



LAHDEN AMMATTIKORKEAKOULU
Lahti University of Applied Sciences

VÄRINSÄÄTÖ

RGB-ledien värin mittaus- ja säätöjärjestelmä

LAHDEN
AMMATTIKORKEAKOULU
Tekniikan ala
Tietotekniikka
Tietokone-elektronikka
Opinnäytetyö
Kevät 2013
Juuso Sakkara

Lahden ammattikorkeakoulu
Tietotekniikka

SAKKARA, JUUSO: Värinsäätö
RGB-ledien värin mittaus- ja säätöjärjestelmä

Tietokone-elektronikan opinnäytetyö, 32 sivua, 4 liitesivua

Kevät 2013

TIIVISTELMÄ

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli tutkia ledeissä tapahtuvia muutoksia sähköisten ja ympäristöparametrien muuttuessa sekä etsiä mahdollisia värinmittausjärjestelmiä. Näiden pohjalta tuli tehdä värin mittaus- ja säätöjärjestelmä RGB-ledvalaisimia varten. Työn toimeksiantajana toimi Teknoware Oy Lahdessa. Teknoware tuottaa julkisiin ajoneuvoihin sisävalaistusjärjestelmiä sekä turvavalaisusjärjestelmiä laivoihin ja kiinteistöihin.

Työ alkaa teoriaosuudella, jossa selvitetään ledeissä tapahtuvia muutoksia sähköisten arvojen sekä ympäristöparametrien muuttuessa. Saatujen tietojen perusteella pystytään määrittelemään mahdollinen säätöjärjestelmä erityisesti RGB-ledejä varten.

Säätöjärjestelmän toteutus alkaa erilaisten vaihtoehtojen selvittämisellä. Tässä etsittiin tietoa jo olemassa olevista mittaus- ja säätöjärjestelmistä. Näistä valittiin toteutuskelpoisimmat vaihtoehdot, jotka esitellään tässä opinnäytetyössä. Näiden vaihtoehtojen perusteella luotiin värinsäätöjärjestelmästä prototyyppi, jonka pohjalta tehtäisiin värinsäätöjärjestelmä osaksi erästä julkisen liikenteen sisävalaistusjärjestelmää.

Prototyypin perusteella selvitettiin värinhallinnan toteuttamiskelpoisuutta tulevissa käyttökohteissa. Säätöjärjestelmän toteutustavaksi valittiin RGB-värianturi, jonka avulla pystyttiin mittaamaan RGB-ledin eri värien valovirtaa.

Asiasanat: RGB-led, värin hallinta, värin mittaus, led-valaisimet, värianturi

Lahti University of Applied Sciences
Degree Programme in Information Technology

SAKKARA, JUUSO: Colour Management
Colour management system for RGB-leds

Bachelor's Thesis in Computer Electronics, 32 pages, 4 pages of appendices

Spring 2013

ABSTRACT

The objective of this study was getting information about available colour measuring techniques for led lighting systems and designing a colour management system for led lights based on the studies. The study was commissioned by Teknoware Oy in Lahti. Teknoware produces interior lighting systems for public transportation and emergency lighting systems for ships and buildings.

This Bachelor's thesis starts with theory on how different conditions affect leds and the colour of led lights. Based on the information from different scientific publications it was possible to determine a suitable colour measuring technique for RGB-leds.

The implementation of the colour management system started with gathering information about existing colour management systems. Based on these different options, a prototype of a colour measuring system was created, which would be used in an interior lighting system of public transportation.

With this prototype it was possible to find out if this kind of colour management system was feasible for the future applications. It was decided that the colour management system should be based on RGB colour sensors, which are able to measure the luminous flux of the different colours of RGB leds.

Key words: RGB led, colour management, colour measurement, led lighting, colour sensor

SISÄLLYS

1	JOHDANTO	1
2	LED	2
3	LEDIEN VALOON VAIKUTTAVAT TEKIJÄT	5
3.1	Lämpötilan vaikutus lediin	6
3.2	Käyttöiän merkitys ledissä	10
3.3	Virran vaikutus ledissä	13
3.4	Binnaus	14
4	VÄRIN MITTAUS JA SÄÄTÖ	16
4.1	Säätö lämpötilan mukaan	17
4.2	Säätö fotodiodia käyttäen	18
4.3	Fotodiodin ja lämpömittauksen yhdistelmä	20
4.4	Säätö värianturin avulla	20
5	VÄRIMITTAUSJÄRJESTELMÄN KEHITYS	22
5.1	Mittausjärjestelmän suunnittelua	22
5.2	Värimittausjärjestelmän prototyyppi	26
5.3	Prototyypin testaus	28
5.4	Vaihtoehtoinen värisensori	29
6	YHTEENVETO	31
	LÄHTEET	33
	LIITTEET	36

SANASTO:

A/D-muunnin on analogia-digitaalimuunnin

ASSIST on the Alliance for Solid-State Illuminations and Technologies

LED on Light Emitting Diode, eli valodiodi

NTC-vastus on lämpövastus, engl. Negative Temperature Coefficient

RGB on Red-Green-Blue, eli punainen, vihreä ja sininen

1 JOHDANTO

Tämän opinnäytetyön tavoitteena on selvittää RGB-ledvalaisimien värisävyyden liittyviä ongelmia ja etsiä niihin ratkaisuja. Työn toimeksiantajana toimi Teknoware Oy Lahdessa. Työn lähtökohtana oli värisävyn vaihtelu RGB-ledeillä valmistetuissa valaisimissa. Esimerkiksi tiettyä violetin värisävyä tavoiteltaessa saattoi väri muuttua aina uuden komponenttierän myötä tai ympäristön lämpötilan muuttuessa.

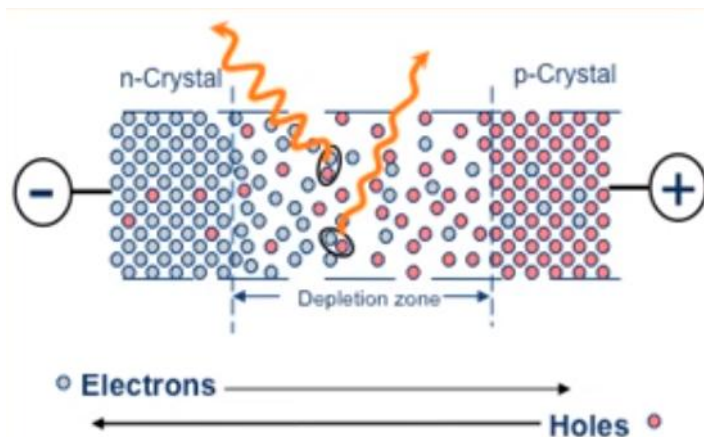
Tarkoituksena oli luoda mittaus- ja säätöjärjestelmä, jolla valaisimen väri pysyisi aina vakiona ympäristöparametrien muuttuessa ja komponenttierästä riippumatta. Tätä varten tuli selvittää erilaisia menetelmiä värin säätämiseen sekä tutkia, mikä säätöjärjestelmä sopisi parhaiten haluttuun käyttökohteeseen.

Työn toimeksianto oli jaettu kolmeen osaan: esitutkimus-, topologia- ja toteutusvaiheeseen. Esitutkimusvaiheessa selvitetään RGB-ledeissä tapahtuvat muutokset eri parametrien suhteen. Topologiavaiheessa tutkitaan mahdollisia menetelmiä värin mittaamiseen ja etsitään mahdollisimman yksinkertainen järjestelmä värin ohjaamiseen. Toteutusvaiheessa toteutetaan yksi valittu säätöjärjestelmä ja mitataan sen toimintaa ympäristöparametrien muuttuessa.

Ledien väreissä tapahtuvia muutoksia selvitettiin aiempien tutkimusten perusteella. Näiden perusteella pystyttiin hahmottamaan suurimmat värivirheitä aiheuttavat tekijät. Aineistona tässä työssä käytettiin suurimmaksi osaksi aiheesta tehtyjä tieteellisiä julkaisuja. Näiden perusteella määriteltiin paras käyttökohteeseen soveltuva värinhallinnan vaihtoehto myös kustannustekijät huomioiden.

2 LED

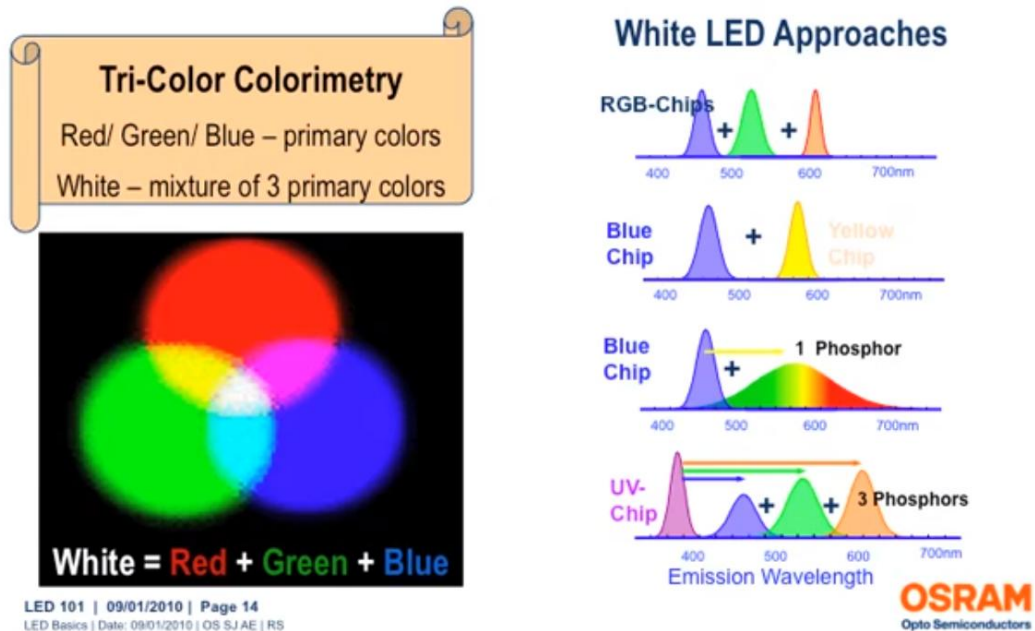
Led (engl. Light Emitting Diode) eli valodiode on puolijohdekomponentti, joka muuttaa virran valoksi, kun sen läpi kulkee tarpeeksi suuri virta. Tätä ilmiötä kutsutaan elektroluminesenssiksi. Elektroluminesenssi-ilmiö syntyy, kun elektronit liikkuvan PN-rajapinnan N-puolelta P-puolelle ja aukot P-puolelta N-puolelle. Näiden alueiden välissä on tyhjennysalue, jossa elektronit ja aukot yhdistyvät aiheuttaen säteilyä eli valoa. Kuviossa yksi on kuvattuna elektronien ja aukkojen liikettä PN-rajapinnassa. Valon lisäksi elektronien ja aukkojen yhdistyessä syntyy myös lämpöä. Toisin kuin hehkulamppu, ledin lämpö ei säteile ympärille, vaan siirtyy ledistä pois johtamalla. (Osram Opto Semiconductors 2012a.)



KUVIO 1. PN-rajapinta (Osram Opto Semiconductors 2012a)

Tavallisen diodin tavoin ledillä on tietty kynnysjännite. Kynnysjännitteen suuruus riippuu ledissä käytetyistä puolijohteista, joten esimerkiksi erivärisillä ledeillä on erisuuruiset kynnysjännitteet. Ledin väri riippuu siinä käytetyistä puolijohteista, joita yhdistelemällä saadaan aikaan erilaisia värisävyjä. Esimerkiksi punainen ledi voidaan tuottaa yhdistämällä alumiinia, galliumia, indiumia ja fosfaattia. Värejä voidaan myös saada aikaan yhdistämällä erivärisiä ledejä. Esimerkiksi valkoinen ledi voidaan toteuttaa yhdistämällä punainen, vihreä ja sininen väri, joiden yhdisteenä syntyy valkoinen valo. Perinteisin tapa toteuttaa valkoinen väri on

käyttämällä sinistä tai ultravioletteilediä ja fosforiseosta. Sininen valo heijastetaan fosforin läpi, jolloin fosfori absorboi osan sinisestä valosta ja säteilee valoa pidemmillä aallonpituuksilla. Kuviossa kaksi on erilaisia tapoja valkoisen värin tuottamiseen. (Osram Opto Semiconductors 2012a.)



KUVIO 2. Valkoisen värin toteutustavat (Osram Opto Semiconductors 2012a)

Nykyisin ledit pystytään tuottamaan pienempiin koteloihin ja näihin koteloihin pystytään sisällyttämään useita eri ledejä. Tällaisia komponentteja ovat muun muassa RGB-ledit, joissa saman kotelon sisään on sisällytetty kolme eriväristä lediä. Näiden ledien värit ovat punainen, vihreä ja sininen. Kyseisten värien avulla voidaan luoda kaikenlaisia värejä sekoittamalla eri värejä eri suhteissa.

Nykyaikana valaistusteknologia alkaa siirtyä entistä enemmän ledien puoleen. Ihmisten kiinnostuessa enemmän ympäristöystävällisyydestä ja energian säästöstä ovat valaisinvalmistajat vastanneet kysyntään alkamalla valmistaa ledivalaisimia. Tätä on myös edesauttanut EU:n direktiivin 2005/32/EY mukainen päätös ajaa hehkulamppujen tuotanto ja myynti vaiheittain alas Euroopassa. (Euroopan Parlamentin ja Neuvoston direktiivi 2005/32/EY.)

Ledien käyttöikä on ylivoimainen verrattuna hehkulamppuihin ja loisteputkiin. Yhden ledilampun keskimääräinen elinikä on noin 25 000 tuntia, ja vastaavasti

hehkulampulla keskimääräinen käyttöikä on noin 1 000 tuntia. Vastaavasti loistelampulla käyttöikä on noin 10 000 tuntia. Toisaalta valmistajat voivat luvata vieläkin parempia käyttöaikoja valaisimilleen. Cree lupaa uusien ledilamppujensa eliniäksi noin 50 000 tuntia. Pitkä käyttöikä pidentää valaisimen vaihtoväliä, mikä luo omalta osaltaan säästöä kuluttajalle. (Osram Opto Semiconductors 2009; Cree 2011.)

Käyttöään lisäksi ledien energiankulutus on paljon tavanomaisia valaisimia pienempi. Ledivalaisimet voivat tuottaa yli 100 lumenia wattia kohden. Esimerkiksi 8 watin ledivalaisin tuottaa saman määrän valoa, kuin 40 watin hehkulamppu. Vaikka ledilamput ovatkin tavanomaisia valaisimia kalliimpia, maksavat ne itsensä takaisin pienen sähkönkulutuksensa ja pitkän käyttöiän myötä. (Navigant Consulting Europe, Ltd. 2012.)

Ledivalaisimien hyötyihin voidaan myös laskea sähköisten arvojen lisäksi valosaasteen vähäisyys. Ledien valokeila kohdistuu suoraan eteenpäin, toisin kuin hehkulampussa, jotka säteilevät valoa ympärilleen. Tämä on erityisen hyödyllistä katuvailaistuksessa, jossa valo halutaan kohdistaa suoraan kadun pintaan. Toisaalta tämä ominaisuus voi hankaloittaa sisävalaistuskäyttöön tarkoitettujen ledivalaisimien suunnittelua. (Osram Opto Semiconductors 2009.)

3 LEDIEN VALOON VAIKUTTAVAT TEKIJÄT

Tämä opinnäytetyö keskittyy erityisesti RGB-LEDeihin ja niissä tapahtuviin muutoksiin eri parametrien muuttuessa. Joissakin esimerkeissä on kuitenkin teoriaa havainnollistettu myös valkoisien ledien avulla. RGB-ledien yleisimpiä käyttökohteita ovat LCD-näyttöjen taustavalaistukset, yleisten tilojen valaistukset ja koristevalaistukset.

RGB-ledit soveltuvat todella hyvin taustavalaistuksen luontiin, sillä ne pystyvät tuottamaan punaisen, vihreän ja sinisen valon lisäksi näiden värien väriyhdistelmiä välittömästi. Yhdistämällä kaikki nämä värit saadaan aikaan valkoista valoa. Valkoisen valon tuottaminen RGB-ledillä on tosin epäluotettavaa, koska ne sisältävät kolme erillistä, eriväristä lediä, joilla on omat sähköiset ominaisuutensa. Esimerkiksi punaisen ledin lämpötilariippuvuus on paljon suurempi kuin vihreän ja sinisen. Valkoisen valon värilämpö voi siis muuttua ympäristöparametrien muuttuessa. Suunnittelijan onkin otettava nämä asiat huomioon valaisinta suunniteltaessa.

Testitilanteessa saatu väri voi olla todellisessa toimintaympäristössä aivan toinen. Toisaalta värin muutokset voidaan pitää kurissa huolehtimalla, että valaisimen ja sen käyttöympäristön lämpötila pysyy tasaisena. Pitämällä lämpötila alle kyseisille ledeille määrättyjen maksimiarvojen voidaan myös pidentää itse valaisimen käyttöikää. Vaikka lämpötila saataisiin pysymään tasaisena valaisimen käyttöympäristössä ja itse valaisimessa, vaikuttaa lediin silti sen ikääntymisen myötä tulevat muutokset. Nämä muutokset tapahtuvat kuitenkin niin pitkällä aikavälillä, että niitä on vaikea ottaa huomioon etukäteen valaisinta suunniteltaessa. Jos asiakkaalla on tarkat vaatimukset värin suhteen, olisi valaisimeen lisättävä väriä mittaava ja säätävä järjestelmä.

Vaikka ledit ovat tällä hetkellä ylivoimaisimpia valolähteitä markkinoilla, on niissä myös paljon ongelmia. Ledien värien aallonpituudet saattavat muuttua ja niiden tehokkuus voi heiketä muun muassa ympäristöparametrien muuttuessa. Toisaalta komponenttivalmistajatkään eivät välttämättä pysty tuottamaan täysin samanvärisiä ledejä eri tuotantosarjojen välillä. Ledien tuottaman valon värin muutoksiin vaikuttavat muun muassa ledin liitoslämpötila, käyttöikä, sen läpi menevä virta ja ledin valmistustavat. Suurimmat muutokset ledien valossa syntyvät lämpötilan ja käyttöiän myötä. Ottamalla nämä kaksi seikkaa huomioon suunnittelussa, voidaan parantaa tuotteen toimintavarmuutta huomattavasti. (Deurenberg, Hoelen, van Meurs & Ansems 2005.)

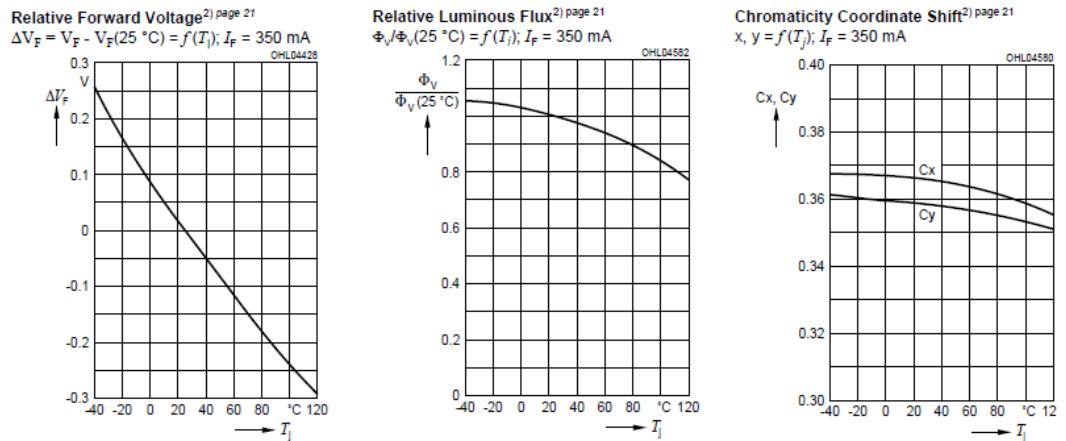
3.1 Lämpötilan vaikutus lediin

Lämpötilan vaikutus ledeihin on suurin niihin liittyvistä ongelmista. Valaisimia tarvitaan erilaisissa ympäristöissä, jolloin myös ympäristön lämpötilat ovat erilaisia. Esimerkiksi ulkokäyttöön tarkoitettu valaisin voi joutua hyvinkin suurten lämpötilavaihtelujen kohteeksi. Tietyissä ympäristöissä ja laitteiden sisällä voivat ledit joutua taas korkeiden lämpötilojen uhreiksi. Ledit tuottavat myös itse paljon lämpöä, joka aiheuttaa ongelmia laitteen suunnittelussa. Tällöin on otettava huomioon, kuinka lämmön voisi johtaa pois ledistä.

Lämpötilan noustessa ledin lähettämän valon aallonpituudet muuttuvat ja näin ollen myös ledin väri muuttuu. Tämä on huomattavissa erityisesti valkoisissa ledeissä, sillä ihmisen silmä erottaa selvästi vaihtelevuudet valkoisessa valossa. Erityisen ongelmallista on, jos valkoinen valo on tuotettu RGB-ledejä käyttämällä, jolloin yhden komponentin kotelossa on kolme eriväristä lediä, joilla kaikilla on omat lämpötilariippuvuutensa. (The Bergquist company 2012.)

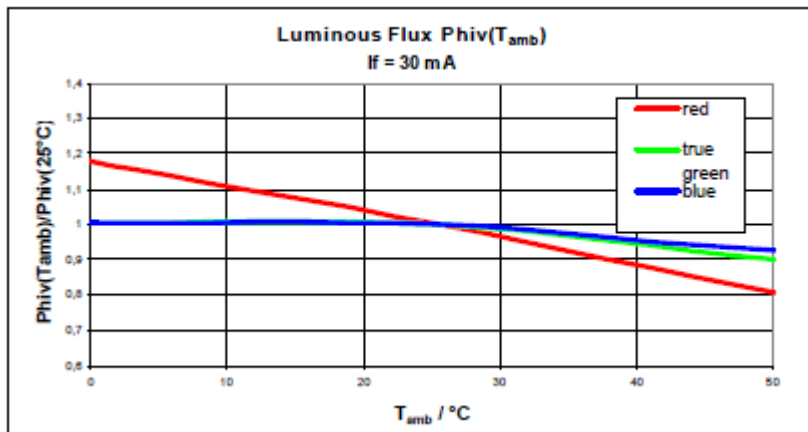
Aallonpituuden lisäksi lämpötila muuttaa myös ledin kynnysjännitettä. Kuviossa 3, ensimmäisessä graafissa on Osramin Osram SLL 80 LCW CQ7P.PC ledin datalehdessä otettu esimerkki lämpötilan vaikutuksesta kynnysjännitteeseen virran ollessa 350 mA. Lämpötilan noustessa 25 °C:sta 80 °C:een pienenee kynnysjännite noin 0,17 volttia. Toisaalta tätä kynnysjännitteen pienenemistä voi käyttää hyväksi esimerkiksi ympäristön lämpötilan arvioinnissa. Jos on tiedossa,

kuinka paljon kynnysjännite muuttuu lämpötilan suhteen, voidaan jännitettä seuraamalla määritellä ympäristön lämpötila. (Osram Opto Semiconductors 2012c; Qu, Wong, Tse.)



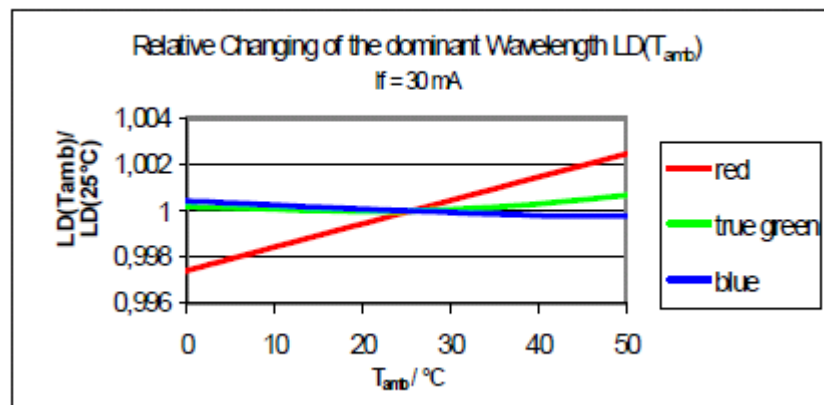
KUVIO 3. Muutokset ledissä lämpötilan noustessa (Osram Opto Semiconductors 2012c)

Samassa kuviossa keskimmäisenä olevassa graafissa on esitetty valovirran muutos lämpötilan suhteen. Lämpötilan noustessa 25 °C:sta 80 °C:seen, laskee valovirta noin 10 %. Viimeisenä kuviossa on esitettyinä ledin värin xy-koordinaattien siirros lämpötilan noustessa. Kuviossa neljä on esitettyinä punaisen, sinisen ja vihreän ledin valovirtojen heikkeneminen lämpötilan noustessa 0 °C:sta +50 °C:seen. Erityisesti punaisen värin kohdalla ongelma on suuri, sillä valovirta heikkenee noin 40 % kyseisellä lämpötilavaihtelulla. Sinisen ja vihreän värin kohdalla valovirta heikkenee vain noin 10 %. (Osram Opto Semiconductors 2004.)



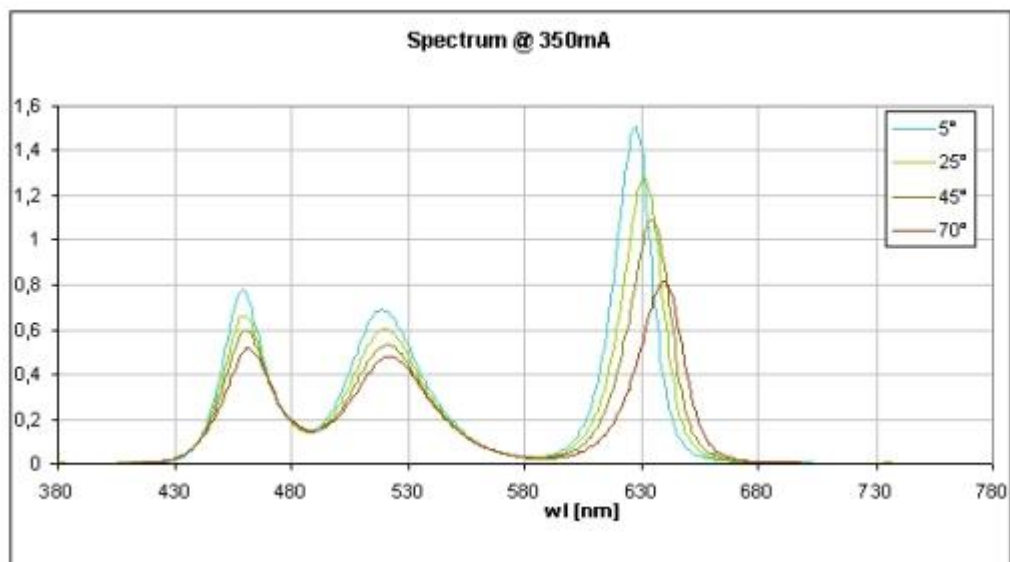
KUVIO 4. Valovirran heikkeneminen lämpötilan suhteen (Osram Opto Semiconductors 2004)

Ihmisen silmä ei kuitenkaan pysty hahmottamaan kuin 15 % vaihtelun valon kirkkaudessa, joten sinisen ja vihreän värin valovirtaa ei tarvitse välttämättä kompensoida. Punaisen värin kohdalla ongelma on taas huomattavasti suurempi. Vastaavasti punaisen värin aallonpituus nousee lähes lineaarisesti lämpötilan suhteen. Tämä on nähtävissä kuviossa viisi. Kuvioiden avulla on helppo hahmottaa, kuinka vaikeaa tietyn värin ylläpitäminen RGB-LEDillä tehdyssä valaisimessa on. (Osram Opto Semiconductors 2004.)



KUVIO 5. RGB-ledin aallonpituuksien muutos lämpötilan suhteen (Osram Opto Semiconductors 2004)

Kuviossa kuusi on esitetty RGB-ledin aallonpituuksien muutokset eri lämpötiloissa. Kuvioista näkee selvästi, kuinka suuri vaikutus lämpötilalla on erityisesti punaiseen väriin, jonka aallonpituudella valon teho on pudonnut tässä tapauksessa lähes puoleen, kun lämpötila on noussut 65 °C:lla. Myös punaisen värin aallonpituus on muuttunut suuremmaksi lämpötilan noustessa. (MAZeT 2012.)

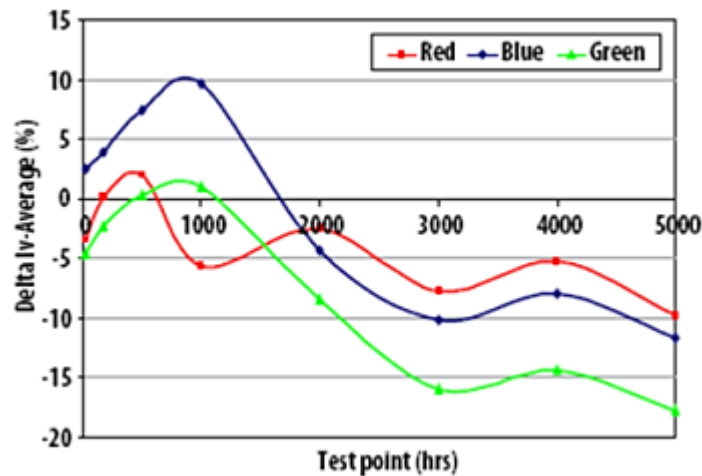


KUVIO 6. Aallonpituuksien muutokset lämpötilan noustessa (MAZeT 2012)

Aallonpituuksien ja intensiteetin lisäksi ledin liitoslämpötila vaikuttaa dramaattisesti sen käyttöikään. Tästä syystä ledin liitoslämpötila tulisi pitää alle sille määritellyn maksimiarvon. Jo 50 °C:n nousu voi lyhentää ledin elin ikää yli 30 000 tunnilla, joka on määrittely esimerkiksi Osramin LRTB GFTG RGB -ledin datalehdessä.

3.2 Käyttöiän merkitys ledissä

Vaikka ledit ovat erittäin pitkäikäisiä, ilmenee niissä käyttöiän myötä tehon heikkenemistä, joka ilmenee valovirran vähenemisenä. Toisin kuin hehkulamput, joiden elinikä päättyy äkillisesti lampun rikkoutumiseen, heikkenevät ledit hitaasti ja vähitellen. Kuviossa seitsemän on havainnollistettu tietyllä RGB-ledillä, kuinka kirkkaus muuttuu punaisella, vihreällä ja sinisellä ledillä 5 000 ensimmäisen käyttötunnin aikana. (Philips Technology white paper 2012.)

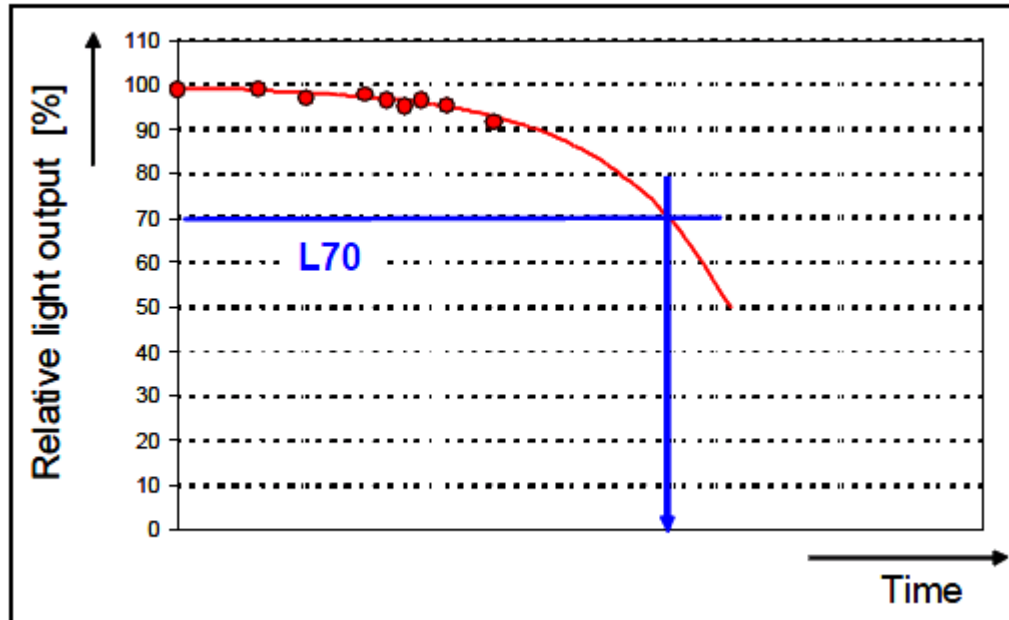


KUVIO 7. Kirkkauden muutos eri väreillä ajan suhteen (MAZeT 2012)

Samasta kuvioista voidaan myös huomata, että ensimmäisen 1000 tunnin aikana ledien valoteho nousee, ennen kuin se alkaa hiljalleen heiketä. Tämä ajan myötä tapahtuva valotehon heikkeneminen on harvoin lineaarista, vaan se voi ajan myötä nousta ja laskea, kunnes se alkaa lopulta himmetä tasaisemmin.

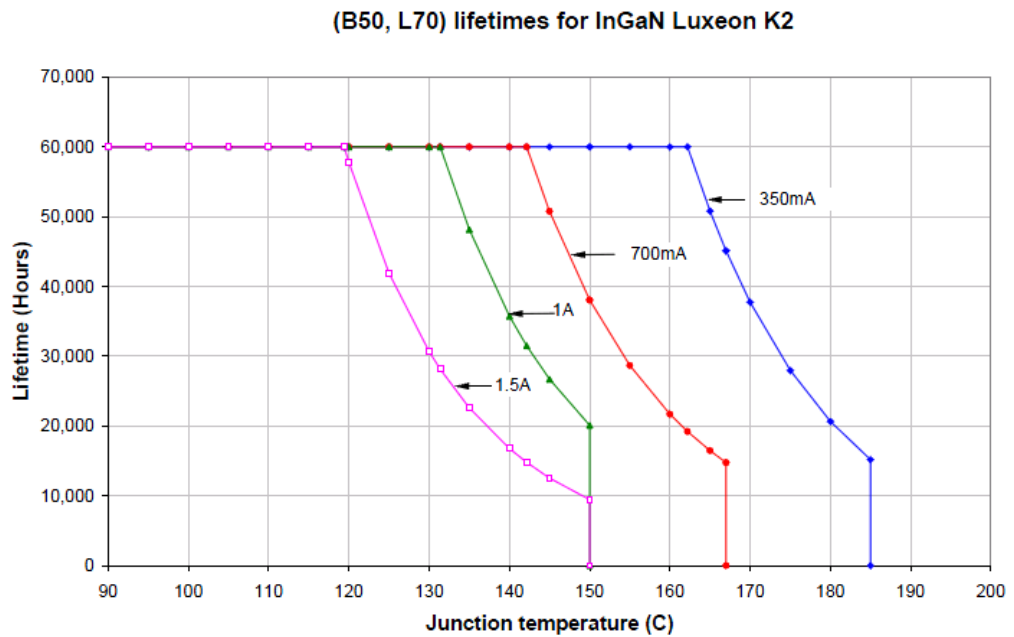
Koska ledien käyttöikä ei pääty yhtä selkeästi rikkoutumiseen, kuten esimerkiksi hehkulamput, on ASSIST (the Alliance for Solid-State Illuminations and Technologies) määrittellyt ledien eliniälle tietyt raja-arvot, jolloin valaisin tulisi korvata. Yleisvalaistuksessa tämä raja-arvo on, kun ledin valoteho on pudonnut 70 %:iin alkuperäisestä ja koristevalaistuksella vastaava arvo on 50 %. ASSIST:n mukaan 30 %:n heikentymä valon ulostulossa on lähimpänä sitä arvoa, jonka ihmisen silmä pystyy havaitsemaan. Kuviossa kahdeksan on esitetty yleisesti L70:tä kuvaava raja-arvo, jolloin valoteho on pudonnut 70 %:iin alkuperäisestä

arvosta, ja se, kuinka ledin valoteho muuttuu iän myötä. (Philips Technology white paper, ASSIST)



KUVIO 8. Valon ulostulon heikkeneminen 70 %:iin (Osram Opto Semiconductors 2008)

Toinen määritelmä ledien käyttöikä on se ajankohta, kun tietty osa valaisimista todennäköisesti vikaantuu. Raja-arvoiksi tälle on ehdotettu, kun 10 % tai 50 % ledeistä on todennäköisesti vikaantunut. Näitä arvoja merkitään tunnuksilla B10 ja B50. Ledin käyttöikä vaikuttavat erityisesti liitoslämpötila ja ledin läpi menevä virta. Näitä säätelemällä ledin käyttöikä pitenee huomattavasti ja tuotteen luotettavuus paranee. Kuviossa yhdeksän on Luxeon K2 valkoisen ledin käyttöiän verrannollisuus sen läpi menevään virtaan liitoslämpötilan noustessa. Kuvion otsikossa olevat termit B50 ja L70 kuvaavat arvoja, jolloin 50 % ledeistä on vikaantunut ja valon ulostulo on pudonnut 70 %:iin (Philips Technology white paper 2012.)



KUVIO 9. Virran ja lämpötilan vaikutus ledin käyttöikään (Philips Technology white paper 2012.)

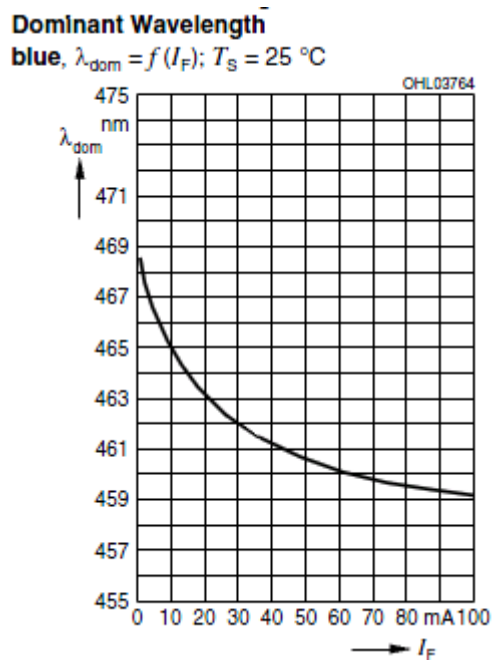
Komponenttivalmistajat antavat yleensä ledin eliniän tunteina verrattuna johonkin B- ja L-arvoon tietyssä lämpötilassa. Esimerkiksi Osramin LRTB GFTG -tyypin RGB-ledille on määritelty sen eliniäksi 100 000 tuntia 25 °C:ssa ja raja-arvoina ovat L50 ja B50. Annetun ajan kuluttua ledit ovat voineet menettää 50 % valotehostaan ja niillä on 50 %:n todennäköisyys vikaantua. Samassa datalehdessä on nähtävissä myös, kuinka lämpötila vaikuttaa sen elinikään. Samoilla raja-arvoilla lämpötilan ollessa 85 °C:tta sen eliniäksi on määritelty 70 000 tuntia. (Osram Opto Semiconductors 2012)

Hehkulamppuja käytettäessä voidaan pidentää sen käyttöikää pienentämällä sen käyttöjännitettä. Ledien tapauksessa voidaan käyttää samanlaista menetelmää, mutta säädettävänä kohteena on virta. Vaikka virran pienentäminen vähentää ledin tuottamaa valoa, tuo se sille huomattavasti enemmän käyttöikää. Käyttöiän pidentäminen taas pidentää valaisimen vaihtoväliä ja luo säästöä käyttäjälle.

3.3 Virran vaikutus ledissä

Ledin läpi menevä virta vaikuttaa valon aallonpituuteen ja sen liitoslämpötilaan. Aallonpituuden nousu taas aiheuttaa värisävyissä eroavaisuuksia. Kuviossa kymmenen on erään Osramin RGB-ledin sinisen värin aallonpituuden muutos virran suhteen. Virtaa säätämällä voidaan myös vaikuttaa valon intensiteettiin. Mitä suurempi virta sen läpi menee, sitä suurempi intensiteetti. Näin ollen ledin kirkkautta voidaan säätää virran avulla.

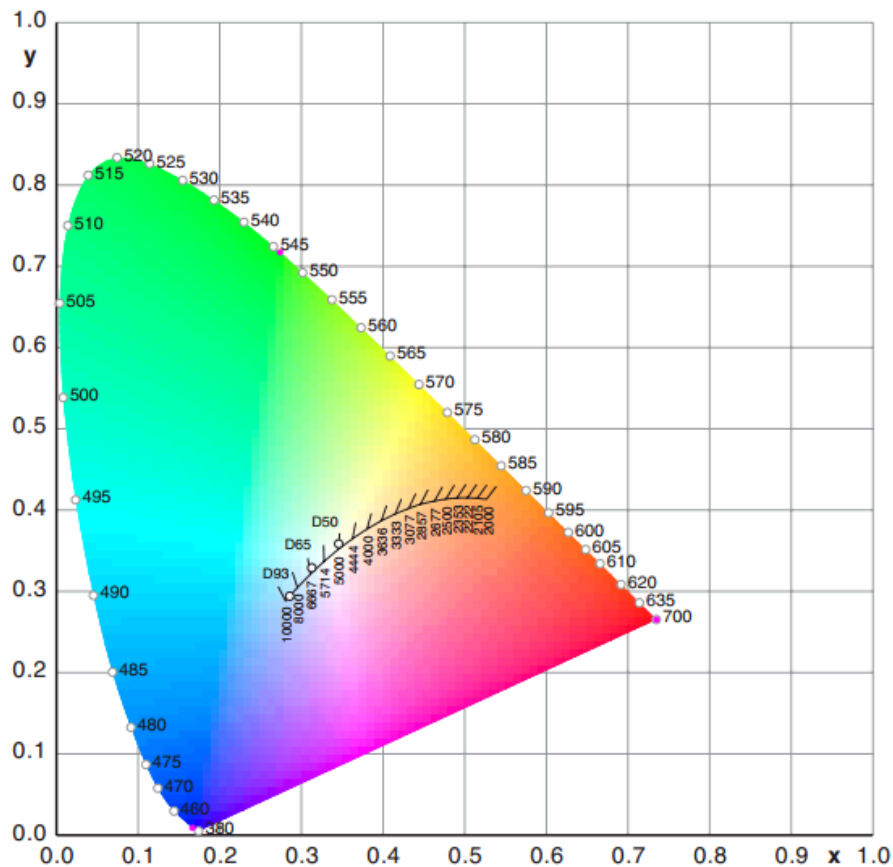
Virran nousu kuitenkin tarkoittaa myös lämpötilan nousua ledissä, mikä aiheuttaa haitallisia ominaisuuksia. Virta kannattaakin pitää vakiona ja alle sille määritellyn maksimiarvon, mikä takaa sen toimintavarmuuden.



KUVIO 10. Aallonpituuden muutos virran suhteen (Osram Opto Semiconductors 2012b)

3.4 Binnaus

Valmistusmenetelmien vuoksi ledien värisävyt on lähes mahdoton saada tismalleen samanlaisiksi. Tietyissä valaisinsovelluksissa pienetkin heitot värisävyssä voivat aiheuttaa ongelmia. Tästä syystä komponenttivalmistajat ovat luoneet niin sanotun binnaus-järjestelmän. Binnauksessa ledit jaetaan tietyn värisävyn tai värilämmön mukaan tiettyihin ryhmiin, jotka osuvat samalle alueelle CIE-väriavaruudessa. Kuviossa yksitoista on nähtävissä CIE1931-värikartta, johon on piirretty valkoisen eri värilämmöt 2000 kelviniästä 10 000 kelviniin. Piste D50 kuvaa päivänvalon värilämpöä.



KUVIO 11. CIE1931 väriavaruus (Hoffmann 2012)

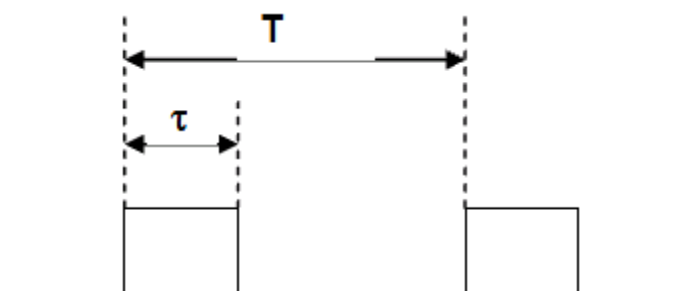
Järjestelmän avulla valaisinvalmistajat voivat tuottaa helpommin halutun sävyisiä valaisimia. Etenkin valkoista valoa tuottavien valaisimien kohdalla tämä on tärkeää, sillä binnaukset voivat vaihdella samalla komponentilla kylmänsävyisestä lämpimänsävyiseen. Jaottelun ansiosta valaisinvalmistaja voi sekoittaa eri ryhmistä otettuja ledejä saadakseen aikaan halutun sävyisen ja tasalaatuisen valaisimen. (Lithonia Lighting 2012.)

4 VÄRIN MITTAUS JA SÄÄTÖ

RGB-ledivalaisimien värinsäätöä suunniteltaessa on otettava huomioon edellä mainitut seikat. Ledien riippuvuudet erilaisista ominaisuuksista ovat saaneet aikaan useita erilaisia säätötoteutuksia. Väriä voidaan hallita muun muassa lämpötilan hallinnalla sekä erilaisten fotodiodien ja värisensoreiden avulla. Jokaisella eri säätötavalla on omat hyötynsä ja haittansa, minkä takia on mietittävä, millaiseen kohteeseen järjestelmä tulee ja millainen budjetti säätöjärjestelmällä tulee olemaan.

Värimuutosongelmat ovat olleet tiedossa jo pitkään, minkä ansiosta asiasta on saatavilla paljon tutkimustietoa. Useimmiten nämä säätö- ja mittausjärjestelmät perustuvat pulssinleveysmodulaatioon ja mikrokontrolleriohjaukseen. Mikrokontrollerille tuodaan eri mittaustapojen mittaustulokset ja sen avulla voidaan säätää pulssisuhdetta, jolla lediä ajetaan.

PWM:ssä eli pulssinleveysmodulaatiossa (engl. Pulse Width Modulation) ledejä ohjataan korkeataajuisella kanttaalloolla. Kuviossa kaksitoista kuvataan pulssinleveysmodulaatiota, jossa τ esittää pulssin ylätilan leveyttä ja T jaksonaikaa. Pulssin ollessa ollessa ylätilassa ledi on päällä ja alatilassa ledi on sammuksissa. Tämä kuitenkin tapahtuu niin korkealla taajuudella, että ihmissilmä ei kykene sitä havaitsemaan. Pulssin leveyttä pienentämällä tai suurentamalla voidaan määrittellä, kuinka kirkkaasti ledi palaa.



KUVIO 12. Pulssinleveysmodulaatio

Kun ledivalaisinkytkennässä on asetettu tietty vakiovirta, voidaan sen kirkkautta säätää manuaalisesti erillisellä himmentimellä, joka toimii pulssinleveysmodulaatiolla.

4.1 Sääto lämpötilan mukaan

Ledien valovirran ollessa erittäin lämpötilariippuvainen on mahdollista parantaa valaisimen väriluotettavuutta säätämällä ledin lämpötilaa. Parhaiten tähän tarkoitukseen sopii liitoslämpötilan mittausta, mutta se ei ole käytännössä mahdollista tai kannattavaa pintaliitoskomponenttien kohdalla, sillä lämpötila-anturi tulisi saada ledin ja juotospadin väliin. Tästä syystä mittausta kohteena tulisi käyttää ledin jäädytys-elementtiä tai juotospadia. Mittaustuloksen perusteella voitaisiin säätää ledin läpi menevää virtaa. (Deurenberg, Hoelen, van Meurs & Ansems 2005.)

Yksi tapa määrittellä ledin lämpötila on mitata ledin yli olevaa jännitettä, kun virta pidetään vakiona. Ledin yli oleva jännite on lähes suoraan verrannollinen sen liitoslämpötilaan, ja näitä vertailemalla saadaan määriteltyä ympäristön lämpötila. Vertailun kohteeksi tarvitaan kuitenkin komponenttivalmistajan määrittelemät arvot, kuinka paljon ledin kynnysjännite putoaa lämpötilan noustessa, eikä näitä tietoja ole aina yleisesti saatavilla. Mittaamalla diodin yli olevaa jännitettä ei tarvittaisi kytkentään erillisiä antureita, mikä taas yksinkertaistaa kytkentää. (Qu, Wong, Tse.)

Ledien värimuutoksia kynnysjännitteen suhteen voidaan myös mitata ja simuloida itse. Tätä varten olisi hyvä olla uuni, jonka lämpötilaa voidaan säätää tarkasti. Ledejä ajettaisiin mahdollisimman pienellä pulssisuhteella ja vakiovirralla, jotta ledin itsensä aiheuttama lämpötilan nousu jäisi mahdollisimman pieneksi. Uunin lämpötilaa nostettaessa mitataan, paljonko ledien kynnysjännite muuttuu lämpötilan suhteen. Samalla tulisi mitata ledien värikoordinaattien muutoksia ja luoda näiden avulla raja-arvot, kuinka paljon väri on muuttunut. (Sun, Wang 2012.)

Eräs tapa määrittellä ledin lämpötilaa on kytkeä sen välittömään läheisyyteen NTC-vastus, jonka resistanssi laskee lämpötilan noustessa. Vastuksen avulla lämpötila saadaan määriteltyä melko tarkasti, mutta tässä tulee kuitenkin muistaa, että vastuksen lämpötilaan voi vaikuttaa myös muut ulkoiset tekijät, jotka voivat vaikuttaa saatuun lämpötilaan.

Kun ledin lämpötila on saatu mitattua, tarvitaan kytkentään jonkinlainen säätöjärjestelmä värin oikaisemiseksi. Yleisesti tämä on hoidettu PWM-ohjauksella, jota ohjataan mikrokontrollerilla. Tämä tapa on helppo toteuttaa, sillä mikrokontrolleri pystyy automaattisesti säätämään pulssin leveyttä haluttuun suuntaan mittaustulosten perusteella, jolloin haluttu väri pysyy tasaisena.

Lämpötilaan perustuvalla mittauksella ei kuitenkaan voida torjua led-komponenttien ikääntymisestä aiheutuvia valovirran muutoksia. Sen lisäksi lämpötilaan perustuva säätö on melko epätarkka, sillä se perustuu värisävyyn ennustamiseen. Lämpötila tulisikin pitää tasaisena, jolloin tiedetään tarkalleen, millaiset aallonpituudet ja intensiteetit valolla silloin on. Lämpötilaan perustuvaa säätöjärjestelmää varten tulisi ledien aallonpituuksien muutoksia mitata ja simuloida ennalta lämpötilan suhteen, jotta järjestelmä voitaisiin toteuttaa. (Qu, Wong, Tse.)

Lämpötilan mukaan tapahtuvat muutokset ledeissä voi myös muuttua eri valmistuserien välillä, joten värimuutoksen ennustaminen on tässä tapauksessa vaikeaa. Tällöin jokaiselle eri ledien valmistuserälle täytyisi tehdä omat simulaatiot, jotta säätöjärjestelmästä saataisiin luotettava. (Deurenberg, Hoelen, van Meurs & Ansems 2005.)

Lämpötilaan perustuvan säädön etuja on sen edullisuus ja sen kyky korjata aallonpituuksien muutoksia. Kun kytkennässä ei ole optisia sensoreja, ei kytkentään tarvita välttämättä mikro-ohjainta ohjaamaan ledejä. Tästä syystä säästyään myös ohjelmien suunnittelulta. Optisten sensorien mittaustuloksiin vaikuttavat myös lämpötilan muutokset samalla tavalla kuin itse ledeihinkin, jolloin mittaustuloksia voidaan joutua kompensoimaan.

4.2 Säätö fotodiodia käyttäen

Fotodiodin avulla saadaan mitattua helposti valovirta. Se antaa ulostulona jännitteen, valovirran suuruudesta riippuen. Tavallista lediäkin voidaan käyttää fotodiodin tavoin, minkä voi helposti havaita mittaamalla sen yli olevaa jännitettä, kun siihen kohdistetaan valoa. Tavallisen ledin tapauksessa se havaitsee valon

parhaiten, joka on lähimpänä sen omaa väriä. Esimerkiksi käytettäessä vihreää lediä fotodiodina havaitsee se helpoiten vihreän valon.

Fotodiodin avulla pystytään ehkäisemään lämpötilavaihtelun ohella ledin ikääntymisen myötä tulevia valovirran vaihteluita. Valitettavasti tällä mittaustavalla ei pystytä kompensoimaan lämpötilavaihtelusta aiheutuvia aallonpituuksien muutoksia, jolloin värivirheet voivat jäädä korjaamatta.

Fotodiodi pystyy vain mittaamaan valon valovirtaa (Deurenberg, Hoelen, van Meurs & Ansems 2005.)

Käytännössä fotodiodi tulee valaisimessa ledien läheisyyteen, josta se mittaa yleensä valovirran jostakin heijastuspinnasta. Mittauksessa on kuitenkin otettava huomioon ympäristön valaistus, joka voi vääristää mittaustulosta. Tästä syystä fotodiodi tulisi sijoittaa siten, että ympäristön valosta osuisi siihen mahdollisimman vähän. Tavallisen yksivärisen fotodiodin tulisi mitata RGB-ledin jokaista väriä sekä ympäristön valoa, jotta se voitaisiin ottaa huomioon väriä säädettäessä.

Tähän tarvittaisiin joko neljä erillistä fotodiodia tai yksi fotodiodi, joka suorittaa neljä mittausta, jotka olisivat erikseen jokaiselle värille ja ympäristön valolle. Tämä onnistuu vain, jos ledejä ohjataan PWM-ohjauksella, jolloin mittaukset suoritetaan aina, kun tietyt ledit ovat ylä- tai alatilassa. Tällöin pystytään määrittelemään jokaisen värin valovirta erikseen. Jotta tällainen järjestelmä toimisi, tulee fotodiodin mittaustapahtuma multipleksata (engl. multiplexing), jolloin pystytään mittaamaan jokaisen yksittäisen värin intensiteettiä. (Deurenberg, Hoelen, van Meurs & Ansems 2005.)

Fotodiodeja käytettäessä on muistettava, että ne ikääntyvät aivan kuten leditkin, jolloin niiden herkkyys valovirran suhteen saattaa muuttua. Myös lämpötilan muutokset fotodiodissa aiheuttavat siinä vastaavanlaisia muutoksia kuin ledeissä, jolloin mittaustulokset eri aallonpituuksilla voivat muuttua. (Deurenberg, Hoelen, van Meurs & Ansems 2005.)

4.3 Fotodiodin ja lämpömittauksen yhdistelmä

Fotodiodilla suoritettussa mittauksessa ja lämpötilamittauksella ei pystytä erikseen kompensoimaan kaikkia RGB-ledissä ilmeneviä värivirheitä. Fotodiodi ei pysty korjaamaan lämpötilasta aiheutuvia aallonpituuksien vaihteluita eikä lämpötilamittaus pysty korjaamaan valovirran muutoksia. Tästä syystä näiden kahden mittausjärjestelmän yhdistelmä pystyisi ehkäisemään tarkasti RGB-ledien värivirheet. (Deurenberg, Hoelen, van Meurs & Ansems 2005.)

Tässäkin mittaustavassa luotetaan lämpötilaan perustuvan säädön kohdalla ledivalmistajilta saatuihin tietoihin. Näiden tietojen perusteella pystytään vain oletamaan, kuinka paljon valon aallonpituudet muuttuvat lämpötilan noustessa.

4.4 Sääto värianturin avulla

Toisin kuin fotodiodi, joka mittaa valon intensiteettiä, värianturi kykenee mittaamaan valon väriä. Värisävyä mittaavan komponentin avulla pystytään korjaamaan lämpötilan vaihtelun sekä ikääntymisen myötä tapahtuvat valovirran ja aallopituuksien muutokset ledissä sekä ledien binnauksesta johtuvat värien heittelyt.

Värianturit voidaan jakaa RGB- ja XYZ-väriantureihin. Tätä opinnäytetyötä varten oli saatu näytekappaleita RGB-värianturista. Kyseinen värianturi mittaa valon jokaista kolmea pääväriä erikseen. Tämä tapahtuu anturissa olevien suotimien avulla, jotka päästävät läpi vain tietyt valon aallonpituudet. Tieto väristä saadaan sensorilta ulostulojännitteenä tai -virtana. RGB-anturi mittaa jokaisen päävärin intensiteettiä eikä se kykene antamaan päävärien yhdistelmän värikoordinaatteja. (Hailer.)

XYZ-värianturi mittaa taas päävärien kombinaation muodostamaa sävyä. Tältä anturilta saadut arvot vastaavat värikoordinaatiston arvoja X, Y ja Z. Y on tarkoittaa valon kirkkautta, X ja Z ovat taas värin koordinaatteja. Nämä X, Y ja Z arvot voidaan myös muuntaa muille värikartoille sopiviksi. XYZ-värianturi antaa mittaamansa värin arvon värikoordinaatteina, jolloin se pystyy ehkäisemään kaikki ledeissä tapahtuvat värien muutokset. (Hailer.)

Värikoordinaatit saadaan anturilta digitaalisena signaalina, jotka mikrokontrolleri pystyy laskemaan värikoordinaatistoon matemaattisten matriisien avulla.

Värikoordinaattien ansiosta voidaan ledit säätää halutun väriseksi, jolloin pystytään ehkäisemään kaikki värivirheet. Kontrolleri laskee mahdollisen värivirheen ja säätää valaisinta sen mukaisesti. Säättäminen tapahtuu tässäkin jokaisen erivärisen ledin pulssisuhdetta muuntamalla.

Värisävyä mittaavan värianturin hinta ylittää usein hinnallaan koko valaisimen muiden komponenttien yhteishinnan, minkä takia tulee miettiä tarvitseeko käyttökohde näin tarkkaa mittaus- ja säätöjärjestelmää (Deurenberg, Hoelen, van Meurs & Ansems 2005).

5 VÄRIMITTAUSJÄRJESTELMÄN KEHITYS

Ledvalaisimien mittaus- ja säätötavaksi valittiin anturilla mittaus, joka perustuu komponenttiin, joka sisältää kolme eriväristä fotodiodia. Tähän tarkoitukseen oli saatu näytekappaleita Hamamatsun S10942-01CT värisensorista, joten mittausjärjestelmän toteutusta alettiin suunnitella tämän komponentin pohjalta. Tämän komponentin yleisiä käyttötarkoituksia ovat muun muassa kannettavien laitteiden näyttöjen värinhallinta ja sen tarkkailu. Ulostulona se antaa sitä suuremman virran, mitä suurempi valovirta siihen kohdistuu. (Hamamatsu 2012.)

S10942-01CT ei pysty antamaan värien kordinaatteja CIE-väriavaruudessa. Sen sisältämiin fotodiodeihin on lisätty suotimet, jotka päästävät läpi vain tietyt aallon pituudet. Tältä saadut mittausarvot kertovat kyseisen värin valovirran. (Hamamatsu 2012.)

5.1 Mittausjärjestelmän suunnittelua

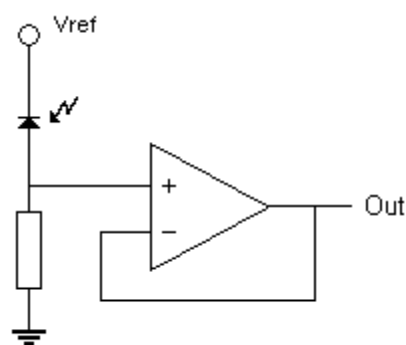
Hamamatsun värianturiin perustuvan järjestelmän toteutus oli vaikea saada alkuun, kun valmistajalta ei löytynyt kunnollista dokumentaatiota, kuinka komponenttia tulisi käyttää. Erillisistä lähteistä tutkimalla löytyi kuitenkin mahdollisia kytkentäesimerkkejä, joita voisi käyttää tähän tarkoitukseen. Anturin toimintaa alettiinkin tutkimaan aluksi mittaamalla, paljonko se antaa jännitettä estosuuntaan, kun siihen kohdistetaan erivärisiä valoja. Tässä vaiheessa pystyi jo huomaamaan komponentin eri kanavien herkkyyden eriväristen valojen suhteen.

Komponentista mitattiin erikseen, kuinka jännite ja sen resistanssit vaihtelevat eriväristen valojen suhteen. Näiden mittausten myötä eriväristen fotodiodien herkkyydet tulivat myös ilmi. Esimerkiksi punainen fotodiodi vastasi kaikista herkimmin valon muutoksiin ja sininen taas heikoimmin. Kun komponentin tiedettiin toimivan, kokeiltiin sen kytkemistä mikrokontrollerin A/D-muuntimen tuloihin. Tämän tarkoituksena oli kehittää tulevaa mittausjärjestelmää ja selvittää, saako sensorista ulos tarpeeksi suuren jännitteen.

Aluksi anturi kytkettiin suoraan mikrokontrollerin analogisiin sisääntuloihin siten, että sen yhteinen katodi oli kytkettynä maihin. Tällöin mikrokontrolleri pystyi lukemaan jo pieniä jännitteen muutoksia sensorissa. Tämä ei kuitenkaan antanut varsinaisia mittaustuloksia valonvirran suuruuteen verrattuna. Kytkentää muutettiin siten, että sensorin kanssa kytkettiin sarjaan suuri vastus ja anturin yhteinen katodi kytkettiin referenssijännitteeseen. Näin ollen sarjankytkentä sai aikaan jännitteenjaon, jonka jännitteen tuli vaihdella mikrokontrollerin referenssijännitteen ja nollan voltin välillä.

Tällä kytkentätavalla saadut mittausravot heittelivät suuresti. Tämä arvojen heittelehtiminen näytti johtuvan kontrollerin tuloimpedanssista, joka ei pystynyt toimimaan yhteen anturikytkennän pienen virran kanssa. Kyseisen jännitteenjaon virta jäi vain mikroampeerien suuruisiksi.

Tavallisesti fotodiodeja käytetään transimpedanssivahvistimen avulla, joka muuttaa sensorilta saadun virran jännitteeksi. Tällaisen kytkennän toteutus olisi kuitenkin ollut vaikeaa käytettävällä anturilla, sillä komponentin kaikilla erillisillä fotodiodella oli yhteinen katodi. Tavallisesti fotodiodeja kytketään transimpedanssivahvistinkytkennässä operaatiovahvistimen positiivisen ja negatiivisen tulon välille. Käytössä olleella komponentilla oli kuitenkin yhteinen katodi, joten tämä kytkentätapa ei olisi onnistunut.



KUVIO 13. Sensorin kytkentätapa

Kun fotodiodin ja vastuksen sarjankytkennän ohelle lisättiin operaatiovahvistin jänniteseuraaajana, saatiin aikaan selviä ja tasalaatuisia mittaustuloksia.

Operaatiovahvistimen toimiessa jänniteseuraaajana ei mikrokontrollerin tuloimpedanssi häirinnyt sensorien pieniä virtoja, sillä se erottaa anturin lähdön ja kontrollerin tulon toisistaan.

Tässä vaiheessa testattiin myös, kuinka anturin eri värialueet antavat mittaustuloksia muille väreille, jotka eivät vastanneet sen omia aallonpituuksia. Punaista valoa mitattaessa vain punainen kanava antoi selkeästi jännitettä kyseiselle valolle. Vihreän valon kohdalla jälleen vihreä kanava antoi suurimman antojännitteen, mutta tässä tapauksessa myös sinisessä kanavassa tapahtui pieni jännitteen nousu. Sinisen valon kanssa vain sininen kanava antoi selkeän mittaustuloksen ja muut sensorit eivät antaneet juurikaan jännitettä tälle. Mittaus tapahtui heijastuspinnan kautta siten, että anturi sekä valaisin olivat kuvun sisällä, eikä mittaukseen päässyt ulkopuolista valoa. Mitattavan valaisimen RGB-ledejä ajettiin noin 20 milliampeerin virralla.

Anturin ja mikro-ohjaimen avulla toteutettiin väriä seuraava prototyyppi, joka matki sen havaitseman valon väriä. Kontrollerin PWM-ulostuloon kytkettiin RGB-ledi, jota ohjattiin saatujen mittaustulosten perusteella. Pian kuitenkin kävi ilmi, että operaatiovahvistimelta saatu jännite jäi aina 3,3 voltin referenssijännitteen alapuolelle, vaikka sensoriin kohdistettiin suoraan valoa. Tässä tapauksessa anturilta saadun jännitteen olisi tullut olla maksimissaan, eli referenssijännitteen suuruinen.

Testimittauksissa käytetyn LM358-operaatiovahvistimen datalehdessä oli annettu sen minimikäyttöjännitteeksi 3 voltia yksittäisellä jännitelähteellä. Helpon kytkennän vuoksi käyttöjännitteeksi otettiin mikrokontrollerin 3,3 voltin referenssijännite. Tämän käyttöjännitteen takia operaatiovahvistimen ulostulojännite jäi suurimmillaan noin 2,6 volttiin. Valovirran noustessa jäivät mittausarvot saamatta referenssijännitteen yläpäästä. Kun operaatiovahvistin kytkettiin 5 voltin käyttöjännitteeseen, saatiin mittaustulos nousemaan referenssijännitteen maksimiarvoon.

Testimittauksissa käytettiin violetin väristä valaisinta, jonka käyttöjännitettä muuntamalla väri vaihtui pienillä syöttöjännitteillä punaisesta suuremmilla syöttöjännitteillä sinertävän sävyiseksi. Värin matkiminen onnistui todella hyvin, kunnes valon intensiteetti kasvoi liian suureksi, jolloin sensori yliohtautui. Vaikka valaisimen väri oli edelleen sinertävän violetti, ohjasi sensori mikro-ohjaimella ohjattavan ledin täysin valkoiseksi. Tuossa tilanteessa mitattaessa mittauskytkennän antojännitettä antoivat sen kaikki erilliset fotodiodit maksimiulostulojännitteen, vaikka mitattava kohde oli selvästi violetin sävyinen. Tämä johtui siitä, että valaisimen antama valovirta nousi niin suureksi, että sensorit eivät enää kyenneet suodattamaan eri värejä. Tämä pystyttiin korjaamaan kytkennän sensorikytkennän vastusarvoja muokkaamalla.

Valaisimen valolla on jokin haluttu kohdeväri, joka tulisi pitää vakiona. Väriä mitataan sensorin avulla ja verrataan kohdearvoihin. Sensorikytkentä kytketään mikro-ohjaimen A/D-muuntimeen, jolloin siitä saa tietyn arvon referensijännitteeseen verrattuna. Tämä arvo vaihtelee nollan ja yhden välillä A/D-muuntimeen tuodun jännitteen perusteella. Tätä arvoa voidaan myös käyttää hyväksi pulssisuhdetta säädettäessä, joka myös vaihtelee tässä tapauksessa nollan ja yhden välillä.

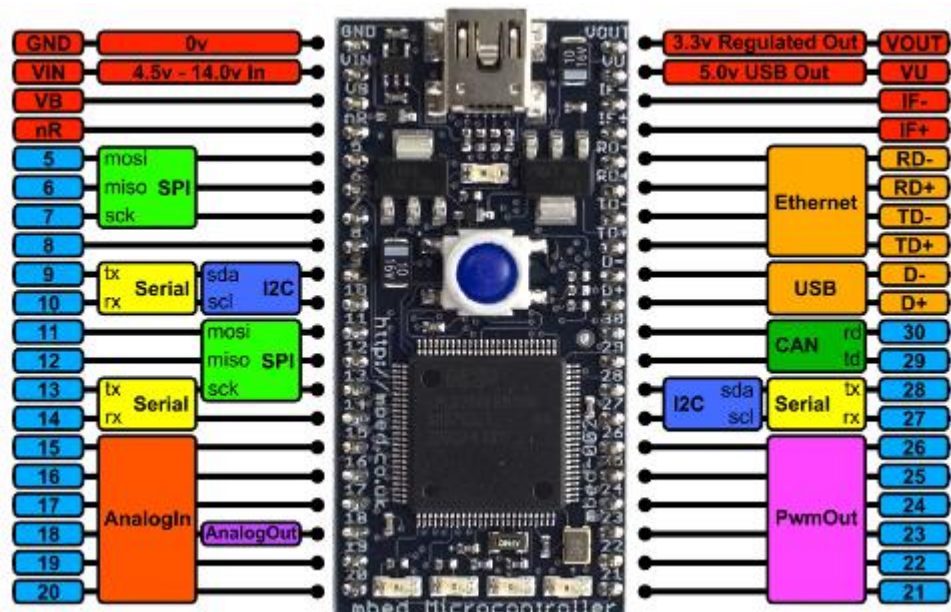
Ohjelma toimi käytännössä siten, että mitattu arvo vähennettiin kohdearvosta, jolloin niiden erotuksena saatiin värivirheen arvo. Näiden erotuksien tulisi olla nolla, kun väri on oikea. Jos erotus on vähemmän kuin nolla, on kyseistä väriä liikaa, jolloin tämä erotus vähennetään nykyisestä arvosta. Jos erotus on taas enemmän kuin nolla, on kyseistä väriä liian vähän, jolloin erotus lisätään nykyiseen arvoon.

Mikrokontrollerin PWM-ulostuloihin suoraan kytkettyinä ledejä ei voitu ajaa tarpeeksi suurella virralla, jotta värin säätöä olisi voitu simuloida tällä suoraan. Yksittäisestä ulostulosta saatiin maksimissaan 7 mA:n virta, joka ei riittänyt esimerkiksi sinisen ledin ajamiseen tarpeeksi kirkkaasti. Jotta ledien säätöä ja käyttäytymistä voitaisiin tutkia suoraan, oli tätä varten tehtävä erillinen kytkentä, jossa ledit saavat käyttöjännitteen ja jossa ledeille pystyttiin säätämään oma vakiovirta.

Tätä ledien ohjauskytkentää pystyttiin ohjaamaan ulkoisella PWM-signaalilla, jolla säädettäisiin jokaisen eri värin kirkkautta. Tämän prototyypin kytkentä löytyy liitteestä yksi.

5.2 Värimittausjärjestelmän prototyyppi

Prototyyppiin suunniteltiin laitettavan yksi RGB-ledi, jotka ohjattaisiin mittausjärjestelmällä. Lediä varten luotiin sille vakiovirtageneraattori, jotta sitä voitaisiin ohjata PWM-signaalilla. Tätä signaalia muutettaisiin värisensorin mittaus tuloksien mukaan. PWM-signaalia sekä värisensorilta saatuja mittausarvoja ohjattaisiin mbed-kehitysalustalla. Mbed-kehitysalusta valittiin prototyypin ohjaukseen henkilökohtaisen osaamiseni takia, sillä tämä järjestelmä oli minulle jo entuudestaan tuttu. Kuviossa kolmesta näkyy kyseisen kehitysalustan liitännät. Mikrokontrollerina alustalla on 32-bittinen ARM Cortex-M3. (mbed 2013.)



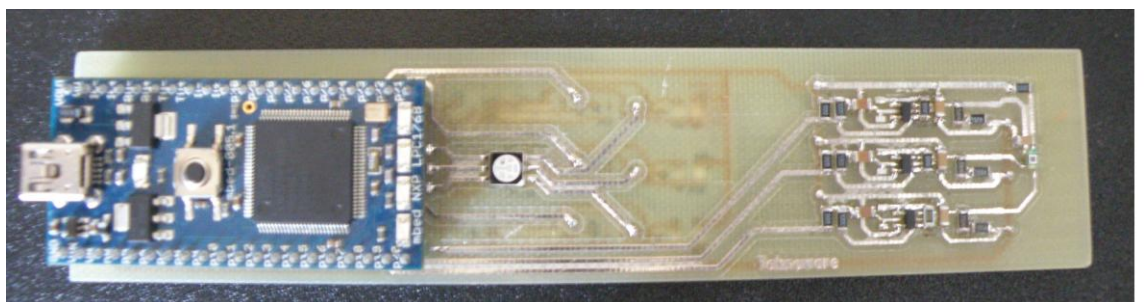
KUVIO 13. mbed-kehitysalusta (mbed 2013.)

Sensoria varten valittiin tarkemmat operaatiovahvistimet, jotta mittaus tuloksista saataisiin luotettavimmat. Tämän lisäksi mittausjärjestelmän ympärille laitettiin tarvittavat suodattimet, jotta signaalit pysyisivät ehjinä.

Operaatiovahvistinkytkentöihin lisättiin vastuksille paikat siten, että mittaussignaalia voitaisiin mahdollisesti vahvistaa. Näiden ansiosta värisensorin kanssa olevat suuret 4,7 megaohmin vastusarvot voitaisiin vaihtaa pienempiin, jolloin virta pysyisi suurempana eikä signaali olisi niin herkkä häiriöille. Häiriöihin kiinnitettiin huomiota myös piirilevysuunnittelussa, jossa mittausjärjestelmälle ja vakiovirtageneraattorille vedettiin omat syöttöjännite- ja maavedot. Tämä tehtiin sen takia, että PWM-signaali ei häiritsisi herkkiä mittaussignaaleja.

Prototyypin valmistuttua jatkui säätöjärjestelmän ohjelman kehitys, jotta järjestelmää voitaisiin testata. Ohjelman teko onnistuikin jo aiemmin tehtyjen ohjelmien perusteella. Vain pieniä muutoksia jouduttiin tekemään, jotta koko mittaus- ja säätöjärjestelmä saatiin toimimaan. Itse ohjelma on yksinkertainen, sillä siinä vain luetaan sensorin antamat mittausravot ja säädetään PWM-lähtösignaalia sen mukaan ylös- tai alaspäin kohdearvon ja mitatun arvon erotuksen mukaisesti.

Sensorin antamat mittausravot sekä PWM-lähtöjen arvot tulostettiin sarjaportin kautta terminaaliin, jotta mittaustuloksia voitiin seurata tietokoneella reaaliajassa. Näin pystyttiin todentamaan järjestelmän toiminta helposti. Tämä ohjelma löytyy liitteestä kaksi. Kuviossa 14 on prototyyppi valmiiksi kasattuna. Värisensori sijaitsee piirilevyn oikeassa laidassa, kaukana säädettävästä ledistä, jotta sen valo ei häiritse mittaustuloksia. Kyseinen ledi on keskellä piirilevyä.



KUVIO 14. Väri säätöjärjestelmän prototyyppi

5.3 Prototyypin testaus

Kun ohjelma saatiin valmiiksi, testattiin prototyyppiä aluksi erikseen ledin ohjauksen ja mittauksen osalta. Kun molemmat todettiin toimivaksi, pystyttiin ledin ohjausta testaamaan mittaustulosten perusteella. Aluksi referenssinä toimiva ledi laitettiin seuraamaan sensorille osoitetun valon väriä. Tämä toimi moitteettomasti. Sensorille osoitettiin vuoron perään vihreää, sinistä ja punaista valoa, joiden mukaan ohjattava ledi muuttui kyseiseksi väriksi. Tämän jälkeen sitä testattiin värien sekoitusta seuraamalla ja tässä tapauksessa mittaushetkenä oli violetti valaisin, jonka sävy muuttui sen tulojännitteen mukaan.

Kun mittausjärjestelmä oli todettu toimivaksi, oli säätöjärjestelmän vuoro. Ohjelmaa muokattiin siten, että se yrittäisi pitää tietyn värin aina samana. Tätä testattiin siten, että haluttu väri olisi saman violetin sävyinen kuin mitattava valaisin. Tällöin mitattavan valaisimen käyttöjännitettä muutettiin siten, että sen sävy muuttuisi ja järjestelmän tulisi säätää vertailulediä sen mukaisesti. Kun valaisimen käyttöjännitettä nostettiin, nousi tiettyjen värien valovirta, jolloin referenssiledi laski kyseisten värien pulssisuhdetta.

Lopullinen mittaus tehtiin sääkaapissa, jossa lämpötila laskettiin aluksi $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$:een ja sen jälkeen lämpötila nostettiin $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$:seen. Tämä mittaus suoritettiin siksi, jotta sensorin toimintaa voitaisiin tarkkailla myös ääriolosuhteissa, sillä lähteiden mukaan fotodiodien ominaisuudet muuttuvat lämpötilan mukaan samalla tavalla kuten ledien. Kun lämpötila laskettiin -20 asteeseen, ei mitattavan valaisimen valovirrat juurikaan muuttuneet. Asteikolla nolasta yhteen, valovirta laski vain 0,01:n verran, mikä voi myös johtua valaisimen päälläoloajasta.

Lämpötilaa nostettaessa $+70$ asteeseen, laski punaisen ledin valovirta runsaasti, jonka pystyi jo erottamaan silmillä. Huoneenlämmössä mitattuna punaisen värin mittausarvoksi saatiin 0,68, joka laski tasaisesti lämpötilan noustessa 0,52:een $+70\text{ }^{\circ}\text{C}$:ssa. Punaisen valovirta on siis laskenut noin 23 prosenttia alkuperäisestä arvostaan. Vastaavasti referenssiledin pulssisuhdetta nostettiin sen mukaisesti, jolloin tämä violetti näkyi punaisen sävyisenä, kun mitattava kohde oli enemmän sinertävän sävyinen.

Mittauksen ajan prototyypiltä saatiin tietokoneelle mittalukemat ja PWM-lähtösignaalin pulssisuhde reaaliajassa. Mittaustulokset kirjattiin ylös aina kymmenen lämpötila-asteen välein. Nämä mittaustulokset näkyvät liitteessä kolme. Mittauksen aikana mitattiin myös mittaustulokseena olleen valaisimen ledien pintalämpötilaa sekä prototyypin piirilevyn lämpötilaa sensorin läheisyydestä. Sensorin voitiin olettaa pysyvän ympäristön lämpötilan suuruisena, sillä sen läheisyydessä ei ollut lämpeneviä komponentteja.

Mitattavan valaisimen ledien lämpötila pysyi koko mittauksen ajan noin kymmenen astetta korkeammalla kuin ympäristön lämpötila. 70 asteessa ledien lämpötila oli noin 81 astetta.

5.4 Vaihtoehtoinen värisensori

Mittaustarkoitukseen kokeiltiin myös toista värisensoria, joka oli TAOS Inc.:n TCS3103-värisensori. Kyseinen komponentti sisälsi punaisen, vihreän ja sinisen kanavan, joilla jokaisella oli 3 erillistä fotodiodielementtiä. Nämä elementit olivat jaettu 3x3 matriisiin, jotta sen mittaustuloksesta saataisiin mahdollisimman yhdenmukainen. Etuna tällä sensorilla oli sen sisäänrakennettu transimpedanssivahvistin, jonka ansiosta kytkentään ei olisi tarvittu erillisiä vahvistinkomponentteja. Näiden ansiosta sensorilta saatiin mittaustulokset ulos jännitteinä. (TAOS Inc. 2013.)

Kun kytkennässä ei olisi ollut erillisiä vahvistinosuuksia, olisi se ollut myös sähköisten häiriöiden kannalta luotettavampi ratkaisu. Sensoria testattaessa kävi kuitenkin ilmi, että sen herkkyys ei vastannut aiemmin testattua Hamamatsun valmistamaa sensoria. Vaikka itse komponentissa oli mahdollisuus valita sen vahvistuskerroin, ei sen antojännitteet tai mittausherakkyys vastanneet Hamamatsun sensoria. Esimerkiksi huoneen sisävalaistusta mitattaessa antoi TCS3103 noin kolme kertaa pienemmät ulostulojännitteet kuin kilpailevan komponenttivalmistajan sensori. (TAOS Inc. 2013.)

Yritettäessä seurata tietyn väristen valaisimien väriä ei se myöskään pystynyt toistamaan väriä samalla tavalla. Punaisen fotodiodin herkkyys oli paljon suurempi kuin kahden muun värin. Tästä syystä esimerkiksi violettiä valoa

mitattaessa antoi se punaiselle valolle paljon suuremman jännitteen kuin muille, vaikka sinisen värin osuus valosta oli lähes yhtä suuri kuin punaisen.

Komponentin valoa mittaavan alueen pinta-ala oli vain $378\mu\text{m} \times 378\mu\text{m}$, joka osaltaan selittää sen kykyä havaita valovirran muutoksia.

Koska kyseinen värisensori ei kyennyt mittaamaan valon väriä halutulla tarkkuudella, ei sitä voitu käyttää tulevissa käyttökohteissa. Komponentin sisältämät transimpedanssivahvistinkytkennät olisivat tuoneet säästöä komponenttikustannuksissa muiden etujen ohella.

6 YHTEENVETO

Tämän opinnäytetyön tarkoituksena oli selvittää ledeissä tapahtuvien värivirheiden syyt sekä etsiä mahdollisia värinhallintamenetelmiä ledvalaisimiin. Mahdollisista värinsäätöjärjestelmistä löytyi todella runsaasti aiempaa tutkimustietoa, joten materiaalin saaminen tätä työtä varten oli todella helppoa. Varsinaisten toteutustapojen runsaus yllätti, sillä alun perin kuvittelin mittausten tapahtuvan vain ja ainoastaan värianturien avulla.

Teoria ledeissä tapahtuvista muutoksista ympäristöparametrien suhteen onnistui mielestäni helposti, sillä siitä löytyi kattavasti tutkimustietoa luotettavista lähteistä. Säätöjärjestelmän alkuun saaminen oli taas huomattavasti vaikeampaa, sillä malliksi saaduista värisensoreista ei valmistaja tarjonnut juurikaan minkäänlaista tietoa. Tästä syystä anturin kytkentätapa piti etsiä muualta ja sitä joutui itse pohtimaan, jotta se saatiin toimimaan kuten oli tarkoitus. Tämän suhteen sain onneksi apua kokeneemmilta elektroniikkasuunnittelijoilta toimeksiantajan puolelta.

Opinnäytetyön aihe oli mielestäni erittäin kiinnostava ja sen aikana opin paljon erityisesti ledien käyttäytymisestä. Myös piirilevysuunnittelun kannalta sain hyviä käytännön vinkkejä, jotta herkäät signaalit saadaan pysymään ehjinä häiriöitä silmällä pitäen.

Ajankäytöllisesti käytin mielestäni ehkä liikaa aikaa itse teoriaosuuteen, sillä laitteen toimintaan saaminen vei odotettua enemmän aikaa. Tämä johtui lähinnä kytkennän komponenttien arvojen mitoituksesta ja tietysti ohjelman tekemisessä. Vaikka ohjelma olikin lyhyt ja yksinkertainen, oli siinä aluksi paljon sudenkuoppia, joiden takia järjestelmä ei toiminut luotettavasti.

Tekemäni prototyypin ja tutkimustietojen perusteella värinsäätöjärjestelmä tulee osaksi erästä julkisen liikenteen sisävalaistusjärjestelmää. Aivan sellaisenaan tekemäni järjestelmä ei tule käyttöön, vaan siihen on tarkoitus tehdä parannuksia, jotta sen toiminta voidaan taata.

Kehitystä ajatellen värinhallintaa voisi vielä parantaa värien aallonpituuksien muutosten varalta. Tämä nykyinen värinsäätöjärjestelmä ei kykene korjaamaan

värien aallonpituuksien muutoksia, jotka voivat tapahtua lämpötilamuutosten myötä. Tätä varten voitaisiin järjestelmään lisätä lämpötilaa seuraileva kytkeä. Aallonpituuksien muutokset katsottiin kuitenkin olevan vähäiset tulevissa käyttökohteissa, joten kompensointia sen osalta ei tarvinnut toteuttaa.

LÄHTEET

ASSIST recommends. 2005. LED Life for General Lighting. Saatavissa: <http://www.lrc.rpi.edu/resources/newsroom/pdf/2005/Assistrecommends.pdf>

The Bergquist Company. 2012. LEDs - Temperature Effects

[viitattu 14.10.2012]. Saatavissa:

http://www.bergquistcompany.com/thermal_substrates/LEDs/temp-effect.html

Cree Lighting. 2011. Why Cree? [viitattu 19.10.2012] Saatavissa:

<http://www.cree.com/lighting/why-cree-led-lighting/>

Dipl.-Ing. (FH) Fredrik Hailer. Improved LED systems with true color sensor.

[viitattu 30.11.2012] Saatavissa:

http://ic.cn/pdfs/upload/ic.cn_improved%20led%20systems%20with%20mtcs%20-%20led%20professional%207_07_975.pdf

Euroopan Parlamentin ja Neuvoston direktiivi 2005/32/EY. Saatavissa: [http://eur-](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:191:0029:0029:FI:PDF)

[lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:191:0029:0029:FI:PDF](http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2005:191:0029:0029:FI:PDF)

Hoffmann, G. 2012. CIE Color Space [viitattu 24.10.2012.]. Saatavissa:

<http://docs-hoffmann.de/ciexyz29082000.pdf>

Hamamatsu. 2012. Si photodiode S10942-01CT. RGB color sensor integrated in small and thin package. [viitattu 24.10.2012] Saatavissa:

http://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/s10942-01ct_kspd1079e03.pdf

Lithonia Lighting. White paper: Binning and LED. What is Binning with respect to LEDs?. [viitattu 24.10.2012] Saatavissa:

http://lithonia.acuitybrands.com/Files/RTLED_Files/RTLED_WPaper_BinningandLED.pdf

MAZeT. 2012. WHAT ARE THE PRICE ADVANTAGES OF LIGHT COLOR REGULATION VIA FEEDBACK CONTROL. [viitattu 25.10.2012] Saatavissa:

<http://www.mazet.de/en/downloads/product-and-customer-information/white-paper-1/what-are-the-price-advantages-of-light-color-regulation-via-feedback-control#.UIkFfW8xqyt>

mbed. 2013. mbed NXP LPC1768 - Handbook | mbed [viitattu 2.4.2013].

Saatavissa: <http://mbed.org/handbook/mbed-NXP-LPC1768>

Navigant Consulting Europe, Ltd. 2012. Life Cycle Assessment of Ultra-Efficient Lamps. [viitattu 21.10.2012]. Saatavissa:

http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2012_LED_Lifecycle_Report.pdf

Osram Opto Semiconductors 2004. Color Stabilization of RGB LEDs in an

Backlighting Example. [viitattu 19.10.2012]. Saatavissa: [http://catalog.osram-](http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do?favOid=000000000023403000c0023&act=show)

[os.com/catalogue/catalogue.do?favOid=000000000023403000c0023&act=show](http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do?favOid=000000000023403000c0023&act=show)
[Bookmark](#)

Osram Opto Semiconductors 2012a. LEDs Basics. [viitattu 19.10.2012] Saatavissa:

<http://ledlight.osram-os.com/knowledge/led-fundamentals/leds-basics/>

Osram Opto Semiconductors. 2009. Life Cycle Assessment of Illuminants A Comparison of Light Bulbs, Compact Fluorescent Lamps and LED Lamps

[viitattu 19.10.2012]. Saatavissa: [http://www.osram-](http://www.osram-os.com/osram_os/EN/About_Us/We_shape_the_future_of_light/Our_obligation/LED_life-cycle_assessment/OSRAM_LED_LCA_Summary_November_2009.pdf)

[os.com/osram_os/EN/About_Us/We_shape_the_future_of_light/Our_obligation/LED_life-cycle_assessment/OSRAM_LED_LCA_Summary_November_2009.pdf](http://www.osram-os.com/osram_os/EN/About_Us/We_shape_the_future_of_light/Our_obligation/LED_life-cycle_assessment/OSRAM_LED_LCA_Summary_November_2009.pdf)

Osram Opto Semiconductors. 2012b. LRTB GFTG Datasheet. [viitattu

19.10.2012]. Saatavissa: [http://catalog.osram-](http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do?favOid=000000050001e02b003f0023&act=show)

[os.com/catalogue/catalogue.do?favOid=000000050001e02b003f0023&act=show](http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do?favOid=000000050001e02b003f0023&act=show)
[Bookmark](#)

Osram Opto Semiconductors. 2012c. OSRON SSL 80 Datasheet. [viitattu

19.10.2012]. Saatavissa: [http://catalog.osram-](http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do?favOid=000000020000263308030023&act=show)

[os.com/catalogue/catalogue.do?favOid=000000020000263308030023&act=show](http://catalog.osram-os.com/catalogue/catalogue.do?favOid=000000020000263308030023&act=show)
[Bookmark](#)

Philips Technology White Paper. 2012. Understanding power LED lifetime Analysis. [viitattu 24.10.2012]. Saatavissa:

http://ritelites.com/yahoo_site_admin/assets/docs/WP_on_LED_life.3482523.pdf

Deurenberg, P., Hoelen, C., van Meurs, J. & Ansems, J. 2005. Achieving color

stability in RGB multi-chip LED modules using various color control loops. Fifth

International Conference on Solid State Lighting.

Tai-Ping Sun., Chia-Hung Wang. Specially Designed Driver Circuits to Stabilize LED Light Output Without a Photodetector. IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 27, NO. 9, SEPTEMBER 2012

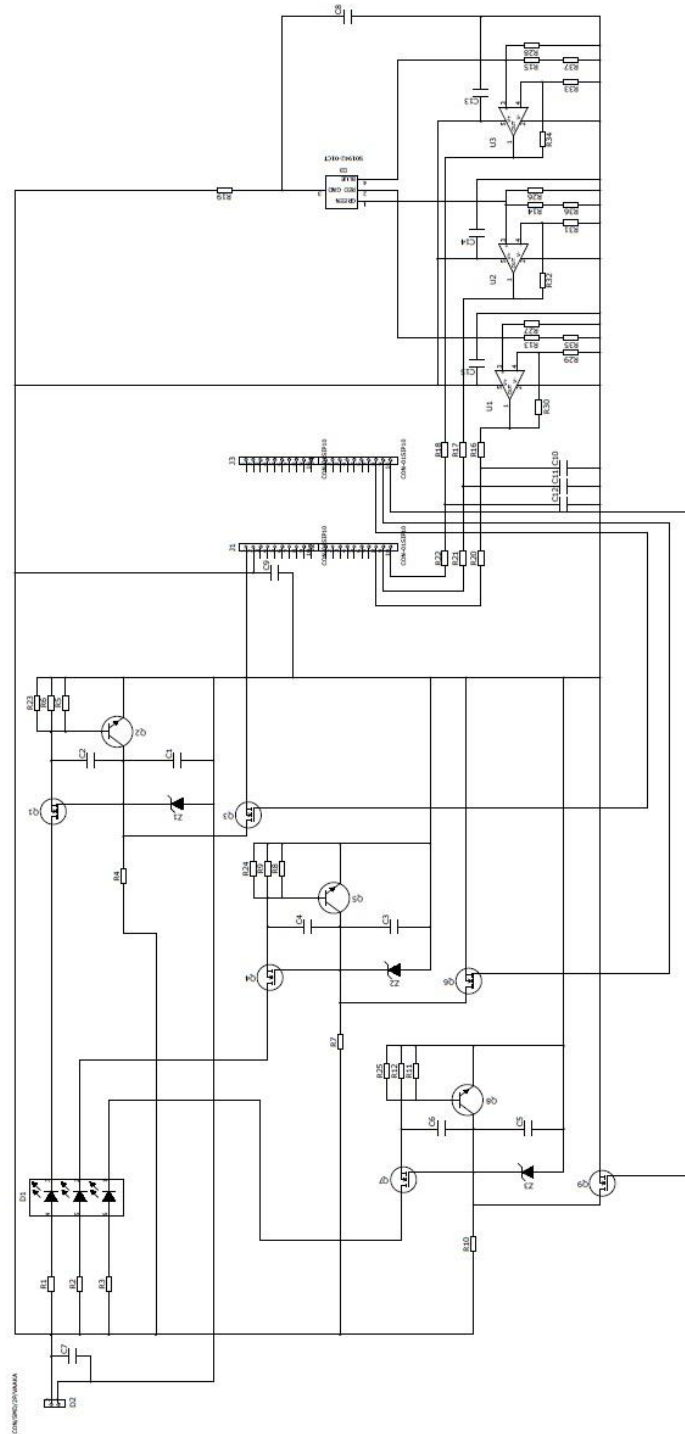
TAOS Inc. 2013. TCS3103, TCS3104 LIGHT-TO-VOLTAGE COLOR SENSOR Datasheet. [viitattu 11.1.2013] Saatavissa:

<http://www.ams.com/eng/Products/Light-Sensors/Color-Sensor/TCS3103>

Xiaohui Qu., Siu Chung Wong. & Chi K. Tse. Color Control System for RGB LED Light Source Using Junction Temperature Measurement. The 33rd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON)

LIITTEET

LIITE 1. Prototyypin kytkentäkaavio



LIITE 2. Värimittausjärjestelmän lähdekoodi

```
1 #include "mbed.h"
2
3 //PWM Lähdöt:
4 PwmOut Red(p23);
5 PwmOut Green(p22);
6 PwmOut Blue(p21);
7
8 // A/D-muuntimen inputit:
9 AnalogIn RedSensor(p18);
10 AnalogIn GreenSensor(p19);
11 AnalogIn BlueSensor(p20);
12
13 double RedTarget = 0.7, GreenTarget = 0.08, BlueTarget = 0.34; //Sensorin kohdearvot
14 double OutputRed = 0.7, OutputGreen = 0.13, OutputBlue = 0.7; //Outputin kohdearvot
15 double RedError, GreenError, BlueError; //Muuttujat virheen laskemiseen
16 double RedOut, GreenOut, BlueOut, RedS, GreenS, BlueS, apuR, apuG, apuB; //Apumuuttujat tulostusta varten
17
18 Serial pc(USBTX, USBRX); // Tulostuksen alustukset
19
20
21 int main()
22 {
23     while(1)
24     {
25         //Lasketaan värivirheetvirheet
26         RedError = RedTarget - RedSensor;
27         GreenError = GreenTarget - GreenSensor;
28         BlueError = BlueTarget - BlueSensor;
29
30
31         // Punaisen säätö:
32         if(RedSensor < RedTarget)
33         {
34             Red = 1-(OutputRed + RedError);
35         }
36         else if(RedSensor > RedTarget)
37         {
38             Red = 1-(OutputRed + RedError);
39         }
40
41         // Vihreän säätö:
42         if(GreenSensor < GreenTarget)
43         {
44             Green = 1-(OutputGreen + GreenError);
45         }
46         else if(GreenSensor > GreenTarget)
47         {
48             Green = 1-(OutputGreen+ GreenError);
49         }
50
51         // Sinisen säätö:
52         if(BlueSensor < BlueTarget)
53         {
54             Blue = 1-(OutputBlue + BlueError);
55         }
56         else if(BlueSensor > BlueTarget)
57         {
58             Blue = 1-(OutputBlue + BlueError);
59         }
60
61         //Muuttujat tulostukseen:
62         RedOut = 1-Red;
63         GreenOut = 1-Green;
64         BlueOut = 1-Blue;
65         RedS = RedSensor;
66         GreenS = GreenSensor;
67         BlueS = BlueSensor;
68         apuR = OutputRed;
69         apuG = OutputGreen;
70         apuB = OutputBlue;
71
72         // Tulostus terminaaliin:
73         pc.printf("\x1B\x59\x31");
74         pc.printf("\x1B\x59\x31");
75         pc.printf("Red Target value: %.2f\n\r", apuR);
76         pc.printf("RedSensor: %.2f\n\rRedError: %.2f\n\rRedOutput: %.2f\n\n\r", RedS, RedError, RedOut);
77         pc.printf("Green Target value: %.2f\n\r", apuG);
78         pc.printf("GreenSensor: %.2f\n\rGreenError: %.2f\n\rGreenOutput: %.2f\n\n\r", GreenS, GreenError, GreenOut);
79         pc.printf("Blue Target value: %.2f\n\r", apuB);
80         pc.printf("BlueSensor: %.2f\n\rBlueError: %.2f\n\rBlueOutput: %.2f\n\n\r", BlueS, BlueError, BlueOut);
81         pc.printf("\x1B\x4A");
82     }
83 }
```

LIITE 3/1. Mittaustulokset

Värinsäätöjärjestelmän mittaukset sääkaapissa.

25.3.2013

Nimike	Tarkoittaa
RedSensor	Sensorin punainen kanava
GreenSensor	Sensorin vihreä kanava
BlueSensor	Sensorin Sininen kanava
RedOutput	Punaisen pulssisuhde
GreenOutput	Vihreän pulssisuhde
BlueOutput	Sinisen Pulssisuhde

Lähtöjen kohdearvot:

RedOutput	0,7
GreenOutput	0,14
BlueOutput	0,7

Mittaustulokset huoneenlämmössä:

RedSensor	0,68
GreenSensor	0,07
BlueSensor	0,34

Lähtöjen pulssisuhde huoneenlämmössä:

RedOutput	0,73
GreenOutput	0,14
BlueOutput	0,72

0 °C

RedSensor	0,66	RedOutput	0,74
GreenSensor	0,07	GreenOutput	0,14
BlueSensor	0,32	BlueOutput	0,72

-10

RedSensor	0,66	RedOutput	0,74
GreenSensor	0,07	GreenOutput	0,15
BlueSensor	0,31	BlueOutput	0,73

-20

RedSensor	0,66	RedOutput	0,74
GreenSensor	0,07	GreenOutput	0,15
BlueSensor	0,31	BlueOutput	0,73

LIITE 3/2

30 °C

RedSensor	0,63	RedOutput	0,77
GreenSensor	0,07	GreenOutput	0,15
BlueSensor	0,33	BlueOutput	0,72

40 °C

RedSensor	0,61	RedOutput	0,79
GreenSensor	0,07	GreenOutput	0,15
BlueSensor	0,33	BlueOutput	0,72

50 °C

RedSensor	0,58	RedOutput	0,82
GreenSensor	0,07	GreenOutput	0,15
BlueSensor	0,33	BlueOutput	0,72

60 °C

RedSensor	0,55	RedOutput	0,85
GreenSensor	0,07	GreenOutput	0,15
BlueSensor	0,32	BlueOutput	0,72

70 °C

RedSensor	0,52	RedOutput	0,88
GreenSensor	0,07	GreenOutput	0,15
BlueSensor	0,32	BlueOutput	0,72