

Timo Kuisma

# Älyä valaistukseen Väriämpötilan ja valaistusvoimakkuuden säätö optisten antureiden avulla

Opinnäytetyö

Sähköinsinööri

Tekniikka

2021



**Kaakkois-Suomen  
ammattikorkeakoulu**

Tutkintonimike	insinööri (AMK)
Tekijä/Tekijät	Timo Kuisma
Työn nimi	Älyä valaistukseen
Vuosi	2021
Sivut	60 sivua
Työn ohjaaja(t)	Harri Kosonen

## TIIVISTELMÄ

Tutkimuksen tavoitteena on anturoinnin liittäminen älyvalaistuksen osaksi niin, että niiden lukemien perusteella voidaan ohjata valaisimien valovirtaa sekä värilämpötilaa dynaamisesti ympäristön valaistuksen tai värityksen mukaan. Tutkimusongelmaksi asetettiin yksinkertaisesti, onko anturipohjaisen älyn lisääminen sekä valovirran ja värilämpötilan säätömahdollisuus jokaiseen valaisimeen järkevää ja käyttäjän mukavuuteen riittävän suurta etua tuottavaa olakseen kaupallisesti mielekästä. Tutkimuksen teoriaosuudessa käytiin lukemisen helpottamiseksi ensin läpi valaistukseen liittyviä perussuureita, kuten valovirta, valovoima sekä valaistusvoimakkuus sekä se, miten ihminen havainnoi valoa. Niistä jatkettiin työlle keskeiseen värilämpötilan määrittelyyn.

Seuraavaksi luotiin katsaus ledien historiaan sekä valmistusprosesseihin. Käytännön ledien ominaisuudet, kuten valovirta, kynnysjännite ja värisävy sekä niiden hajonnat, jotka pitää ymmärtää huomioida valaisinsuunnittelussa, käytiin läpi. Samaten perehdyttiin lyhyesti puolijohdepohjaisten optisten anturoiden teknologiaan ja ominaisuuksiin. Lopuksi luotiin katsausta siihen, millaisia ratkaisuja valaisinvalmistajilla on tänä päivänä tarjolla.

Käytännön mittauksia varten suunniteltiin ja rakennettiin anturilla varustettu valaisin käyttäen ledimoduuleita, lediajureita sekä anturipuolella puolijohdevalmistajan kehittämää valaistusohjainta, jonka avulla voidaan mitata dynaamisesti taustavalaisuksen valaistusvoimakkuutta ja värilämpötilaa. Anturin lukemien perusteella voitiin ohjata kahden eri värilämpötilan ledikokonaisuutta pitämään yllä tiettyä valovirta tai värilämpötilaa. Mittauksia tehtiin valaisimen parametrien varmistamiseksi, valaisimen valovirran säätöön päivänvalon tms. valonlähteen vaikutuksen kompensoinniksi sekä lopuksi värilämpötilan dynaamisen säätämisen ulkoisten värisävyjen valoon tuoman vaikutuksen pohjalta.

Tuloksena havaittiin, että valovirran säätö dynaamisesti toimii teknisesti mallikkaasti, mutta verrattuna olemassa oleviin säätöjärjestelmiin on vaikea nähdä varsinaista hyötyä yhden komponentin lisäämisellä, etenkin kun kalibrointi on mutkikas prosessi. Värilämpötilan säätö toimi myös yhtä hyvin, mutta kun tiedetään, että vuorokausirytmiiin perustuva säätöä jo kaupallisesti tarjotaan, kohdealue pitää valita alueelta, jossa tarkempi säätö on järkevää.

**Asiasanat:** värilämpötila, CCT, älyvalaistus, LED-valaistus, sirkadiaaninen rytmi

Degree	Bachelor of Engineering
Author	Timo Kuisma
Thesis title	Intelligence to lighting
Time	May 2021
Pages	60 pages
Supervisor	Harri Kosonen

## ABSTRACT

The goal of this research was to explore the behaviour of integrated sensor control in a lighting system, letting the luminous flux and correlated colour temperature be adjusted dynamically based on the environmental lighting condition. The research question was simply that is adding sensors into individual luminaires sensible enough to both bring sufficient amount of comfort to the user, and to be commercially justified.

In the theory section, at first the basic quantities and terms related to lighting, like luminous efficiency and intensity, illuminance and luminance, were introduced, followed by how a human eye can sense light. Then the colour theory and the essential part of this research, correlated colour temperature (CCT), were discussed. Then the history and manufacturing of LED's were touched with focus on the non-idealities of a commercial LED, focusing on luminous flux, forward voltages and currents and their distributions that are important to understand in the design of a luminaire. Optical sensor technologies and typical features based on CMOS semiconductor processes were discussed and finally, some sensor-based smart lighting solutions currently in the market were introduced.

To test the sensor-controlled system in practice, a test luminaire utilizing optical sensing was build, including the LED modules of two different CCT, LED drivers and a smart lighting manager developed by one semiconductor manufacturer, used to sense and tune the currents of two LED modules to dynamically maintain the values of configured illuminance and CCT. Several measurements were made to confirm the parameters of the luminaire being as specified, then verifying the performance of the luminaire in the condition of external light sources and finally how did the luminaire manage to control the CCT and luminance in the presence of items of different colours.

As a result, it was seen that dynamic control of illumination operates as expected from the technical point of view but compared with existing lighting solutions it is difficult to see the benefit of adding a component into each luminaire, especially when the need for calibration is significant. The tuning of CCT functions on the same level but when known that tuning based on circadian rhythm is already in the market, it is necessary to find the most suitable market where the benefits of dynamic control make sense.

**Keywords:** CCT, color temperature, LED lighting, sensor, circadian rhythm

# SISÄLLYS

1	JOHDANTO .....	7
2	TUTKIMUSSUUNNITELMA.....	8
2.1	Teoreettinen viitekehys .....	8
2.2	Tutkimuksen tarkoitus, tavoite ja tutkimusongelma.....	9
2.3	Tutkimusmenetelmät ja aineisto .....	10
2.4	Tutkimuksen aikataulu .....	10
3	VALON JA SEN HAVAITSEMISEN TEORIAA .....	10
3.1	Valon luonne.....	10
3.2	Valoon liittyvät perussuureet.....	11
3.2.1	Valon säteilyteho .....	11
3.2.2	Valovirta $\Phi$ .....	12
3.2.3	Valovoima $I_v$ .....	12
3.2.4	Valaistusvoimakkuus $E$ .....	12
3.2.5	Luminanssi $L$ .....	13
3.2.6	Valotehokkuus .....	13
3.3	Valon havaitseminen .....	14
3.3.1	Silmän toiminta .....	14
3.3.2	Silmän spektriherkkyys .....	15
3.3.3	Värien aistiminen ja kolmiväriteoria (CIE 1931) .....	16
3.3.4	Väriämpötila ja Planckin säteilijä.....	18
3.3.5	Värintoistoindeksi $R_a$ , CRI .....	20
4	VALAISTUKSESTA .....	21
4.1	Keskeiset parametrit valaisimen määrittelyssä .....	21
4.1.1	LED (Light Emitting Diode) .....	21
4.1.2	Valkoinen ledi .....	23

4.2	Ledien ominaisuudet.....	24
4.2.1	Väriämpötila.....	24
4.2.2	Kynnysjännite .....	25
4.2.3	Valovirta.....	26
4.2.4	Yhteenveto.....	26
5	VALON MITTAUS JA TULKINTA. SPEKTROMETRI, FOTODIODIT. ....	27
5.1	Fotodiodi.....	27
5.1.1	Valoanturit markkinoilla.....	27
5.1.2	Valon suodatus .....	28
5.2	Valojen ohjaus, katsaus menneeseen, nykyisyyteen sekä tulevaan.....	30
6	KÄYTÄNNÖN KOEJÄRJESTELY: VALAISINKOHTAINEN ANTURIPOHJAINEN VÄRILÄMPÖTILAN JA VALOVIRRRAN SÄÄTÖ .....	33
6.1	Testijärjestelmän kuvaus .....	33
6.1.1	Ledimoduulit .....	34
6.1.2	Linssit.....	36
6.1.3	Lediajurit .....	36
6.1.4	Valaisimen parametrien laskenta.....	37
6.1.5	Valaistusanturi .....	41
6.1.6	Muut anturit.....	43
6.2	Valaisintestit.....	43
6.3	Mittaustulokset.....	44
6.3.1	Testitulokset - kalibrointi .....	44
6.3.2	Päivänvalon hyödyntäminen .....	45
6.3.3	Dynaaminen väriämpötilan säätö.....	48
7	TULOSTEN ANALYYSI JA POHDINTA .....	51
	LÄHTEET.....	55
	KUVALUETTELO .....	59
	TAULUKKOLUETTELO.....	60



## 1 JOHDANTO

”Jumala sanoi: ”Tulkoon valo!” Ja valo tuli. Jumala näki, että valo oli hyvä. Jumala erotti valon pimeydestä”. (Raamattu 1992.)

Vastaava seikka ilmenee useimmista luomiskertomuksista. Ensimmäinen asia, mikä maailmaan syntyy, on valo, tuli se sitten Jumalan käsistä, sotkan munasta tai korpin sulasta, kertoen siitä, kuinka oleellinen valo on elämän kannalta, toki lukuisten muiden perusainesten ohella.

Vähänpä luomiskertomuksissa tiedettiin sitä, että jonain päivänä maailmaan keksitään insinööri, jonka visioista koko valon käsite muuttuu vuosisadan kuluessa. Vielä muutama kymmenen vuotta sitten kuluttajan valonhallinta oli helppoa: osti kaupasta vain 25, 40, 60, 75 tai 100 W tehoisen lampun, jossa wattimäärä suoraan kertoi, monenko kynttilän veroinen kyseinen polttimo valovoimaltaan oli. Pinnoite oli sitten himmeä tai kirkas, tarpeen mukaan. Loisteputkissa taas näkyi se kiusallinen värinä, ja muuta parametria ei ollut kuin sopivan pituuden lisänä mystinen kolminumeroinen koodi, joka sitten yllätti, kun värisävy olikin erilainen kuin edellisissä putkissa.

Lediteknologia on tehnyt tuloaan 1990-luvulta asti, tänä päivänä ne ovat puolijohdeteknologian kehittymisen myötä kaikkialla, ja niiden hinta on edullinen. Sivujuonteena julkisuudessa käydään keskusteluita eri värisävyjen vaikutuksesta ihmisen fysiologiaan, eli lediteknologia on poikanut tullessaan lukuisan määrän tutkimusta eri tieteenaloilla kasvien kasvamisesta ihmisen vireystilaan.

Tässä työssä on tarkoitus perehdyttää lukijaa valoon sähkömagneettisena säteilynä, ihmissilmään näkyvän valon spektrin ominaisuuksiin, sekä värien havaitsemiseen. Siitä pääsemme luomaan katsauksen värien teoriaan sekä valon värilämpötilaan, sekä lediteknologian haasteisiin valkoisen valon tuottamisessa. Valmiissa valaisimissa ledit on valittu yleensä tarkoituserä huomioon, mutta insinöörejä tarvitaan myös lukuisilla valaisinvalmistajilla Suomessa, joten on hyvä ymmärtää myös ledien valintaan vaikuttavat käsitteet sekä haasteet.

Puolijohdeteknologian kehitys mobiili- ja autoteollisuuden myötä on tuonut kulluttajan ulottuville myös edullisen anturitekologian, jolla voidaan mitata valon eri ominaisuuksia ja käyttää tuloksia erilaisten tulosten analysointiin. Näistä mainittakoon UV-indeksi, tuotteiden värien havaitseminen, jota käytetään esimerkiksi maalin värisävyn tai jonkin elintarvikkeen tuoreuden tunnistamiseen. Tässä työssä jätämme värianalyysit sikseen ja keskitymme anturoinnin hyödyntämistä valaistuksessa. Nykyään valaisinten valovirtaa voidaan anturoinnin säätää, mutta en ole vielä markkinoilla törmännyt automaattiseen värilämpötilan säätöön.

Tarkemman käsityksen luomiseksi rakennetaan testivalaisin, jolla ledivalaisimen valovirtaa ja värilämpötilaa voidaan säätää automaattisesti siihen tarkoitettun anturin avulla. Erilaisin mittauksin voidaan tutkia, miten anturi käytännössä toimii ja tulosten perusteella vetää johtopäätöksiä, mitä kaikkea moiosella voisi saada aikaan esimerkiksi sisustusvalaistuksessa.

## **2 TUTKIMUSSUUNNITELMA**

### **2.1 Teoreettinen viitekehys**

Insinöörikoulutuksessa sähkö- ja automaatiotekniikan alalla käydään kattavasti läpi valaistustekniikkaa ja -suunnittelua järjestelmätasolla. Valo-oppia käydään läpi fysiikassa, mutta suurta painoa ei ole laitettu siihen, miten valoa tuotetaan ja etenkin havainnoidaan. Yleinen valaistus palvelee nimenomaan ihmisen havainnoinnin tarpeita. Se, miten ihminen valoa havaitsee sekä aallonpituusalue käydään työssä läpi, samaten standardihavainnoijaan pohjautuvat kolmiväriteoria sekä mustan kappaleen säteilyyn perustuva valkoisen valon värilämpötila.

Edelleen luodaan katsaus käytännön leditekologian taustoihin, kunnes päästään ytimeen: valkoinen valo ei ole valkoista valoa, vaan eri ledien spektrit poikkeavat toisistaan. Käydään läpi todellisten ledien oleellimmat parametrit.



Valon tunnistamiseen käytettyä anturiteknologiaa käsitellään, kuten miten puolijohde valoa tunnistaa, mitä seikkoja on syytä ottaa huomioon, kuten valovirran käsittely, värilämpötilan määrittäminen sekä eri värien erottelu. Edelleen perehdytään siihen, miten anturin lukemia pitää tulkita ja käsitellä, jotta todelliset valaistusvoimakkuuden ja värilämpötilan arvot saadaan selville.

## 2.2 Tutkimuksen tarkoitus, tavoite ja tutkimusongelma

Sensortechnologia kehittyy ainoastaan harppauksin. Sen kärkinä ovat mobiiliteknologia sekä autoteollisuus. Perinteinen teollisuus, etenkin talotekniikka on tullut hieman jäljessä, vaikkakin valaistuksen puolella läsnäoloanturit sekä himmentimet ovat olleet arkipäivää jo hyvän aikaa. Tyypillisessä toimisto- tms. tilassa on käytetty muutamaa läsnäolo- tai valoanturia, joilla valaistus himmennetään tai kytketään päälle ja pois.

Kaliforniassa on ollut jo hyvän aikaa direktiivi, jolla vaaditaan päivänvalon hyödyntämistä valaistuksessa, eli kun ikkunoista tulee riittävästi valoa, keinovalaistusta himmennetään tai sammutetaan, kun taas alueilla, joihin valoa ei tule, keinovalo pidetään kirkkaampana. Tavoitteena on detaljitason tasoisempi balanssi riittävän valaistuksen sekä energiankulutuksen välillä. (CLTC 2018.) On hyvä syy olettaa, että vastaavia vaatimuksia asetetaan myös globaalisti.

Sirkadiaaninen rytmi on usein esillä päivittäisessä uutisoinnissa, eli miten valon sävy vaikuttaa ihmisen vireystilaan eri vuorokauden aikoina; samoin älylaitteiden sinertävä sävy kännykkää selaillessa ennen nukahtamista häiritsee unen laatua. (Potter ym. 2016.) Valon sävyn eli värilämpötilan säätöä tehdään jo vuorokausirytmien puitteissa mm. Espoossa Tapiolan metroasemalla, mutta dynaaminen säätö ei ole tullut esille muissa yhteyksissä.

Tutkimuksen tavoitteena on vastata seuraaviin kysymyksiin:

- voiko valaisinkohtaisella valovirran säädöllä säästää kustannuksia samalla kun mukavuus säilytetään?
- voiko dynaamisella värilämpötilan säädöllä vaikuttaa valaistukseen tilan värien pohjalta?

Näkökulmana kysymyksille on sekä mukavuus että kaupalliset tavoitteet. Oliko em. ominaisuuksista niin paljon hyötyä, että valaisinvalmistajien asiakkaat olisivat valmiit hyväksymään kustannuslisän?

### **2.3 Tutkimusmenetelmät ja aineisto**

Tutkimusmenetelmänä käytetään kvantitatiivista analyysiä, joka on yhdistelmä matemaattisesta analyysistä sekä käytännön mittauksista testilaitteen avulla. Tutkimusta varten rakennettiin testivalaisin, jossa on kahden eri värilämpötilan ledit ja johon on kytketty aiemmin kuvattu valaistuksen ohjauspiiri. Testivalaisimen parametrien avulla lasketaan ensin valaistusvoimakkuus, värilämpötilat sekä lämmönhallinta teorioiden pohjalta, jonka jälkeen tehdään joukko testejä, joilla tutkitaan, miten anturointi käytännössä reagoi erilaisissa valaistusolosuhteissa.

### **2.4 Tutkimuksen aikataulu**

Koska tutkimuksella ei ole ulkopuolista rahoittajaa eikä tilaajaa, vaan kyse on akateemisesta kiinnostuksesta aiheeseen, aikataulu ei ole aseteltu tarkaksi. Varsinainen työ tehdään kevään 2021 aikana, vaikka aihe olikin valittuna jo 2019.

## **3 VALON JA SEN HAVAITSEMISEN TEORIAA**

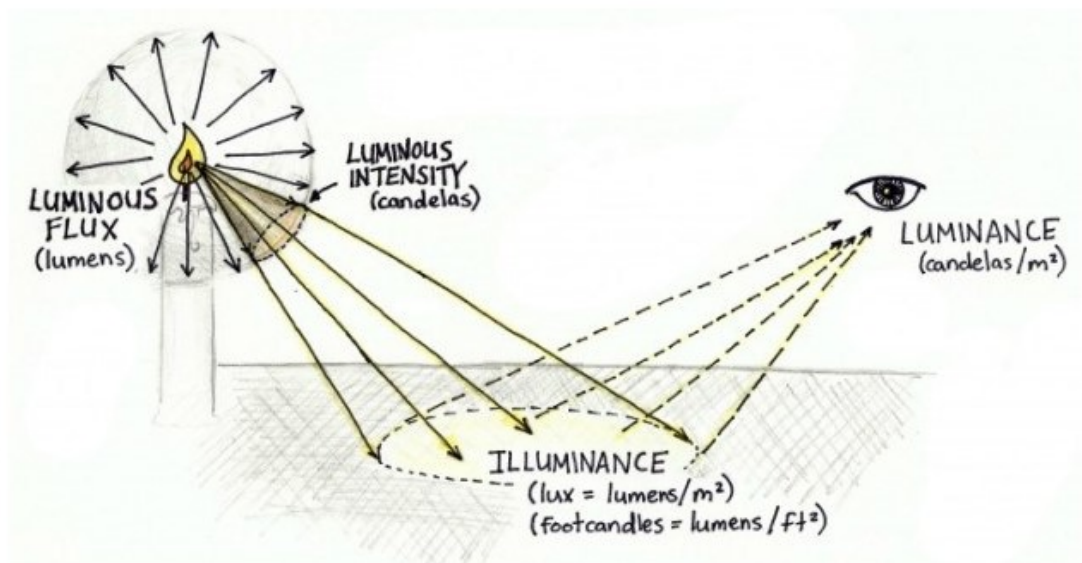
### **3.1 Valon luonne**

Valo fysikaalisena ilmiönä on sähkömagneettista säteilyä, jota voidaan kuvata sekä aalto- että kvanttiteorioiden avulla. Säteilyn aallonpituusalue on nolasta äärettömiin, mutta valoksi kutsutun alueen aallonpituus vaihtelee 400–760 nm välillä, hieman havaitusalueesta riippuen. Näkyvän valon alueeksi kutsutaan luontevasti niitä aallonpituuksia, joita ihmisen havaintoelin, silmä, pystyy havaitsemaan. (Ahponen ym. 1996, 13.) On syytä huomata, että yleensä sähkömagneettinen säteily kuvataan taajuuden funktiona, mutta valon kyseessä ollen on

tyypillistä puhua aallonpituuksista. Silmän tarkemmasta luonteesta valon ja värien havaitsemisessa on lisätietoa luvussa 3.3.1.

### 3.2 Valoon liittyvät perussuureet

Valoon liittyvät perussuureet ovat valovirta (luminous flux), valovoima (luminous intensity), valaistusvoimakkuus (illuminance) sekä luminanssi. Suureita havainnollistaa alla oleva piirros ja seuraavissa kappaleissa on kuvattu tarkemmin kunkin piirteitä.



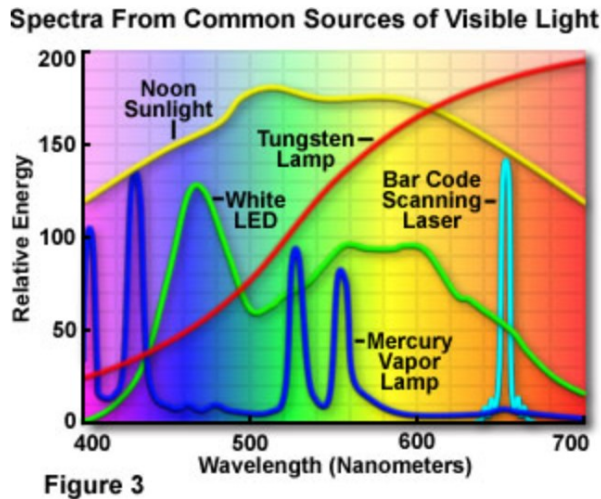
Kuva 1. Valaistuksen suureet (Sigma-Safety 2020)

Kokonaisuutena edellä kuvatut suureet voi mieltä valaistussuunnittelussa niin, että valovirta kuvaa valaisimen tuottamaa valotehoa  $I$ . valovirtaa, joka valaisimen rakenteesta riippuen tuottaa tiettyyn suuntaan kohdennetun valovoiman. Kun valaisimen valokuvio ja etäisyys tunnetaan, voidaan laskea vastaava valaistusvoimakkuus tietyllä pinnalla.

#### 3.2.1 Valon säteilyteho

Valon säteilyteho määritellään yleisesti valon aallonpituuksien sähkömagneettisen säteilyn teho, eli säteilyn tuottama energia aikayksikköä kohden. Käytökelpoisemmaksi säteilyteho saadaan, kun siitä määritellään sen spektriheys,

eli lasketaan säteilyteho jokaiselle valon aallonpituudelle. Kuvassa 2 on esitetty esimerkinomaisesti erilaisten valonlähteiden spektriheydet aallonpituuden funktiona.



Kuva 2. Valonlähteiden spektrit (Davidson 2019)

### 3.2.2 Valovirta $\Phi$

Valovirta  $\Phi$  on valon säteilyvoimakkuus painotettuna silmän spektriherkkyyden funktiona, eli sen tarkoitus on kuvata, miten paljon säteilevä valonlähde tuottaa silmän erottamaa valoa. Valovirran yksikkö on lumen [lm]. (Ahponen ym. 1996, 18.) Tyypillisesti valaisinpolttimoissa käytetään vertailun helpottamiseksi valovirran arvoa sähkötehon sijasta.

### 3.2.3 Valovoima $I_v$

Valovoima kuvaa taas sitä, miten voimakas on valonlähteen säteilemä valovirta tietyssä avaruuskulmassa. Yksikkö on kandela [cd], ja sitä käytetään tyypillisesti määrittelemään valaisimen valontuottokykyä tiettyihin suuntiin. (Ahponen ym. 1996.)

### 3.2.4 Valaistusvoimakkuus $E$

Valaistusvoimakkuus määritellään tietylle pinnalle kohdistuvan valovirran määränä, ja sen yksikkö on luksi [lx]. Luksi voidaan myös siis määritellä luume-

neina neliometriä kohden [ $\text{lm}/\text{m}^2$ ], ja sillä nimensä mukaisesti mitataan esimerkiksi valaisimen tuottamaa valoa vaikkapa työpisteessä (Ahponen ym. 1996, 21.) Tyypillisiä mitattuja arvoja valaistusvoimakkuudelle ovat esimerkiksi

- valaistu maantie 20 lx
- toimistopöytä 500 lx
- kirkas päivä 100 000 lx

Valaistussuunnittelussa valaistusvoimakkuus on oleellinen parametri.

Taulukko 1. Valaistusvoimakkuudet (Khan ym. 2015, 260)

**Table 7.3** *Illuminance scale.*

lux	Environmental illumination
~100 000	Daylight hours 12 clear sky
~65 000	Daylight hours 10 clear sky
~35 000	Daylight hours 15 overcast sky
~32 000	Daylight hours 12 overcast sky
~25 000	Daylight hours 10 overcast sky
~2000	Natural light an hour after dawn, overcast sky
~1000	Natural light an hour before dawn
~1000	Internal, fluorescent lamps and window light
700-500	Department stores
500-400	Interior with fluorescent lamps
300-200	Interior
200-100	Internal stairs

### 3.2.5 Luminanssi L

Valaistusvoimakkuus kertoo vain sen, kuinka paljon valoa osuu tiettyyn pintaan. Luminanssi puolestaan kertoo sen, kuinka paljon pintaan osuvasta valosta heijastuu takaisin, eli millainen valovoima pinnasta säteilee. Sen yksikkö on siis  $\text{cd}/\text{m}^2$ . Luminanssi riippuu pinnan materiaalista, muodosta sekä väristä. (Ahponen ym. 1996, 23.)

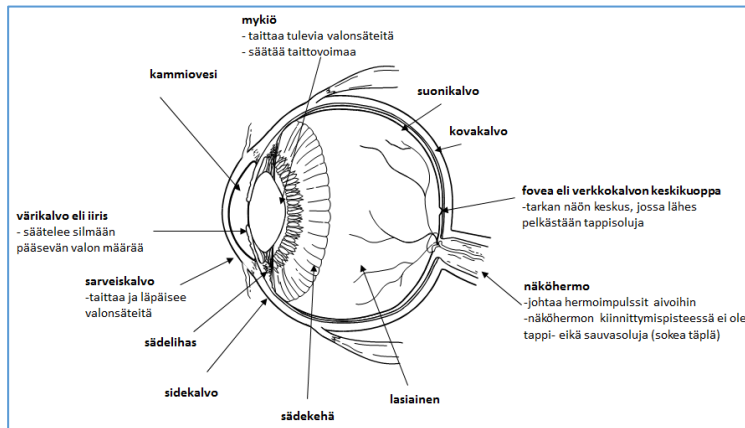
### 3.2.6 Valotehokkuus

Valotehokkuus, vaikkei olekaan varsinaisesti oma fysikaalinen suurensa, on sähkövalaistuksen yhteydessä oleellinen suure, joka määrittelee valonlähteen hyötysuhteen. Valotehokkuus määritellään valovirran ja lampun ja sen liitäntälaitteen käyttämän sähkötehon suhteena, eli sen yksikkö on  $\text{lm}/\text{W}$ . Se kertoo, miten hyvin valonlähde muuttaa ottamansa sähkötehon näkyväksi valoksi. (Ahponen ym., 1996.)

### 3.3 Valon havaitseminen

#### 3.3.1 Silmän toiminta

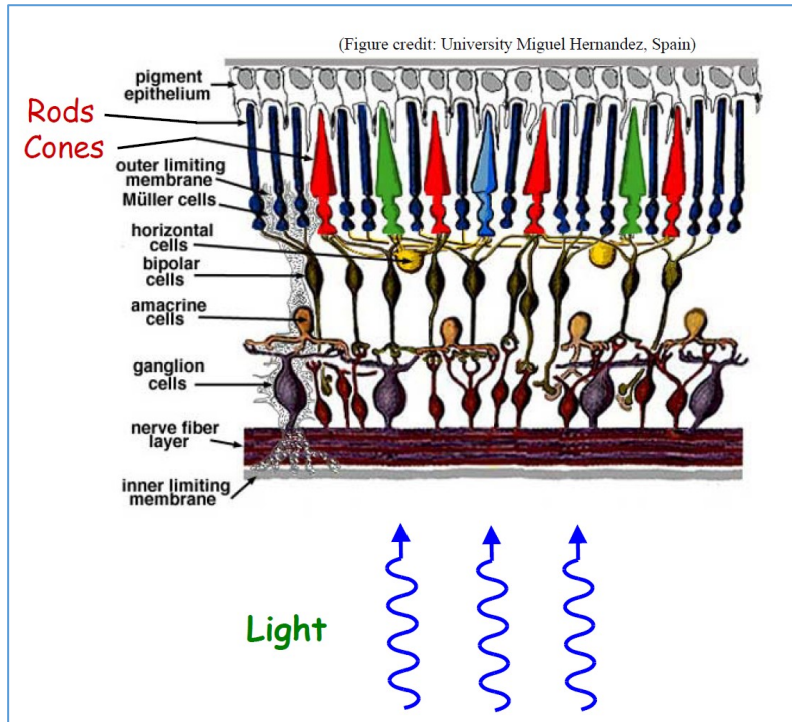
Silmä on rakenteeltaan ja toiminnaltaan pitkälti kameraa muistuttava elin. Silmän poikkileikkaus on esitetty kuvassa 3. Pallomaisen rakenteen etuosassa on sarveiskalvon suojaama linssi, joka synnyttää sekä kohdentaa näkökentässä olevista esineistä heijastuvan kuvan optiikan lakien mukaisesti verkkokalvolle, joka on valoherkkien solujen peittämä. Verkkokalvon solujen aistimat valo- ja värierot siirretään näköhermoa pitkin aivojen näkökeskukseen, jossa varsinainen kuva muodostetaan tulkittavaksi. (Ahponen ym. 1996, 57.)



Kuva 3. Silmän rakenne (Digma)

Verkkokalvon valoherkkiä soluja on kahdenlaisia: sauvoja ja tappeja. Tapit ovat erikoistuneet toimimaan voimakkaassa ja sauvat heikossa valaistuksessa. Tarkimman näön alueella silmän akselilla soluja on tiheimmässä, ja alueen keskuksessa tarkimman näön alueella on vain tappisoluja. Tarkimman näön alue on vain 1–2° suuruinen. (Ahponen ym. 1996, 58.)

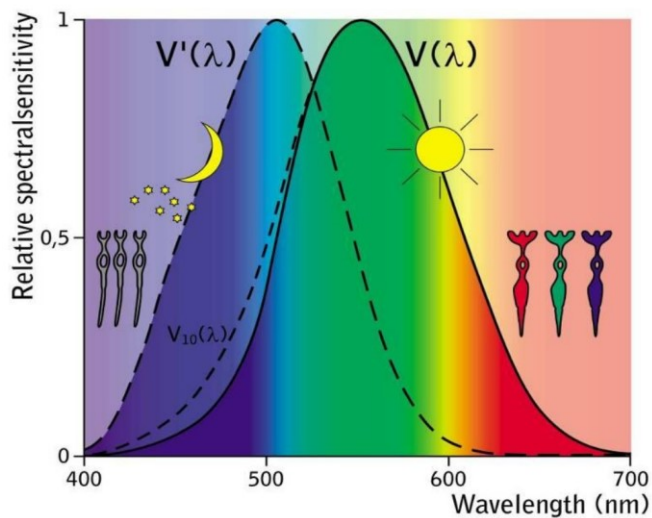
Tappisoluja on kolmenlaisia: osa niistä on herkkiä siniselle, osa vihreälle ja osa punaiselle valolle ja värien havainnointi perustuukin eri tappisolujen tuotamiin aistimuksiin. Kuvassa 4 on esitetty poikkileikkaus verkkokalvosta.



Kuva 4. Kuva verkkokalvosta (KTH)

### 3.3.2 Silmän spektriherkkyys

Voimakkaassa valaistuksessa, jossa näkeminen tapahtuu vain tappisolujen avulla, syntyy sekä valoisuus- että väriaistimuksia. Silmä ei kuitenkaan havaitse kaikkia aallonpituuksia samalla tavalla, vaan yksinkertaistettuna valoisaistimus riippuu aallonpituudesta kuvan 5 mukaisella tavalla. (Ahponen ym. 1996, 16.)



Kuva 5. Silmän spektriherkkyys  $V(\lambda)$  (Ketomäki 2018)

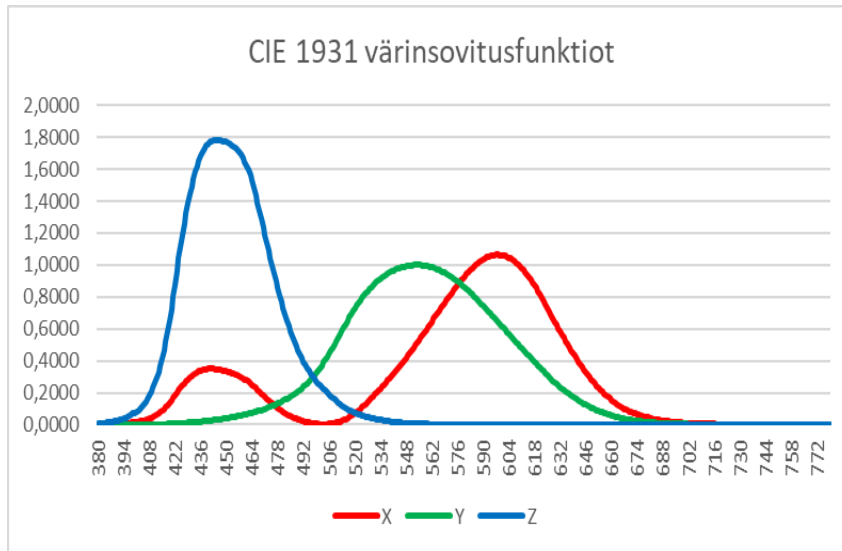
Spektriherkkyyskäyrän on määritellyt kansainvälinen valaistusjärjestö CIE (Commission Internationale de l'Éclairage) vuonna 1924. Koska silmän tappi- ja sauvasolut reagoivat kirkkaaseen ja hämärään valoon, on niillä myös omat spektriherkkyytensä. Kirkkaan valon alueella spektriherkkyyskäyrää kutsutaan fotooppiseksi, ja silloin silmä on herkin 555 nm aallonpituudella, joka aistitaan vihreän sävynä. Hämärässä herkkyyskäyrää kutsutaan skotooppiseksi, ja sen maksimi on 500 nm tienoolla eli on herkempi sinisen sävyille, auttaen siten hämäränäkemistä. (Ketomäki 2018.). Spektriherkkyyskuvista voi myös havaita, että esimerkiksi jo fotooppisella käyrällä 620 nm aallonpituuden punaisen sävyn säteilytehon tulee olla kymmenkertainen tuottaakseen saman aistimuksen kuin 555 nm aallonpituus (Ahponen ym. 1996, 17.)

### **3.3.3 Värien aistiminen ja kolmiväriteoria (CIE 1931)**

Värien tunnistamista ei suoraan johdeta silmän tappisolujen spektriherkkyysistä, sillä ylipäänsä valon synnyttämä stimulaatio värille herkissä soluissa, ärsykkeen välittyminen aivoihin ja kokonaisuuden tulkinta on monimutkainen psyko-fysiologinen prosessi (Khan ym. 2015, 22).

Kuten kohdassa 2.3.1 mainittiin, väriaistimus tapahtuu eri aallonpituuksille herkkien tappisolujen välityksellä. Sillä ihmisen väriaistimusta ei varsinaisesti pystytä mittaamaan, standardointiorganisaatio CIE määritteli vuonna 1931 standardihavainnoijan eli koehenkilön, jolle näytettiin eri aallonpituuden valoja ja tämä kertoi, millainen väri on kyseessä. Joukolle standardihavainnoitsijoita tehtiin nämä testit ja niiden perusteella saatiin määriteltyä ihmisen silmän väriherkkydet, jotka on esitetty kuvassa 6, ja joita kutsutaan XYZ-koordinaateiksi. Kuvan värit vastaavat sitä, miten ihmisen silmä havainnoi sinistä, vihreää ja punaista väriä. Kiintoisa yksityiskohta on punaista väriä kuvaava käyrä, jossa on pieni huippu 440 nm kohdalla, eli myös sinisen valon alueelta voidaan havaita punaisen sävyä. (Khan ym. 2015.)





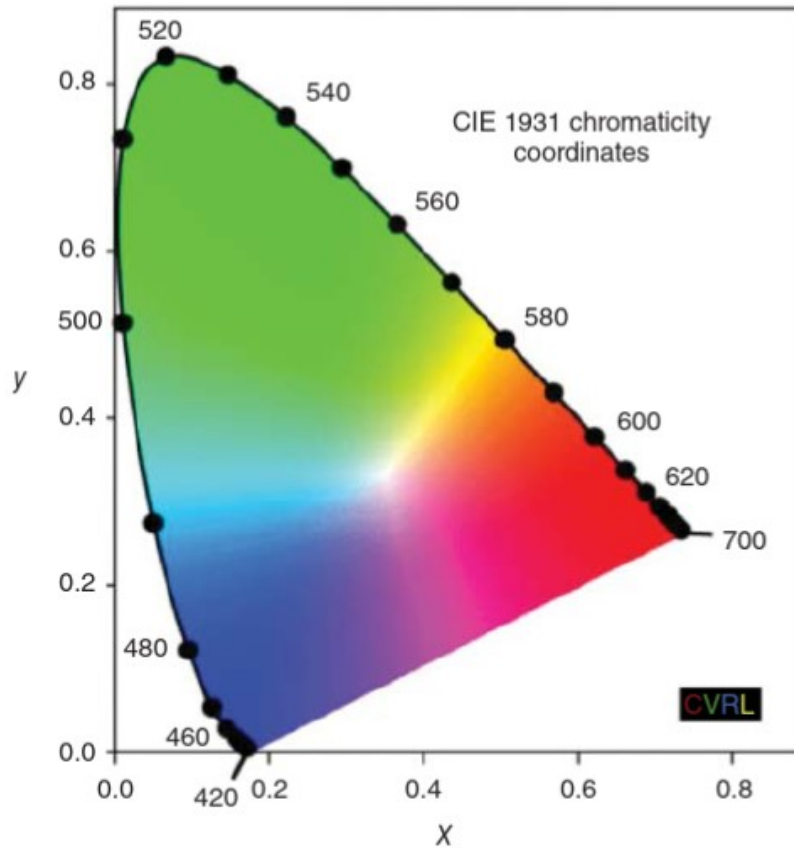
Kuva 6. Värinsovitusfunktiot

XYZ ei suinkaan ole ainoa malli, jota on vuosien saatossa kehitelty värien aistimisen tutkimusten pohjalta. Se kuitenkin on riittävä malli kuvaamaan väriavaruutta, joten sen pohjalta valaistuksessa määritellään värit sekä myös seuraavassa kohdassa esitelty värilämpötilan määrittely, joten se on varsin tärkeä mallinnus ihmisenäölle. (Khan ym. 2015.)

XYZ-koordinaatisto voidaan ajatella kolmiulotteisena värikarttana, jossa kullekin värille on oma akselinsa. Kolmiulotteinen hahmottaminen on kuitenkin hankalaa, joten asteikkoa on yksinkertaistettu normalisoimalla  $Y = 1$ , jolloin se vastaa valkoisen valon synnyttämää luminanssia. Siten voidaan johtaa kromaattisuuskoordinaatit  $(x, y, z)$  ja ne ovat alla olevan yhtälön muotoa. (Khan ym. 2015, 26.)

$$x = \frac{X}{Z+Y+Z}, y = \frac{Y}{X+Y+Z}, z = \frac{Z}{X+Y+Z} = 1 - x - y \quad (1)$$

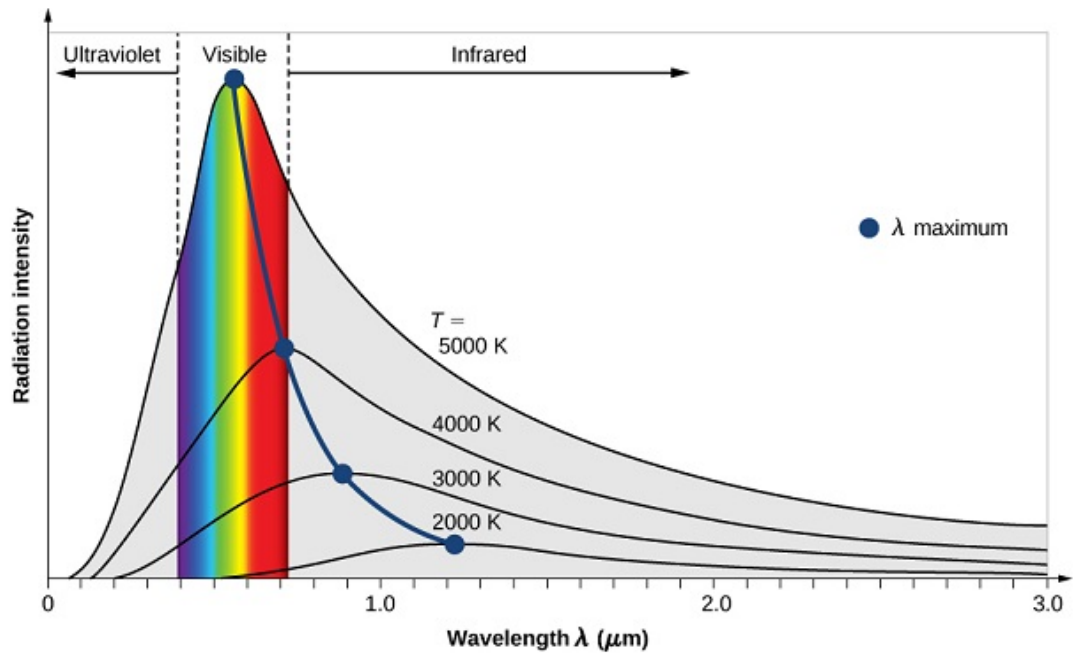
Näin saadaan esitettyä keskeinen käsite,  $x, y$ -kromaattisuusdiagrammi, joka on nähtävissä kuvassa 7. Kromaattiset aallonpituudet ovat käyrän reunalla ja sen rajoittamalla alueella voidaan määrittellä kaikkien värien koordinaatit (Khan ym. 2015, 26.)



Kuva 7. Kromaattisuusdiagrammi (Khan ym. 2015)

### 3.3.4 Värilämpötila ja Planckin säteilijä

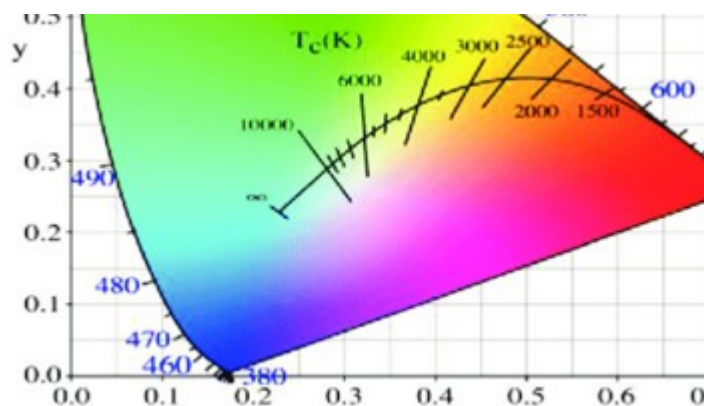
Jokainen maalikaupassa värisävyjä tutkinut on huomannut, että valkoinen ei ole vain valkoista, vaan sisältää äärettömän määrän erilaisia sävyjä. Kukin valkoisen sävy saadaan määriteltyä kromaattisuusdiagrammin avulla. Määrittäessä käytetään fyysikko Maxwell Planckin tutkimustietoa siitä, että jokainen kappale emittoi säteilyä, jonka aallonpituus riippuu kappaleen lämpötilasta. (Larsen 2020.)



Kuva 8. Mustan kappaleen säteily (Larsen 2020)

Huoneenlämmössä säteily on näkyvän valon alueen ulkopuolella, mutta kuumennettaessa säteily siirtyy näkyvän valon alueelle. Planck tutki erityisesti mustan kappaleen säteilyä erilaisissa lämpötiloissa ja totesi sen, minkä useimmat makkaraa metallitikun nenässä nuotiolla paistaneet ovat havainneet, eli metalli muuttuu kellertäväksi kuumetessaan.

Musta kappale lämmitessään näyttää ensin kellertävältä, muuttuu sitten kirkkaan valkoisen kautta sinertäväksi. Mustan kappaleen tietyissä lämpötilassa tuottaman säteilyn aallonpituus voidaan piirtää kromaattisuusdiagrammiin kuvan 9 mukaisesti, ja kyseistä käyrää kutsutaan Planckin mustan kappaleen säteilykäyräksi.



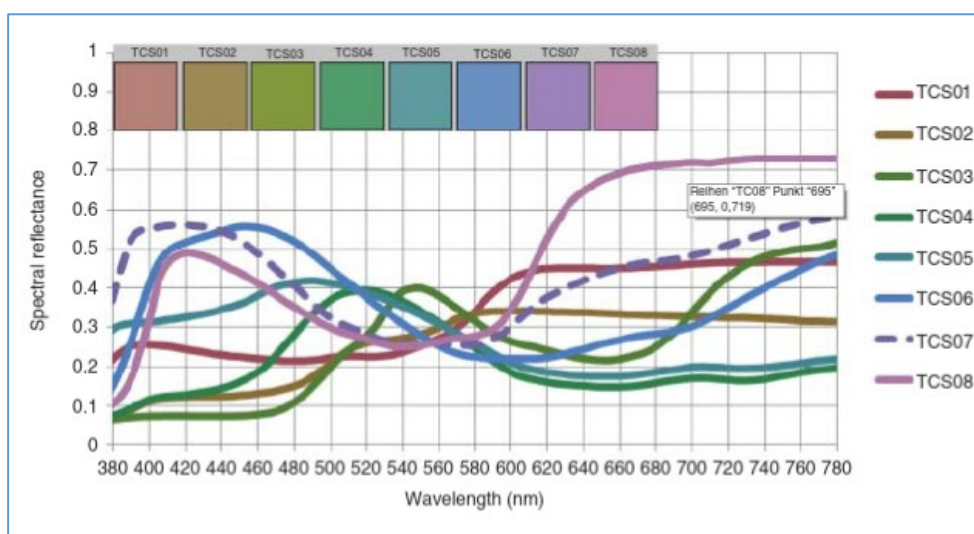
Kuva 9. Planckin säteilykäyrä (Khan ym. 2015)

Käyrän asteikko muodostuu vastaavista lämpötiloista ja se määrittelevät siten keskeisen valaistuksen määritelmän, valkoisen valon väriämpötilan. Englannin kielessä käytetään lyhennettä CCT (correlated colour temperature).

Käytännön sanastossa väriämpötilaa kuvataan lämpimän tai kylmän valkoisen skaalalla, mikä on hieman harhaanjohtavaa, sillä mitä korkeampi väriämpötila on, sitä kylmemmästä sävystä on kyse. Tyypillisesti lämmin valkoinen on 2200–3500 K alueella, kun taas sävyt muuttuvat kylmemmäksi korkeammissa lämpötiloissa. Kromaattisuusdiagrammin arvo ledivalaistuksen suunnittelussa käy paremmin selville luvussa 3.

### 3.3.5 Värintoistoindeksi Ra, CRI

Valonlähteen laatua pyritään ilmaisemaan lukuisin eri tavoin. Lähde, jonka spektri ei ole tasainen, voi silti näyttää tasaiselta, mutta spektristä puuttuvat tai korostuneet komponentit eivät ole silmällä yleensä havaittavissa, mutta voivat tuottaa yllätyksiä ilmiön, jota kutsutaan metamerismiksi, myötä. Valaistuksessa käytetyin muoto on CIE:n määrittelemä CRI (Colour Rendering Index), jossa mitataan valonlähde vertaamalla sitä, miten sen valo heijastuu tunnettuun referenssiin verrattuna usealla eri ennalta sovitulla värisävyllä. (Khan ym. 2015, 245.)



Kuva 10. CRI värit

Kuvassa 10 on esitetty kunkin värisävyn spektrit. CRI lasketaan mittaamalla kustakin sävystä heijastunut luminanssi, laskemalla kustakin indeksi verrattuna referenssiin ja laskemalla näiden keskiarvot yhten. Täydellisesti referenssiä vastaava lähde saa indeksin 100. (Khan ym. 2015.)

Menetelmän heikkoutena on värien valinta. Etenkin punainen on aliedustettuna referenssiväreissä (Khan ym. 2015, 246). Tätä parantaakseen CIE kehitti CRI2012-menetelmän (Khan ym. 2015, 249), mutta sitä ei toistaiseksi ole yleisvalaistukseen suunniteltujen ledien karakterisoinnissa käytetty. Alla olevassa taulukossa on listattu CRI-arvojen kategoriat.

Taulukko 2. CRI-arvojen tulkinta (Khan ym. 2015, 261)

Semantic category	CRI2012 ( $R_{a,2012}$ or $R_{i,2012}$ )	$R_a$
Very good	100	100
Good	87	87
Moderate	67	74
Low	47	58
Bad	26	33

In this table,  $R_{a,2012}$  or  $R_{i,2012}$  values were computed using the exponent (2/45) instead of (1/55) in Eq. (5.6).  $R_a$  values reflect the mean tendency of Figure 5.19 computed by considering all types of light source spectra.

## 4 VALAISTUKSESTA

### 4.1 Keskeiset parametrit valaisimen määrittelyssä

Koska työn fokus on älykäs valaistuksen ohjaus, jätämme kattavamman selvityksen erilaisista valonlähteistä lukijan harteille, ja keskitymme kuvailemaan lediteknologiaa hieman tarkemmin.

#### 4.1.1 LED (Light Emitting Diode)

Kuten LED, tai tässä työssä käytetty termi "ledi", nimityksenäkin kertoo, kyse on yksinkertaisesta puolijohdekomponentista, joka säteilee valoa, kun liitoksen

yli ohjataan sopiva jännite. Ledien historia ulottuu jo liki vuosisadan taa. Ensimmäiset merkinnät ledien kehittämisestä tapahtuivat viime vuosisadan alussa, ja brittiläinen insinööri H. J. Round tutki kideilmaisimia, havaitsi valon syntymisen, muttei syytä, miksi näin tapahtui, ja kirjoitti havainnoistaan 1907 *Electrical World* -lehteen. (Gregersen 2014.)

Ensimmäiset kaupalliset ledit kehitettiin 1960-luvun loppupuolella ja niissä käytettiin galliumia, arsenikkia sekä fosforia, ja tuottivat punaista valoa. Niitä käytettiin lähinnä merkkivaloina laitteistoissa. Hewlett-Packard oli ensimmäinen yritys, joka käytti ledejä kaupallisissa tuotteissaan.

Valkoisen valon tuottamiseen tarvittiin vielä punaisen ja vihreän lisäksi sinistä valoa, ja sen tuottaminen lediteknologialla oli edelleenkin haastavaa aina 1990-luvulle asti. Japanilainen Shuji Nakamura aloitti työnsä 1979 pienessä puolijohdevalmistajassa Nichia Chemicalissa ja alkoi valmistaa galliumfosfidi- ja galliumarsenidikiteitä ledien valmistukseen, sekä myöhemmin kokonaisia korkealaatuisia punaisia sekä infrapuna-ledejä. Nakamura halusi kehittää jostain sellaista, joka ei kilpaile suurten valmistajien kanssa, ja päätyi kehittämään sinistä lediä, johon tutkijat eivät vielä olleet kyenneet yrityksistä huolimatta. Nakamura valitsi materiaaliksi galliumnitraatin (GaN). Vuonna 1995 projekti tuotti viimein tulosta. Nichia alkoi myydä sinisiä ledejä vuonna 1999. (Gregersen 2014.)

Taulukossa 3 on listattu nykyisin värillisissä ledeissä käytetyt eri puolijohde-materiaalit ja niitä vastaavat aallonpituudet (Khan ym. 2015, 64).

Taulukko 3. Ledimateriaalit ja niitä vastaavat aallonpituudet (Khan ym. 2015)

Material group	Material	Color	$\lambda_p$ (nm)	$\eta_e$ (%)	Growth technique	Junction layer type
I	InGaN	UV	372	7.5	MOCVD	DH
	InGaN	Blue	470	11	MOCVD	QW
	InGaN	Royal Blue	440–450	Up to about 65	Thin GaN	MQW
	InGaN	Blue	460–470	Up to about 64	Thin GaN	MQW
	InGaN	Green	510–535	About 25	Thin GaN	MQW
	InGaN	Green	520	10	MOCVD	QW
	InGaN	Amber	590	3.5	MOCVD	QW
II	AlInGaP	Red	636	About 45	InGaAlP-thin-film	MQW
	AlInGaP	Deep Red	650	About 50	InGaAlP-thin-film	MQW
	GaAlAs	Red	650	16	LPE	DH
	AlGaInP	Amber	590	10	MOCVD	DH
III	GaP:N	Yellow-green	>565	0.3	LPE	H
	GaAsP:N	Yellow	>590	0.3	VPE	H

#### 4.1.2 Valkoinen ledi

Alla oleva tiivis kuvaus fosforipinnoitteiden käytöstä valkoisilla ledeillä on lainattu Lumileds-valmistajan teknisestä materiaalista (Lumileds 2020).

Fosfori, jos sitä säteilytetään ultraviolettisäteilyllä tai elektronisuihkulla, alkaa säteillä näkyvää valoa. Huolellisella fosforin rakenteen muokkaamisella näkyvän valon spektriä voidaan säätää, mikä tekee siitä laajasti käytetyn materiaalin valaistuksen elektroniikassa, kuten näytöissä, fluoresenssivaloissa sekä valkoisissa ledeissä.

Useimmat valkoiset ledit on valmistettu taulukon 3 mukaisesta InGaN-materiaalista, joten ne säteilevät kapeaspektristä sinistä valoa alueella 440–470 nm ja ne on pinnoitettu keltaisella, vihreällä tai punaisella fosforilla, joiden tehtävänä on absorboida osa sinisestä valosta. Läpi päässeeseen sinisen ja fosforin itse säteilemän valon yhdistelmä tuottaa valoa, jonka ihmissilmä tunnistaa valkoisena. Valkoisen ledin laatu sekä luotettavuus pitkällä aikavälillä riippuvat voimakkaasti valitun fosforin laadusta sekä ledin valmistuksen prosessista, miten fosfori puolijohteen päälle saadaan integroitua.

Keltainen fosfori tarjoaa tasaisen spektrin 500–700 nm alueella ja samalla absorboi voimakkaasti sinisen valon 420–480 nm aluetta, mutta tuottaa huonosti

punaista valoa, joten ne näyttävät sinertäviltä ja kategorisoidaan 4000–5000 K värilämpötilan alueelle. Myös värintoistoindeksi jää matalaksi.

Punainen fosfori on käytössä 2700–4000 K värilämpötilan ledeille, CRI:n ollessa vähintään 80. Haittana on se, että punaisen fosforin säteilystä suuri osa on 700 nm aallonpituuden yläpuolella, on siten ihmisilmälle näkymätöntä ja siten antaa valonlähteelle huonomman hyötysuhteen.

## 4.2 Ledien ominaisuudet

Käytännössä ledin ominaisuuksissa tapahtuu variaatiota kuten missä hyvänsä puolijohdeprosessissa. Ledien valmistuksessa eri yhdisteiden kerryttäminen puolijohteen pinnalle tapahtuu kaasujen avulla, jolloin eksakti prosessin hallinta on äärimmäisen hankalaa, ja vaihtelua esiintyy tuotantoerien välillä.

Tämä johtaa ledien luokitukseen, mistä käytetään insinöörikielessä slangisanaa *binnaus* (engl. binning). Valmistaja tekee binnaustestit jokaiselle valmistuserälle, ja ledit luokitellaan sitten eri tarkoituksiin sopiviksi. (Khan ym. 2015, 298.)

Sovellukset, joissa värisävyt, kynnysjännitteet tai valovirrat eivät ole oleellisia, voidaan käyttää mitä tahansa sopivaa lediä, kun taas viranomaisten valvonnassa oloissa, kuten meri- tai rautateiden sekä lentokenttien signaloinnissa saattaa olla hyvinkin tarkat vaatimukset ledien ominaisuuksille.

Seuraavassa katsotaan oleellisimmat valkoisen ledin luokituksessa käytetyt parametrit. Asiaan syvällisemmin perehdytystä kaipaavalle suositellaan lukemista Khanin kirjan luvusta 7 (Khan ym. 2015).

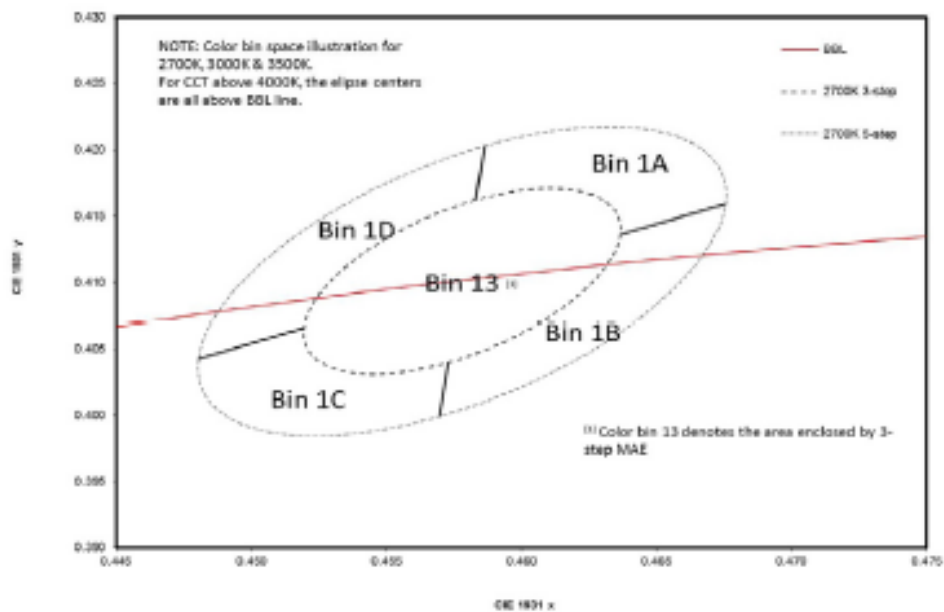
### 4.2.1 Värilämpötila

Ledit yleensä luokitellaan noin kymmeneen eri värilämpötilaan, mutta kullakin on sisäinen variaatio alla olevan kuvan mukaisesti. Siinä on esitetty yhden värilämpötilan vaihtelualue Planckin säteilykäyrän ympärillä, joka on merkitty punaisella värillä. Kuvassa olevat ellipsejä kuvataan MacAdamin ellipseiksi, ja kunkin ellipsin sijainti voidaan määrittellä kromaattisuusdiagrammista tutuilla x-



ja y-koordinaateilla, jotka on esitetty tuotteen spesifikaatiossa. (Khan ym. 2015.)

Ilman erityisvaatimuksia oleviin sovelluksiin voidaan käyttää kaikkia binnejä, kun taas vaativammissa, tässä tapauksessa vain 13-käyrän sisällä sijaitsevat, mahdollisimman vähän ideaalisesta valkoisesta valosta poikkeavat ledit kelpaavat tarkoitukseensa.



Kuva 11. Lumileds Rebel Plus ledien binnit (Lumileds 2019)

#### 4.2.2 Kynnysjännite

Kynnysjännite vaihtelee ledistä riippuen, alla taulukossa 4 on esitetty Lumiledsin Rebel Plus -ledin luokitus, eli tässä tapauksessa luokkia on kolme. Miten kynnysjännite vaikuttaa sovellukseen, riippuu voimakkaasti tapauksesta. Valaistuksen sovelluksissa ledit yleensä kytketään sarjaan ja ohjataan kokonaisuuksina, jolloin jännitteen variaatio peittyy kokonaisuuteen. Lumiledsin Rebel Plus:n tapauksessa vain kaksi eri binniä on saatavilla. (Lumileds 2020.)

#### Taulukko 4. Kynnysjännitteet

Table 7. Forward voltage bin definitions for LUXEON Rebel PLUS,  $T_j=85^\circ\text{C}$ .

BIN	FORWARD VOLTAGE <sup>(1)</sup> (V <sub>f</sub> )	
	MINIMUM	MAXIMUM
1	2.50	2.75
2	2.75	3.00

Notes for Table 7:

1. Lumileds maintains a tolerance of  $\pm 0.05\text{V}$  on forward voltage measurements.

#### 4.2.3 Valovirta

Valovirta riippuu luonnollisesti siitä, onko ledi tarkoitettu indikaattoriksi vaiko valonheittimeen, joten se pitää valita sovelluksensa mukaan. Alla on esitetty Lumiledsin Rebel Plus:n valovirran binit, joita on siis seitsemän kappaletta.

#### Taulukko 5. Valovirrat

Table 5. Luminous flux bin definitions for LUXEON Rebel PLUS.

BIN	LUMINOUS FLUX <sup>(1)</sup> (lm)	
	MINIMUM	MAXIMUM
A	75	85
B	85	95
C	95	105
D	105	115
E	115	125
F	125	135

Notes for Table 5:

1. Lumileds maintains a tolerance of  $\pm 6.5\%$  on luminous flux measurements.

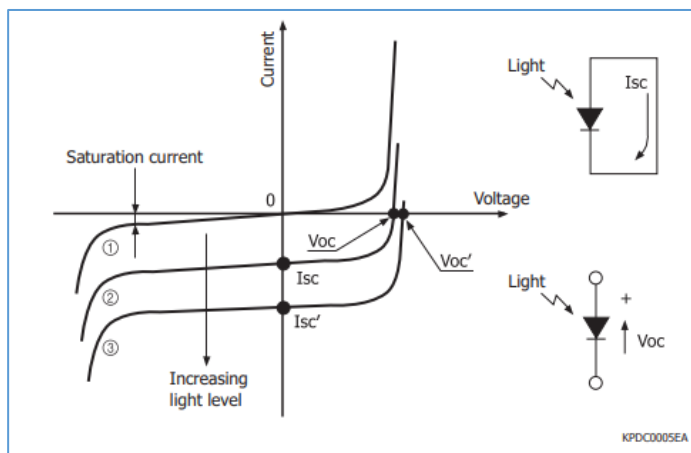
#### 4.2.4 Yhteenveto

Ledien tilaaminen sovellukseen vaatii siis ensinnäkin valinnan, onko kyse suur-, keski- vai matalatehoisesta ledistä, millainen värilämpötila tarvitaan ja kuinka tarkasti ledien se pitää täyttää. Samaten valovirran vaihtelusta on usein haittaa, joten on tärkeä valita sopiva bin myös sille. Mutta on syytä pitää mielessä, että mitä tiukemmin vaatimuksin ledin valitsee, myös hinta nousee korkeammaksi.

## 5 VALON MITTAUS JA TULKINTA. SPEKTROMETRI, FOTODIODIT.

### 5.1 Fotodiiodi

Tämän työn puitteissa ei ole syytä hautautua puolijohdetekniikan syövereihin, vaan oletamme tässä, että fotodiiodi tai fototransistori, jotka nimensä mukaisesti ovat puolijohdekomponentteja, joiden p-n-liitoksen yli syntyy jännite ja virta, kun komponenttia valaistaan. Alla olevassa kuvassa on havainnollistettu virran ja jännitteen käyttäytymistä (Hamamatsu 2014, 4.)



Kuva 12. Fotodiiodin ominaiskäyrät (Hamamatsu 2014)

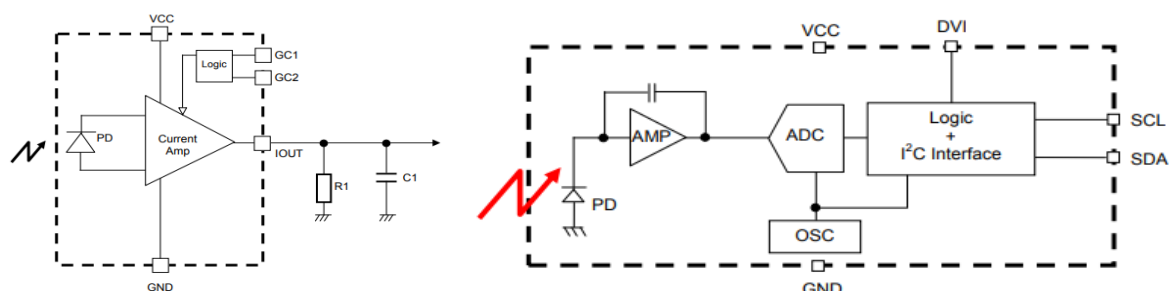
Fotodiiodiin syntyvä virta riippuvuus valon määrästä on lineaarinen, mutta saturaatioituu suuremmalla säteilyllä.

CMOS-tekniikalla valmistettujen fotodiiodien kyky tunnistaa valoa ulottuu noin 300–1100 nm aallonpituuskaistalle, eli herkkyysalue ulottuu UV-alueelta infrapuna-aallonpituuksiin, joten perusanturi tunnistaa paljon muutakin kuin ihmisen silmän havaitsemaa valoa. Jotta anturin lukemat vastaisivat kuvan 5 ihmisen silmän spektriherkkyttä, valon suodattaminen on tarpeen. Suodatuksesta on enemmän kappaleessa 4.1.2.

#### 5.1.1 Valoanturit markkinoilla

Valoanturikomponenttien valmistajista suurimmat ovat Vishay, ams ja rohm. Käytännössä anturit voi jakaa kahteen ryhmään: analogia- ja digitaalilähtöisiin

komponentteihin, joista esimerkkinä on esitetty rohm in anturin yksinkertaiset lohkokaaaviot alla (rohm 2011, 2012). Edelleen anturit jaetaan sen perusteella, mitä aallonpituuksia niillä voi tunnistaa. Niillä voi tunnistaa vain ihmissilmälle näkyvää valoa, värejä RGB-tasolla tai XYZ-koordinaatistossa tai rajoittaa näkyvyys joko UV- tai infrapuna-alueelle.

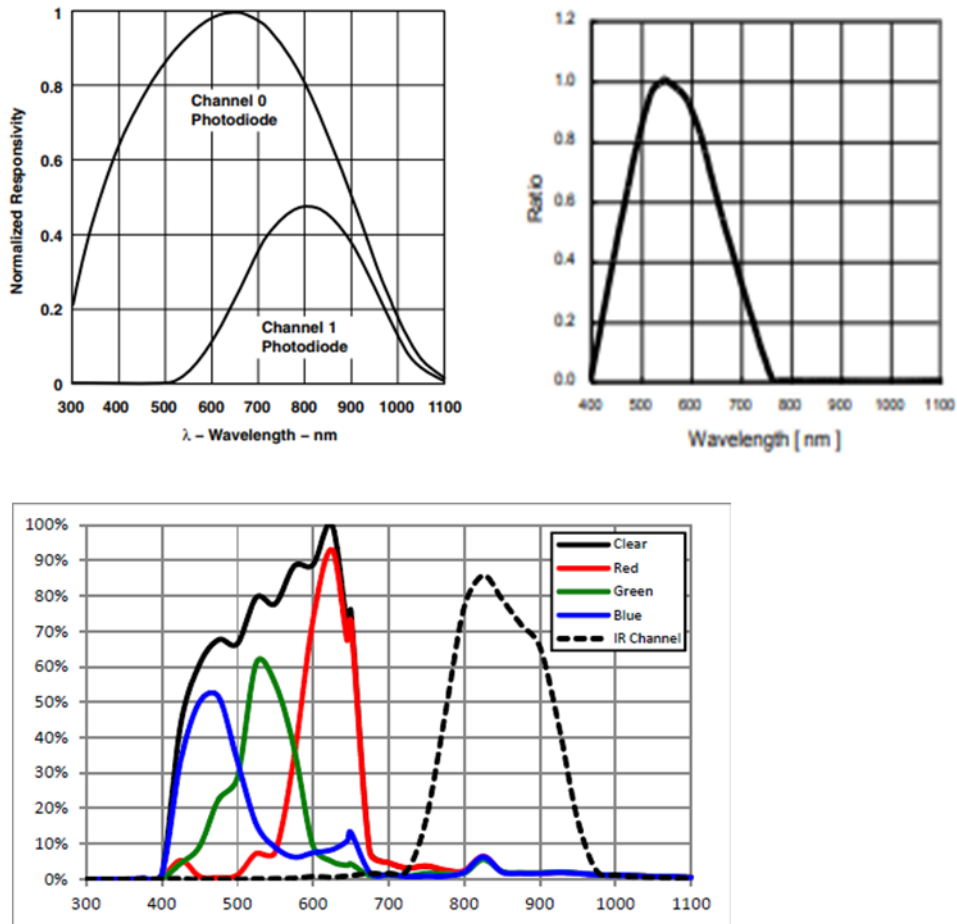


Kuva 13. Valoanturikomponenttien rakenteet (rohm, 2011)

Kuvista havaitaan, että fotodiodin virta vahvistetaan ja muutetaan jännitearvoksi operaatiovahvistimen avulla. Vahvistimella on tyypillisesti muutama eri vahvistusarvo dynamiikka-alueen kasvattamiseksi. Digitaalilähdöllä varustetun komponentin rakenne on pitkälti samanlainen kuin analogialähtöisen, mutta siihen on lisätty AD-muunnin sekä logiikkaa, jotta valon voimakkuus saadaan luettua digitaalisen väylän kautta. Muunnin on tyypillisesti 16-bittinen integroiva AD-muunnin, jonka dynamiikka-alue riippuu integrointiajan pituudesta. Digitaaliväylän avulla integrointiaikaa voidaan kasvattaa ja siten saavuttaa lisää dynamiikkaa. (rohm 2012.)

### 5.1.2 Valon suodatus

Valon suodattimen tehtävä on päästää tietyn aallonpituuden säteily läpi ja heijastaa muut pois. Kun suodattimen päästö- ja estokaistat valitaan sopivasti, voidaan suodattaa esimerkiksi vain tiettyä väriä, infrapuna- tai UV-säteilyä. Alla olevissa kuvissa on esitetty muutaman eri optisen anturin spektriherkkyydet. Vasemmalla ylhäällä on kaksi kanavaa: toinen koko alueelle ja toinen vain infrapuna-alueelle. Niiden suhteista voidaan päätellä valaistusvoimakkuuden tasoa. Oikealla ylhäällä taas on anturi, joka noudattaa silmän herkkyysskäyrää eikä sisällä infrapuna-aluetta. Alla on monikanavainen anturi, jossa on RGB-suodatukset, "valkoisen valon suodatus" sekä infrapunakanava. (ams 2020.)



Kuva 14. Antureiden herkkyyssäyriä (ams, rohm)

Pääsääntöisesti suodattimet ovat joko orgaanisia tai interferenssiin perustuvia. Orgaaninen suodatin on yksinkertaisimmillaan tietyn värinen kerros sopivaa materiaalia, joka heijastaa kyseisen värin aallonpituudet takaisin päästään muut lävitseen. Eri värisiä kerroksia päällekkäin ladottaessa saadaan suodatettua halutut aallonpituudet fotodiodille. Puolijohdeprosessissa haasteena orgaaniselle suodatukselle on se, että kerrosten paksuutta on vaikea kontrolloida. Se taas vaikuttaa kerrosten läpäisevän säteilyn intensiteettiin. Estokaisella mitään ei pääse läpi, mutta päästökaistalla intensiteetti voi vaihdella tuotantoterien välillä, mikä taas johtaa lopputuotteen kalibroinnin tarpeeseen. (IDEX Optics and Photonics 2018.)

Interferenssisuodatuksessa ladotaan fotodiodin päälle tarkasti määriteltäjä, pääasiassa neljännesaallonpituuden paksuisia kerroksia eri taitekertoimen omaavia materiaaleja, jolloin tietyt aallonpituudet heijastuvat kerrosten väli-

sissä heijastuksissa takaisin, kun taas halutut aallonpituudet saadaan fotodiodille. Tällä menetelmällä saadaan toteutettua hyvin tarkkoja kaistanpäästösuodattimia, mutta rakenne on hyvin arka valon tulokulmalle. Pieni muutos kulmassa kasvattaa kerrosten välisiä kulkumatkoja, jolloin suodattimen kaista siirtyy. (IDEX Optics and Photonics 2018.)

Käytännön toteutuksissa molempien rakenteiden yhdistelmiä voidaan käyttää. Anturikomponentissa on yleensä useita fotodiodeja, joiden päälle on tehty erilaisia suodattimia. Alla olevassa kuvassa on ams AG:n anturi, jonka spektriherkkyys näkyy kuvassa 15. Keskellä olevan fotodiodin päällä on vain infrapuna-alueen 700–900 nm läpi päästävä interferenssisuodatin, kehällä sekä infrapunaa estävä interferenssisuodatin että orgaaniset suodattimet eri väreille. Valkoiset alueet päästävät 400–700 nm kaistan läpi. Anturi on tarkoitettu eri valonlähteiden tunnistamiseen sekä kameran valkotasapainon määrittelyyn.



Kuva 15. ams TCS3490 fotodiodit

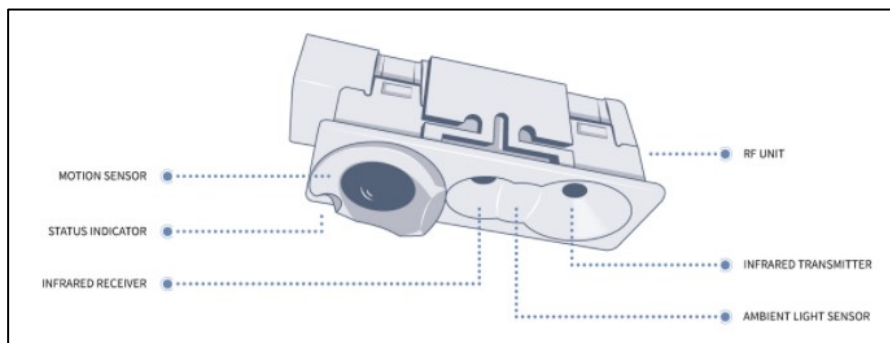
## 5.2 Valojen ohjaus, katsaus menneeseen, nykyisyyteen sekä tulevaan.

Aikaan perustuvaan valaistuksen ohjaukseen lienee jokainen kerrostalossa asunut tai siellä pimeään aikaan vierailut ja rappukäytävän valaistuksen lyhyttä päällä olon aikaa tuskaillut. Viimeisen parin vuosikymmenen kuluessa anturiohjaus on saapunut PIR-antureiden muodossa, eli jos tilassa ei havaita liikettä tiettyyn aikaan, valot sammuvat itsestään ja syttyvät taas liikkeen myötä. Optimaalisesti konfiguroituna järjestelmät toimivat mallikkaasti, jollei sitten esi-

merkiksi hotellin kylpyhuoneessa ole sähkön säästämiseksi asennettu epäherkkää anturia, joka sammuttaa valot kerran minuutissa, vaati parranajoa tuulimyllymäisin kädenliikkein. Päivänvaloanturit taas ovat tervetullut lisää säättämään valojen valovirtaa ikkunoista tulevaa valoa hyödyntämällä sen perusteella, mitä huonetilan valaistusvoimakkuustasoksi tarvitaan.

Millaisia järjestelmiä yllä mainittujen toimintojen takana sitten on? Seuraavassa on kuvailtu lyhyesti muutamaa eri toteutusta, joita valmistajat ovat älykkään ohjauksen toteuttamiseksi kehittäneet.

Suomalainen valmistaja Fagerhult on lanseerannut tuotebrandin nimellä ”Organic response”, jossa jokaisessa valaisimessa on anturiyksikkö, joka tunnistaa läsnäoloa infrapunasäteilyyn perustuvan PIR-anturin avulla, sekä taustavalon anturi, ja valaisimet kommunikoivat järjestelmän kanssa langattomalla yhteydellä, jonka kautta valaisimet voidaan kalibroida kuhunkin tilaan sopiviksi. Järjestelmä hyödyntää päivänvaloa, eli taustavalon ylittäessä ohjelmoidun kynnyksen, valaisimia himmennetään, ja päinvastoin. Valaisimet taas sammutetaan, kun tilassa ei ole ihmisiä. (Fagerhult 2020.) Päättarkoituksena on optimoida energiankulutusta, ja järjestelmä ei sisällä värilämpötilan säätöä.



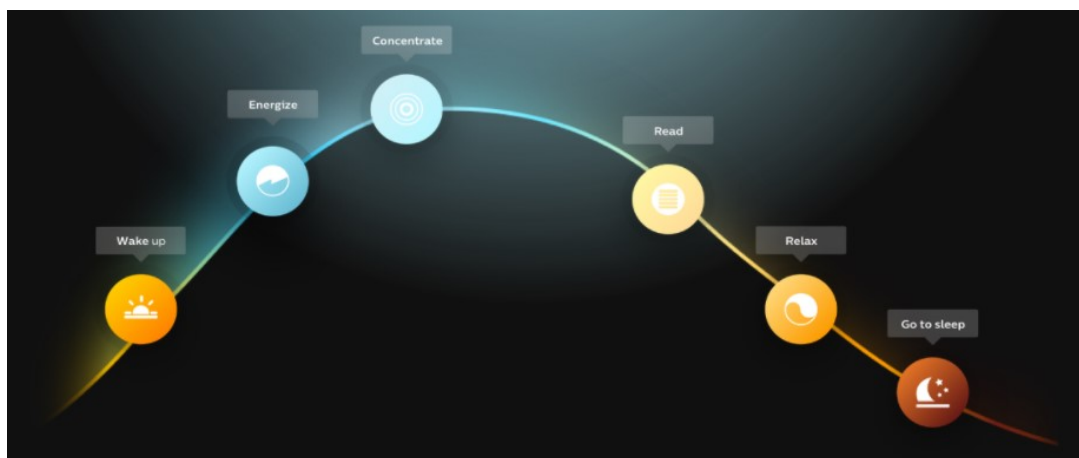
Kuva 16. Fagerhultin valaisinanturit (Fagerhult 2020)

Valaistusjärjestelmien edelläkävijä Helvar on puolestaan kehittänyt ”Ihmiskeinen valaistus” -järjestelmän, joka menee pitemmälle kuin edellä esitelty Fagerhultin järjestelmä. Anturoinnin ja konfiguroinnin avulla järjestelmällä voidaan energiansäästön ohella tukea ihmisen sirkadiaanista rytmiä. Helvar kuvaa järjestelmäänsä seuraavasti.

*”Järjestelmä on älykäs verkkopohjainen ohjausjärjestelmä, jossa on vaihteleva määrä toimilaitteita ja yksi tai useampia keskusyksioitä. Toimilaitteissa voi olla releitä, läsnäolon tunnistimia, kytkimiä tai signaaleja muista kiinteistön järjestelmistä kuten lämmitys tai ilmanvaihto. Sääto tapahtuu sekä itse laitteissa että keskusyksiköissä.” (Juslén 2018.).*

Helvarin laitteistolla valaisimet voidaan säätää ihmisen sirkadiaanisen rytmin perusteella, eli tarjota aamulla sinertävää ja iltaa kohti kellertävämpää valoa, jotta melatoniinin tuotanto noudattaisi ihmisen normaalia vuorokausirytmää.

Valaistuksen uranuurtaja Philips on taas kehittänyt ”Philips Hue” -järjestelmän, jossa valaisimet voivat tuottaa mitä tahansa värejä, ja niitä voidaan ohjata joko erillisellä ohjaimella tai mobiilisovelluksella. Ohjelmisto sisältää lukuisia eri värisävyjä teemoitettuna, ja siihen voidaan myös ohjelmoida sirkadiaanisen rytmin mukaisen värisävyjen vaihtelu, kuten alla kuvassa 17 näkyy (Philips 2021.)



Kuva 17. Philips Hue ja sirkadiaaninen rytmi

Philipsin järjestelmässä ei ole varsinaista anturoinnin tuomaa dynamiikkaa, vaan säätö on joko esiohjelmoitu tai säädetään käsin mobiilisovelluksen avulla.

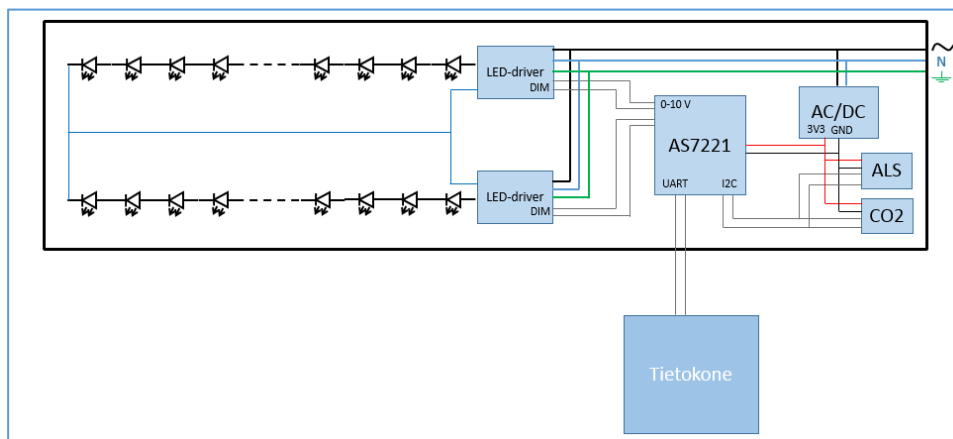


## 6 KÄYTÄNNÖN KOEJÄRJESTELY: VALAISINKOHTAINEN ANTURI- POHJAINEN VÄRILÄMPÖTILAN JA VALOVIRRRAN SÄÄTÖ

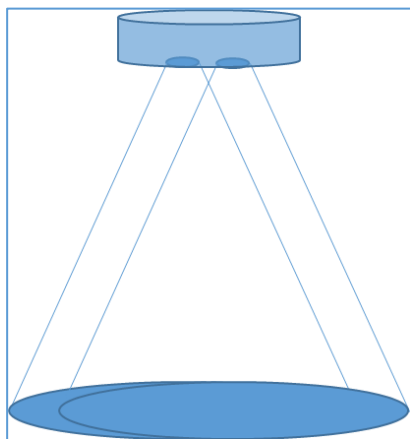
Tutkimuksen yhtenä kysymyksenä on se, ovatko puolijohdeanturit riittävän tarkkoja valaistusvoimakkuuden mittaamiseen sekä valaistuksen ohjaamiseen. Menetelmänä on kvantitatiivinen, testijärjestelmän mittauksiin perustuva metodi. Suoritetaan erilaisia mittauksia valaistusvoimakkuuden ja värilämpötilan osalta ja katsotaan, millaisia tuloksia saavutetaan.

### 6.1 Testijärjestelmän kuvaus

Jotta anturiohjatun valaisinkohtaisen järjestelmän toimintaa voisi testata, rakensin testivalaisimen, jota voi hahmottaa alla olevasta kuvista 18 ja 19. Valaisin on sijoitettu vanhaan kattolamppuun. Lampun kunkin osasen tarkempi kuvaus on esitetty alla.



Kuva 18. Testivalaisimen lohkokkaavio



Kuva 19. Testivalaisimen yksinkertaistettu valonjakokuvio

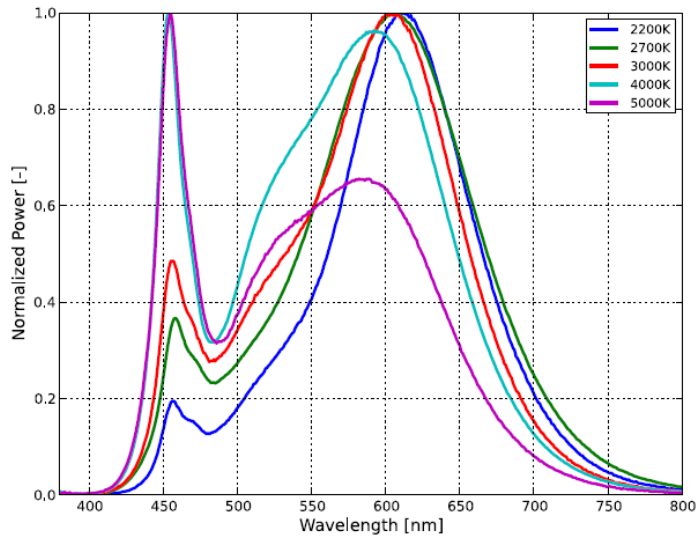
### 6.1.1 Ledimoduulit

Valaisimessa on käytetty valonlähteinä kahta Lumiledsin (Lumileds 2019) Chip-on-Board (CoB) -tekniikalla valmistettua moduulia, joissa useita ledikomponentteja on istutettu piirilevyille. Etuna on pieni tila sekä se, että ledit ovat yleensä samasta tuotantoerästä, jolloin ne ovat ominaisuuksiltaan samankaltaiset. Moduulit on nimetty konfiguraatioon viittaavin numeroin; testivalaisimessa käytetään 1208-moduulia, jossa on rinnakkain 8 kpl 12 ledin sarjakytkentöjä. Moduulien väriämpötilat vaihtelevat 2200 K – 6500 K välillä. Jotta voidaan tarkastella väriämpötilan säätöä, moduulien väriämpötiloiksi on valittu 2700 K ja 5000 K. Alla olevassa taulukossa on esitetty ko. moduulien parametreja.

Taulukko 6. 1208-kokoisten ledimoduuleiden parametrit

PART NUMBER	Forward voltage Vf [V]			Luminous flux [lm]		Temperature coefficient of Vf [mV/°C]	Nom CCT	Min CRI	Typical luminous efficacy [lm/W]	Test current [mA]	LES [mm]	Keila (FOV)	Typical thermal resistance junction to case [°C/W]
	Min	Typ	Max	Typ	Max								
L2C5-27801208F1500	32.5	34.8	37.5	3774	4193	-16	2700	80	134	900	15	115°	0,25
L2C5-50801208E1500	32.5	34.8	37.5	4088	4542	-15	5000	80	145	900	15	115°	0,29

Moduuleita vastaavat spektrikäyrät, normalisoidut valovirrat sähkövirran funktiona sekä kynnsjännitteen riippuvuus virrasta on esitetty alla olevissa kuvissa 20–22. Spektristä voi havaita, että sinisen alueen 450 nm komponentti on korostunut, joten moduulit perustuvat siniseen lediin, jonka aallonpituutta hajautetaan fosforin avulla. Muita käyriä tutkitaan testilaitteen mitoituksen yhteydessä.



Kuva 20. Ledin spektritiheys eri väriämpötiloilla (Lumileds 2019)

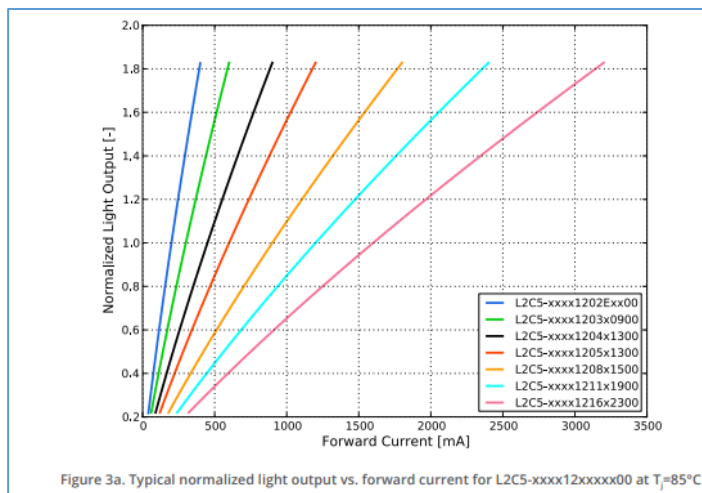


Figure 3a. Typical normalized light output vs. forward current for L2C5-xxxx12xxxx00 at  $T_j=85^\circ\text{C}$ .

Kuva 21. Valovirta sähkövirran funktiona (Lumileds 2019)

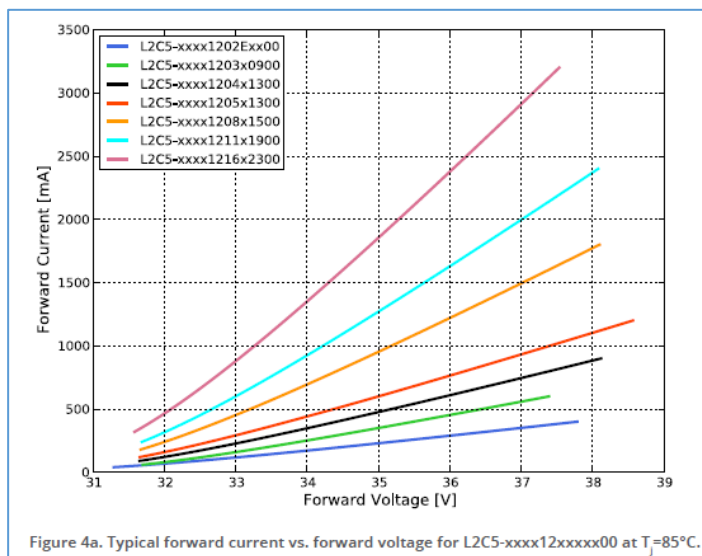


Figure 4a. Typical forward current vs. forward voltage for L2C5-xxxx12xxxx00 at  $T_j=85^\circ\text{C}$ .

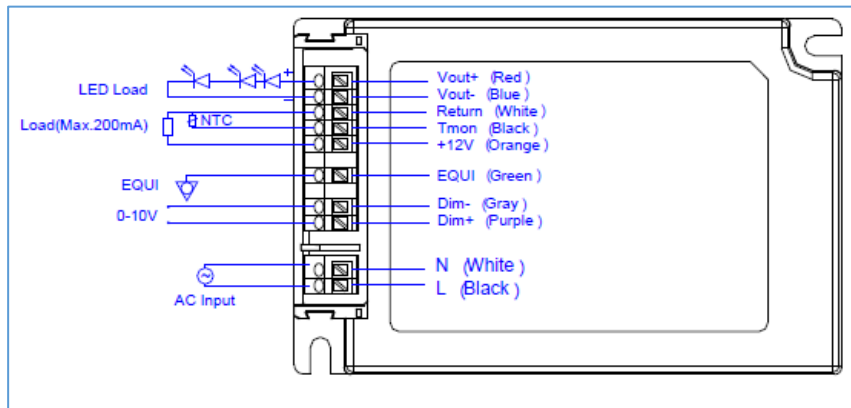
Kuva 22. Ledin kynnysjännitteen riippuvuus virrasta (Lumileds 2019)

### 6.1.2 Linssit

Tyypillisesti COB-moduuleihin kiinnitetään linssi, jolla valaistuskuvio saadaan halutun muotoiseksi, mutta testivalaisimeen ei linssejä asennettu. Ledil Oy valmistaa erilaisia linssejä myös testivalaisimessa käytetyille moduulille.

### 6.1.3 Lediajurit

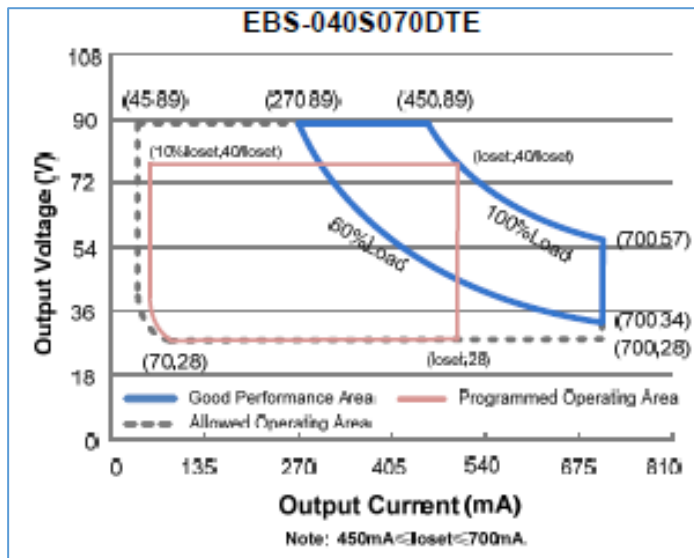
Helpoimmalla säädettävän ajurin ledeille saa, jos käyttää valmista vakiovirta-moduulia. Testivalaisimeen valittiin Inventronicsin ajurit tyyppikoodiltaan EBS-040S070DTE (Inventronics 2020).



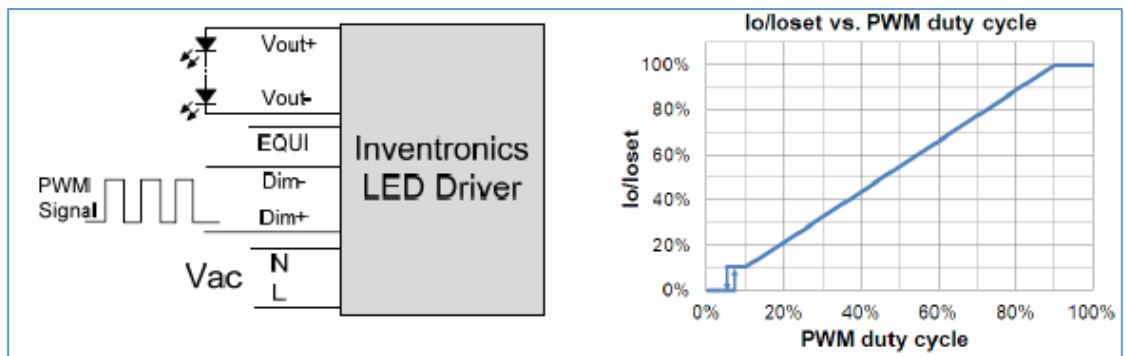
Kuva 23. LED-ajurin kytkentäkaavio (Inventronics 2020)

Ajuri kytketään järjestelmään kuvan 23 mukaisesti. Verkkovirtatulon ja ledilähtöjen lisäksi ajurissa on himmennysmahdollisuus joko 0–10 V säädöllä tai pulssinleveysmodulaatiolla (PWM). Testilaitteessa on käytetty PWM-tuloa, sillä anturin himmennys toimii PWM-muotoisena. Ajurin esiohjelmoitu suurin lähtövirta on 700 mA, mutta se voidaan ohjelmoida pienemmäksi erillisen ohjelmointilaitteen avulla.

Ajureilla on laaja lähtöjännitealue, jolloin niihin voi kytkeä erityyppisiä ledikonfiguraatioita. Alla olevassa kuvassa on esitetty ajurin tehoalueet, joiden pohjalta voidaan valita ajurille sopiva ledikonfiguraatio. Tai jos valonlähteen virta- ja jännite tiedetään, voidaan käyrien perusteella valita oikea ajuri.



Kuva 24 LED-ajurin mitoitus (Inventronics 2020)



Kuva 25 Lediajurin himmennys (Inventronics 2020)

### 6.1.4 Valaisimen parametrien laskenta

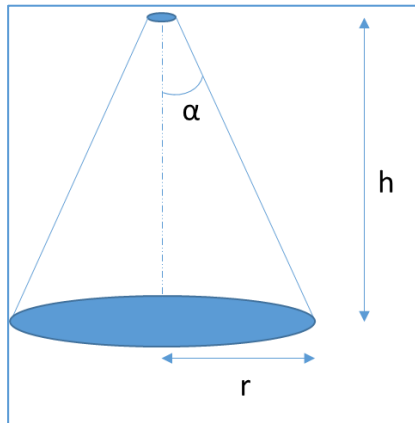
#### Sähköteho

Testilaitteen tapauksessa taulukosta 6 voidaan havaita, että ledimoduuleiden tyypillinen kynnysjännite on 34,8 V valmistajan nimellisvirralla 900 mA, joten tyypillinen teho moduulia kohden on  $P = 900 \text{ mA} \times 34,8 \text{ V} = 31,3 \text{ W}$ .

Testeissä ledimoduuleita ajetaan enintään 620 mA virralla varmuuden vuoksi, ettei laite kuumene liikaa. Kuvasta 22 havaitaan, että 1208-kokoisen moduulin kynnysjännite on 33,8 V 620 mA virralla, jolloin yhden ledimoduulin teho on  $P = 620 \text{ mA} \times 33,8 \text{ V} = 20,9 \text{ W}$ .

### Valaistusvoimakkuus

Kuten kappaleessa 3 esitettiin, valaistusvoimakkuus määritellään valaisimen säteilemänä valovirtana valaistuun pinta-alaan nähden. Testitapauksessa olemme, että valaisimen ledimoduulit ovat niin lähellä toisiaan, että niitä voidaan pitää yhtenä pistemäisenä valonlähteenä, jonka keila on sama kuin ledimoduuleiden keilat.



Kuva 26. Valaistun pinta-alan laskenta

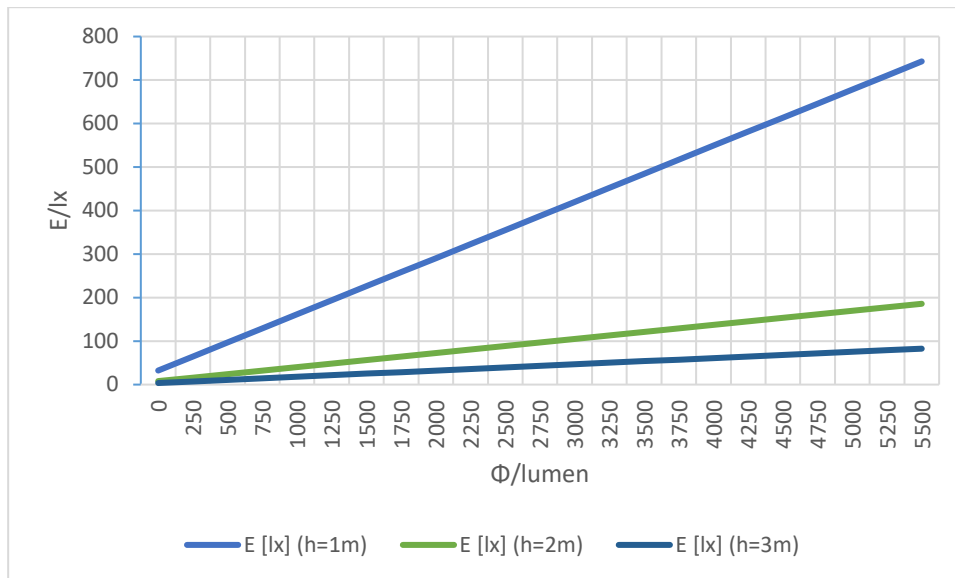
Kuvasta huomataan, että valaistu pinta-ala saadaan laskettua kaavalla  $A = \pi \times r^2$ , jossa  $r = h \times \tan \alpha$ . Kuten kohdassa 2.2.4 todettiin, valaistusvoimakkuushan saadaan seuraavasta kaavasta

$$E [lx] = \frac{\varphi [lm]}{A [m^2]} \quad (2)$$

ja johon pinta-alan yhtälöt sijoitettuna saamme:

$$E [lx] = \frac{\varphi [lm]}{A [m^2]} = \frac{\varphi}{\pi \times (h \times \tan(\frac{\alpha}{2}))^2} \quad (3)$$

Kun sijoitetaan kaavaan pinta-ala sekä taulukosta 6 ledimoduulien valovirrat muistaen, että kuvan  $\alpha$  on puolikas keilasta, saadaan laskettua valaisimen valaistusvoimakkuus. Alla olevassa kuvassa 27 on koottu yhteen valaistusvoimakkuus 1, 2 ja 3 m korkeudella sekä valovirroilla 0–6000 lm. Kuten kaavakin kertoo, valaistusvoimakkuus pienenee etäisyyden neliössä.



Kuva 27. Valaistusvoimakkuus valovirran funktiona

Jotta saamme testivalaisimen valovoimakkuuden selville, pitää ensin laskea valovirrat käytetyllä maksimivirralla 620 mA. Kuvasta 21huomaamme, että 1208-modulilla valovirta on 70 % verrattuna nimellisvirtaan 900 mA. Kun otamme taulukosta 6 valovirrat, saamme seuraavat yhtälöt

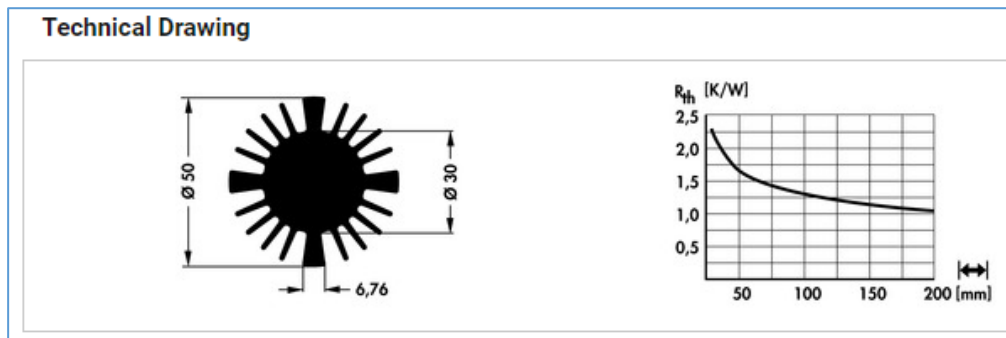
$$\varphi_{2700} = 0,7 \times 3774 \text{ lm} = 2640 \text{ lm} \quad (4)$$

$$\varphi_{5000} = 0,7 \times 4088 \text{ lm} = 2860 \text{ lm} \quad (5)$$

Valovirroissa on hieman eroa eri värilämpötilan moduuleiden välillä, mutta koska lediajureiden virta voidaan asettaa vain askelittain, emme saa tuon tarkempaa yhtäläisyyttä niiden välille. Ajettaessa kumpaakin lediä 620 mA virralla saamme siis valovirraksi yhteensä  $\varphi_{tot} = 2640 + 2860 = 5500 \text{ lm}$ . Kuvasta 27 huomataan, että vastaavat valaistusvoimakkuudet vaihtelevat 100–750 luksin välillä. Käytämme näitä arvoja testeissä.

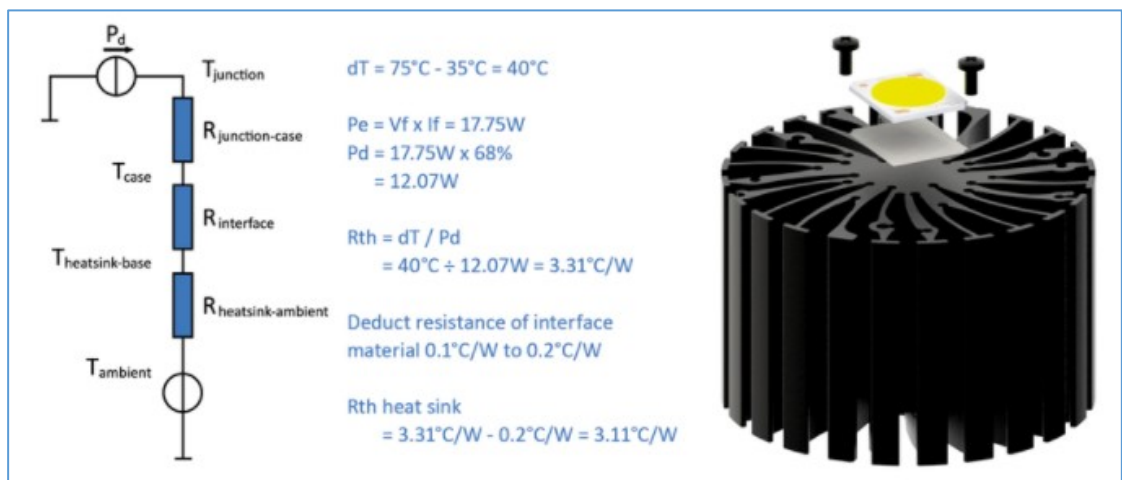
### Lämmön hallinta

On tärkeä huomata, että suuren leditiheyden omaavat ja suurilla virroilla COB-moduulit kuumenevat, joten tarpeellisesta jäähdytyksestä on huolehdittava. Testivalaisimeen ostettiin paikallisesta elektroniikkakaupasta ledimoduuleille tarkoitetut jäähdytys-elementit, joihin moduulit kiinnitettiin lämpöä johtavalla liimalla. Käytetty jäähdytys-elementti on kuvan 28 mukainen, 15 mm paksu malli.



Kuva 28 Jäähdytyslementti (Fischer Elektronik)

Lämpöresistanssin ja siten maksimitehon määrittämisen voi laskea kuvan 29 kaavoilla.



Kuva 29 Jäähdytystarpeen laskenta (Mechatronix 2021)

Ledimoduulin lämpöresistanssi on taulukosta 6 katsoen 0,25 tai 0,29 K/W. Jäähdytysrivan lämpöresistanssi on 15 mm paksuudella kuvan 29 perusteella noin 2,0 K/W. Liiman lämpöresistanssi määritellään lämmön johtavuutena, jonka arvo tässä tapauksessa on  $G = 0,9 \text{ W/(mK)}$ , ja se riippuu liima-alueen pinta-alasta ja paksuudesta kaavan

$$R_b = \frac{\text{paksuus}}{\text{pinta-ala} \times G} = \frac{0,2 \times 10^{-3}}{20 \times 24 \times 10^{-6} \times 0,9} = 0,46 \quad (6)$$

Koko lämpöresistanssi saadaan laskettua siis seuraavasti

$$R_{th} = R_{jc} + R_i + R_{hs, amb} \left[ \frac{\text{K}}{\text{W}} \right] = 0,25 + 0,46 + 2,0 \left[ \frac{\text{K}}{\text{W}} \right] = 2,71 \left[ \frac{\text{K}}{\text{W}} \right] \quad (7)$$

Ledimoduulin datalehdessä huomataan, että maksimilämpötila on  $125^\circ\text{C}$  ja suositeltu maksimilämpötila  $85^\circ\text{C}$ . Valaisinta käytetään huonelämpötilassa, joten lämpöä pitää johtaa pois  $125 - 20 = 105^\circ\text{C}$ .



Kaava, jota käytetään maksimihukkatehon määrittämiseen, on

$$Pd = \frac{\Delta T}{R_{th}} \quad (8)$$

eli tässä tapauksessa saadaan:

$$Pd = \frac{125-20}{2,71} W = 38,7 W \quad (9)$$

Testivirralla ledimoduuli kuluttaa tehoa 20,9 W, joten testivalaisimen jäähdytyslevy on riittävä. Lasketaan vielä käytännön testejä varten, miten paljon ledimoduuli lämpiää lasketun lämpöresistanssin ja lediajurin lähtövirran 620 mA myötä. Saadaan

$$\Delta T = Pd \times R_{th} = 20,9 W * 2,71 \frac{K}{W} = 56,6 K \quad (10)$$

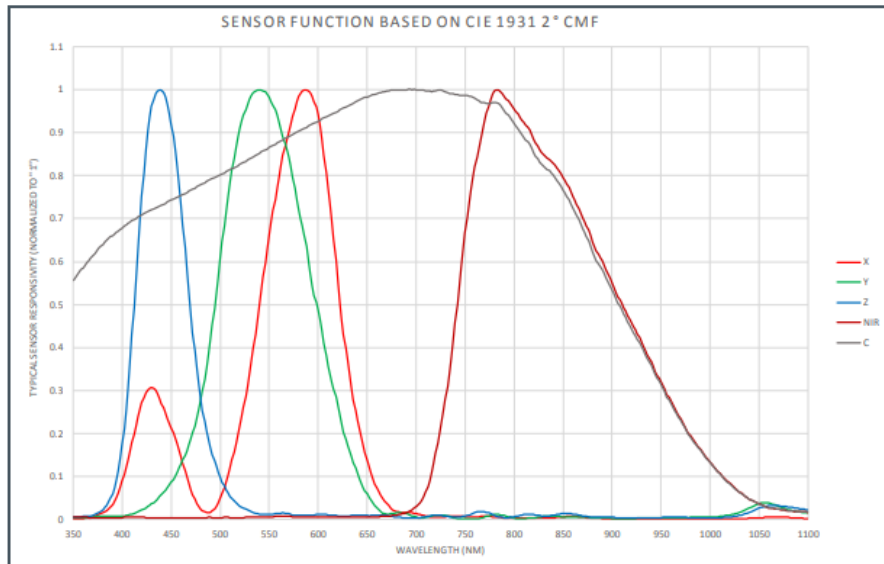
Huonelämpötilassa siis ledimoduulin lämpötilaksi saadaan  $20 + 56,6 \approx 76 \text{ }^\circ\text{C}$ .

### Ajurin mitoitus

Kuvan 25 käyristä voidaan havaita, että kyseisen ajurin minimilähtö on 28 V ja suositellun lähtöjännitealueen alaraja on 34 V. Käytetyt ledimoduulit ovat siis optimaalisen käyttöalueen alapuolella, mutta tässä tapauksessa kelvolliset käyttää, sillä testien tarkoituksena on tutkia anturoinnin vaikutusta. Seuraava pienempitehoinen lediajuri olisi ollut teholtaan 20 W, joka taas jää ledimoduulien tehontarpeen alle.

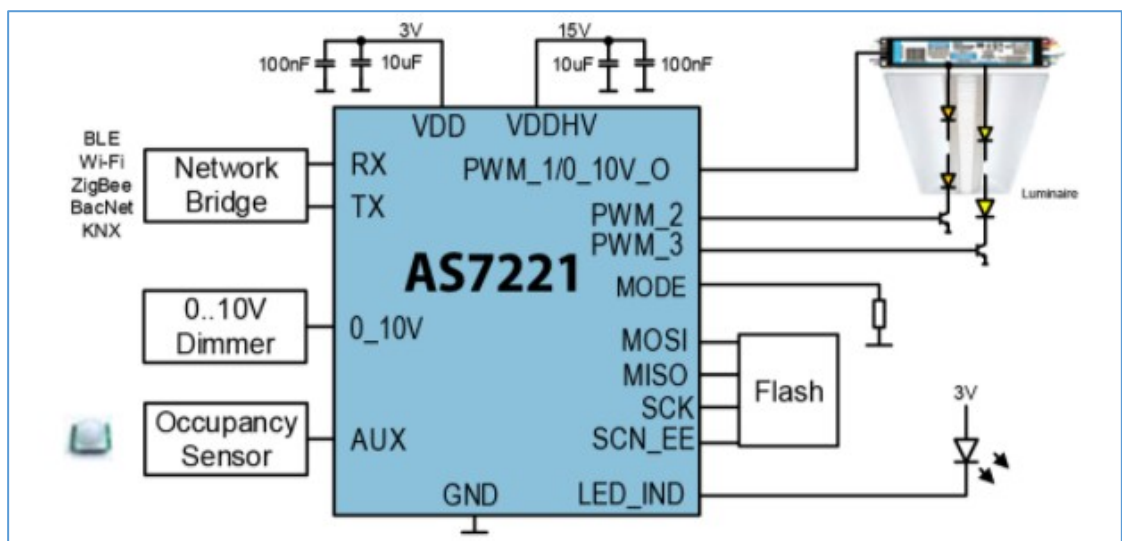
#### **6.1.5 Valaistusanturi**

Testilaitteessa käytettiin puolijohdevalmistaja ams AG:n suunnittelemaa sekä valmistamaa älykästä valaistuksen ohjainpiiriä ”CCT Tuning Smart Lighting Manageria” AS7221. Integroidussa komponentissa on XYZ-valoanturi, jonka spektriherkkyyssäyrät ovat kuvassa 30. XYZ-komponenttien ohella anturi tunnistaa omilla kanavillaan myös infrapunasäteilyä sekä 300–1100 nm koko kaistan päästävää ns. ”kirkas” kanava ilman suodatuksia. Näiden tietojen pohjalta anturiin integroitu mikro-ohjain pystyy laskemaan valon värilämpötilan. Valovirran laskenta olisi myös mahdollinen, mutta siihen käytetään ulkoista taustavaloanturia. (ams 2020.)



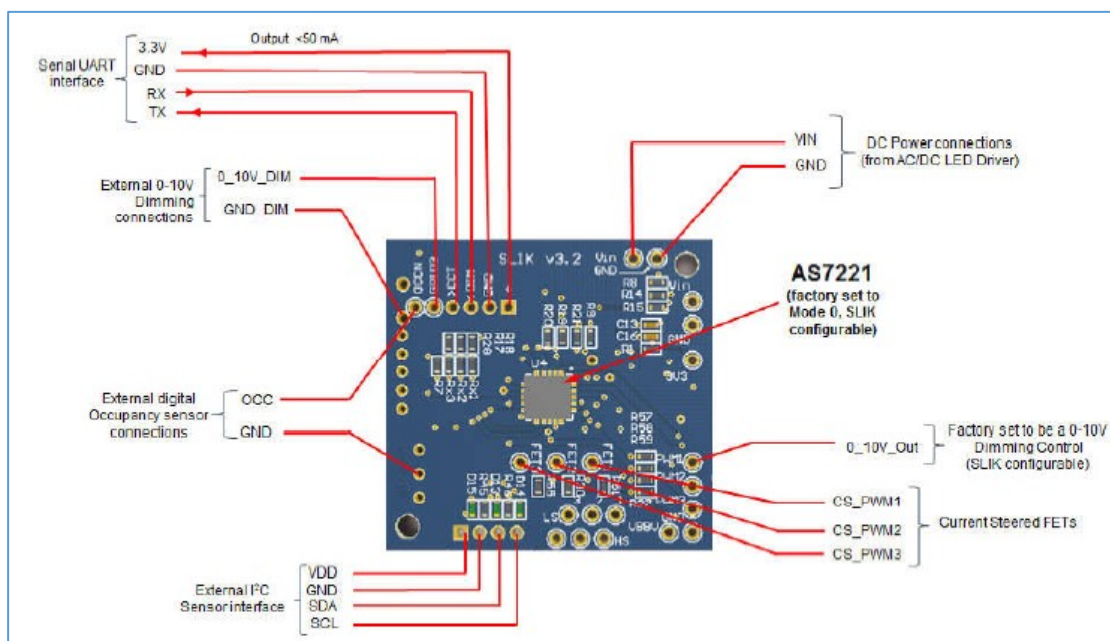
Kuva 30. AS7221 spektriherkkydet (ams AG)

Ko. tietojen perusteella piiri voi kuvan 31 mukaisesti ohjata kahden eri värilämpötilan ledeillä varustetun valaisimen balanssia PWM-signaalien avulla anturin tulon avulla lasketun värilämpötilan avulla. Värilämpötila sekä valaistusvoimakkuus voidaan konfiguroida etukäteen tai ne voidaan säätää dynaamisesti anturin väyläliitännän avulla. Piiriin on mahdollista liittää myös muita antureita I2C-väylän kautta. Samaten piirin sisäisen kellon avulla värilämpötilan ja valovirran säädöille voidaan asettaa vuorokausirythmi. (ams 2020.) Komponenttia ohjataan vuonna 1981 kehitettyyn tekstipohjaiseen Hayes AT-modeemikommentoihin pohjautuvilla komennoilla.



Kuva 31. AS7221 järjestelmäkaavio

Testivalaisimeen ei alettu rakentaa elektroniikkaa, vaan hyödynnettiin kyseisen komponentin evaluointikorttia, jonka kaavio on kuvassa 32.



Kuva 32. AS7221 evaluointikortin kaavio

Kortissa on valmis tehonsyöttö, liitännät valaisinten ohjaukseen, ulkoisille antureille sekä sarjaväylä verkon rakentamista varten. Kortin toimintaa voidaan ohjata USB-väylän kautta tietokoneohjelmiston avulla. Valaisimen mittaukset suoritetaan kyseisen ohjelmiston avulla. Virtamittaukset tehdään yleismittarilla.

### 6.1.6 Muut anturit

AS7221:n evaluointisysteemiin on valmiiksi liitetty valaistusvoimakkuusanturi sekä kosteus- ja lämpötila-anturit. Niiden lukemiin ei testeissä keskitytty, sillä tavoite on perehtyä valaistuksen mittauksiin.

## 6.2 Valaisintestit

Valaisimella on tarkoitus suorittaa erilaisia testejä, joista voi päätellä, miten integroitu puolijohdeanturi toimii valaistuksen sovelluksessa valaisimeen integroituna. Testisuunnitelma on esitetty taulukossa 7.

Taulukko 7. Valaisintestit

Testi	Mittaus	Kuvaus
1	Kalibrointi	Mitataan, millaiset tulokset anturi näyttää kummankin ledimodulin parametreille suhteessa datalehteen ja aseteltuihin arvoihin.
1.1.	Kynnysjännitteet ja -virrat	Mitataan eri valaistusvoimakkuuksilla ja CCT:llä.
1.2.	Valaistusvoimakkuudet	Mitataan, millaiset tulokset erillinen mittalaite näyttää erilaisilla valaistusvoimakkuuksilla. Verrataan anturin lukemiin.
1.3.	Väriämpötila	Vastaako laskettu väriämpötila anturin näkemää?
2	Valaistusvoimakkuuden dynaaminen muutos eli päivänvalon hyödyntäminen	Muutetaan taustavalaistuksen määrää, ja katsotaan, miten valaisin säätää virtoja, jotta aseteltu valaistusvoimakkuus säilyy.
3	Väriämpötilan dynaaminen muutos	Muutetaan valaistun kohteen väritystä. Mitä valaisin tekee?

### 6.3 Mittaustulokset

#### 6.3.1 Testitulokset - kalibrointi

Taulukko 8 Valaisimen kalibrointimittaukset

Kirkkaus	CCT	CCT	LED 5000K		Ur	LED 2700K		TSL4531	MS6610	MS6610
	laskettu	mitattu	Uf [V]	If [A]		Uf [V]	If [A]	E [lx]	yllä	alla
	[K]	[K]								
100 %	2700	2787				34,3	0,62	294	233	953
	3275	3003	32,0	0,16	0,18	33,5	0,52	343	263	1043
	3850	3421	33,1	0,34	0,38	32,6	0,34	368	269	1054
	4425	4080	34,0	0,51	0,56	31,6	0,15	380	269	1009
	5000	4971	34,6	0,61	0,67			357	242	898
75 %	2700	2706			0,00	33,7	0,51	250	198	786
	3275	3032	31,7	0,12	0,13	32,9	0,37	257	197	787
	3850	3476	32,5	0,25	0,28	32,1	0,25	275	204	790
	4425	4029	33,2	0,37	0,41	31,3	0,11	280	200	764
	5000	4975	33,8	0,51	0,56			301	205	760
50 %	2700	2662			0,00	32,6	0,34	164	132	541
	3275	2983	31,3	0,08	0,09	32,2	0,25	175	135	520
	3850	3585	31,9	0,16	0,18	31,8	0,17	179	134	533
	4425	4078	32,5	0,25	0,28	30,9	0,08	191	136	547
	5000	4948	33,0	0,34	0,38			200	137	516
25 %	2700	2610			0,00	31,6	0,15	82	67	252
	3275	2659	31,0	0,06	0,07	31,5	0,12	95	74	198
	3850	3233	31,3	0,08	0,09	30,9	0,08	86	67	246
	4425	3945	31,6	0,12	0,13	31,7	0,06	99	73	297
	5000	5075	31,8	0,16	0,17			98	69	272

Taulukossa 8 on koosteena mittaustulokset väriämpötilalle, kynnysjännitteille ja -virroille, kun ledien valovirtoja ja keskinäistä balanssia on säädetty. Huomioita tuloksista on esitetty alla.

**Väriämpötilan** laskettu arvo on suoritettu lineaarisesti interpoloimalla, kun tiedetään kummankin ledin valovirta prosentteina. Menetelmä ei selvästikään ole tarkka, sillä ledien spektrit eivät ole tasaiset, joten väriämpötila ei muutu lineaarisesti. Tunnetuilla väriämpötiloilla 2700 K ja 5000 K anturi on verraten tarkka, sillä poikkeamat ovat alle 100 K suuruisia.

Ledien **kynnysvirrat** on mitattu yleismittarilla 1,1 ohmin vastuksen yli. Ne vastaavat valovirran säätöä vastaavia laskennallisia arvoja riittäväällä tarkkuudella. Ne ovat myös linjassa ledien parametrien kanssa. Ledien **kynnysjännitteet** ovat hieman korkeammat kuin mitä datalehdessä mainittiin, mutta moduuleissa on variaatiota, ja se selittää oletettuja suuremmat lukemat.

**Valaistusvoimakkuuden** mittaaminen on mielenkiintoinen prosessi. Kun ulkoinen valonlähde sammutettiin, valaistusvoimakkuuden arvot mitattiin AS7221-anturiin kytketyllä ulkoisella taustavaloanturilla. Rinnalla käytettiin erillistä kaupallista valaistusmittaria referenssinä. Vaihtelevat lukemat osoittavat, kuinka tarkkaa anturin asemointi on valittava, kun tiedetään, että valaistusvoimakkuus muuttuu etäisyyden neliössä. Valaistusvoimakkuus mitattiin valaisimesta lattiaa kohden, jolloin lukemat ovat varsinaisesti lattiasta heijastuvaa valoa, ja riippuvat paitsi valovirrasta, myös valaistun pinnan heijastussuhteesta. Viimeisessä sarakkeessa on valaistusmittarin lukemat valaisimen alle lattialle sijoitettuna, jolloin saamme valaistusstandardeja vastaavat valaistusvoimakkuuden arvot.

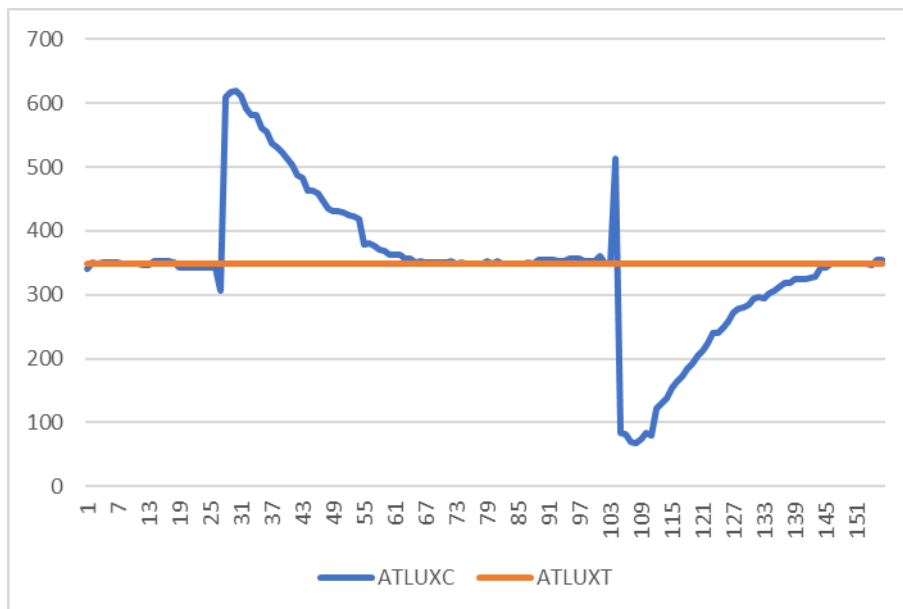
Kokonaisuutena kalibrointimittausten tulokset näyttävät täsmäävän spesifioituihin arvoihin riittäväällä tarkkuudella. Valaistusvoimakkuuden tuloksia käydään tarkemmin läpi pohdinnassa.

### 6.3.2 Päivänvalon hyödyntäminen

AS7221:n algoritmi suorittaa valaisimen valovirran säädön ulkoisen anturin mittaaman taustavalon määrän avulla, jotta valaistusvoimakkuus säilyisi vakiona. Tehtiin siis testi, jossa virran ollessa kytkettynä valaisimeen, tuodaan ulkoinen valonlähde valaisemaan kohdealuetta, jolloin taustavaloanturin pitäisi

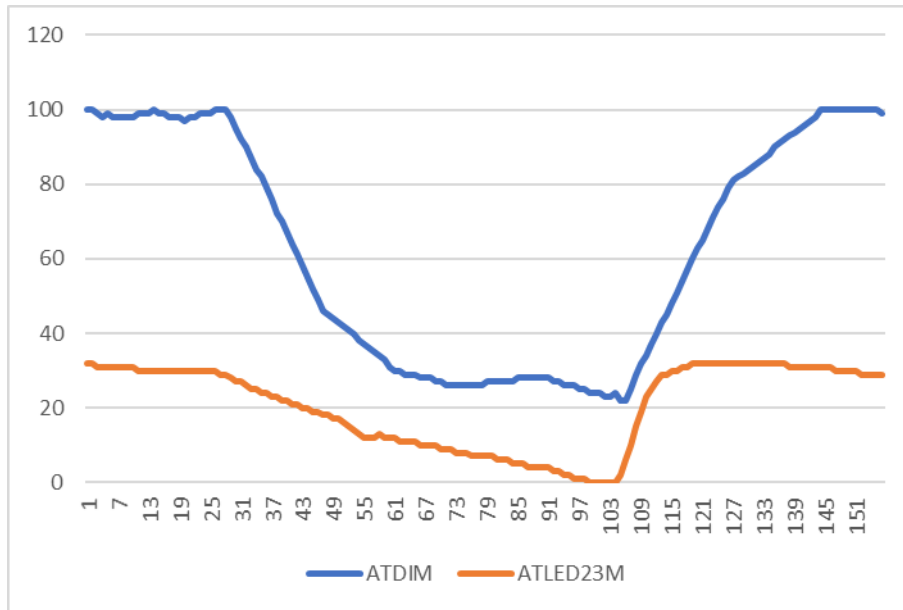
muutos tunnistaa ja säätää valaisimen valovirtaa vastaavasti. Ulkoisena valonlähteenä käytettiin kuvausvalaisinta, jossa oli Airam Superlux -ledipolttimo, jonka valovirta on 2452 lm ja CCT 4000 K.

On syytä huomata, että algoritmi ei voi muuttua kovin nopeasti oskillaation ja sen myötä syntyvän vilkkumisen välttämiseksi. Alla olevassa kuvassa 33 on käyrä, joka kertoo, miten valaisin säätää valaistusvoimakkuutta niin, että se pysyisi mahdollisimman vakaana. Oranssi viiva edustaa säädettyä valaistusvoimakkuutta ja sininen sitä, miten valaistusvoimakkuus muuttuu, kun ulkoisella valonlähteellä valaistaan testivalaisimen kohtaa lattiassa. Näemme, että luksivoimakkuus luonnollisesti muuttuu ensin äkkiä ja sitten hitaasti valovirran säädön myötä tasoittuu asetetulle tasolle.



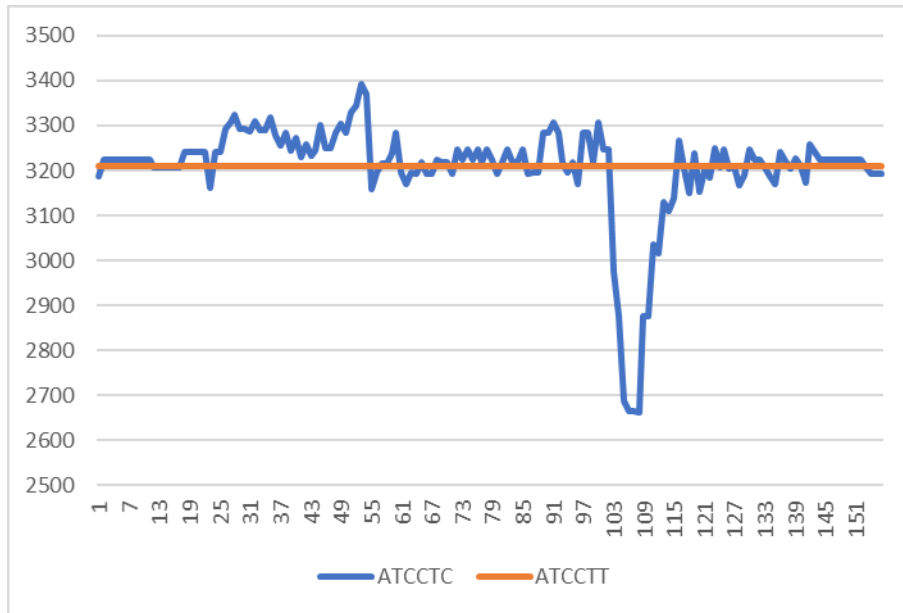
Kuva 33. Valaistusvoimakkuus ulkoisen valonlähteen aikana

Kuvassa 33 näkyy sinisellä valaisimen valovirran säätö halutun valaistusvoimakkuuden säilyttämiseksi, eli valovirran 100 % -tasosta himmennetään noin 20 % tasolle ja takaisin.



Kuva 34. Valovirran ja ledimoduulien balanssin säätö

Taustavalon muutos vaikuttaa myös värilämpötilan säätöön. Ennen ulkoisen valonlähteen syttymistä, CCT oli aseteltu 3200 K tasolle. Kuvassa 35 näkyy, miten, kun ulkoinen 4000 K valonlähde sytytettiin, CCT nousi hetkeksi korkeammalle, mutta algoritmi säätäessä palasi taas takaisin lähelle tavoitetasoa. Värähtelyn syytä ei saa selville, mutta koska kyse on sensorin raakadatasta sillä ei ole merkitystä, koska CCT:n säätö tapahtuu kuitenkin hitaasti, kuten kuvan 34 oranssista käyrästä voidaan havaita. Käyrä kertoo 2700 K ja 5000 K ledimoduulien keskinäisestä balanssista, eli siitä näkee, miten käyrän pohjalla valaisin sammuttaa 5000 K ja kirkastaa 2700 K moduulin, jotta CCT säilyisi halutussa tavoitteessa.



Kuva 35. Valaisimen CCT:n muutos

Kun ulkoinen valonlähde sammutettiin, käyrässä näkyy piikki 2650 K tasolle. Se lienee anturin sisäinen häiriö, joka ei siis vaikuta valon laatuun, minkä huomaa kuvan 34 CCT:n säätökäyrästä, jossa ei vastaavaa poikkeamaa esiinny.

### 6.3.3 Dynaaminen väriämpötilan säätö

Dynaamista väriämpötilan säätöä testattiin valaisimella niin, että sen valaistusvoimakkuus asetettiin 50 % maksimista, jolloin valkoista taustaa vasten valaistusvoimakkuus näytti 150 lx tasoa, ja väriämpötila puoliväliin 3600 K tasolle, jotta valaisimella olisi kapasiteettia säätää sekä väriämpötilaa että valovirtaa. Valaisimen alle laitettiin eri värisiä materiaaleja ja lokitiedostoon rekisteröitiin valaistusvoimakkuus, väriämpötila, valovirta sekä ledien välinen balanssi. Kuvassa 36 näkyy tulos yhtenä mittaussekvenssinä. Kunkin värin testaus on erotettu kyseisen värin pystyviivoin.

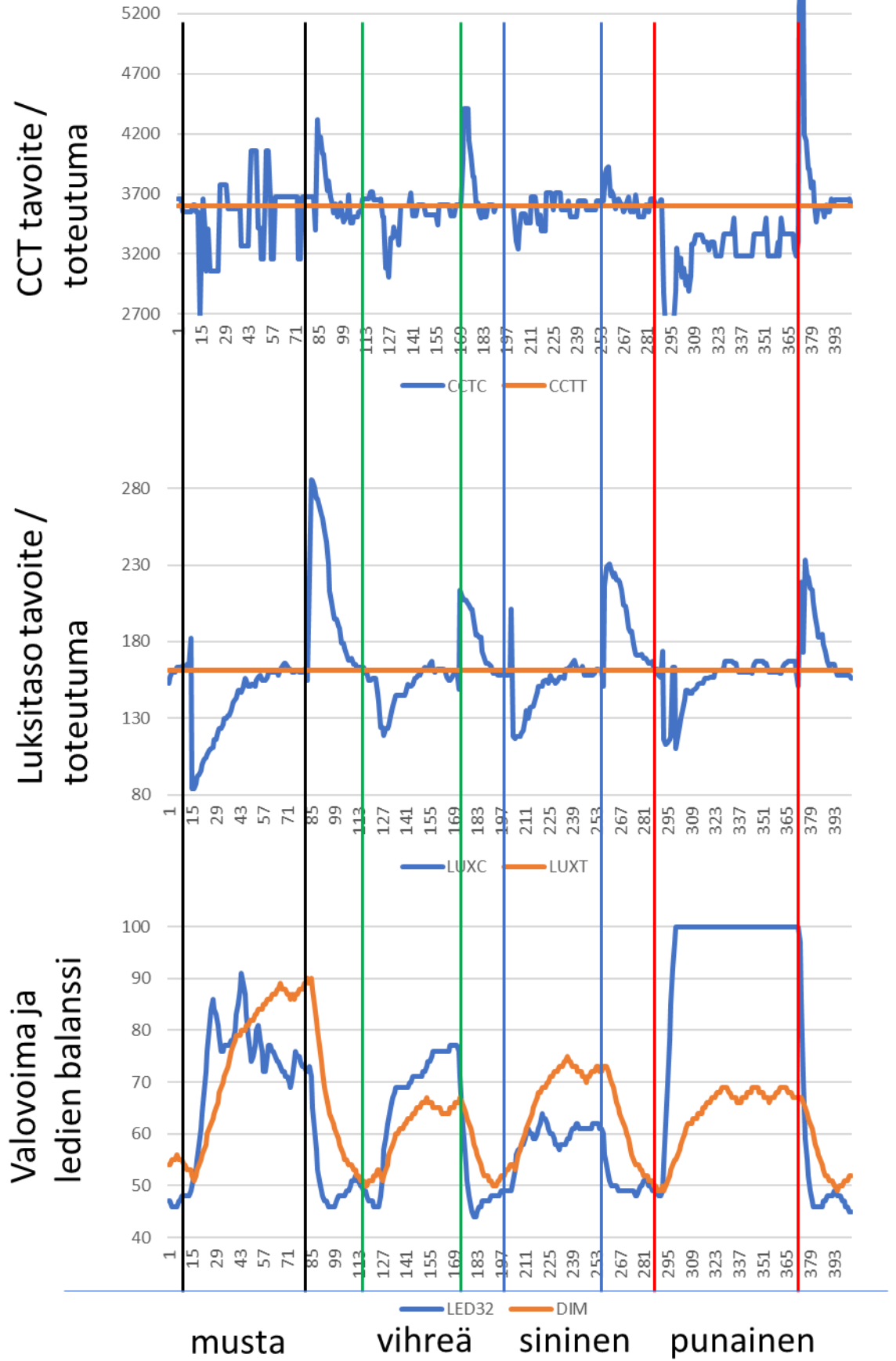
Ensin valaisimen alle laitettiin musta kangas. Mustalla ei väriämpötilan muutosta pitäisi erottua, mutta valaistusvoimakkuuden pitäisi laskea. Kuvasta näkyy, miten näin käy, joten valaisin nostaa ensin sekä 5000 K ledin että kokonaisvalovirtaa, mutta sillä ei ole juurikaan merkitystä väriämpötilan muutoksessa huonon heijastumisen tähden, ja valaisin muuttaa balanssia tasaisemmaksi sekä nostaa kokonaisvalovirtaa.



Valaistessaan vihreän väristä kangasta, vihreä väri asettuu korkeammalle värilämpötilan alueelle kuin asetettu 3600 K, kuten kuvasta 9 ilmenee, joten valaisimen tulisi nostaa 2700 K valovirtaa suhteessa 5000 K:een. Valaistusvoimakkuus ei putoa samalla tavoin kuten mustalla, mutta värilämpötila hieman yllättävästi laskee, joten valaisin nostaa valovirtaa ja painottaa sitä 5000 K suuntaan. Kompensointien avulla värilämpötila ja valaistusvoimakkuus saadaan pidettyä asetetuissa arvoissa. Käytöstä voi selittää testissä käytetty materiaali, jossa voi olla enemmän keltaista kuin silmälle näyttää.

Sininen väri puolestaan pudottaa mitattua valaistusvoimakkuutta kuten vihreäkin, mutta värilämpötilan muutos on pieni. Valaisin kompensoikin muutosta kokonaisvalovirtaa nostamalla kuin ledien keskinäistä tasapainoa muuttamalla, saavuttaen asetellut arvot.

Punaisen värin kohdalla muutos on selkein. Sekä värilämpötilan että valaistusvoimakkuuden putoaminen on rajua, ja valaisin kompensoi sitä sammuttamalla 2700 K, punaisen sävyjä enemmän sisältävän ledin, pyrkien siten säätämään värilämpötilaa kohti korkeamman värilämpötilan sinisen sävyä. 5000 K ledi ei riitä kompensoimaan muutosta, joten värilämpötila jää noin 200 K alle asetetun 3600 K arvon.



Kuva 36. Dynaaminen värilämpötilan ja valovirran säätö

## 7 TULOSTEN ANALYYSI JA POHDINTA

Mittaustuloksia tarkemmin tutkiessa on levollista huomata, että mitatut tulokset ovat kohtuullisessa mitassa sen kaltaisia kuin mitä teoriaosuudessa on pohdiskeltu. Kalibrointidata oli linjassa spesifikaatioiden kanssa.

Valaistusvoimakkuuden mittaaminen herätti oikeastaan suurimman kummastuksen. Miten valaisimeen kiinnitetty taustavaloanturi voi antaa tuloksen, joka on sekä tarkka että luotettava, sillä sehän näkee vain sen, mitä valaistusta kohteesta takaisin heijastuu. Kappaleessa 3.2.4 todettiin, että esimerkiksi toimistopöydällä pitäisi olla 500 lx valaistusvoimakkuus, mutta pöydällä voi olla ties mitä tavaraa, jonka heijastussuhde vaihtelee. Taulukossa 8 nähdään, että valaisimen ollessa metrin korkeudella lattialta, lattiatasossa voi olla 953 lx valaistusvoimakkuus, ja vaaleasta klinkkeristä, josta suuri osa valosta heijastuu takaisin, valaisimen kyljessä sijaitseva valaistusmittari näyttää vain 233 lx lukemaa. Mielekäs ratkaisu haasteeseen löytyy kalibroinnista, eli valaistusvoimakkuus pitäisi jokaisessa tärkeässä pisteessä mitata, säätää valovirrat niin, että haluttu taso saavutetaan, ja samalla tallentaa valaisimessa olevan taustavaloanturin lukema, jotta tiedetään, mikä lukeman pitää olla. Tämä ei kuulosta kovin dynaamiselta ratkaisulta.

Dynaaminen värilämpötilan säätö sikäli toimi, että valaisin tunnisti muutokset sekä valaistusvoimakkuudessa että värilämpötilassa ja alkoi heti tehdä korjauksia sekä kokonaisvalovirtaan että ledien keskinäiseen balanssiin. Jossain tapauksissa säädön tulos oli hieman poikkeava odotuksista, mikä saattoi johtua erilaisista materiaaleista.

Tutkimuksen tavoitteeksi asetettiin kysymykset:

- voiko valaisinkohtaisella valovirran säädöllä säästää kustannuksia samalla kun mukavuus säilytetään?
- voiko dynaamisella värilämpötilan säädöllä vaikuttaa valaistukseen tilan värien pohjalta?

Vastaus ensimmäiseen kysymykseen on, että teknisesti valaistusvoimakkuuden säätö on täysin mahdollista nykyisellä anturiteknologialla, mutta oleellisempi kysymys on se, miten tulokset tulkitaan ja miten käytännön järjestelmä saadaan kalibroituja riittävällä tarkkuudella vastaamaan lukemia. On ehkä helpompaa laittaa tilaan pari taustavaloanturia ja ohjata valaisimia ryhmissä, kuten nykyisin on jo tapana tehdä, ja jättää detaljitaisemman valovirran säädön erikoisvalaistukseen, jossa kohteen tasainen valaisu on erityisen tärkeää ja ylimääräinen kalibroinnin kustannus voidaan kiviutta ympäri valaistuksen kustannuksiin. Se, että asiantuntija kiertää tilaa valaistusmittarin kanssa jokaista valaisinta säätäen, on varmasti kalliimpaa kuin 1 € arvoisen komponentin mukanaan tuoma lisä valaisimen materiaalikustannuksiin.

Dynaamisen värilämpötilan suhteen tilanne on varsin samanlainen. Nykyiset järjestelmät kykenevät jo nyt noudattamaan kellonaikoihin sidottua sirkadiaanista rytmiä, jolla pyritään vaikuttamaan ihmisten vuorokausirytmiiin. Dynaamiselle säädölle voisi olla tilausta sisustussuunnittelijan työkaluna. Anturointi selvästi osoittaa, että sillä voidaan tunnistaa tilan sisustuselementtien, kuten mattojen tai seinien, värit ja käyttää sitä valaistuksen valovirran ja värilämpötilan pitämiseen vakaana. Sellaiselle voisi olla kaupallistakin kiinnostusta. Testivalaisimen säätömahdollisuus on kuitenkin rajallinen, jos kyseessä on vain kahden eri värilämpötilan omaavat, epäideaaliset valonlähteet. Mutta kehitys kehittyy, "tasaspektrisiä" ja tasaisesti himmennettäviä ledejä on jo saatavilla, ja sellaisten kanssa laadukkaampi säätöprosessi voisi olla mahdollinen.

### **Mitä tästä olen sitten oppinut?**

Aloin suunnitella työn aihetta vuonna 2016 ollessani työssä sensorivalmistaja ams AG:n palveluksessa. Aikaa on rientänyt idean synnystä tähän päivään, ja on ollut mielenkiintoista seurata, miten anturointi on tullut markkinoille. 2016 keskustellessani AS7221-ohjaimesta asiakkaiden, mm. Helvarin, kanssa, tuli jokseenkin selväksi, ettei valaisimeen kannata lisätä antureita, sillä kilpaillulla alalla hintaa ei voi kasvattaa. Järjestelmissä on yleensä käytetty muutamaa

PIR-anturia sekä taustavalon mittaria, ja niiden lukemien pohjalta valaistusta säädetään keskitetysti jonkin teollisuusväylän avulla.

Näin neljä vuotta myöhemmin aloin miettiä, ajoiko aika ohi valaisimeen liitettävän värilämpötilaa ja taustavaloa mittaavan anturin uutuusarvolle, sillä valmistaja toisensa jälkeen on julkaissut älykkäät ohjausjärjestelmänsä. Samoin ledivalmistajat ovat tuoneet markkinoille ”tunable white” -tuotteensa, joissa on kahden eri värilämpötilan ledit samassa kotelossa, mutta muutama vuosi siten valaisinvalmistajat eivät pitäneet mielekkäänä laittaa valaisimiinsa eri värilämpötilan ledejä kustannussyistä. Human centric -lighting, eli sirkadiaaniseen rytmiiin perustuvaan valaistuksen sävyn säätöön törmää tämän tästä. Tilanetta kartoittaessani en kuitenkaan löytänyt sellaista järjestelmää, jossa olisi toteutettu anturein ohjattu värilämpötilan dynaaminen säätö.

Työn edetessä huomasin, että on turha keskittyä vain anturiin, sillä sen toimintaan vaikuttaa niin moni asia, kuten valon havainnointi sekä käytännön ledien ominaisuudet ja ajurit, joten oli syytä perehtyä tarkemmin myös kyseisiin asioihin. Muinoin eräs komponenttiosastaja Pohjanmaalta sanoi, että: ”reles on reles, ei sen valmistajalla ole väliä.” Elin itse pitkään siinä uskossa, että vastaava viivsaus päätisi myös ledeihin. Vuonna 2018 aloittamani työ komponenttijakelijan palveluksessa teknisenä myyjänä teollisuutemme asiakkaille avasi käsitystä siitä, miten kompleksinen prosessi ledien valmistus ja valinta on. Hyvänä esimerkkinä toimikoon se, että eräs asiakas etsi asiakkaalleen leikkaussalivalaisimeen lediä, jonka CRI>90, jotta se toistaisi kaikki värit ”oikein”. Sitten kävi ilmi, että käytetty CRI:n luokitustapa ei sisältänyt indeksiä värille Ra9, kirkas punainen, mikä on jokseenkin puutteellinen ominaisuus leikkaussalissa. Eräs ledivalmistaja oli testannut omat tuotteensa myös ko. värillä, joten asiakas sai parin virheen jälkeen haluamansa. Ledien myyminen on mutkikas prosessi, sillä asiakas yleensä määrittelee kaikki tai osan parametreista kynnysjännite, valovirta tai värilämpötila, ja niitä arvoja ei yleensä ole tuotteen tyyppikoodiin kirjoitettu, vaan se tieto on ainoastaan tuotantoerän etiketissä. Varastossa olevasta materiaalista ei siis juurikaan kysymättä tiedä.

Jotta taas valaistusanturin toimintaa osaa ymmärtää, pitää ymmärtää valon eri suureet, ihmisen kyky havainnoida valoa, joten siitä tuli luonnollinen osa tätä työtä.

Testivalaisimen rakensin yrityksen, erehdyksen sekä käsillä ja varastossa olevan materiaalin avulla. Ensimmäiset lediajurit olivat vääränlaisia, sillä niistä puuttui PWM-säätömahdollisuus, joten tarvittiin eri malliset. Kun ledit oli saatu syttymään, niistä hohtava kuumuus, vaikkakin niitä ajettiin varmuuden vuoksi pienillä virroilla, ajoi etsimään sopivia jäähdytysrimoja sekä liimaa, jolla kuumuuden saisi johdettua ledistä toisaalle sekä päätymään lämpöresistanssien laskentaan. Olisiko sen voinut rajata marginaalissa esitettäväksi, on oma kysymyksensä, mutta ahaa-elämysten reunustamalla polulla tuntui tarpeelliselta kirjoittaa oivallukset ylös.

Tämä on ollut mielenkiintoinen polku, joka kiemurrellen johti oikeastaan hieman eri paikkaan kuin mihin lähtiessäni luulin matkani johtavan. Mutta odottamattomuudessa piilee rikkaus!

### **Pohtimisen aihetta.**

AS7221-ohjain nykyisellään on käyttäjälle musta laatikko, johon syötetään sähköä sekä muutamia komentoja, joilla saadaan ohjattua kahta eri valonlähdetä. Valmistajan olisi kannattanut avata kokonaisuutta hieman enemmän, ja antaa asiakkaille mahdollisuus lisätä omia ominaisuuksia ohjaimelle. Nykyisellään asiakkaat joka tapauksessa laittavat älyvalaisimeen mikro-ohjaimen, ja AS7221 on vain kustannuslisä. Yhdistämällä toiminnot päästäisiin pienempiin valaisinkustannuksiin, mutta se toki rajoittaisi sitä volyyymiä, jota markkinoilta haettiin. Toisekseen AS7221:ssa on koko- ja kustannussyistä käytetty mahdollisimman yksinkertaista 8051-pohjaista mikro-ohjainta, joka juuri ja juuri jak-saa algoritmien vaatiman laskennan suorittaa. Kolmanneksi kehitetyt algoritmit ovat valmistajan liiketoiminnan ydinaluetta, ja niiden avaaminen laajemmin johtaisi nopeaan kopiointiin.

Kehitysvaiheessa olisin itse ollut kovin kiinnostunut lukemaan AS7221:n kaikkien antureiden (XYZ) lukemia, jotta olisi voinut myös mitata, minkä sävyisiä komponentteja valo sisältää, ja sen perusteella paremmin ymmärtää, miksi säätö toimi niin kuin toimi. Siihen on toki olemassa eri anturi myös samalta valmistajalta.

## LÄHTEET

Ahponen, V., Kasurinen E., Timonen, T. 1996. Valaistuksen laskenta, mittaukset ja huolto. Sähköinfo Oy.

ams AG. 2020. AS7221 CCT Tuning Smart Lighting Manager. Pdf-dokumentti. Saatavissa: [https://ams.com/documents/20143/36005/AS7221\\_DS000479\\_4-00.pdf](https://ams.com/documents/20143/36005/AS7221_DS000479_4-00.pdf) [Viitattu 30.4.2021]

California Lighting Technology Center (CLTC). 2018. Daylight harvesting for commercial buildings. Pdf-dokumentti. Saatavissa: [https://cltc.ucdavis.edu/sites/default/files/files/publication/Daylighting\\_181008\\_Web.pdf](https://cltc.ucdavis.edu/sites/default/files/files/publication/Daylighting_181008_Web.pdf) [Viitattu 30.4.2021]

Davidson, M. 1998-2019. Sources of Visible Light. The Florida State University. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://micro.magnet.fsu.edu/primer/lightandcolor/lightsourcesintro.html> [viitattu 6.10.2019].

Digma avoin yhteisöllinen oppimisympäristö. s.a. Näkeminen. WWW-dokumentti

Saatavissa: <https://moodle.amk.fi/mod/book/view.php?id=4463&chapterid=303>

[Viitattu 6.5.2021]

Fagerhult. 2020. Organic response. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.fagerhult.com/fi/valonohjaus/organic-response/toimintaperiaate/> [viitattu 21.4.2021]

Fischer Elektronik. s.a. Data sheet Product SK 577. WWW-dokumentti.

Saatavissa:

[https://www.fischerelektronik.de/web\\_fischer/en\\_GB/PR/SK577/\\_datasheet.xhtml?branch=heatsinks](https://www.fischerelektronik.de/web_fischer/en_GB/PR/SK577/_datasheet.xhtml?branch=heatsinks) [viitattu 5.4.2021]

Gregersen, E. 2014. Encyclopædia Britannica. WWW-dokumentti. Saatavissa:

<https://www.britannica.com/biography/Shuji-Nakamura> [viitattu 10.2.2021]

Hamamatsu. 2014. Opto-semiconductor 2014/Chapter 02\_Si photodiodes.

Pdf-dokumentti. Saatavissa:

[https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e02\\_handbook\\_si\\_photodiode.pdf](https://www.hamamatsu.com/resources/pdf/ssd/e02_handbook_si_photodiode.pdf) [viitattu 15.4.2021]

IDEX Optics and Photonics. 2018. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <https://web.archive.org/web/20181116013134/https://www.cvilaseroptics.com/file/general/filters.pdf>.

[viitattu 25.4.2021]

Juslén, H. 2018. Human centric lighting. Helvar Oy. Pdf-dokumentti. Saata-

vissa: [https://www.helvar.nl/files/dali-lichtmanagementsysteem/human-centric-lighting/HCL\\_Whitepaper.pdf](https://www.helvar.nl/files/dali-lichtmanagementsysteem/human-centric-lighting/HCL_Whitepaper.pdf)

[Viitattu 21.4.2021]

Ketomäki, J. 2018. Valaistus. Aalto-yliopisto. Pdf-dokumentti. Saatavissa:

[https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/559558/mod\\_resource/content/3/Ketom%C3%A4ki\\_Opiskelijoille%20Annettu%20ELEC-8001%20Energiatekn%202018.pdf](https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/559558/mod_resource/content/3/Ketom%C3%A4ki_Opiskelijoille%20Annettu%20ELEC-8001%20Energiatekn%202018.pdf) [Viitattu 1.4.2021]

Khan, T. Q., Bodrogi, P., Vinh, Q.T. & Winkler, H. 2015. LED Lighting - Technology and Perception. Wiley-VCH.

Kungliga tekniska högskolan (KTH). s.a. Pdf-dokumentti. Saatavissa:

<https://www.kth.se/social/files/542d2474f27654546973166c/Fotoslides4.pdf> [Viitattu 15.2.2021]

Larsen, D. 2020. Chemistry 110A: Introduction to Quantum Mechanics. Uni-

versity of California. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://chem.libretexts.org/@go/page/171804> [viitattu 15.4.2021]



Lumileds. 2019. LUXEON CoB Core Range. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <https://www.lumileds.com/wp-content/uploads/files/DS162-LUXEON-CoB-Core-Range-datasheet.pdf> [Viitattu 5.4.2021]

Lumileds. 2020. Phosphor. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.lumileds.com/technology/luxeon-technology/phosphor/> [viitattu 15.4.2021]

Mechatronix. 2021. Thermal calculation. Calculation of the required LED Cooler Thermal Resistance Rth. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.led-heatsink.com/thermal-calculation> [viitattu 21.3.2021]

Philips. 2021. Philips Hue. WWW-dokumentti. Saatavissa: <https://www.philips-hue.com/en-ca> [viitattu 21.4.2021]

Potter, G., Skene, D., Arendt, J., Cadet, J., Grant, P., Hardie, L. 2016. Circadian Rhythm and Sleep Disruption: Causes, Metabolic Consequences, and Countermeasures. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <https://academic.oup.com/edrv/article/37/6/584/2691715> [Viitattu 30.4.2021]

Raamattu.1992. Suomen evankelis-luterilaisen kirkolliskokouksen vuonna 1992 käyttöön ottama suomennos. Helsinki: Suomen Piipiaseura

rohm. 2011. Digital 16bit Serial Output Type Ambient Light Sensor IC. BH1721. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/ic/sensor/light/bh1721fvc-e.pdf> [viitattu 16.4.2021]

rohm. 2012. Analog Current Output Type Ambient Light Sensor IC BH1603fvc. Pdf-dokumentti. Saatavissa: <https://fscdn.rohm.com/en/products/databook/datasheet/ic/sensor/light/bh1603fvc-e.pdf>. [viitattu 16.4.2021]

Sigma Safety. 2020. Lumens and lux and candela,oh my! WWW-dokumentti.  
Saatavissa: <https://sigmasafety.ca/news/lumens-lux-and-candela/> [viitattu  
3.4.2021]

## KUALUETTELO

Kuva 1. Valaistuksen suureet (Sigma-Safety 2020) .....	11
Kuva 2. Valonlähteiden spektrit (Davidson 2019).....	12
Kuva 3. Silmän rakenne (Digma).....	14
Kuva 4. Kuva verkkokalvosta (KTH).....	15
Kuva 5. Silmän spektriherkkyys $V(\lambda)$ (Ketomäki 2018).....	15
Kuva 6. Väriinsovitusfunktiot .....	17
Kuva 7. Kromaattisuusdiagrammi (Khan ym. 2015) .....	18
Kuva 8. Mustan kappaleen säteily (Larsen 2020).....	19
Kuva 9. Planckin säteilykäyrä (Khan ym. 2015) .....	19
Kuva 10. CRI värit .....	20
Kuva 11. Lumileds Rebel Plus ledien binnit (Lumileds 2019).....	25
Kuva 12. Fotodiodin ominaiskäyrät (Hamamatsu 2014).....	27
Kuva 13. Valoanturikomponenttien rakenteet (rohm, 2011) .....	28
Kuva 14. Antureiden herkkyyskäyriä (ams, rohm).....	29
Kuva 15. ams TCS3490 fotodiodit.....	30
Kuva 16. Fagerhultin valaisinanturit (Fagerhult 2020) .....	31
Kuva 17. Philips Hue ja sirkadiaaninen rytmi.....	32
Kuva 18. Testivalaisimen lohkoakaavio.....	33
Kuva 19. Testivalaisimen yksinkertaistettu valonjakokuvaio.....	33
Kuva 20. Ledin spektritiheys eri väriämpötiloilla (Lumileds 2019).....	35
Kuva 21. Valovirta sähkövirran funktiona (Lumileds 2019).....	35
Kuva 22. Ledin kynnysjännitteen riippuvuus virrasta (Lumileds 2019) .....	35
Kuva 23. LED-ajurin kytkentäkaavio (Inventronics 2020) .....	36
Kuva 24 LED-ajurin mitoitus (Inventronics 2020) .....	37
Kuva 25 Lediajurin himmennys (Inventronics 2020).....	37
Kuva 26. Valaistun pinta-alan laskenta .....	38
Kuva 27. Valaistusvoimakkuus valovirran funktiona .....	39
Kuva 28 Jäähdytys-elementti (Fischer Elektronik).....	40
Kuva 29 Jäähdytystarpeen laskenta (Mechatronix 2021).....	40
Kuva 30. AS7221 spektriherkkydet (ams AG) .....	42
Kuva 31. AS7221 järjestelmäkaavio.....	42
Kuva 32. AS7221 evaluointikortin kaavio .....	43
Kuva 33. Valaistusvoimakkuus ulkoisen valonlähteen aikana .....	46

Kuva 34. Valovirran ja ledimoduulien balanssin säätö .....	47
Kuva 35. Valaisimen CCT:n muutos.....	48
Kuva 36. Dynaaminen väriämpötilan ja valovirran säätö .....	50

## TAULUKKOLUETTELO

Taulukko 1. Valaistusvoimakkuudet (Khan ym. 2015, 260)

Taulukko 2. CRI-arvojen tulkinta (Khan ym. 2015, 261)

Taulukko 3. Ledimateriaalit ja niitä vastaavat aallonpituudet

Taulukko 4. Kynnysjännitteet

Taulukko 5. Valovirrat

Taulukko 6. 1208-kokoisten ledimoduuleiden parametrit

Taulukko 7. Valaisintestit

Taulukko 8 Valaisimen kalibrointimittaukset