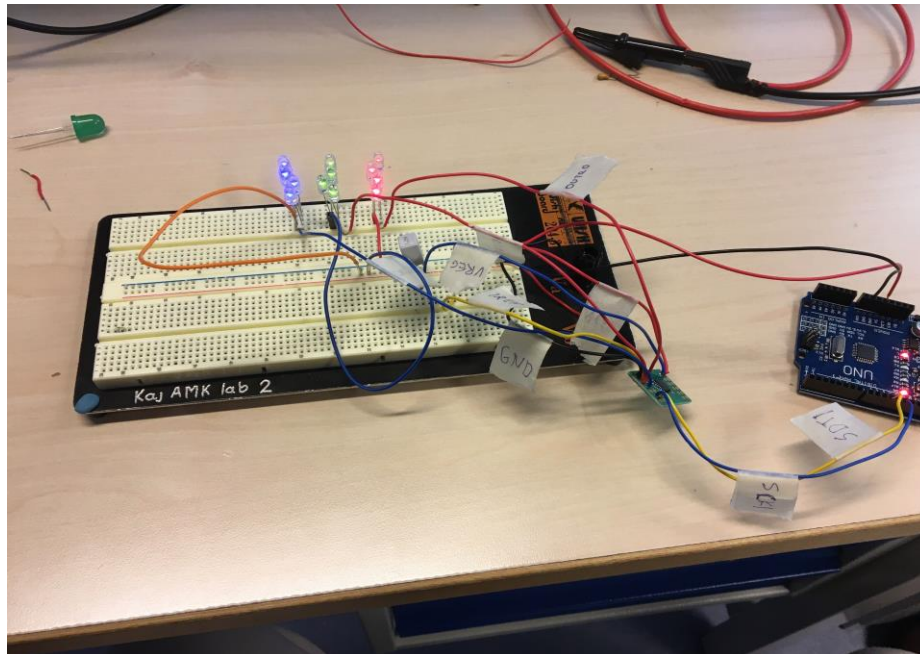


Kuva 32. Ledi ilman laatikkoa (vasen) ja laatikon kanssa (oikea)

5.4 Prototyypin valmistus

Prototyypissä käytetään sekaisin pintaliitoskomponentteja ja läpiladottavia komponentteja. Tämä johtuu siitä, että käytetty ohjainpiiri on pintaliitoskomponentti (läpiladottavaa ei ole olemassa) mikä pakottaa myös käyttämään erillistä alustaa kytkentää varten. Vaihtoehtoisesti piirin kanssa voi käyttää läpiladottavaa alustaa. Tällä tavalla piiriä ei juoteta mihinkään, vain alusta, jolloin vältetään mahdollisesti piirin rikkova prosessi ja piiriä voidaan käyttää uudelleen. Ledit ovat läpiladottavia, koska läpiladottavat komponentit on helppo kiinnittää leipäpöydälle

ja sitä kautta niiden väliset kytkennät on helppo tehdä ja kytkennän testaaminen ja muokkaaminen on helpompaa.



Kuva 33. Leipäpöydälle viritetty koekytkentä.

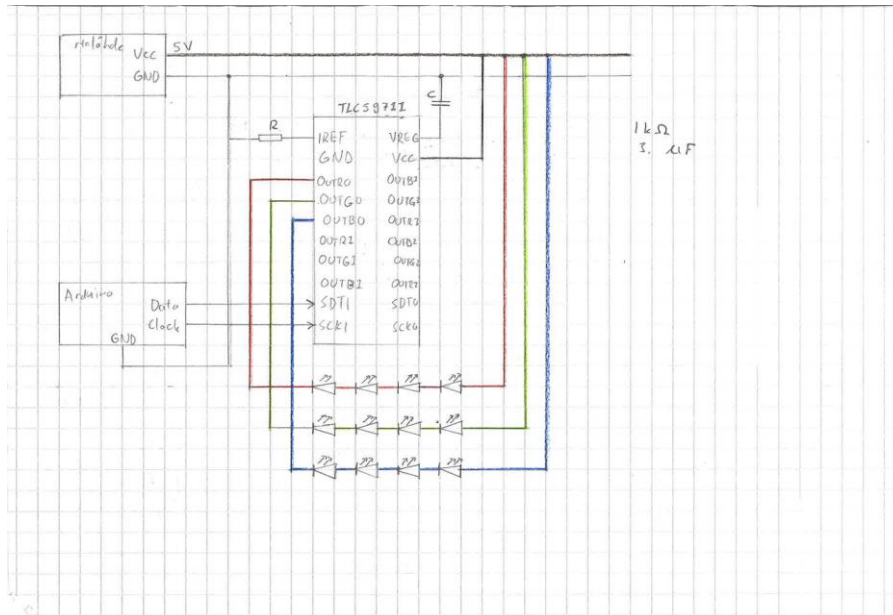
Prototyypin koekytkennässä olen käyttänyt 12 lediä (4 punaista, 4 vihreää ja 4 sinistä). Ohjaan ledejä Arduinolle kirjoitetulla koodilla ja TLC59711-piiri ohjaa virran ledeille. Proton testaus on suoritettu tavallisella leipäpöydällä.

Sinisten ja vihreiden ledien paikalle voidaan vaihtaa punaisia ledejä toimimaan ilman isompaa ongelmaa, koska ohjainpiiri itsessään toimii vastuksena virralle. Lisäksi piirissä olevat 12 porttia voidaan jokaista käyttää 4 ledin ohjaukseen mikä nostaa ledien määrän 48 lediin.

Yksi hyvä tapa selkeyttää kytkentää on nimetä jokainen johdin, esim. teipin avulla. Tällä tavalla kytkentä on selkeämpi ja erilaisia ongelmia on helpompi selvittää.

Kytkentä kaavio on kuvan 34 mukainen. Kytkentään tuleva jännite (VCC) on 5 voltia, IREFiin kytkettävän vastuksen (R) koko on yksi kilo-ohmi ja VREGiin kytkettävän kondensaattorin (C) koko on 3,3 mikrofaraadia. IREF ja VREG yhdistetään maahan (GND)

Pinnijärjestys menee ylävasemmalta yläoikealle numerojärjestyksessä 1-20, 10 molemmilla puolilla.



Kuva 34. Kytentäkaavio (kuvasta jäänyt pois piirin GND:n yhdistysviiva skannaus vaiheessa).

Piirissä on 12 lähtöä ledeille, OUTR0-3 punaisille ledeille, OUTG0-3 vihreille ledeille ja OUTB0-3 sinisille ledeille. Piiri on suunniteltu RGB-LED-ille, yksi lähtö jokaiselle värille, mutta niitä voidaan käyttää myös yksivärisille ledeille kytkentäkaavion mukaisella tavalla. Tämän työn aikana olen myös käyttänyt kyseisiä lähtöjä pelkkien punaisten ledien kanssa.

Piirissä on sisään tulot Datalle ja kellolle, SDTI datalle ja SCKI kellolle, ja ne yhdistetään Arduinin digitaalisiin pinneihin. SDTO ja SCKO ovat datan ja kellon ulostuloja, jotka yhdistyvät sarjassa seuraavana olevaan piiriin.

Piiristä löytyy myös jännitteen (voltage) ja virran (current) regulaatio pinnit VREG ja IREF. VREG käsittelee piirille ulkoisista lähteistä tulevaa jännitettä 3,3 ja 5,5 voltin välillä. Se voidaan myös yhdistää muiden piirien VREG lähtöihin korkeamman jännitteen vastaanottamiseksi. IREF säätelee piirin maksimi virran määrää jokaiselle ulostulolle.

5.4.1 Koekytkenän laajennus

On tärkeää testata miten montaa lediä yksittäinen piiri kykenee ohjaamaan. Tällä tavalla saadaan selville työhön tarvittavien piirien määrä ja montako lediä kukin piiri kykenee ohjaamaan ilman piirien lämpiämistä.

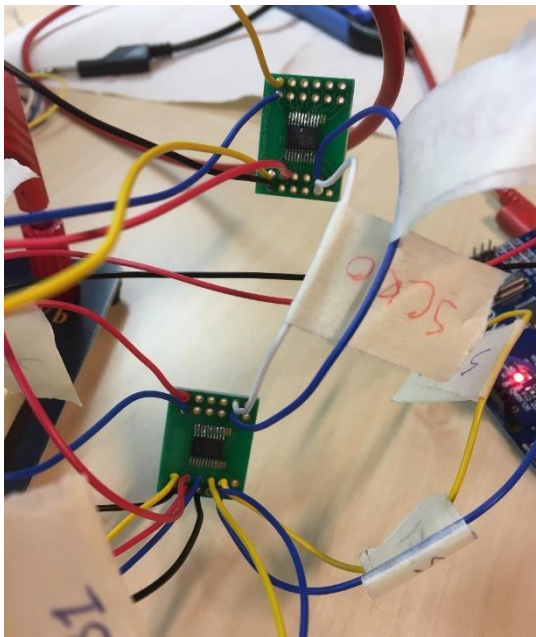
Vaikka piirissä on portit eri väreille, voidaan sinisille ja vihreille ledeille tarkoitettuja portteja käyttää ohjaamaan pelkästään punaisia ledejä. Jokaiselle ledille tulee 4,1 voltia jännitettä ja 0,33 milliampeeria jännitettä.

Kytkentöjä tehtäessä on otettava huomioon ohjainpiirin lämpiäminen. Neljä lediä kuudella lähdöllä tuottaa paljon voimakkaammin lämpöä kuin kuusi lediä kolmella lähdöllä. Ensimmäiseen kytkentään on voimakkaasti suositeltavaa laittaa lämpönielu, toiseen kytkentään se voi olla suositeltavaa, mikäli ledejä on tarkoitus pitää käynnissä pitkiä ajanjaksoja ja etenkin mikäli siihen halutaan lisätä enemmän ledejä.

5.4.2 Piirien yhteen liittäminen

Piirit ovat suhteellisen yksinkertaisia liittää yhteen. TLC59711-piirit liitetään sarjaan yhdistämällä ensimmäisen piirin kellolähtö (SCKO, pinni 11, valkoinen johto) ja datalähtö (SDTO, pinni 12, sininen johto) sarjassa seuraavana olevan piirin kellotulon (SCKI, pinni 9) ja datatulon (SDTI, pinni 10) kanssa.

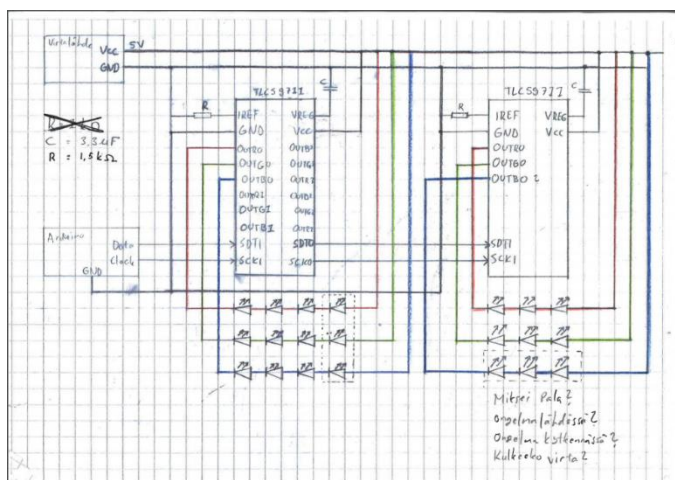
Kuvassa 36 kytkentään on lisätty toinen TLC59711-piiri ja toinen 9 ledin sarja, alkuperäisen



Kuva 35. Yhteen liitetyt TLC59711-piirit

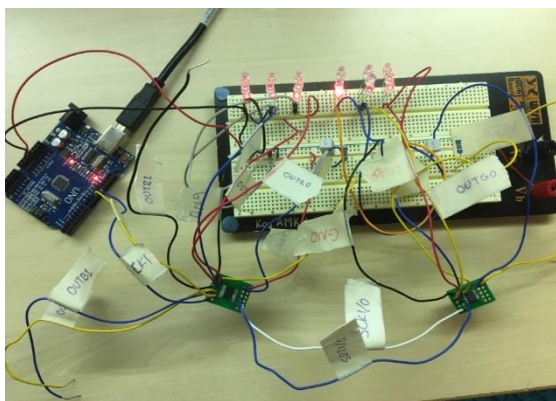
piirin kytkennästä on poistettu yksi ledi kustakin sarjasta. Lisäksi molemmilla piireillä on omat vastukset ja kondensaattorit, vastusten kokoa olen kasvattanut varmuuden vuoksi 1,5 kilo-ohmiin.

Piirien yhteen liittäminen on yksinkertainen prosessi ja ohjelmoinnissa on otettava huomioon piirien lukumäärä. Oikein kytkettynä, ja käyttämällä sopiva määrä ledejä, kytkentä ei tuota lämpöhaittaa piireille.



Kuva 36. Laajennetun kytkennän kaaviokuva

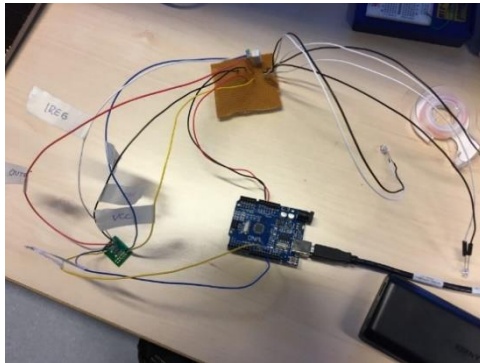
Koko kytkentä on toimiva 5 voltin jännitteellä. Kumpaankin piiriin on kytketty 9 punaista lediä ja kaikki toimivat moitteettomasti. Mikäli jokaiseen piiriin saadaan kytkettyä 10 lediä ilman ongelmia, voidaan projekti suorittaa 10 piirillä.



Kuva 37. Kuvan 36 mukainen kytkentä, kytkettynä kytkentäalustaan.

5.4.3 Prototyypin valmistus protolevylle

Seuraava vaihe on siirtää projekti leipäpöydältä protolevylle. Tässä vaiheessa myös alan testaamaan miten pitkiä liitoksia kytkentä kestää ja miten hyvin virta kulkee pidemmissä liitoksissa.

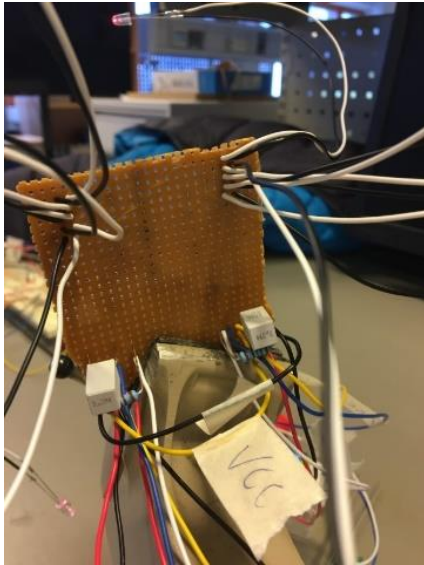


Kuva 38. Protolevylle suoritettu kytkentä.

Kytkenä kopioidaan leipäpöydältä protolevylle, joskus muokattuina. Toisin kuin leipäpöydässä tehtävät kytkennät protolevylle tehtävät kytkennät on juotettava kiinni. Mikäli ledejä ei juoteta suoraan levyllä, ne juotetaan kiinni johtimiin. Ja jälleen kerran johtimet on nimetty teipin avulla kytkennän selkeyttämiseksi.

Johdinten pituus vaihtelee käyttö tarkoituksen mukaan, mutta pidemmät johtimet antavat hieman enemmän pelivaraa kytkennän sijoittelussa. ledien johtimet ovat tässä kohtaa pituudeltaan 30–35 cm (senttimetriä).

Kuvassa 39 proto on laajennettu toimimaan kahdella piirillä ja 11 ledillä. Virtalähteenä toimii Arduinoon kiinnitetty virtapankki. Kyseinen kytkentä oli alkujaan hyvin epäselvä ja muutamassa kohdassa huomasin siinä olevan kytkentähäiriöitä, joiden takia Ledit eivät syttyneet. Tämän takia kytkentä oli muutettava selkeämmäksi ja tämän takia asetin levyn vasemmalle puolelle piiriin 1 liittyvät kytkennät ja oikealle puolelle piiriin 2 liittyvät kytkennät.

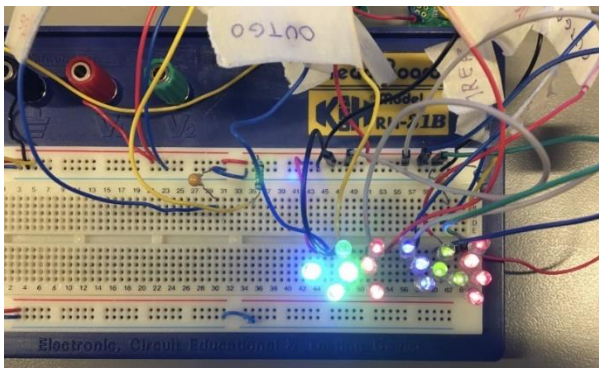


Kuva 39. Kuvan 38 kytkentä laajennettuna ja siistittynä.

5.4.4 Takaisin kytkentäalustalle

Mietittyämme Henrin kanssa mahdollisia sovelluksia, ja muita ajatelmia työhön liittyen, tulimme siihen tulokseen, että työlle paras rakennusalausta on kytkentäalusta. Tällä tavoin kytkentää on paljon helpompi muokata ja korjata.

Kuvassa 40 on nähtävissä eri kirkkauksilla palavia ledejä. Kyseessä on kaksi erilaista lediä, jotka eivät kykene toimimaan sarjassa keskenään, ja ne on sen takia laitettava erilleen toiminnan varmistamiseksi.



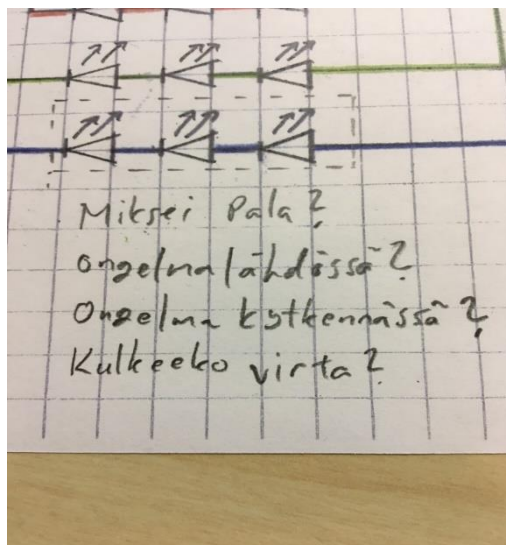
Kuva 40. Kytkentä palautettuna kytkentäalustalle.

6. Pulmia ja ratkaisuja

Elektroniikan kanssa on oltava huolellinen ja varovainen, koska pienikin virhe kytkennässä voi aiheuttaa ison päänsäryn. Tässä kappaleessa käydään läpi asioita mitä minulla on tullut vastaan ja mitä huomioita ja ratkaisuja olen niihin kehittänyt.

6.1 Ongelmien ratkomisesta

Ongelmia tulee jokaiselle, etenkin elektroniikan ja ohjelmoinnin parissa työskenteleville. Tällaisissa tilanteissa, mikäli ongelma ei ole ilmiselvä, kannattaa tehdä lista asioista mitkä voivat aiheuttaa kyseisen ongelman ja lähteä yksi kerrallaan testaamaan ne. Tällä tavalla käydään läpi mitkä asiat toimivat ja saadaan selville järjestelmällisesti missä ongelma on.



Kuva 41. Yksinkertainen lista tarkistettavista asioista.

Tässä vaiheessa saattaa ajatella, että se ei voi olla jokin tietty asia syystä tai toisesta. **Tarkistakaa kyseinen asia siitä huolimatta**, saatatte yllättyä. Ongelmat voivat todellakin johtua jostakin mikä ei tuntuisi vaikuttavan niin voimakkaasti tai vaikuttaisi olevan kunnossa, esimerkiksi huonosti kiinni olevat ledien jalat tai huonosti juotettu johdin.

6.2 Kondensaattorien ongelmat

Kondensaattorin laatu voi vaikuttaa kytkennän toimimattomuuteen. Tantaali-kondensaattorit ovat halpoja ja yleisesti käytettyjä koululla, mutta ne eivät toimi joissain kytkennöissä. Keraamiset kondensaattorit ovat kestävämpiä ja parempi laatuista, mutta oikeankokoisia ei aina ole saatavilla.

Kannattaa tarkistaa onko komponentit kytketty oikein ennen kuin lähtee vaihtamaan mitään. Kannattaa ensin kokeilla toista samanlaista ennen kuin vaihtaa erilaiseen komponenttiin.

6.3 Piirien juottaminen alustaan

Piirien juottaminen on hyvin vaikeaa, koska kyseessä olevat pintaliitoskomponentit ovat pieniä ja niiden juottaminen vaatii tarkkuutta. Vaarana on, että varomaton juottaminen voi hyvin helposti aiheuttaa kahden jalan yhteenliittymisen ja sitä kautta oikosulkuun ja kytkennän toimimattomuuteen. On myös mahdollista, että huonosti tehty juotos voi johtaa alusta rikkoutumiseen ja sitä kautta ylimääräiseen odotteluun.

On suositeltavaa, että pintaliitoskomponenttien juottaminen suoritetaan suurennuslasin alla ja ohuella juotostinalla. Näin minimoidaan oikosulun riski ja varmistetaan juotosten laatu ja tarkkuus.

6.4 Rikkoutunut piiri

Rikkoutunut piiri voi aiheuttaa ongelmia mm. yksittäisen ledin tai ledirivin toimimattomuudesta koko kytkennän toimimattomuuteen. Tällöin on syytä tarkistaa niin kytkentä kuin piirikin hyvin tarkkaan, sillä ongelmat voivat olla hyvin pieniä ja vaikeita havaita.

Mikäli yksittäinen ledirivi lakkaa toimimasta tarkista kulkeeko kytkennässä virta. Mikäli virta kulkee, tarkista kytkennät, kyseessä voi olla mm. kosketushäiriö, väärin tehty kytkentä tai katkennut johdin. Mikäli kytkennöissä ei ole vikaa tarkista piirin jalat, ne saattavat olla joko

huonosti kiinni, irronneet kokonaan tai katkenneet. On myös mahdollista, että kyseessä on huomaamatta jäänyt oikosulku, esimerkiksi kaksi piirin jalkaa on vahingossa juotettu yhteen.

6.4.1 Mikä voi aiheuttaa piirin rikkoutumisen?

Piirin rikkoutuminen voi johtua useammasta syystä, joista yleisimmät ovat piirin läpi kulkevat liiallinen jännite tai virta tai piirille aiheutuva fyysinen vahinko. Fyysinen vahinko voi olla esimerkiksi piirin jalan irtoaminen tai katkeaminen.

Vääntynyt jalka on suoristettava varoen ja mahdollisimman vähällä voimalla, muuten se vääntyy toiseen suuntaan liikaa ja voi pahimmillaan katketa liiallisen vääntelyn ja metallin väsymisen takia. Tällöin on vain otettava käyttöön uusi piiri.

Liiallisen jännitteen tai virran kulkiessa piirin läpi piiri kärkehtää ja tuloksena on toimimaton piiri ja yleensä myös palaneen käry. Tällöin on myös otettava käyttöön uusi piiri.

6.5 Palamattomat ledit

Katsoessa kuvaa 40 voit huomata, että vasemmalla puolella olevat siniset ja vihreät ledit palavat kirkkaammin kuin oikealla puolella olevat. Tämä johtuu siitä, että kyseessä on kaksi eri ledi tyyppiä, jotka eivät kykene toimimaan sarjassa keskenään. Mikäli huomaat, että sinulla on kytkennässä ledejä sarjassa ja ne eivät pala testaa ne yksitellen. Tällä tavalla varmistat, että et heitä toimivia ledejä roskeen vaan säästät ne jatkoa varten.

Tässä on myös hyvä muistuttaa käyttämään sopivaa etuvastusta ledin edessä. Tämän työn kytkennässä käytetty piiri toimii etuvastuksena, minkä takia sitä ei erikseen ole lisätty kytkentään.

7. Pohdintoja

Teorian hankkiminen oli suhteellisen yksinkertainen osa, mutta joidenkin asioiden selvittäminen oli ajoittain vaikeaa vähäisten lähteiden takia. Esimerkiksi aika-multipleksausmetodin ongelmiin ei tahdo löytyä suoraan mitään ratkaisua. Ison osan lähteistä löysin englannin kielellä, joten niiden kääntäminen ja ymmärtäminen veivät oman aikansa.

Fyysisessä työssä on monia tekijöitä mitkä on otettava huomioon, kuten osien sopivuus ja mitoitus, ohjelman tekeminen ja kytkennän suunnitteleminen ja toteutus. Kytkenän suunnittelu on itsessään haasteellista sitä vähemmän tekeväälle, samoin kuin ohjelmointi vähemmän ohjelmoivalle.

Yksi omista kohtaamistani ongelmista oli huomata miten itse teen ajoittain työstä vaikeamman mielessäni kuin se oikeasti on mm. ylimiittimällä ohjelmoinnin tärkeyttä verrattuna siihen mitä pitäisi tehdä.

Kehitysmahdollisuuksia

Tehtyä työtä voidaan hyödyntää itsessään matriisin valmistuksessa, mutta sitä voidaan käyttää myös yksinkertaisempien kytkentöjen pohjana. Työtä voitaisiin käyttää sellaisenaan binäärikellon rakentamiseen. Tässä tapauksessa työssä tarvitsee vain muuttaa ledirivien järjestys sopivaksi ja ohjelmoida Arduino ja piiri antamaan oikeanlaiset signaalit kullekin riville.

Kytkenän laajentaminen matriisiksi on oma haasteensa. Ledien määrän kasvaessa myös kytkennän virran tarve kasvaa, jolloin pitää huolehtia virran kulun rajoituksesta ledeihin tarkemmin ja mietittävä millaisen virtalähteen kytkentä tarvitsee. Iso haaste on myös matriisin ohjelmointi niin, että rivistä loistaa yksittäinen ledi tai halutut ledit tietystä rivistä. Käytettävällä ohjainpiirillä on helppo ohjata kokonaisia rivejä, mutta yksittäisen ledin ohjaamisessa tulee vastaan omat haasteensa.

8. Yhteenveto

Valitettavasti COVID-19 epidemian ja sitä vallitseva tilanne on estänyt minua viemästä työtä protovaihetta pidemmälle. Työn loppuun viemiseksi pitäisi luoda toimiva matriisi, mutta minulla itselläni ei ole hallussa tarvittavia osia tai välineistöä sen tekemiseksi ja koulun ovien ollessa kiinni minulla ei ole mahdollisuutta niiden käyttämiseen siellä

Prototyypin valmistaminen on itsessään yksinkertainen tehtävä. Tärkeintä on varmistaa, että kytkentä on tehty oikein ja sitä varten tehdyt laskelmat pitävät paikkansa. Mikäli kytkentää suunniteltaessa tulee vaikeuksia, kannattaa tutkia esim. käytettävän piirin spesifikaatioita sillä niistä löytyy yleensä mallikytkentöjä sovellettavaksi omaan kytkentäänsä.

Ohjelmoinnissa on mahdollista käyttää pohjana jo olemassa olevaa ohjelmistoa, kuten itse olen käyttänyt Adafruitin kehittämää ohjelmistoa. Kaikkeen ei kuitenkaan löydy suora vastausta, joten on tärkeää tutkia mitä kaikkea löytyy ja mitä ei löydy on joko tehtävä täysin itse tai muokattava olemassa olevasta aineistosta.

Työssä ei ole pakko käyttää Arduinoa, mutta olen huomannut sen olevan helppoiten saatavilla olevan ja helppoiten käytettävän. TLC59711-ohjainpiiri on toimiva ja sen ohjelmointi on suhteellisen yksinkertaista sen osavalle. Piirien sarjaan kytkeminen on yksinkertaista ja ohjelmointiin riittää, että yksi piiri ohjelmoidaan ja toinen liitetään sarjaan.

Lähteet

1. Rob Arnold; why are LED's different colors?
Saatavilla 16.4.2020 <http://led.linear1.org/why-are-leds-different-colors/>
2. Electronics Basics - How RGB LEDs work?
Saatavilla 16.4.2020. <https://randomnerdtutorials.com/electronics-basics-how-do-rgb-leds-work/>
3. Hardy Wu, Charles Chen, Kenneth Du, Shawn Ding, Alex Wang; How to Select a RGB LED Driver (Elokuu 2013)
Saatavilla 16.4.2020 <http://www.ti.com/lit/an/slvaef3/slvaef3.pdf>

4. Tim Whitaker, Fact or Fiction – LEDs don't produce heat (10.05.2005)
Saatavilla 16.4.2020. <https://www.ledsmagazine.com/articles/2005/05/fact-or-fiction-leds-dont-produce-heat.html>
5. Victor Adrian Floroiu, High Temperature, the enemy of LED performance: what you need to know (23.11.2015)
Saatavilla 16.4.2020. <https://www.linkedin.com/pulse/high-temperature-enemy-led-performance-what-you-need-know-floroiu>
6. Taylor Scully, Why You Need an LED Heat Sink: Increasing light output & extending your LEDs lifetime (February 2019)
Saatavilla 16.4.2020. <https://www.ledsupply.com/blog/why-you-need-an-led-heat-sink/>
7. Mike Turner, All you need to know about fans (01.05.1996)
Saatavilla 16.4.2020 <https://www.electronics-cooling.com/1996/05/all-you-need-to-know-about-fans/>
8. Justine Galbraith, Optical Properties of Glass: How Light and Glass Interact (24.8.2015)
Saatavilla 16.4.2020 <http://www.koppglass.com/blog/optical-properties-of-glass-how-light-and-glass-interact/>
9. Current Sourcing and Sinking (06.02.2003)
Saatavilla 16.4.2020 <https://startingelectronics.org/articles/current-sourcing-sinking/>
10. Texas Instruments; Display Power Solutions for LED Signage
Saatavilla 16.4.2020 <http://www.ti.com/lit/sl/snvy010/snvy010.pdf>
11. How to Defeat LED Ghosting on WPC Era Pins
Saatavilla 16.4.2020 https://emmytech.com/arcade/led_ghost_busting/

12. Kajaanin Ammattikorkeakoulun älykkäidenjärjestelmien insinööriopiskelijatyöryhmä
Aino Honkanen, Harri Kaikkonen, Henna Korhonen, Joel Väisänen, Niko Lindqvist ja Niko Friman
13. Arduino Uno Rev3
Saatavilla 16.4.2020 <https://store.arduino.cc/arduino-uno-rev3>
14. TLC5971-datasheet
Saatavilla 16.4.2020 <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/tlc5971.pdf>
15. Klaus Nurkkala, RGB-LED-valaistuksen ohjaaminen Linux palvelimella (2011)
Saatavilla 16.4.2020
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/31972/Nurkkala_Klaus.pdf?sequence=1&isAllowed=y
16. Bill Earl, TLC5947 and TLC59711 PWM LED Driver Breakouts
Saatavilla 16.4.2020 <http://descargas.cetronic.es/AdafruitTLC5947.pdf>
17. Eliminating Ghost-Image Currents in Color-LED Display Systems Using the MAX6972–MAX6975 LED Drivers
Saatavilla 16.4.2020 <https://www.maximintegrated.com/en/design/technical-documents/app-notes/4/4111.html>