

Opinnäytetyö (AMK)  
Elektroniikka  
Tietoliikennejärjestelmät  
2014

Henri Haapanen

# SISÄVALAISTUKSEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS LED-NAUHOILLA



TURUN AMMATTIKORKEAKOULU  
TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

OPINNÄYTETYÖ (AMK) | TIIVISTELMÄ

TURUN AMMATTIKORKEAKOULU

Elektroniikka | Tietoliikennejärjestelmät

2014 | Sivumäärä: 47

Ohjaaja: TkL Juha Nikkanen

Henri Haapanen

# SISÄVALAISTUKSEN SUUNNITTELU JA TOTEUTUS LED-NAUHOILLA

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli uusia asiakkaan asunnon alkuperäistä valaistusta keittiön ja eteisen vaatekaapiston osalta. Valaistuksen uudistamiseen ryhdyttiin pääasiallisesti kohteiden riittämättömän valaisun takia.

Työssä keskityttiin etenkin keittiön välitilan sekä apupöydän valaistukseen, jotka voidaan katsoa työtasoiksi, ja siten asettavat tiukemmat vaatimukset valaistukselle. Työssä käsiteltiin valaistustekniikan suureita ja termejä sekä perehdyttiin ledin toimintaan ja sen yleisimpiin ominaisuuksiin valaistuskäytössä.

Työssä todettiin työtasojen alkuperäisen valaistuksen riittämättömyys valaistusvoimakkuusmittauksilla sekä suoritettiin uusintamittaus uudistetuilla valaisimille. Kohteiden uudistetut valaisimet toteutettiin led-tekniikkaan perustuvilla led-nauhoilla, jotka valittiin asiakkaan toiveiden ja vaatimusten sekä valaistusteknisten syiden perusteella.

Lopputuloksena saavutettiin silmännähtävä parannus kohteiden valaistuksissa, joita tukivat suoritettujen valaistusvoimakkuusmittausten ero alkuperäisten ja uudistettujen valaistuksien suhteen. Työtasojen valaistusvoimakkuus kasvoi alkuperäisestä keskimäärin yli 200 % sekä valon lankeaminen työtasoille oli tasaisempaa.

Riittävällä ja tarkoituksenmukaisella valaistuksella lisättiin työtasojen työmukavuutta ja –turvallisuutta sekä epäsuoralla valaistuksella parannettiin keittiön yleisvalaistusta. Tämän lisäksi alun perin valaisemattoman eteisen vaatekaapiston käyttö helpottui ja selkeytyi riittävän ja tarkoituksenmukaisen valaistuksen myötä.

ASIASANAT:

LED, led-nauha, valaistus.

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics Engineering | Telecommunication Systems

2014 | Total number of pages: 47

Instructor: Juha Nikkanen, Lic.Tech., Principal Lecturer

Henri Haapanen

## INTERIOR LIGHTING DESIGN AND IMPLEMENTATION WITH LED STRIPS

The goal of this thesis was to redesign the original lighting of the kitchen and the hall's wardrobe in a customer's apartment. The main reason for this renovation was the initially inadequate lighting in the target areas.

The main focus of the thesis was the lighting of the kitchen counters which can be thought as worktops and thereby require stricter standards for their lighting. The thesis offered further clarification of all the essential quantities and terms related to photometry and oriented in the functions and the most common characteristics of the LED in illuminance usage.

The original lighting was found inadequate according to illuminance measurements taken before the replacement. Measurements were also conducted after the renewed lighting was installed. The renewed lighting was implemented with LED strips which are based on LED technology and were chosen as a replacement mainly because of the desires and demands of the customer, and of lighting technical reasons.

As a result, there was an evident difference between the original and renewed lighting supported by the conducted illuminance measurements. The illuminance of the worktops increased on average by over 200 % and the light covered the worktops more evenly.

The comfort and safety of working on the worktops was enhanced with the new adequate and appropriate lighting and general lighting in the kitchen was improved by the indirect lighting. In addition, the originally unlit wardrobe's usability was enhanced with adequate and appropriate lighting.

### KEYWORDS:

LED, LED strips, interior lighting.

# SISÄLTÖ

|   |           |
|---|-----------|
| <b>1 JOHDANTO</b>                         | <b>1</b>  |
| <b>2 VALO JA FOTOMETRIA</b>               | <b>2</b>  |
| 2.1 Näkyvä valo                           | 2         |
| 2.2 Valovoima                             | 3         |
| 2.3 Valovirta ja valotehokkuus            | 3         |
| 2.4 Valaistusvoimakkuus                   | 4         |
| 2.5 Avaruuskulma                          | 5         |
| 2.6 Neliö- ja kosinilaki                  | 6         |
| 2.7 Väriämpötila                          | 6         |
| 2.8 Värintoistoindeksi                    | 8         |
| <b>3 LED</b>                              | <b>10</b> |
| 3.1 Historia                              | 10        |
| 3.2 Toimintaperiaate                      | 11        |
| 3.3 Virta ja jännite                      | 14        |
| 3.4 Ledit valaistuskäytössä               | 15        |
| 3.4.1 Valkoinen LED                       | 16        |
| 3.4.2 Väriämpötila                        | 18        |
| 3.4.3 Värintoistoindeksi ja valotehokkuus | 19        |
| 3.4.4 Lämmönhallinta ja elinikä           | 20        |
| 3.4.5 Hinta ja markkinaosuus              | 22        |
| 3.5 Ledien tulevaisuus                    | 23        |
| <b>4 LED-NAUHAT</b>                       | <b>24</b> |
| 4.1 Led-nauhojen rakenne ja valmistus     | 24        |
| 4.2 Kotelot                               | 24        |
| 4.3 Laatu ja suunnittelu                  | 25        |
| 4.4 Käyttökohteet                         | 26        |
| <b>5 TOIMEKSIANTO</b>                     | <b>27</b> |
| <b>6 SUUNNITTELU</b>                      | <b>30</b> |
| <b>7 TOTEUTUS</b>                         | <b>37</b> |

|                     |           |
|---------------------|-----------|
| <b>8 TULOKSET</b>   | <b>40</b> |
| <b>9 YHTEENVETO</b> | <b>43</b> |
| <b>LÄHTEET</b>      | <b>44</b> |

## KUVAT

|   |    |
|---|----|
| Kuva 1. Silmän suhteelliset spektriherkkyydet tappinäkemisessä $V(\lambda)$ sekä sauvanäkemisessä $V'(\lambda)$ . [3] | 3  |
| Kuva 2. Avaruuskulman määritelmä. [1]   | 5  |
| Kuva 3. Planckin käyrän sijainti CIE:n värikoordinaatistossa. [46]  | 7  |
| Kuva 4. Puolijohteen eri energiatasojen tuottama säteily. [18]  | 14 |
| Kuva 5. Tyypillinen RGB-ledin spektri. [47]   | 16 |
| Kuva 6. Tyypillisen loisteainepohjaisen valkoisen ledin spektri. [48]   | 17 |
| Kuva 7. Keittiön välitilan alkuperäinen valaistus.  | 28 |
| Kuva 8. Keittiön lasikaapin työtason alkuperäinen valaistus.  | 29 |
| Kuva 9. Asennuksiin käytettävä led-nauha.   | 36 |
| Kuva 10. Alumiiniset asennuslistat ja diffuusorikannet.   | 37 |
| Kuva 11. Keittiön valaistus led-nauhavalaisimilla toteutettuna.   | 38 |
| Kuva 12. Lasikaapin työtaso led-nauhavalaisimella valaistuna.   | 39 |
| Kuva 13. Eteisen vaatekaappi led-nauhavalaisimilla valaistuna.  | 42 |

## KUVIOT

|   |    |
|---|----|
| Kuvio 1. Keittiön välitilan valaistusvoimakkuusprofiili alkuperäisellä valaistuksella.  | 34 |
| Kuvio 2. Lasikaapin työtason valaistusvoimakkuusprofiili alkuperäisellä valaistuksella. | 35 |
| Kuvio 3. Välitilan työtason valaistusvoimakkuusprofiili led-nauhavalaisimilla.          | 40 |
| Kuvio 4. Lasikaapin työtason valaistusvoimakkuusprofiili led-nauhavalaisimilla.         | 41 |

## TAULUKOT

|  |    |
|--|----|
| Taulukko 1. Ra-indeksin arvosteluasteikko. [25]  | 9  |
| Taulukko 2. Eri-ikäisten ihmisten valontarpeet hyvin painetun tekstin lukemisessa. [3] | 27 |
| Taulukko 3. Asiakkaalle esitettyjen led-nauhojen tekniset tiedot.                      | 36 |

# 1 JOHDANTO

Asiakas huomasi muuton jälkeen asuntonsa keittiön valaistuksen olevan riittämätön päivittäisten askareiden suorittamiseen. Varsinkin keittiön työtasojen valaistukseen halutaan parannusta sekä asiakkaan pyynnöstä keittiön yleisvalaistusta lisätään epäsuoralla valolla sekä valaistaan alun perin valaisematon eteisen vaatekaappi.

Tässä työssä suunnitellaan ja toteutetaan asiakkaan toiveiden ja vaatimusten mukaisesti keittiön valaistus sekä valaistaan eteisen vaatekaappi led-nauhoilla. Asiakkaan toiveesta työn painopiste keskittyy työtasojen riittävään, tarkoituksenmukaiseen ja energiatehokkaaseen valaisuun. Ledeillä toteutettujen valaisin- ja lamppuvaihtoehtojen suuren määrän takia ja työn laajuuden hallitsemisen kannalta työssä keskitytään pääasiallisesti led-nauhoihin.

Vastaavia insinööritöitä aiheesta on tehnyt Olli Tölä työllään ”LED-VALAISTUKSEN HYÖDYNTÄMINEN SISÄVALAISTUKSESSA”, jossa käsitellään ledien teoriaa ja led-valaistuksen etuja ja haittoja sekä niiden käyttöä sisävalaistuksessa. Henri Hakkaraisen ”LEDIEN KÄYTTÖMAHDOLLISUUDET TIEVALAISTUKSESSA” käsittelee yksityiskohtaisesti valoon ja fotometriaan liittyviä suureita ja termejä sekä ledien teoriaa.

Luvussa 2 tuodaan lisäselvyyttä valoon ja valaistukseen liittyviin termeihin ja ehdonalaisuuksiin, joita tarvitaan esim. eri valonlähteiden vertailuun. Luvussa 3 käsitellään ledien toimintaperiaatetta sekä niiden käytön etuja ja heikkouksia valaistuskäytössä ja luvussa 4 tuodaan esille led-nauhojen perusominaisuuksia ja käyttökohteita. Keittiön työtasojen alkuperäisille valaistuksille suoritetaan valaistusvoimakkuusmittaukset, joita käsittelee luku 5 ja vastaavasti uusituille valaisimille samaiset mittaukset suoritetaan tuloksia käsittelevässä luvussa 8.

## 2 VALO JA FOTOMETRIA

Tässä luvussa käydään läpi yleisimmät valoon ja valaistustekniikkaan liittyvät suureet ja käsitteet. Nämä käsitellään työssä esiintyvien valaistustekniikan suureiden ja käsitteiden takia, joita käytetään esim. valaisimien teknisten tietojen ja ominaisuuksien vertailuun. Valaistustekniikan osa-aluetta, joka määrittää valaistukseen liittyvät suureet, kutsutaan fotometriaksi [1].

Työssä rakennetaan ja asennetaan valaisimia, joiden perustana toimivat led-nauhat. Valaisin on kokonaisuudessaan laite, jossa otetaan huomioon valaisimen sisältämien lampujen (valonlähteiden) kannattamiseen, kiinnittämiseen, suojaamiseen sekä verkkoon liittämiseen tarvittavat osat ja laitteet. Näin ollen valaisin jakaa, suodattaa tai muuntaa yhdestä tai useammasta lampusta säteilemän valon valaistavaan kohteeseen. Suomen Standardisoimisliitto ry:n valaisinmääritelmässä ei oteta itse lampuja huomioon, poikkeuksena on kiinteälamppuinen valaisin, jossa lamput eivät ole vaihdettavissa. [2]

### 2.1 Näkyvä valo

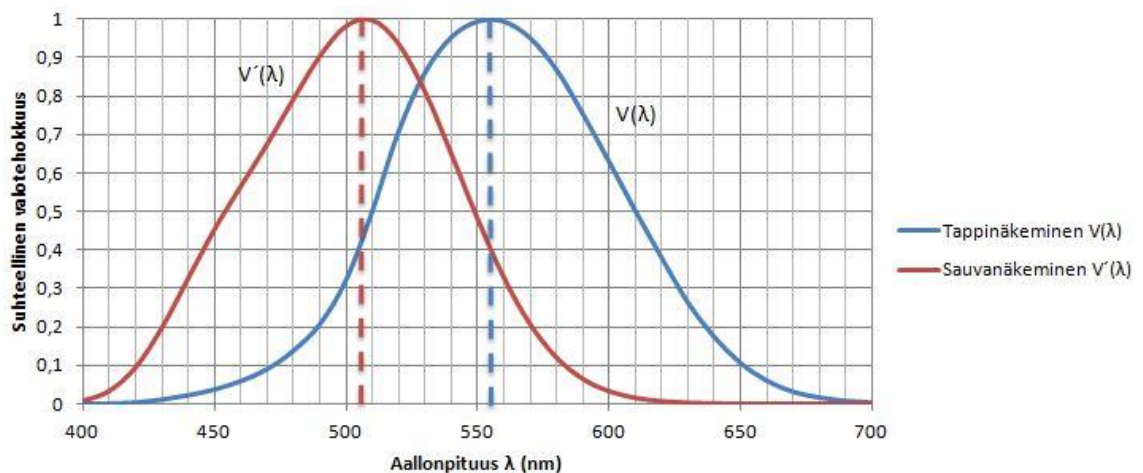
Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituusalue, joka on havaittavissa ihmissilmällä, käsittää näkyvän valon osuuden. Aallonpituusalueen rajat saattavat vaihdella havaitsijan mukaan, mutta yleisinä rajoina voidaan pitää n. 400–780 nm:n aallonpituusalueetta. Näkyvälle valolle rajat asettaa lyhyemmällä n. 100–400 nm aallonpituuksilla ultraviolettisäteily ja vastaavasti pidemmällä n. 780 nm–1 mm aallonpituuksilla infrapunasäteily. Näiden kolmen säteilyn osaa sähkömagneettisen säteilyn spektristä kutsutaan optiseksi säteilyksi. Huomion arvoista säteilyjen eroissa on niiden aistittavuus. Näkyvä valo luonnollisesti aistitaan silmän, näköhermon ja aivojen yhteistyöllä. Infrapunasäteilyä kutsutaan joissain yhteyksissä myös lämpösäteilyksi ja on täten aistittavissa tuntoaistin avulla lämpönä. Näistä kahdesta poiketen ultraviolettisäteilyä ei voi välittömästi tai lainkaan havaita ihmisaisteilla, vaan havainnointiin tarvitaan fysikaalisia mittareita tai mittalaitteita. [1,3,4]

## 2.2 Valovoima

Valaistustekniikan perussuure on *valovoima*  $I$ , joka kuvaa valonlähteen säteilemän valon intensiteettiä avaruuskulmaa kohti. Valovoiman yksikkö on *kandela*, (cd). Yksikön nimi juontuu sen vanhasta määritelmästä steariinikynttilän avulla, jonka liekin vieressä valovoima on karkeasti 1 cd. Nykyään kandela kuuluu SI-järjestelmän perussuureisiin ja on täten määritelty SI-järjestelmässä täsmällisesti:

”Kandela on sellaisen säteilylähteen valovoima, joka tiettyyn suuntaan lähettää monokromaattista säteilyä taajuudella 540 THz:n, ja jonka säteilyteho tähän suuntaan on 1/638 wattia steradiaania kohti.” [1,4]

Kandelan määritelmään valittu 540 THz taajuus vastaa aallonpituutena 555 nm, joka asettuu kuvassa 1 ihmissilmän suhteellisen spektriherkkyyskäyrän huippukohtaan päivänvalossa eli tappinäkemisessä. Hämärässä valaistuksessa eli sauvanäkemisessä samainen huippukohta asettuu 507 nm:n kohdalle. [1,3]



Kuva 1. Silmän suhteelliset spektriherkkydet tappinäkemisessä  $V(\lambda)$  sekä sauvanäkemisessä  $V'(\lambda)$ . [3]

## 2.3 Valovirta ja valotehokkuus

Suurin osa sähkövalaisimien ottotehosta muuntuu lämpösäteilyksi ja vain pieni osa saadaan näkyvän valon säteilytehoksi. *Valovirta*  $\phi$  mittaa juuri tätä näkyvän



valon säteilytehoa, joka on painotettu ihmissilmän spektriherkkyydelle. Valovirta määritellään valonlähteen valovoiman ja avaruuskulman tulona:

$$\phi = I\omega$$

Valovirran yksikkö on täten  $cd \cdot sr$ , josta käytetään SI-järjestelmässä erikoisnimitystä *lumen* (lm). [1]

Varsinkin nykypäivänä on hyvin oleellista kiinnittää huomiota valaisimen hyötysuhteeseen eli toisin sanoen siihen paljonko valaisimen ottamasta sähkötehosta  $P$  saadaan muutettua valovirraksi  $\phi$ . Näiden kahden suureen suhdetta kutsutaan *valotehokkuudeksi*  $\eta$ :

$$\eta = \frac{\phi}{P}.$$

Valotehokkuuden yksikkö on lumenia/watti (lm/W). Valotehokkuuden arviointia helpottamaan esitellään kaksi teoreettista maksimiraja-arvoa. 555 nm:n aallonpituudella säteilevän valolähteen teoreettinen maksimivalotehokkuus on 683 lm/W. Jos valonlähde säteilee tasaisesti pelkästään näkyvän spektrin alueella, on teoreettinen maksimi tällöin 187 lm/W. Tähän arvoon päästään laskeamalla silmän spektriherkkyysarvojen  $V(\lambda)$  keskiarvon (väliltä 390–780 nm, 10 nm:n välein) ja valotehokkuusvakion  $K_m$  tulo.

$$\phi = K_m \cdot V(\lambda)_{ave}$$

$$\phi = 683 \cdot 0,2740 \text{ lm} = 187 \text{ lm}.$$

390–780 nm:n aallonpituusalueelle tasaisesti jakaantunut 1 W:n teho tuottaa 187 lm:n valovirran. [1,4]

## 2.4 Valaistusvoimakkuus

Tilan tai pinnan valaisun riittävyyden arvioimiseen käytetty suure on *valaistusvoimakkuus*  $E$ . Kun valonlähteestä pinnalle saapuva valovirran tiheys lankeaa

johonkin pinnalle, se heijastuu, läpäisee pinnan tai absorboituu pintaan. Valaistusvoimakkuus  $E$  määritellään valovirran  $\phi$  ja pinnan  $A$  suhteena:

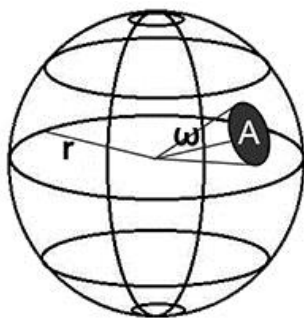
$$E = \frac{\phi}{A}.$$

Valaistusvoimakkuuden yksikkö on tällöin luumenia neliömetrille ( $\text{lm}/\text{m}^2$ ), josta käytetään erikoisnimeä luks (lx). Hyvin yleinen tapa ilmoittaa tilojen ja pintojen valaistuksen ohjearvoja on käyttää valaistusvoimakkuutta. [1,4]

## 2.5 Avaruuskulma

Valonlähteestä säteilevä valo voi edetä kolmiulotteisessa avaruudessa ympärisäteilevästi tai haluttuun suuntaan, jolloin on käytettävä myös kolmiulotteista suuntaa kuvaavaa kulmasuuretta, *avaruuskulmaa*  $\omega$ . Kaksiulotteinen tasokulma ei sovellu kuvaamaan valon tasaista etenemistä kolmiulotteisessa avaruudessa tai lankeamista pallon pinnalle. [1,4]

Kuvassa 2 on esimerkki avaruuskulmasta. Kartio muodostuu  $r$ -säteisen pallon pinnalla olevasta mielivaltaisesta alasta  $A$ . Avaruuskulma  $\omega$  on tässä tapauksessa kartion sisään jäävä osa avaruudesta. [1]



Kuva 2. Avaruuskulman määritelmä.[1]

Avaruuskulma  $\omega$  määritellään pinnan  $A$  ja säteen  $r$  neliön suhteena:

$$\omega = \frac{A}{r^2}.$$

Avaruuskulman yksikkö on *steradiaani*, (sr). Koko pallon pinta-alan ollessa  $A = 4\pi r^2$  on koko avaruutta kuvaava avaruuskulma  $\omega = 4\pi \text{ sr}$ . [1]

## 2.6 Neliö- ja kosinilaki

Neliö- ja kosinilaki ovat valaistusvoimakkuusmittauksien perusta. Neliölain mukaan pistemäisestä valonlähteestä kohtisuoraan mittauspintaa vasten tulevan valon ja valaistusvoimakkuuden ollessa kääntäen verrannollinen etäisyyden neliöön, pätee yhtälö:

$$E = \frac{I}{r^2} \text{sr} .$$

jossa  $E$  on valaistusvoimakkuus,  $I$  on valovoima ja  $r$  on valonlähteen ja pinnan välinen etäisyys. [4]

Käytännössä neliölakiin perustuva laskenta ja mittaus on usein liian pelkistetty, koska useimmiten valoa tulee useammasta kulmasta mitattavaan pisteeseen tai vastaavasti yhdestä valonlähteestä tulevaa valoa halutaan mitata eri kohdista valaistavaa aluetta. Tällöin valaistusvoimakkuus voidaan laskea kosinilain avulla. Laissa otetaan huomioon valaistusvoimakkuuden verrannollisuus valon tulo- kulman ja pinnan normaalin välisen kulman kosiniin:

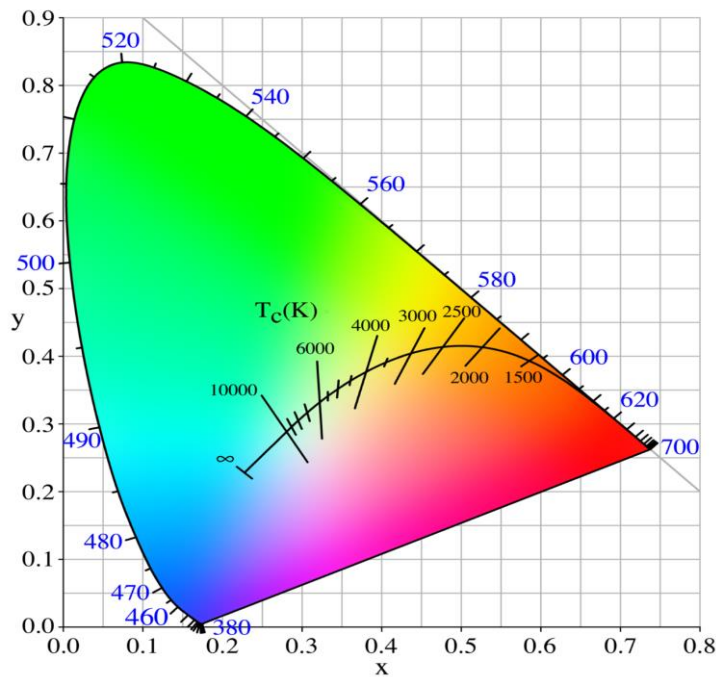
$$E_h = \frac{I_\alpha}{r^2} \cdot \cos \alpha .$$

jossa  $E_h$  on valaistusvoimakkuus,  $I_\alpha$  on valovoima suuntaan  $\alpha$  ja  $r$  on etäisyys valonlähteen ja pinnan välinen etäisyys. [4]

## 2.7 Väriämpötila

Fysikaalisesti tarkasteltuna väriämpötila  $T$  on Planckin säteilyn lähteen ns. mustan kappaleen säteilylämpötila. Mustan kappaleen ominaisuus absorboida täydellisesti siihen saapuva säteily, tekee siitä myös täydellisen säteilijän, koska heijastumista tai läpäisyä ei tapahdu. Kappaleen lämpötila vaikuttaa säteilyn

kokonaistehoon, säteilyn maksimin arvoon sekä säteilyn maksimiarvon aallonpituuteen. Kappaleen lämpötilan noustessa kasvaa säteilyn määrä voimakkaasti kaikilla aallonpituuksilla, sillä säteilyn kokonaisteho on verrannollinen lämpötilan neljänteen potenssiin. Samalla säteilyeksitanssin maksimi siirtyy lyhyemmille aallonpituuksille sekä säteilyeksitanssin maksimin arvo kasvaa. (Säteilyeksitanssi ilmaisee pinnasta lähtevän valovirran tiheyden vrt. valaistusvoimakkuus, pinnalle tulevan valovirran tiheys.)



Kuva 3. Planckin käyrän sijainti CIE:n värikoordinaatistossa.[46]

Planckin säteilyn lähteen ominaisia piirteitä voidaan ajatella käytännön esimerkin avulla. Rautaa, kuten sähkölieden levyä lämmitettäessä hehkuu se aluksi syvän punaisena. Lämpötilan nousun jatkuessa hehku kirkastuu sekä väriin tulee mukaan oranssia ja on lopulta täysin oranssi. Kokonaistehon kasvu huomataan voimistuvana lämpösäteilynä, säteilyn maksimiarvon kasvu kirkkaampana säteilynä sekä säteilyn maksimiarvon siirtyminen lyhyemmille aallonpituuksille levyn säteilemän värin siirtymisestä näkyvän valon spektrin alueelle aina kohti sinistä spektrin päätä.[3,4]

Väriämpötilan yksikkönä käytetään kelvinasteita (K). Täydellisen säteilijän lämpötilaa, jolla saavutetaan värisävyiltään ja -kylläisyydeltään samanlaista valoa

kuin valaisimen tuottama valo, kutsutaan valaisimen väriämpötilaksi. Koska vertailuun käytetty täydellinen säteilijä on terminen säteilijä, soveltuu väriämpötilan määrittäminen parhaiten termiseen säteilyyn perustuville valaisimille, kuten hehkulamput. Muille valaisintyypeille, kuten purkauslamput tai elektroluminesenssiin perustuville valonlähteille, on kehitetty Planckin säteilyn väripisteiden avulla käyrästä (kuva 3) ekvivalentin väriämpötilan määrittämiseksi. Useille purkauslamput ekvivalenttista väriämpöä ei kuitenkaan voida määrittää, koska ne poikkeavat liian paljon Planckin säteilyn väripisteiden käyrästä. [3,4]

## 2.8 Värintoistoindeksi

Valaistuskäyttöön tarkoitetuilla eri valonlähteillä on erilaiset säteilykoostumukset eli spektrit. Yhdistelemällä erilaisia säteilykoostumuksia voidaan muodostaa samoja värejä eri väripisteitä käyttäen. Tämä johtaa siihen, että on mahdotonta arvioida miltä ympäristön pintojen värit näyttävät eri valonlähteillä pelkästään silmämääräisesti tai värikoordinaattien ja väriämpötilan perusteella. Valonlähteiden värintoisto-ominaisuuksia kuvaamaan on kehitetty erilaisia menetelmiä, joissa useimmissa tutkittavaa valonlähdetä verrataan sopivaan vertailuvalonlähteeseen. Käytännön valaistustekniikan ja työn kannalta tärkein on yleinen värintoistoindeksi  $R_a$ . [3,4]

CIE:n yleinen värintoistoindeksi  $R_a$  määritellään kahdeksan testiväripinnan avulla. Määrittämisessä käytetyt kahdeksan standardoitua testiväripintaa ovat valittuja Munsellin värinäytteitä. Valituilla värinäytteillä on keskimääräinen vaaleus ja värikylläisyys ja ne kattavat koko väriympyrän. Yleinen värintoistoindeksi  $R_a$  koostuu erikoisindekseistä  $R_i$ , jolloin kahdeksan värinäytteen erikoisindeksien  $R_i$  aritmeettinen keskiarvo muodostaa yleisen värintoistoindeksin  $R_a$ . Keskiarvo- luonteensa takia yleinen värintoistoindeksi on täysin suhteellinen vain vertailuvalonlähteeseen, jolloin tilanne, jossa kahdella valonlähteellä voi olla samat  $R_a$ - arvot, mutta spektrit ja sitä kautta värintoistot ovat erilaiset, on mahdollinen. [3,4]

$R_a$  ilmoitetaan lukuna asteikolla 0–100, jossa 0 on täysin monokromaattista valoa, jossa vain säteilty väri toistuu, kun taas 100 vastaa täydellistä värintoistoa. Hehkulankalamppujen  $R_a$  on lähes 100, koska vertailuvalonlähteet ovat Planckin säteilijöitä. Lämminvalkean 3000 K:n loistelampun  $R_a = 50$ , joka toimii yleisen värintoistoindeksin laskentaperustana. Taulukossa 1 on  $R_a$ -indeksin arvosteluasteikko sekä tyypillisiä käyttö- ja sovelluskohteita. [3,4,25]

Taulukko 1.  $R_a$ -indeksin arvosteluasteikko. [25]

| <b>Ra-<br/>indeksi</b> | <b>Arvosteluasteikko</b> | <b>Tyypillisiä käyttö- ja sovelluskohteita</b>                                      |
|------------------------|--------------------------|---|
| <b>100</b>             | Täydellinen              | Päivänvalo, hehkulankalamput  |
| <b>90–100</b>          | Erinomainen              | Erikoisloistelamput, tietyt ledilamput, muut erikoislamput                          |
| <b>80–90</b>           | Hyvä                     | Tavalliset loistelamput, monimetallilamput, pienloistelamput, tavalliset ledilamput |
| <b>70–80</b>           | Tyydyttävä               | Huonolaatuiset loistelamput, tietyt ledilamput                                      |
| <b>50–70</b>           | Välttävä                 | Jotkut katulamput, huonolaatuiset loistelamput                                      |
| <b>0-50</b>            | Huono                    | Katu- ja tievalot yleensä   |
| <b>0</b>               | Ei värintoistoa          | Pienpainenaatriumlamput, monokromaattiset valonlähteet, laservalo                   |

## 3 LED

LED on lyhenne englanninkielisistä sanoista Light Emitting Diode, joka tarkoittaa suomeksi valoa säteilevää diodia. Lisäksi LED:stä käytetään nimityksiä loistodiode, hohtodiode sekä ledi, joista jälkimmäistä käytetään työssä. Arkikielessä saatetaan käyttää virheellisesti myös nimitystä valodiode, jolla kuitenkin viitataan fotodiodeihin eli valolle herkkään diodeihin. Tässä luvussa käydään läpi ledin historiaa sekä toimintaperiaatetta sekä perehdytään valaistuskäyttöön tarkoitettujen ledien ominaisuuksiin.

### 3.1 Historia

Ensimmäinen maininta ledin mahdolliseen syntyyn on jo vuodelta 1907. Englantilainen Henry J. Round huomasi piikarbidikiteen tuottavan keltaista valoa johdattaessa sähkövirtaa kiteen läpi. Tämä oli tietävästi ensimmäinen havainto elektroluminesenssista. 1920-luvun puoli välissä venäläinen Oleg V. Losev tutki sinkkioksidin ja tasasuuntauspiikarbididiodin tuottamaa valoa. Vuonna 1927 Losev haki patenttia keksinnölleen nimellä valorele. Tutkimuksissaan Losev muun muassa ymmärsi valoreleensä ei-termisen emission luonteen, mittasi valoreleen valoemissiolle kynnysvirran sekä muodosti valoreleen virta-jänniteominaiskäyrän. Patentti hyväksyttiin vuonna 1929, johon mennessä Losev oli ymmärtänyt moduloidun valoreleen tuottaman valon mahdollisuudet toimia lähettimenä ja vastaanottimena lennätin- ja puhelinyhteyksien sekä kuvien siirrossa. Keksintö julkaistiin monen maan tieteellisissä julkaisuissa, mutta keksinnölle ei löydetty kuitenkaan käyttöä ja se unohtui vuosikymmeniksi. [5]

Vuonna 1962 yhdysvaltalainen Nick Holonyak Jr. kehitti ensimmäisen näkyvää valoa säteilevän punaisen ledin gallium-arseeni-fosforista (GaAsP). Tätä voidaan pitää kaupallisen ledin syntyhetkenä. 70-luvulla puolijohdeiden kehitys jatkui ja markkinoille alkoi ilmestyä erivärisiä ledejä, kuten vihreä, oranssi ja keltainen. [16]

Ensimmäisen ns. erikoiskirkkaan vihreän ja sinisen ledin kehitti japanilainen Shuji Nakamura galliumnitridistä (GaN) ja indium-gallium-nitridistä (InGaN) 90-luvun alussa. Hän jatkoi keksintönsä kehittelyä, ja vuonna 1993 markkinoille tuli ensimmäinen valkoinen ledi, jonka perustana toimii erikoiskirkas sininen ledi, joka päällystettiin fluoresoivalla fosforikerroksella. Tämän seurauksena ledit alkoivat yleistyä valaistuskäytössä 2000-luvulla. [16]

### 3.2 Toimintaperiaate

Ledin perustana toimii myötäsuuntainen diodi, joka on puolijohdekomponentti. Diodin perusidea on päästää virta kulkemaan vain toiseen eli myötäsuuntaan ja vastaavasti estää virran kulku estosuuntaan. Kuten missä tahansa puolijohdekomponenteissa, diodeissa ja siten myös ledeissä, tapahtuu tehohäviöitä näiden resistiivisyydestä johtuen. Normaalisissa myötäsuuntaisissa diodeissa osa sen kuluttamasta energiasta muuttuu lämmöksi. Vastaavasti myös ledi on häviöllinen komponentti tuottaen lämpöä, mutta poiketen normaalista diodista osa sen kuluttamasta energiasta muuttuu näkyväksi valoksi. [6]

Ledit valmistetaan puolijohdeesta, joka on eriste- ja johdeaineen välimuoto. Aine luokitellaan eristeeksi, jos sen uloimmat elektronit ovat valenssivyöllä, eivätkä pääse liikkumaan vapaasti aineessa. Johdeaineessa uloimmat elektronit pääsevät liikkumaan vapaasti valenssivyön (alempi energiataso) ja johtavuusvyön (ylempi energiataso) välillä kuljettaen samalla mukanaan negatiivista varaus-taan mahdollistaen hyvän sähkön johtumisen. Puolijohdeet toimivat kylmässä lämpötilassa eristeen tavoin, mutta esim. huoneenlämmössä osa valenssielektro-neista muuttuu vapaiksi elektroneiksi, jolloin puolijohde johtaa hieman sähköä huoneenlämmössäkin. [6]

Puhtaalla puolijohdeella on luonnostaan ominaisuutena muodostaa uusia vapaita elektroneja sekä uusia aukkoja. Tätä ilmiötä tuottaa vapaita elektroneja ja aukkoja kutsutaan termiseksi generaatioksi, jonka voimakkuus on lämpötilariip-puvainen. Korkeassa lämpötilassa lämpöenergiaa on paljon ja termisen gene-raation elektroni–aukko-parituotto on korkea. Alhaisessa lämpötilassa lämpö-



energiaa on vähemmän ja termisen generaation elektroni–aukko-parituotto on matala. Vastakohtana termiselle generaatiolle on rekombinaatio, jossa negatiivinen varauksenkuljettaja elektroni ja positiivinen varauksenkuljettaja aukko yhdistyvät. Tällöin myös häviää elektroni–aukko-pari. [6]

Käytännön puolijohteet ovat usein ”dopattuja” eli niitä on seostettu epäpuhtauksilla. Seostamiseen käytetään pieniä määriä erilaisia aineita, jotka ovat ominaisuuksiltaan edullisia lisäämään vapaiden elektronien ja aukkojen määrää puolijohteessa. Seostettuja puolijohdemateriaaleja kutsutaan n- tai p-tyyppisiksi puolijohteiksi. N-tyypin puolijohde seostetaan (esim. fosforilla, P) siten, että siihen saadaan ylimääräisiä vapaita elektroneja ja vastaavasti p-tyypin puolijohde seostetaan (esim. boorilla, B) siten, että siihen saadaan lisää aukkoja. Puolijohdediodi syntyy, kun kaksi vastakkaismerkkistä puolijohdetta seostetaan samalle puolijohdepalalle. Seostettujen vastakkaismerkkisten puolijohteiden rajapintaa kutsutaan pn-liitokseksi. [6,7]

Kun ledi kytketään päästösuuntaan eli p-tyypin puoli (anodi) positiiviseen potentiaaliin ja n-tyypin puoli (katodi) negatiiviseen potentiaaliin ja ledin kynnysjännite ylitetään, alkaa virta kulkea ledissä muodostuneen sähkökentän suuntaisesti elektrodien välillä anodista katodin suuntaan. Tällöin p-tyypin puolella olevat aukot liikkuvat virran suuntaan kohti pn-liitosta. Vastaavasti vapaat elektronit kulkevat virtaa vastaan kohti pn-liitosta. Puolijohteen pn-liitosta, jossa rekombinaatio tapahtuu kutsutaan ns. tyhjennysalueeksi. Tyhjennysalueen leveys määrää ledin läpi kulkevan virran suuruuden. Alueen leveyteen vaikuttaa ledin jännitteen suunta ja suuruus. Päästösuuntatilanteessa jännite on ylittänyt kynnysjännitteen ja tyhjennysalueen leveys on lähellä nollaa ja virta kulkee voimakkaimmillaan. Jos ledin kynnysjännite tai estosuuntainen läpilyöntijännite ei ylity, tyhjennysalueen läpi kulkee vain hyvin pieni, huoneenlämmössä muutaman nanoampeerin (lämpötilasta riippuvainen) suuruinen vuotovirta. [6,7]

Täyttäessään aukon sähkökentässä virittynyt elektroni siirtyy johtavuusvyöltä alemmalle energiatasolle, valenssivyölle, samalla vapauttaen termisestä generaatiosta saamansa ylimääräisen lämpöenergian. Valenssivyön ja johtavuusvyön välissä vallitsee energiarako  $E_g$ , jota kutsutaan ns. kielletyksi alueeksi.

Energiarako määräytyy pn-liitoksessa käytetyistä materiaaleista, esim. piillä (Si) kielletyn alueen leveys  $E_{g0} = 1,12 \text{ V}$ . Näin ollen piissä yhden elektronin siirtymiseen kielletyn alueen yli vaaditaan huoneenlämmössä energiaa  $E_g = 1,12 \text{ eV}$ . Ledin tapauksessa elektronin vaihtaessa energiatasoa, emittoi tämä myös valokvantin, jota kutsutaan fotoniksi. Kynnysjännitteen  $U$ , energiatasojen välisen eron  $\Delta E$ , fotonin energian  $E_p$  sekä säteilyn aallonpituuden  $\lambda$  välillä vallitsee suhde: [6,7,18]

$$qU = \Delta E = E_p \approx hf = h \frac{c}{\lambda},$$

jossa  $q$  on alkeisvaraus,  $h$  on Planckin vakio,  $f$  on säteilyn taajuus ja  $c$  on valonnopeus tyhjiössä. [7,18]

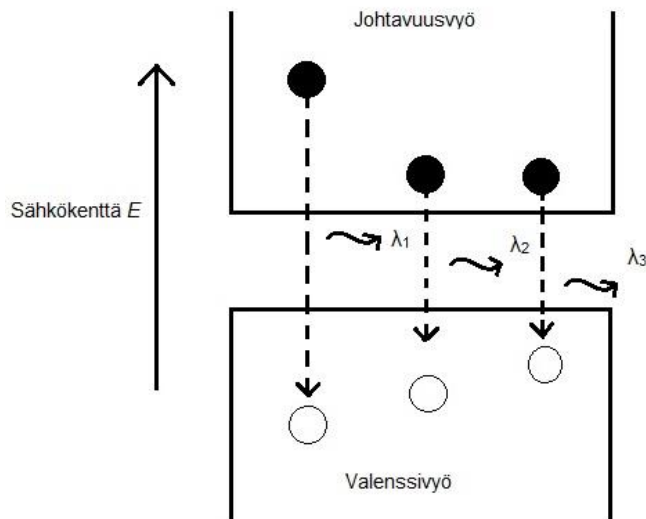
Yllä olevasta yhtälöstä voidaan todeta, että mitä pidempi säteily aallonpituus on, sitä pienempi fotonin energia on, kuten myös energiaraon välinen ero. Näin ollen esim. punaisen ( $\lambda = 700 \text{ nm}$ ) ledin kynnysjännite on matalampi kuin sinisen ( $\lambda = 470 \text{ nm}$ ) ledin:

$$\begin{aligned} qU_{pun} = h \frac{c}{\lambda_{pun}} \rightarrow U_{pun} = \frac{hc}{q\lambda_{pun}} &= \frac{6,626 \dots \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,997 \dots \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,602 \dots \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 700 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \approx 1,7712 \\ &= 1,77 \text{ V} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} qU_{sin} = h \frac{c}{\lambda_{sin}} \rightarrow U_{sin} = \frac{hc}{q\lambda_{sin}} &= \frac{6,626 \dots \cdot 10^{-34} \text{ Js} \cdot 2,997 \dots \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}}}{1,602 \dots \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 470 \cdot 10^{-9} \text{ m}} \approx 2,63796 \\ &= 2,64 \text{ V} \end{aligned}$$

Kaavan tarkkuus riittää ainoastaan arvioimaan ledin jännitettä, mutta kuvastaa hyvin kynnysjännitteen ja värin välistä suhdetta. [7]

Käytännön puolijohteilla  $E_p \geq E_g$ , koska säteilyprosessiin osallistuu useampi energiataso johtavuus- ja valenssivöillä (kuva 4). Täten käytännön puolijohde säteilee eri, mutta kuitenkin toisiaan lähellä olevia aallonpituuksia. Ledeillä näkyvän valon alueella kaistanleveys  $\Delta\lambda$  on tyypillisesti luokkaa muutamia kymmeniä nanometrejä. [18]



Kuva 4. Puolijohteen eri energiatasojen tuottama säteily. [18]

Puolijohteen materiaalivalinnoilla pystytään siis vaikuttamaan onko energiata-sosiirto säteilevä vai ei-säteilevä sekä ledin tapauksessa käytetyillä materiaaleil-la voidaan vaikuttaa säteiltävän valon aallonpituuteen eli väriin. Tyypillisesti dio-dien valmistamiseen käytetään piitä (Si) tai germaniumia (Ge). Nämä materiaalit eivät kuitenkaan sovi ledien valmistukseen, koska ne säteilevät suurimmaksi osaksi vain lämpöä. Yleisimmät ledien valmistukseen käytetyt puolijohdemateri-aalit ovat galliumarsenidi (GaAs), galliumfosfidi (GaP) ja näiden yhdisteet esim. galliumarseenifosfidi (GaAsP) sekä alumiinigalliumindiumfosfidi (AlGaInP). Näil-lä materiaaleilla pystytään valmistamaan punainen, oranssi, keltainen ja vihreä ledi. Lisäksi vihreän, sinisen ja violetin ledin valmistamiseen käytetään indium-galliumnitridiä (InGaN). [6,7]

### 3.3 Virta ja jännite

Ledien päästösuuntainen jännite muodostuu pn-liitoksessa tyhjennysalueella syntyvän sähkökentän vaikutuksesta. Tyhjennysalueen p-tyyppin materiaalissa vallitsee pieni negatiivinen varaus ja vastaavasti n-tyyppin materiaalissa pieni positiivinen varus. Tähän rajapinnassa syntyvän sähkökentän ja siten kynns-jännitteen ylittämiseen tarvitaan varauksenkuljettajilta tietty energia. Ledien

päästösuuntainen jännite on diodeja korkeampi, tyypillisesti n. 1,8–2,2 V (väristä riippuen) ja valkoisilla ledeillä jopa 3,5–4,2 V. [6,7]

Ledien toimiessa vain päästösuuntaisella virralla katsotaan monesti järkeväksi tasasuunnata käytetty virta. Ledien maksimipäästösuuntainen virta vaihtelee käyttötarkoituksen mukaisesti. Merkinantosovelluksiin käytetyissä ledeissä virrankestoisuus on 10–30 mA, tyypillisesti 20 mA. Valaistuskäyttöön tarkoitetuissa teholedeissä saattaa parhaimmillaan olla jopa muutaman ampeerin virrankestoisuuksia. [7,21]

### 3.4 Ledit valaistuskäytössä

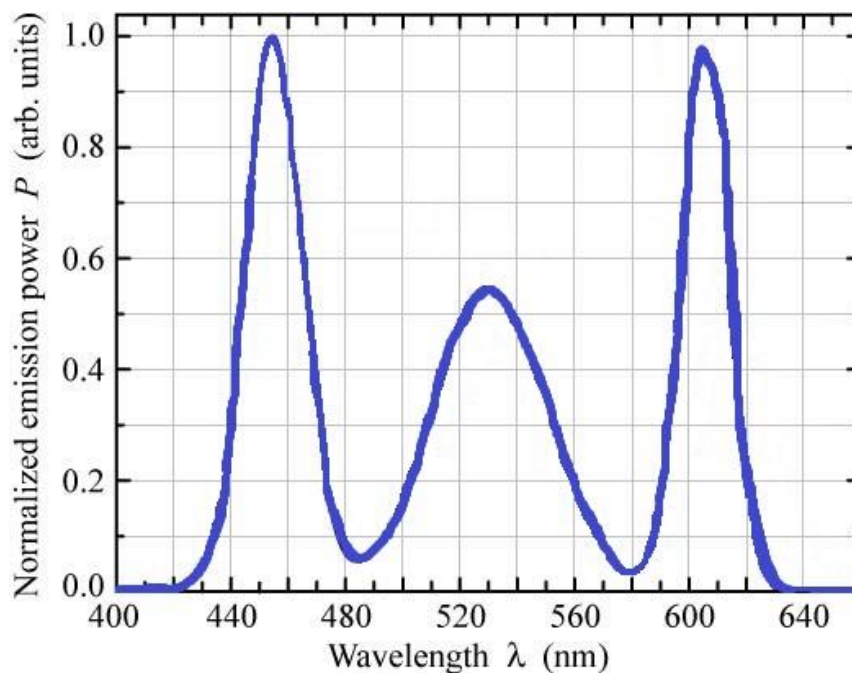
Ledeiltä vaaditaan erilaisia ominaisuuksia, kun niitä käytetään valaistustarkoituksessa, kuten valkoisen valon tuottaminen ja siihen liittyvät värintoisto-ominaisuudet sekä halutun värilämpötilan saavuttaminen. Ledille tärkeimpänä ominaisuutena voidaan pitää valotehokkuutta, jolloin ledeillä on mahdollista tehdä energiatehokkaita valaistusratkaisuja. Merkinantoledeihin verrattuna suuret tehot pakottavat huomioimaan lämmönhallintaan liittyviä seikkoja, jotka ovat ledien eliniän ja valontuoton kannalta kriittisiä niin lyhyellä kuin pitkälläkin aikavälillä.

Eri ominaisuuksia tarkastellessa huomataan nopeasti niiden usein kulkevan käsi kädessä, ja koska hyvältä valonlähteeltä vaaditaan, ei pelkästään vain monia eri ominaisuuksia, vaan niiden tulee olla kilpailevien valonlähteiden ominaisuuksien tasolla tai parempia. Toisaalta ledien nopea kehitys valaistuksen saralla ja sitä kautta voimakkaasti kasvavat markkinat houkuttelevat monia ledvalaisinvalmistajia pohjattomiin lupauksiin koskien tuotteittensa laatua. Usein liioittelun kohteena ovat yleisen laadun lisäksi, värintoisto, tuotetut lumenit, valotehokkuus sekä kestävyys. [30]

### 3.4.1 Valkoinen LED

Valkoinen valo on yhdistelmä kaikkia, vakio säteilytehoisia näkyvän spektrin aallonpituuksia. Tällaista spektriä, jossa näkyvän alueen säteilytehon spektritiheys on vakio, kutsutaan *tasaenergiaspektri*ksi. [3]

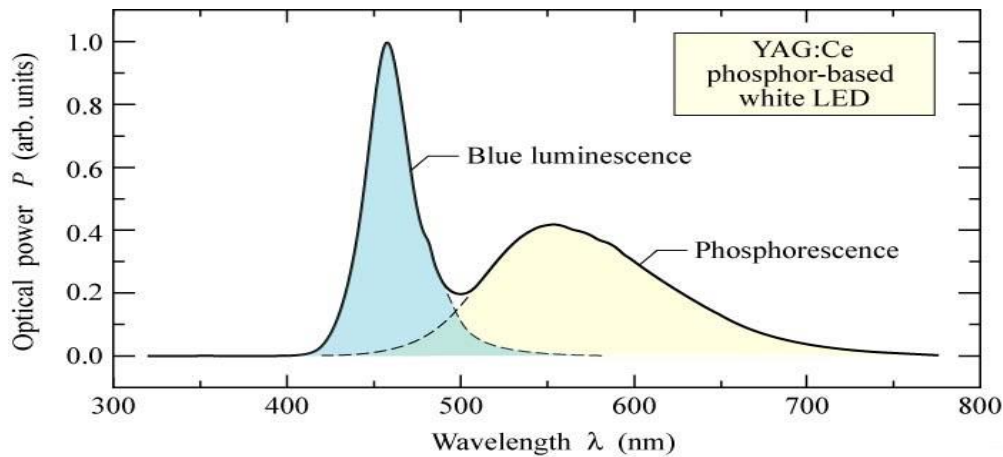
Valkoista valoa tuotetaan ledeillä pääasiallisesti kahdella eri tekniikalla. Moniväritekniikalla valkoinen väri saadaan aikaiseksi vähintään kolmea pääväriä yhdistelemällä, yleensä punaista, sinistä ja vihreää. Tekniikkaa käytetään värinmuodostuksessa esim. plasmatelevisioissa, jossa tekniikka tunnetaan nimellä RGB. Moniväritekniikka ei kuitenkaan ole ollut kovinkaan suosittu menetelmä valkoisen valon tuottamiseen yleisvalaistustarkoituksessa. [19]



Kuva 5. Tyypillinen RGB-ledin spektri. [47]

Tuottaakseen valkoista valoa RGB-ledin valmistukseen vaaditaan vähintään kolme eriväristä lediä, jotka tekevät valmistusprosessista kalliin. Lisäksi eriväriset ledit vanhenevat eri tahtiin, jolloin tuotettu nettoväri muuttuu ajan kuluessa. Suurin ongelma vihreällä ledillä on heikompi tehokkuus (kuva 5) kuin punaisella tai sinisellä ledillä, joka heikentää kriittisellä spektrinalueella värintoistoa. RGB-

ledit vaativat aina myös ohjauslaitteen hallitsemaan yksittäisten värien määrää yhdistelmässä. RGB-ledien valmistajat panostavakin yleensä enemmän ohjaukseen ja hallintaan kuin värintoistoon ja tekniikka on omiaan tunnelmavalaistuksen luomiseen esim. kolmea eri värilämpötilan valkoista (lämmin, neutraali, kylmä) käyttämällä. [19]



Kuva 6. Tyypillisen loisteainepohjaisen valkoisen ledin spektri. [48]

Toinen huomattavasti suositumpi valkoisen valon tuottamiseen käytetty tekniikka on ns. valkoinen ledi. Tekniikan perustana on erikoiskirkas sininen ( $\lambda \approx 450$  nm) GaN tai InGaN ledi, jonka kuori päällystetään tai itse led-siru ympäröidään fluoresoivalla aineella, kuten paljolti käytetyllä keltaisella ceriumin ja yttriumalumiinioksidin seoksella ( $\text{Y}_3\text{Al}_5\text{O}_{12}:\text{Ce}$ , YAG). Kuvassa 6 on tyypillinen valkoisen ledin spektri, joka koostuu sinisen ledin tuottamasta piikistä  $\lambda = 460$  nm sekä laajempi kaistaisesta fluoresenssisäteilystä  $\lambda = 500 - 650$  nm. Valkoiselta valolta vaikuttavaa säteilyä saadaan aikaiseksi, kun sinisen ledin säteily osittain läpäisee fluoresoivan aineen ja osittain absorboituu fluoresoivaan aineeseen, jolloin nettosäteilynä syntyy yhdistelmä sinistä valoa sekä laajakaistaista fluoresenssisäteilyä, joka näyttää valkoiselta valolta. Puolijohdeiden materiaalivalinnoilla ei ainakaan toistaiseksi suoraan kyetä tuottamaan tasaenergistä spektriä. [19]

Lähivuosina on esitelty näiden kahden edellä mainitun tekniikan hybridiversio, jossa perustana on RGB-tekniikka, johon on lisätty päävärejä tuottavien ledien

lisäksi loisteainepäälysteisiä valkoisia ledejä, tavoitteena tasaisempi spektri eli parempi värintoisto, sekä parempi valotehokkuus kuin normaalilla kolmiväritekniikalla toteutetulla ledillä. [20]

### 3.4.2 Värilämpötila

Valkoista valoa kuvataan ja arvioidaan yleensä värilämpötilan avulla. Lämpimästä valkoisesta puhuttaessa viitataan kellertävään valkoiseen ja kylmällä valkoisella tarkoitetaan sinertävää valkoista. Termit ovatkin täten muodostettu siten, miten valkoinen valo nähdään ja koetaan eikä värilämpötilan nousuun tai laskuun perustuen. [26]

Valaistuskäytössä ledien värilämpötilan valinta on tärkeä, jotta kohde saadaan valaistua tarkoituksen mukaisesti. Lämpimillä värilämpötiloilla saadaan luotua kotoista tunnelmaa, kun taas näkötehtävissä, kuten työtasoilla suositaan lämpimän valkoisen sijaan neutraaleja ja kylmiä valkoisia värilämpötiloja. Ledien värilämpötilaskaala on todella laaja n. 2 600–10 000 K. Perinteisistä valonlähteistä loistelamput pääsevät ainoastaan tälle tasolle n. 2 600–8 000 K:n värilämpötilaskaalalla. Hehkulankalamppujen n. 2 400–3 000 K:n värilämpötila määräytyy käytetyn hehkulangan perusteella. Yleisimmin käytetyt värilämpötilat alkavat hehkulamppumaisesta, lämpimästä valkoisesta 2 700 K:n värilämpötilasta aina kylmään ja sinertävään valkoiseen 6 500 K:n värilämpötilaan asti. Lämpimän ja kylmän valkoisen väliin asettuu neutraali valkoinen, jota kutsutaan myös luonnolliseksi tai puhtaaksi valkoiseksi. Lämpimän, neutraalin ja kylmän valkoisen rajat kelvinasteikolla vaihtelevat hieman valmistajan mukaan, mutta yleisinä rajoina lämpimälle valkoiselle voidaan pitää 2 700–3 000 K:n värilämpötilaa, neutraalille 3 000–4 500 K:n värilämpötilaa sekä kylmälle 4 500–6 500 K:n värilämpötilaa. [4,26,27,29]

### 3.4.3 Värintoistoindeksi ja valotehokkuus

Yksi tärkeimmistä valaistukseen käytetyistä valonlähteiden ominaisuuksista on värintoisto. Hyvällä värintoistolla taataan, että valaistun kohteen värit näyttävät luonnollisilta käytetyn valaisimen valossa. Valaistuskäyttöön tarkoitetuilla valkoista valoa tuottavien ledien suunnittelussa pyritään korkeaan valotehokkuuteen sekä hyvään värintoistoon, mutta varsinkin loisteainepäällysteisillä ledeillä joudutaan tyytymään värintoiston ja valotehokkuuden väliseen kompromissiin. Tämä johtuu näiden ominaisuuksien välisestä suhteesta, jossa paras värintoisto saavutetaan laajakaistaisella, näkyvän valon alueelle tasaisesti jakautuvalla säteilyllä, kun parhaaseen valotehokkuuteen päästään monokromaattisella  $\lambda = 555$  nm säteilyllä. Näin ollen kumpikin ominaisuus määräytyy lähteen tuottaman spektrin perusteella, jolloin näihin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa spektrisuunnittelussa. [22]

Värintoiston parantaminen valotehokkuuden kustannuksella ei ole kovin suositua, koska ledeihin siirtymisen pääasiallisena syynä voidaan pitää mahdollisia suuriakin energiasäästöjä valtakunnallisella tai jopa globaalilla tasolla. Toisaalta erinomaisen värintoiston omaavien hehkulankalamppujen poistuessa markkinoilta ledeiltä vaaditaan yhä parempaa värintoistoa. [22]

Useimmat valmistajat tarjoavat erilaisille loisteainepäällysteisille ledeilleen vaihtoehtoja värintoistoindeksien suhteen. Vaihtoehdot vaihtelevat valmistajien mukaan, joista suuri osa sijoittuu  $R_a = 70$ – $80$  välille. Yli 90 värintoistoindeksiin päästään ledeilläkin, mutta onnistuu ainoastaan valotehokkuudesta tinkimällä. Huomion arvoista on paljolti käytetyn CIE:n värintoistoindeksi  $R_a$ , joka ei sovellu kovinkaan hyvin ledien tai muiden piikkimäisen spektrin omaavien valonlähteiden mittaamiseen. CIE onkin tästä syystä kehittämässä näihin valonlähdetyyppihin paremmin soveltuvaa mittaustekniikkaa. [22]

Normaalisti valotehokkuus mittaa ottotehon (W) ja säteilyn valovirran (lm) välistä hyötysuhdetta. Koska lediä ajetaan yleensä tasasuunnatulla virralla, siihen tarvittavan liitäntälaitteen kuluttama sähköteho (muunnoshäviö) kuuluisi ottaa huomioon valotehokkuutta ilmoitettaessa. Useimmiten valmistajat kuitenkin il-



moittavat vain itse ledin valotehokkuuden markkinointisyistä. Tämä hankaloittaa eri ledien ja erilaisten lamppujen valotehokkuuksien vertailua. [22]

Valkoisten ledien valotehokkuus on noussut niiden kaupallistamisen (vuonna 1996) n. 5 lm/W tasolta nykyisten kaupallisten ledien 150 lm/W:n tasolle n. 17 vuodessa. Kaupalliset huippumallit ylittävät jo 200 lm/W:n rajan ja testiolosuhteissa päästään 276 lm/W:n valotehokkuuteen, joka lähestyy valkoisen valon teoreettisena maksimina pidettyä n. 400 lm/W rajaa. Ledeille valotehokkuuden teoreettinen huippuarvo on n. 300–400 lm/W, joka määräytyy valkoisen valon sisältämän vihreän värin määrästä. [31,32]

Ledien valotehokkuutta rajaa se seikka, että ledissä tuotetusta valosta suurin osa siroaa loisteainekerroksesta ja heijastuu takaisin ledin sisälle ja absorboituu ledin sisärakenteisiin. Ongelmaa on pyritty ratkaisemaan siirtämällä loisteainekerrosta kauemmaksi led-sirusta, jolloin ledin sisäpinnat voidaan valmistaa takaisinheijastuksia hyödyntävästä materiaalista. Samalla etäämmälle siirretty loisteainekerros ei lämpene yhtä paljon kuin led-sirun ympärillä oleva loisteaine, jolloin loisteaineen muunnoshyötysuhde paranee. [31,32,33]

#### 3.4.4 Lämmönhallinta ja elinikä

Ledit ovat muiden elektroniikan puolijohdekomponenttien lailla lämpötilariippuvaisia. Ympäristön lämpötila vaikuttaa suuresti ledin suorituskykyyn. Suurin syy valaistukseen käytettyjen ledien toimimattomuuteen on huono lämmönhallinta. Puutteellinen lämmönhallinta kuumentaa led-sirua, tarkemmin pn-liitosta, turhaan, joka vähentää valontuottoa sekä lyhentää ledin elinikää huomattavasti ja voi jopa johtaa ledin toimimattomuuteen. Valmistajan ilmoittaman virrankestoisuuden ylitys johtaa hetkelliseen valontuoton nousuun, mutta nostaa pn-liitoksen toimintalämpötilaa ja siten lyhentää ledin elinikää. Tämän takia hyvä lämmönhallinta on kriittinen osa led-valaisimen suunnittelua. [28,30,35]

Nykyiset teholedit pystyvät muuttamaan n. 40 % käytetystä sähköenergiasta näkyväksi valoksi, jolloin n. 60 % energiasta muuttuu lämmöksi. Tämä tuotettu lämpö on johdettava ledin rajapinnasta ympäröivään ilmaan kotelon, piirilevyn

sekä valaisinrakenteiden välityksellä. Perinteisiin valonlähteisiin verrattuna (esim. hehkulamppu yli 2 500 °C) ledin maksimi toimintalämpötila on suhteessa matala n. 100 °C. Tällöin huoneen lämmössä (20–25 °C) ledin maksimitoimintalämpötilan ja ympäristön lämpötilan ero on hyvin pieni, jolloin lämmön siirtyminen johtumalla on myös hitaampaa. Koska lämpötilaeroon on vaikea, jollei mahdotonta vaikuttaa, voidaan lämmön siirtymistä parantaa suuremmalla jäähdytyspinta-alalla sekä valitsemalla hyvin lämpöä johtavia materiaaleja. Jäähdytykseen vaikuttaa myös ledin juotosprosessin laatu. Ilmakuplat juotoksessa heikentävät lämmön johtumista piirilevyyn. Myös liika juote juotostäplien ja ledin jalkojen välissä heikentää lämmön johtumista, koska ledin ja piirilevyn väliin jää ilmarako. Passiivisen jäähdytyksen ollessa riittämätön voidaan suuritehoisten valaisimien jäähdytykseen käyttää ns. aktiivista jäähdytysjärjestelmää, kuten tuulettimia sekä pumppuja yhdistettynä jäähdytyslementteihin. Tämä toisaalta kuluttaa lisää energiaa ja vaatii suuremman tilan valaisimessa. [28,30]

Vertailun vuoksi, hehkulamppu pystyy muuntamaan ottamastaan sähköenergiasta n. 8 % näkyväksi valoksi ja loput muuttuu lämmöksi. Loistelamppu muuntaa ottamastaan sähköenergiasta n. 21 % näkyväksi valoksi, mutta säteilee samalla myös UV- ja IP-säteilyä. [28]

Perinteisten valonlähteiden (hehkulankalamput, loistelamput) elinikä määritetään B50-standardilla. Valonlähteen elinikä on se aika, jossa puolet testivalonlähdejoukosta ovat hajonneet. Hehkulankalamput tyypillisesti menettävät n. 1 000 h:n elinikänsä aikana n. 10–15 % lähtötilanteen valovirrastaan. Hehkulanka höyrystyy ajan myötä ja volframahiukkaset kerääntyvät lampun seinämiin heikentäen hyötyvalon määrää. Loistelamppujen valovirran alenema johtuu lampun omasta hyvin lyhytaaltoisesta (n. 185 nm) UV-säteilystä, joka ajan saatossa vahingoittaa loisteainetta. Pienloistelamput menettävät 10 000 h:n elinikänsä aikana n. 20 % lähtötilanteen valovirrastaan. Korkealuokkaiset loistelamput (T5 ja T8) menettävät vain n. 5 % valovirrastaan 20 000 h:n elinikänsä aikana. [27,35]

B50-standardi ei kuitenkaan soveltunut sellaisenaan ledeille. Ajansaatossa ledit eivät välttämättä hajoa, kuten esim. hehkulamput, vaan ledin vanhetessa sen

valontuotto laskee. Tätä varten on kehitelty L70-B50-standardi, jossa valonlähteen elinikä mitataan ajasta, jossa puolella testijoukon valonlähteistä on jäljellä 70 %:a lähtötilanteen valovirrasta eli toisin sanoen valonlähteet ovat kärsineet 30 %:n valovirran aleneman. Ledeille on myös kehitelty LM-80-08 ja TM-21-11 standardit, jotka ovat IESNA:n (Illuminating Engineering Society of North America) hyväksymiä menetelmiä. LM-80-08-testissä lediä ajetaan annetulla virralla yli 6 000 h, johon sisältyy jaksottaiset mittaukset. Testin aikana ledin valovirtaa mitataan kolmessa eri ledin kotelon lämpötilassa: 55 °C, 85 °C sekä yhdessä valmistajan valitsemassa lämpötilassa. TM-21-11-menetelmällä ennustetaan ledin elinikää interpoloimalla LM-80-08-testin tuloksia. Ennustukset voivat olla korkeintaan 6-kertaisia LM-80-testin pituuteen nähden, jolloin ennustuksen ja ilmoitetun eliniän välillä saattaa olla eroa. [27,36]

Ledien eliniät vaihtelevat suuresti. Useimmat valmistajat ilmoittavat teholedeilleen 30 000 h:n elinikää, joka saavutetaan tasaisella 350 mA:n virralla sekä rajapinnan lämpötilan pysyessä alle 90 °C:ssa. Kokoajan kehittyvä ledien lämmönhallinta mahdollistaa jopa 50 000 h:n eliniän ledille, jota ajetaan yli 700 mA:n virralla ja sen rajapinnan toimintalämpötila ylittää 100 °C. Osalle ledeistä ilmoitetaan eliniäksi 100 000 h, joka kuitenkin vaatii erittäin optimaaliset käyttöolosuhteet sekä tasaisen virransyötön. [35]

### 3.4.5 Hinta ja markkinaosuus

Led-teknologiaa voidaan pitää uutena ja nopeasti kehittyvänä valaistustekniikkana, jolta odotetaan edelleen merkittävää taloudellista nousua lähivuosina. Valaistuksen maailmanlaajuisesta markkinaosuudesta vuonna 2012 ledien osuus oli n. 10 %. Ledien markkinaosuuden odotetaan kasvavan 25 %:iin vuonna 2014 ja 80 %:iin vuoteen 2020 mennessä. Led-tekniikan kehittyessä ja kilpailun kasvaessa valmistajat haluavat myyntimäärien kasvavan, jolloin ledien hinta kuluttajille laskee. Pääasiallisena suuntana on parantaa ledien valontuottoa, jotta yhteen led-valaistustuotteeseen käytetään mahdollisimman vähän led-

siruja. Koteloidun ledin hinta vuonna 2013 oli 0,41 USD ja hinnan ennustetaan laskevan edelleen vuonna 2016 0,25 USD ja vuonna 2018 0,19 USD. [37,38]

### 3.5 Ledien tulevaisuus

Ensimmäisiä kvanttipisteillä toteutettuja led-valaisimia on jo markkinoilla. Kvanttipisteillä päällystetyllä sinisellä ledillä päästään n. 5-kertaiseen valonmäärään sähköwattia kohden verrattuna hehkulamppuun. Kvanttipisteet ovat pieniä puolijohdepartikkeleita, joiden halkaisijat ovat nanometriluokkaa. Tekniikan ehdoton etu valaistuksen kannalta on se, että tuotetun valon väri määräytyy kvanttipisteen koon mukaan eikä riipu käytetystä puolijohdemateriaalista. Pienemmällä pisteen koolla lähestytään sinistä spektrin päätyä ja suuremmalla pisteen koolla saadaan tuotettua punaista valoa. Näin ollen tekniikalla on mahdollista tuottaa valkoisia ledejä, joiden värintoisto on erinomainen. Kalliin hintansa takia tekniikka ei ole kovinkaan yleinen toistaiseksi. [39,40]

## 4 LED-NAUHAT

Tässä luvussa käsitellään led-nauhojen ominaisuuksia ja käyttökohteita. Led-nauhat ovat pienikokoisia sekä soveltuvat kohteisiin, jossa ei ole saatavilla verkkovirtaa, kuten ajoneuvot ja veneet. Led-nauhojen valaistusvoimakkuus ja valotehokkuus riippuvat pitkälti käytetyistä led-komponenteista sekä virtalähteen hyötysuhteesta.

### 4.1 Led-nauhojen rakenne ja valmistus

Led-nauha valmistetaan muovikalvolle, joka toimii led-nauhan runkona. Muovikalvon päälipuolelle painetaan tai höyrystetään johdinvedot tai foliot sekä liimataan juotospisteet. Pintaliitosledit sekä muut tarvittavat komponentit, kuten etuvastukset juotetaan aaltojuotoksella. Nauha juotetaan 10 x 50 cm:n mittaisista nauhoista, jolloin lopputuloksena syntyy 5 m:n led-nauha. Juotosprosessissa syntyy riski heikentää folion kestävyyttä (kylmäjuotos, liian kuuma juotosprosessi), jolloin folio tai juotoskohta saattaa murtua. Kalvon pohjapuolelle liimataan kaksipuolinen teippi, joka toimii led-nauhan kiinnikkeenä asennuksessa. Nauhalle suoritetaan lopputestaus ja lopuksi se rullataan kelalle. [45]

### 4.2 Kotelot

Led-nauhojen valotekniset ominaisuudet riippuvat pitkälti käytetyistä led-komponenteista ja niiden ryhmittelystä. Led-nauhoissa käytetyt pintaliitosledit ovat tyypillisesti koteloituja led-siruja. Kotelot täytetään yleensä hartsilla tai silikonilla, jälkimmäisen ollessa halvempi vaihtoehto, mutta omaa heikomman lämmönjohtavuuden. Koteloinnin etuina voidaan pitää yksikertaisempien sähköisten kytkentöjen mahdollistaminen suunnittelu- ja kokoonpanovaiheissa sekä toimia fyysisenä suojana led-siruille. Nauhoissa käytettyjen pintaliitosledien yleisimmät kotelokoot ovat 3528 ja 5050. Kotelon tyyppimerkintä kertoo sen ulkomitat, esim. 3528-kotelon leveys on 3,5 mm ja pituus 2,8 mm. Näiden kahden ko-

telotyypin erona, fyysisen koon lisäksi, on käytettyjen led-sirujen eli ns. chipien määrä yhtä koteloa kohden. 3528-kotelossa on yksi led-siru, jonka ansiosta se kuluttaa vähemmän energiaa sekä on tyypillisesti hinnaltaan edullisempi kuin 5050-kotelot. Toisaalta 3528-kotelaisen led-nauhan valontuotto ei ole kovinkaan korkea, tyypillisesti n. 200–300 lm/m, joka vastaa alle 5 W/m kulutusta. 5050-kotelossa on kolme led-sirua, jotka mahdollistavat RGB-ledien valmistamisen sekä yksivärisinä suuremman valontuoton, jopa yli 1000 lm/m, jolloin nauha kuluttaa sähkötehoa yli 14 W/m. Led-nauhojen valontuotto ja sähköteho riippuu myös led-komponenttien lukumäärästä metriä kohden. Yleisimmät lukumäärät ovat 30 kpl/m ja 60 kpl/m, jolloin 5 m:n led-nauhassa voi parhaimmillaan olla 300 kpl led-komponentteja. Led-nauhat myydään usein 5 m:n rullissa, mutta tekniset tiedot tai hinta saatetaan ilmoittaa yhtä metriä kohden, jolloin sekaannusten vaara on suuri. [41,42]

#### 4.3 Laatu ja suunnittelu

Ledit ovat vain pieni osa led-valaisimien kokonaisuutta ja siksi vaikuttavat vain osittain koko tuotteen laatuun. Lopputuotteen suorituskykyyn, laatuun ja elinikään vaikuttavat myös piirilevy, optiikka, diffuusori, virran ja jännitteen syöttö, lämpönielut sekä valaisimen mekaaniset osat. Tästä syystä led-valaisimien mitaus ja arviointi on haastavaa, ja suunnittelussa on paljon huomioon otettavaa perinteisiin valonlähteisiin verrattuna. [30]

Led-nauhan valotehokkuus kertoo paljon valaisimen laadusta, koska siihen vaikuttavat ledin sähköiset, fotometriset, optiset ja lämpöominaisuudet. Suuri valontuotto ei takaa, että koko valaisimen tehokkuus olisi korkea johtuen esim. merkittävistä optisista häviöistä tai teholähteen huonosta hyötysuhteesta. [30]

Led-nauhojen lämmönhallinta kulminoituu ledin rajapintalämpötilan hallintaan, johon suurimmaksi osaksi vaikuttavat mekaaniset ratkaisut ledin ja piirilevyn välillä. Alumiiniset asennusprofiilit auttavat lämmön siirtymistä ympäristöön ja mahdollistavat valoa hajauttavien suojakansien käytön. [30]

Led-nauhoja valmistetaan tyypillisesti kahdella eri käyttöjännitteellä 12 V ja 24 V. Käyttöjännitteen valintaan vaikuttaa sähkönsyötön pituus teholähteestä led-nauhalle sekä led-nauhan sähkötehon suuruus. Pitkillä johtovedoilla sekä suurilla tehoilla siirrettäessä 24 V:n järjestelmällä voidaan led-nauhan kuluttama virta puolittaa ja siten pienentää nauhassa ja sähkönsiirrossa tapahtuvia tehohäviöitä. Matalammalla virralla sekä piirin resistanssin pysyessä samana tapahtuu piirissä pienempi jännitehäviö ja siten pienempi tehohäviö. Led-nauhojen häviöllisyydestä johtuen, nauhan loppupään ledien virta, jännite ja valomäärä ovat pienempiä, kuin syöttöpään ledien. Häviöiden suuruuteen vaikuttaa myös johdinmateriaali sekä sen paksuus ja leveys, kuten riittävän paksu ja leveä kerros kuparia. [44]

#### 4.4 Käyttökohteet

Erilaisten led-nauhojen kirjo on valtava ja ne soveltuvat moneen eri valaistuskohteeseen ja -tarkoitukseen. Led-nauhojen IP-luokitukset alkavat kuivan sisätilan IP20 luokasta ja ovat saatavilla aina ulko- ja märkätiloihin soveltuvaan IP68 luokkaan asti. Led-nauhat ovat kevyitä sekä niistä voidaan tehdä 5 cm:n tai 10 cm:n tarkkuudella sopivan mittaisia käyttökohteen mukaan, jolloin niiden piilottaminen helpottuu tai vastaavasti mahdollistavat ahtaiden kohteiden asennukset, esimerkkinä kalusteiden sokkelit tai jalkalistat. RGB-led-nauhaan voidaan yhdistää kauko-ohjainyksikkö, jolloin valojen kirkkautta sekä eri värejä voidaan säätää langattomasti kauko-ohjaimella. [42,43]

## 5 TOIMEKSIANTO

Asiakas huomasi muuton jälkeen uuden asuntonsa keittiön sekä eteisen vaatekaapin valaistuksien olevan riittämättömät. Asiakas on vuonna 1958 syntynyt nainen, joka on huomannut tarvitsevansa enemmän valo lukemiseen ja päivittäisten askareiden suorittamiseen. Asiakas näkee lukea normaalia tekstiä ilman silmälaseja päivänvalossa tai riittävässä valaistuksessa.

Ihmisen vanhetessa silmän valon tarve kasvaa. Syinä pidetään mm. silmälinssin kellastumista vanhetessa sekä pupillin koon pienenemistä. Ikääntymisen seurauksena suurimpana tekijänä kasvavan valontarpeen aiheuttaa kuitenkin se, että silmän optisen järjestelmän läpi kulkeva valo alkaa hajaantua enemmän. Lisäksi iän lisääntyessä valon absorptio silmässä kasvaa enemmän lyhyemmällä aallonpituuksilla kuin pidemmällä aallonpituuksilla. Näin ollen vanhempi henkilö ( $\geq 50$ -vuotias) näkee keltaiset ja punaiset värit lähes yhtä hyvin kuin nuorempi henkilö, (20 – 30-vuotias) mutta heikommin violettien ja sinisten värien osalta.[3]

Taulukossa 2. on esitetty eri-ikäisten ihmisten suhteelliset valontarpeet. Taulukon arvoissa ei ole otettu huomioon sitä, että valontarpeen ero pienenee vanhemman ja nuoremman henkilön välillä valaistusvoimakkuuden kasvaessa esim. 60-vuotiaan ja 20-vuotiaan henkilön valontarpeen ero pienenee 20 %:iin, kun valaistusvoimakkuustaso on n. 1000 lx. [3]

Taulukko 2. Eri-ikäisten ihmisten valontarpeet hyvin painetun tekstin lukemisessa.[3]

| Ikä                     | 10 v | 20 v | 30 v | 40 v | 50 v | 60 v |
|-------------------------|------|------|------|------|------|------|
| Suhteellinen valontarve | 1/3  | 1/2  | 2/3  | 1    | 2    | 6    |

Keittiön alkuperäinen valaistus käsitti seuraavat valaisimet:

- työtaso, välitila: 39 cm:n loisteputkivalaisin 11 W:n loisteputkella (G5/T5)



- työtaso, välitila: 63 cm:n loisteputkivalaisin 18 W:n loisteputkella (G13/T8)
- liesituulettimessa 2 x 25 W:n hehkulamput
- työtaso lasikaapin alla 63 cm:n loisteputkivalaisin 18 W:n loisteputkella (G13/T8)
- ruokailupöydän yläpuolella kattovalaisin 15 W:n pienloistelampulla.

Kuvassa 7 olevan välitilan työtaso oli mitoiltaan 3 200 mm x 570 mm. Välitilan korkeus työtasosta yläkaappien pohjaan oli 470 mm. Välitilan taustan sekä työtason pintamateriaalina oli Ylämaan ruskeaa kiillotettua graniittia. Kuvassa 8 on lasikaapin alla oleva työtaso, jonka pintamateriaalina oli lakattu tammi, ja joka on mitoiltaan 1 880 mm x 350 mm. Keittiön kaikki seinäpinnat sekä katto oli maalattu valkoisiksi.



Kuva 7. Keittiön välitilan alkuperäinen valaistus.



Kuva 8. Keittiön lasikaapin työtason alkuperäinen valaistus.

Asiakkaalla oli seuraavia toiveita ja vaatimuksia valaistuksen suhteen:

- Keittiön työtasojen valaistusvoimakkuus tulee olla riittävä (+500 lx).
- Keittiön valaisimet eivät saa näkyä normaalissa käytössä.
- Valaisimet eivät saa häikäistä normaalissa käytössä.
- Työtason pinnalle ei saa muodostua pistemäisiä valoalueita.
- Valaisimien on oltava energiatehokkaita.
- Valaisimia on voitava muuttaa tai jatkaa tulevaisuudessa.
- Valaisimien tuottama valo ei saa olla kellertävää tai sinertävää.
- Keittiön yläkaappien päälle on saatava epäsuoraa valoa tuottavia valaisimia.

Eteisen vaatekaapissa ei ollut alkuperäistä valaistusta. Vaatekaapin vaatimukset eivät ole valaistusvoimakkuudeltaan yhtä kriittiset kuin keittiön työvalaistus. Vaatekaapin valaistus ei kuitenkaan saa häikäistä, eikä viedä liikaa tilaa säilytystilalta. Seuraavassa luvussa pyritään löytämään sopivat ja kriteerit täyttävät valaisinratkaisut keittiöön ja eteisen vaatekaappiin.

## 6 SUUNNITTELU

Asiakkaan toiveet ja vaatimukset valaisimien suhteen tekivät tehtävästä haasteellisen, mutta osaltaan myös helpottivat valaisimien valinnassa sulkemalla pois osan perinteisistä valaisinratkaisuista. Lähtökohtaisesti valaisimien päivitykseen ryhdyttiin riittämättömän valaistusvoimakkuuden takia. Valaisimien haluttu värilämpötila (n. 4 000–4 500 K) sekä tasaisen valon lankeaminen työtasolle sulki pois useita valaisinvaihtoehtoja. Varsinaista standardia kotitalouksien valaistusvoimakkuudelle ei ole, vaan arvot perustuvat suosituksiin ja ohjearvoihin. Yleisenä ohjesääntönä keittiön työtasoille voidaan pitää 500–750 lx:n valaistusvoimakkuutta. Tämä saavutetaan 10–15 W/m<sup>2</sup> loisteputkitecholla. [3,4]

Keittiön työtasojen valaisuun suositellaan viivamaisia valaisimia, koska usein, kuten tämän työn tapauksessa, työtasot ovat suorakaiteen mallisia, jolloin valo saadaan lankeamaan mahdollisimman tasaisesti työtason pinnalle sekä valaisimen tuottama valo saadaan kohdistettua mahdollisimman tehokkaasti valaistavalle alueelle. Mahdollisia viivamaisia valaisimia ovat loisteputkivalaisimet, led-nauhat sekä kylmäkatodi. [23]

### Hehkulankalamput

EU:n komissio kielsi vuonna 2009 asetuksessa energiatehokkuudeltaan huoneiden kotitalouslamppujen valmistamisen ja maahantuonnin vaiheittain EU:n alueella. Tällä hetkellä kiello koskee kaikkia yli 7 W:n hekulamppuja, pois lukien erikoislamput, joiden pakkauksissa ja tuotetiedoissa tulee ilmoittaa lampun käyttötarkoitus ja se, ettei se sovi kotitalouden huonevalaistukseen. Vastaavasti halogeenilamppuja koskeva kiello tulee voimaan vuonna 2016. [15]

Termisten säteilijöiden eli lämpöliikesäteilijöiden tuottaman valon intensiteetti on verrannollinen säteilijän lämpötilaan. Esimerkiksi hekulamppu on terminen säteilijä. Hekulampun hekulankaan johdetaan sähkövirtaa, joka kuumentaa langan hekuvaksi ja täten tuottaa valoa. Hekulangan lämpötila on n. 2 900 K, jolloin säteilyeksitanssin maksimin aallonpituus on n. 1 µm eli infrapuna-

alueella. Hehkulampun tuottama säteily sisältää siis paljon infrapunasäteilyä, punaista sekä keltaista valoa, eikä juuri lainkaan sinistä tai vihreää valoa. Jotta hehkulampun huonoa valotehokkuutta pystyttäisiin parantamaan, hehkulangan lämpötilaa tulisi nostaa, jolloin säteilyeksitaanssin maksimi siirtyisi spektrissä näkyvän valon alueelle. Tämä kuitenkin vaatisi yli 4 000 K lämpötiloja, joka ylittäisi hehkulankana käytetyn volframin sulamispisteen (n. 3 683 K). [4]

Halogeenilamppujen valotehokkuus riippuu käytetystä jännitteestä sekä lampun nimellistehosta esim. 230 V/60 W–250 W lamput valotehokkuus on 14–17 lm/W ja 12 V/20 W–65 W = 25 lm/W. Halogeenilamppujen värielämpötila oli liian lämmin ( $T = 3\,000\text{ K}$ ) asiakkaan mielestä käytettäväksi työtilojen valaisuun. Halogeenilampuilla on kuitenkin erinomainen värintoisto  $R_a = 100$ . Lisäksi valaistus halogeenilampuilla on hankala tehdä lankeamaan tasaisesti työtilalle. Asennettaessa halogeenilamput yläkaappien pohjaan ne lämmittävät kaappien pohjaa, jolloin kaapit eivät sovellu herkkien elintarvikkeiden säilytykseen. [8]

## Loistelamput

Perinteinen ja paljon käytetty keittiön tasojen valaistusratkaisu ovat olleet loistelamput ja etenkin loisteputkivalaisimet. Kaksikantaloisteputkien valotehokkuus (tyypillisesti n. 70–100 lm/W) sekä viivamainen rakenne mahdollistaa tasojen tarkoituksen mukaisen valaisun. Loisteputkia on saatavilla monta eri värielämpötilaa (2 700–8 000 K) ja niiden värintoistoindeksi  $R_a = 80$ –89. Loisteputkilla on myös pitkä elinikä n. 20 000 h sekä nykyisin myös niiden valovirran alenemakerroin on n. 90 %. Loisteputkivalaisimia on saatavilla monta eri versiota esim. pistorasiallisia malleja sekä erilaisia kupuja häikäisynestoon.

Toisaalta loisteputkivalaisimet ovat suhteessa esim. led-nauhoihin varsin kookkaita. Tyypillisen G13/T8 (18 W) loisteputkivalaisimen korkeus on 80 mm ja leveys 70 mm. Valaisimen pituus riippuu käytetyn loisteputken pituudesta. Lisäksi loistelamput sisältävät pienen määrän elohopeaa, minkä takia ne luokitellaan

ongelmajätteeksi. Loistelamppujen kehitys on hidastunut ledeihin nähden, joka tekee ledeistä todennäköisimmän valaisutekniikan tulevaisuudessa.

### **Led-nauhat**

Led-nauhojen käyttöä uuden valaistuksen toteutukseen oli harkittu työn alusta asti. Eniten led-nauhoissa askarrutti se, miten tasaisesti valon saa lankeamaan työtasolle sekä onko saatavilla kohtuullisen hintaista ja valotuotoltaan riittävää led-nauhaa. Led-nauha täyttää muutoin hyvin asiakkaan vaatimukset sekä toiveet. Vaikka led-nauha asennetaan asennusprofiiliin, on sen koko hyvin pieni muihin vaihtoehtoihin nähden. Pieni koko auttaa piilottamaan valaisimen esim. kaapistojen häikäisysojan taakse, jotta valaisin ei normaali käytössä näy eikä häiritsevää häikäisyä pääse tapahtumaan.

Asiakkaalla oli tulevaisuudessa tarkoituksena muuttaa ja remontoida osaa keittiön kaapeista, jolloin nyt tehtävässä valaisinpäivityksessä tulee huomioida, miten hyvin valaisimien pituutta tai paikkaa voidaan muuttaa. Tästä syystä led-nauhat olivat järkevä toteutustapa työn puitteissa.

### **Alkuperäisten valaisimien valaistusvoimakkuusmittaus**

Keittiön työtasoille suoritettiin valaistusvoimakkuusmittaus alkuperäisillä sekä uudistetuilla valaisimilla. Kohde oli asumiskäytössä, jolloin tilaa ei voitu täysin suojata ulkopuolisilta valonlähteiltä ja siksi absoluuttisiin mittatarkkuuksiin ei päästy. Valaistusvoimakkuusmittauksien pääasiallinen idea oli saada havainnollistavia kuvioita alkuperäisen ja uudistetun valaistuksen eron sekä valaistusvoimakkuusprofiilien suhteen. Uudistetun valaistuksen valaistusvoimakkuusmittaukset ovat luvussa 8.

Keittiön työtasojen valaistusvoimakkuusmittauksessa käytettiin Onnline I DT-1308-valaistusvoimakkuusmittaria eli luksimittaria. Mittarin valotunnistimen piistä valmistetussa valodiodissa oli täysi kosinikorjaus epäsuoralle valolle sekä spektrivastesuodatin (värikorjaus). Valotunnistimen valodiodin spektrivas-

tesuodatin täyttää CIE:n fotooppisen taajuusvasteen, joka vastaa parhaiten ihmisen silmän vastekäyrää jokapäiväisillä valaistusvoimakkuuksilla. Valotunnistimen kosinikorjaimella pystytään korjaamaan kosinilain mukaisesti syntyvää mittausvirhettä tunnistimeen tulevan epäsuoran valon osalta. Käytännön kosinikorjain toteutetaan valoa hajauttavalla diffuusorilla, joka asennetaan tunnistimen ja spektrivastesuotimen päälle. Korjaus ei ole ideaali varsinkaan tilanteissa, joissa suurin osa valosta tulee tunnistimeen suuressa kulmassa. [3,4,9]

Työssä käytetyn valaistuvoimakkuusmittarin tekniset tiedot ovat seuraavat:

- mittausalueet: 40,00 lx, 400,0 lx, 4000 lx, 40,00 klx ja 300,0 klux
- spektrin tarkkuus: CIE  $V(\lambda)$  funktio  $f1' \leq 6 \%$
- kosinivaste:  $f2' \leq 2 \%$
- tarkkuus:  $\pm 5 \%$  näytön lukemasta,  $\pm 0,5 \%$  mittausalueesta
- toistettavuus:  $\pm 3 \%$
- tunnistimen toimintaetäisyys: 150 cm (noin).

Täyden kosinikorjaimen korjausalue käsittää valotunnistimen yläpuolisen pallopuoliskon. Usein mainitaan tulokulman ja pinnan normaalin välinen kulma eli täyteen kosinikorjaukseen vaaditaan  $90^\circ$ :n korjauskulma. Huomion arvoista on, että mittausvirhe alkaa kasvaa suurilla kulmilla, jolloin alkaa tapahtua ylikompensaatiota. Korjaamattomaan mittariin alkaa syntyä huomattavaa kosinivirhettä, n.  $-10 \%$ , kun valon tulokulma  $\alpha \approx 60^\circ$ . Kun tulokulma  $\alpha \approx 70^\circ$ , virhe kasvaa  $-20 \%$ :iin. [3,4,9,24]

Välitilan alkuperäisen valaistuksen riittävyyttä voidaan arvioida puhtaasti laskennallisesti. Loistelampputeho neliometriä kohden saadaan laskemalla loisteputkivalaisimien kokonaistehon suhde valaistavan kohteen pinta-alasta.

$$\frac{11 W + 18 W}{3\,200\text{ mm} + 570\text{ mm}} = \frac{29 W}{1,8\text{ m}^2} = 16,1 \frac{W}{\text{m}^2}.$$

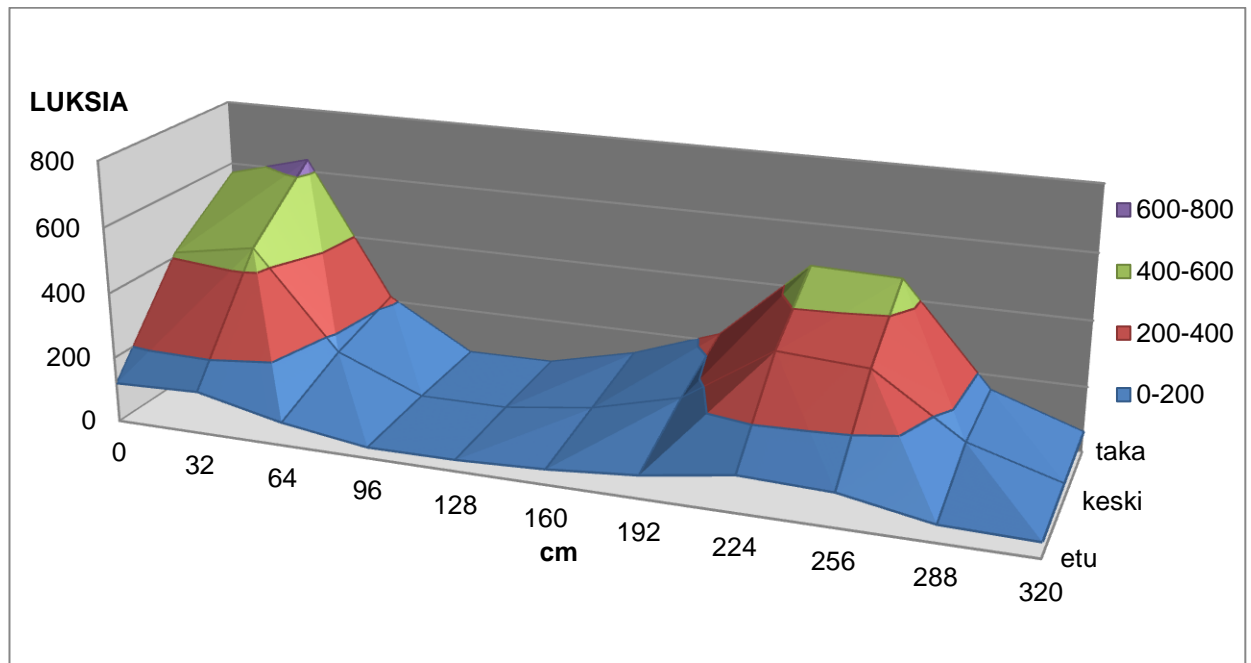
Laskennallisesti työtason alkuperäiset valaisimet riittivät hyvin valaisemaan keittiön välitilan työtason. Kuitenkin pelkkä silmämääräinen tarkastelu riitti kertomaan, ettei valo lankea työtasolle tasaisesti ja suurin osa pinnasta oli varsin

hämärä. Alkuperäisten loisteputkivalaisimien suojakuvut olivat pahasti kellertyneet, jotka vääristivät valon väriä sekä heikensivät hyötyvalon määrää.

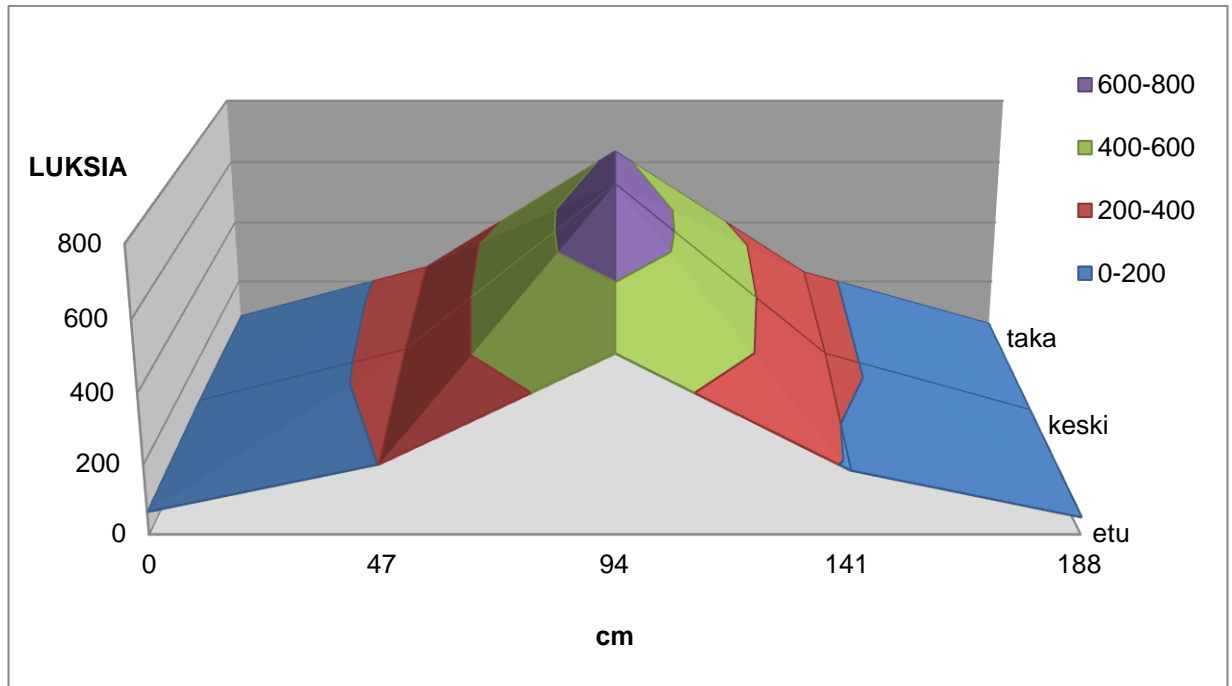
Keittiön välitilan alkuperäiselle valaistukselle tehdyssä valovoimakkuusmittauksessa käytettiin seuraavia valaisimia:

- tiskialtaan yläpuolella 11 W / 39 cm:n loisteputkivalaisinta
- liesituulettimen ja ikkunan välisen kaapiston alapuolella 18 W / 63 cm:n loisteputkivalaisinta.

Välitilan valaistusvoimakkuusmittaukseen valitut mittauspisteet jaettiin tasaisesti koko työtason alalle kuvion 1 mukaisesti. Välitilan työtason mittauksessa oli yhteensä 33 mittauspistettä, jotka jakaantuivat 32 cm:n välein leveys-suunnassa sekä kolmeen eri linjaan syvyysuunnassa (etu-, keski- ja taka-osa). Mittauspisteiden keskiarvoksi tuli 184,5 lx. Mittauspisteiden huippu- ja minimiarvot olivat 637 lx ja 33 lx.



Kuvio 1. Keittiön välitilan valaistusvoimakkuusprofiili alkuperäisellä valaistuksella.



Kuvio 2. Lasikaapin työtason valaistusvoimakkuusprofiili alkuperäisellä valaistuksella.

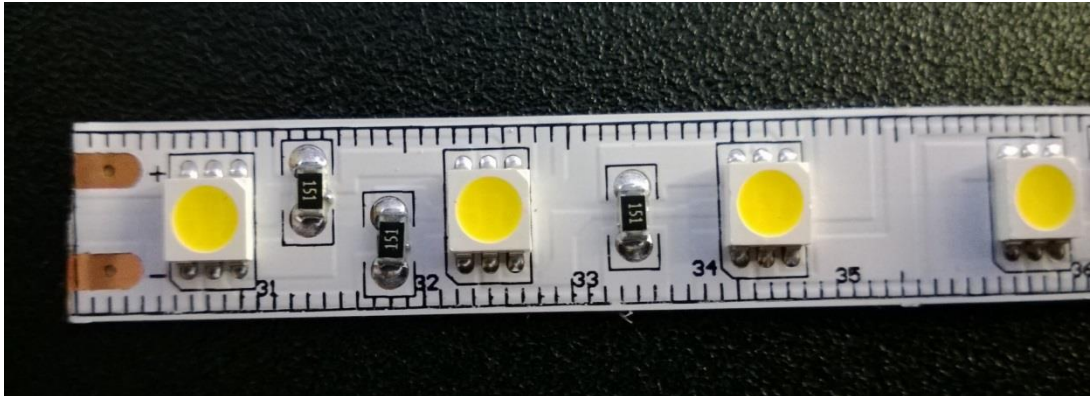
Lasikaapin työtason valaistusvoimakkuusmittaus suoritettiin myös niin, että mittauspisteet on jaettu tasavälein. Lasikaapin työtason mittapisteitä oli 15. Mittauspisteiden keskiarvo oli 240 lx sekä huippu- ja minimiarvot olivat 741 lx ja 49 lx.

Mittauksia tehtäessä keittiön ikkunakaihtimet olivat kiinni. Mittausajankohdaksi päätettiin valita klo 12 päivällä ja puolipilvinen sää, jotta ulkopuoliset tekijät vaikuttaisivat mahdollisimman vähän mittaustuloksiin ja myös mittaustulokset olisivat mahdollisimman vertailukelpoiset olosuhteisiin nähden. Kuviosta 1 voidaan todeta, että valo jakaantuu hyvin epätasaisesti viivamaisista valaisimista huolimatta ja että ohjesäännön valaistusvoimakkuuksiin päästiin vain muutamassa mittauspisteessä. Lasikaapin työtason valaistusvoimakkuusprofiili (kuvio 2) painottuu voimakkaasti keskelle, jossa valaistusvoimakkuus oli suurimmillaan 741 lx, ja työtason reunoilla valaistusvoimakkuus oli n. 50 lx, jolloin koko työtaso ei tule valaistuksi kunnolla.

Asiakkaalle tehdyssä ehdotelmassa esitettiin keittiön työtasoille sekä eteisen vaatekaappiin kahta värilämmöltään puhtaan valkoista ja valontuotoltaan suurta



led-nauhaa (nauha A ja nauha B). Keittiön kaappien päälle epäsuoraa valoa tuottamaan oli myös kaksi vaihtoehtoa, jotka olivat värilämmöltään lämpimämpiä sekä valontuotoltaan toisia pienempi tehoisia (nauha C ja nauha D).



Kuva 9. Asennuksiin käytettävä led-nauha.

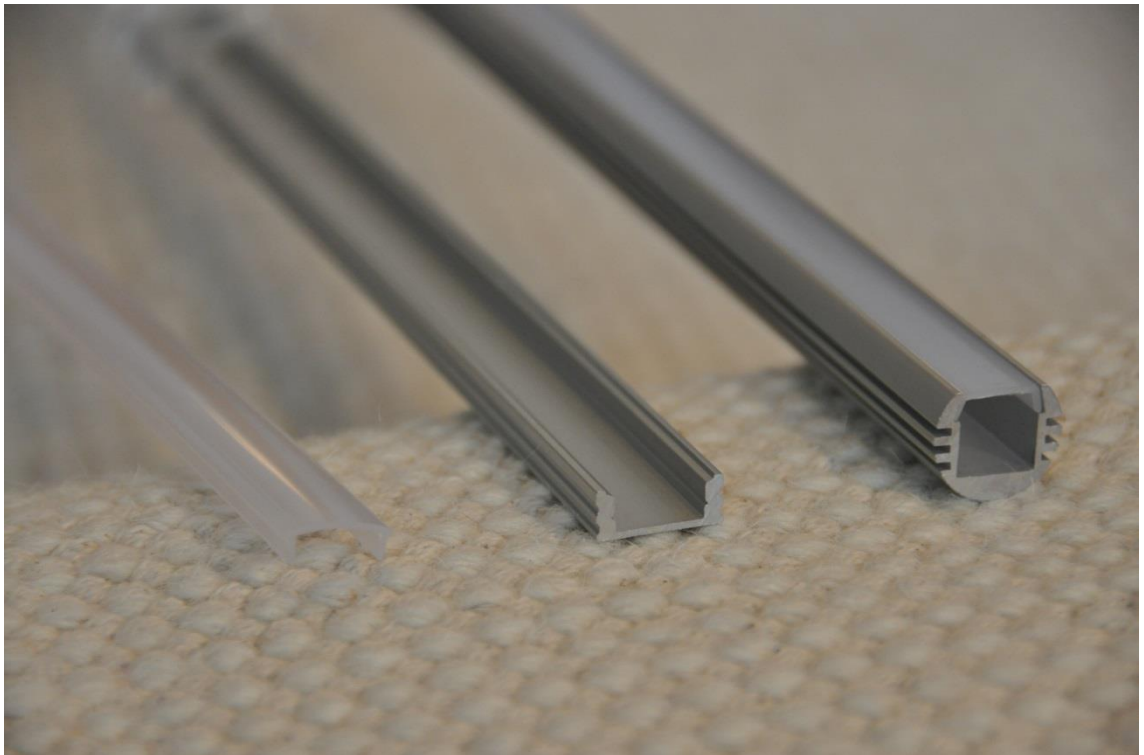
Taulukossa 3 on esitettyjen led-nauhojen myyjän ilmoittamat tekniset tiedot. Nauha C on katkaistavissa 5 cm:n välein, muut nauhat 10 cm:n välein. Asiakas päätyi valitsemaan keittiön työtasoille ja eteisen vaatekaappiin esitetyn tehokkaamman mallin (nauha B, kuva 9) asennettavaksi jokaiseen kohteeseen. Valintaan vaikutti muutama ominaisuus, kuten ryhmän korkein valontuotto sekä ledien lukumäärä, joka edesauttaa tasaisemman valon lankeamista pinnoille. Epäsuoran valon tuottamisessa haluttiin välttää lämpimiä värilämpötiloja.

Taulukko 3. Asiakkaalle esitettyjen led-nauhojen tekniset tiedot.

|                             | Nauha A        | Nauha B       | Nauha C       | Nauha D        |
|-----------------------------|----------------|---------------|---------------|----------------|
| <b>Käyttöjännite [V]</b>    | 24             | 24            | 24            | 24             |
| <b>Sähköteho [W / 5 m]</b>  | 40             | 57            | 18            | 40             |
| <b>Sähköteho [ W / m]</b>   | 8              | 11,4          | 3,6           | 8              |
| <b>Valovirta [lm, lm/m]</b> | 2500 - 2600    | 5200          | 1000 - 1500   | 2000 - 2200    |
| <b>Valovirta [ lm / m]</b>  | 500 - 600      | n. 1040       | 200 - 300     | 400 - 440      |
| <b>Värilämpötila [K]</b>    | 4000 - 4500    | 4000 - 4500   | 3000 - 3500   | 3000 - 3500    |
| <b>Ledien kappalemäärä</b>  | 150 kpl / 5 m  | 300 kpl / 5 m | 300 kpl / 5m  | 150 kpl / 5 m  |
| <b>Aukeamiskulma [°]</b>    | 120            | 120           | -             | 120            |
| <b>Kotelo</b>               | 5050           | 5050          | 3528          | 5050           |
| <b>Elinaikaodote [h]</b>    | 100 000        | 70 000        | 100 000       | 100 000        |
| <b>Hinta</b>                | 129,00 € / 5 m | 169,00 € / 5m | 99,00 € / 5 m | 129,00 € / 5 m |

## 7 TOTEUTUS

Valaisimien asennuksessa pyrittiin maksimoimaan led-nauhojen pituus asennuskohteisiin. Valaisimen pituudessa huomioitiin liitosjohtojen viemä tila, varsinkin ketjutettaessa led-nauhoja, jolloin valaisimen molempiin päihin on jätävä tilaa liitosjohdoilla, pois lukien ketjun viimeinen led-nauha.



Kuva 10. Alumiiniset asennuslistat ja diffuusorikannet.

Led-nauhat kiinnitettiin alumiinisiin asennuslistoihin (kuva 9) led-nauhassa olevalla kaksipuolisella teipillä. Asennuslistoihin sisältyivät ruuvi kiinnikkeet sekä diffuusorikannet, jotka hajuttavat valoa. Alumiinilista toimii samalla jäähdytys elementtinä sekä sen avulla päästään siistiin lopputulokseen. Alumiinilistojen irrottaminen jälkikäteen on myös siistimpää, kuin suoraan teipeillä pintoihin kiinnitettyjen led-nauhojen irrotus, josta saattaa jäädä pysyviäkin vaurioita pintamateriaaleihin. Asennuslistoja hankittiin kahta eri kokoa. Korkeampia listoja käytettiin eteisen vaatekaappiin asennetuissa valaisimissa, joiden tarkoituksena oli ohjata valoa enemmän sekä suojata häikäisyltä.



Kuva 11. Keittiön valaistus led-nauhavalaisimilla toteutettuna.

Keittiön välitilaan sekä kaappien päälle asennettiin kaikkiaan 4 led-nauhavalaisinta. Välitilaan asennettiin 1 400 mm + 600 mm valaisimet ja kaappien päälle asennettiin 2 000 mm + 600 mm valaisimet tuottamaan epäsuoraa valoa. Valaisimien kytkentään käytettiin MMJ 2x2,5 mm<sup>2</sup> asennuskaapelia. Valaisimien syöttö haaroitettiin jakorasiolla kahteen haaraan siten, että 2 000 mm:n valaisin kytkettiin rinnan kolmen muun valaisimen kanssa. Valaisimia syötetään 100 W:n teholähteellä, joka sijoitettiin kuvassa 10 etuvassamalla olevan kaapiston päälle. Valmistajan antamien teknisten tietojen perusteella asennettujen valaisimien ottama kokonaissähköteho voidaan laskea seuraavasti:

$$(2 \text{ m} + 1,4 \text{ m} + 0,6 \text{ m} + 0,6 \text{ m}) \cdot 11,4 \frac{\text{W}}{\text{m}} = 52,4 \text{ W} .$$



Kuva 12. Lasikaapin työtaso led-nauhavalaisimella valaistuna.

Keittiön apupöydän 1 200 mm:n valaisin asennettiin lasikaapin pohjaan 30 W:n teholähteen kanssa. Valaisimen ottama kokonaissähköteho on tällöin

$$1,2 \text{ m} \cdot 11,4 \frac{\text{W}}{\text{m}} = 13,7 \text{ W} .$$

Eteisen vaatekaappiin asennettiin yhteensä 2,7 m led-nauhaa sekä 60 W:n teholähde.

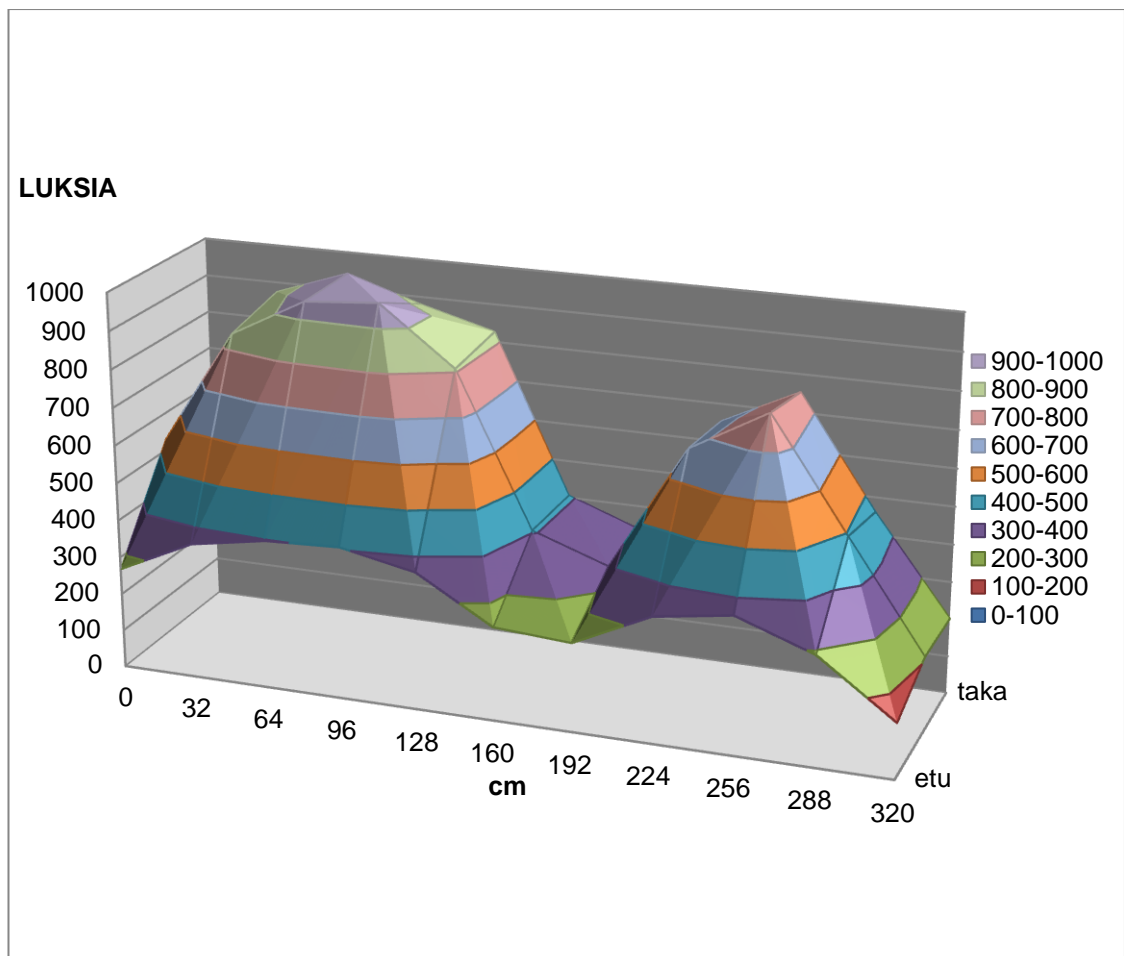
$$2,7 \text{ m} \cdot 11,4 \frac{\text{W}}{\text{m}} = 30,8 \text{ W} .$$

Teholähteet toimivat n. 50 % teholla, jolloin teholähteisiin on mahdollista kytkeä lisää valaisimia tulevaisuudessa.

Valaisimien asennuksessa haasteellisinta oli liitosjohtojen läpivientien tekeminen kalusteisiin sekä paikoillaan olevien valaisimien liitosjohtojen juottaminen toisiinsa.

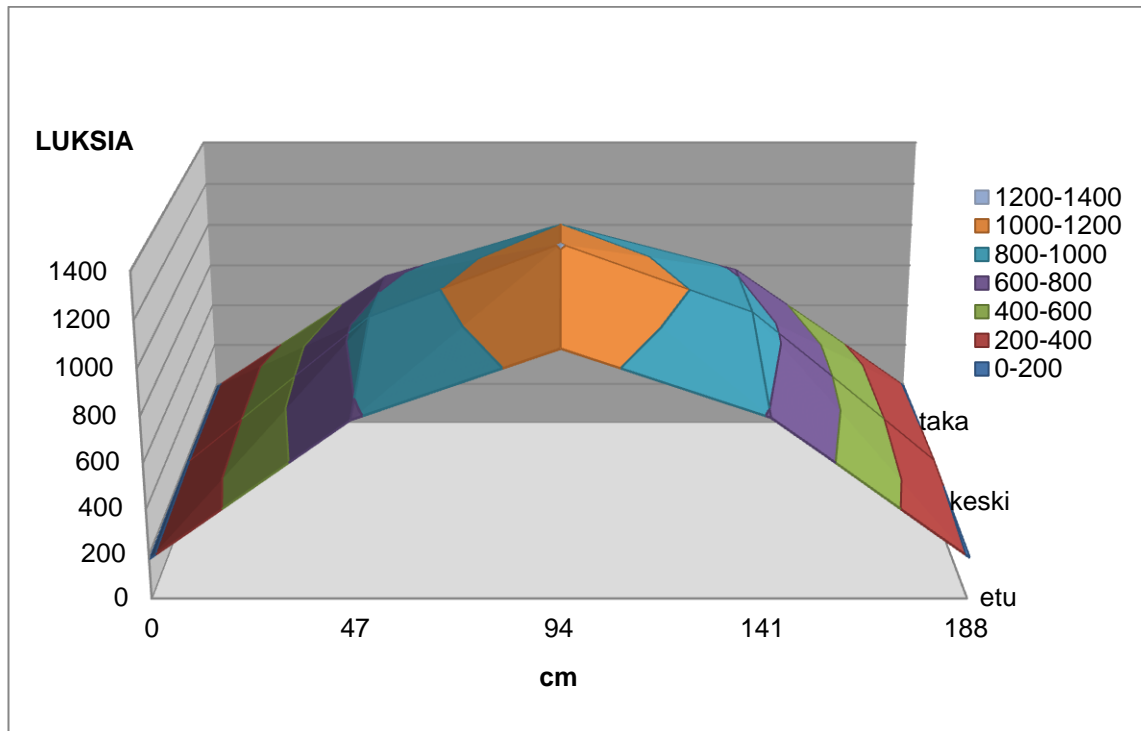
## 8 TULOKSET

Keittiön työtasoille suoritettiin led-nauhavalaisimien asennuksen jälkeen valaistusvoimakkuusmittaukset samalla tavalla kuin alkuperäiselle valaistukselle. Väli-tilan 33 mittauspisteen keskiarvo oli 523 lx sekä huippu- ja minimiarvot olivat 958 lx ja 148 lx (kuvio 3).



Kuvio 3. Väli-tilan työtason valaistusvoimakkuusprofiili led-nauhavalauksella.

Valaistusvoimakkuusprofiilissa (kuvio 3) on huomattavissa hämärä alue 160 ja 192 cm mittauspisteiden välissä. Hämärä alue johtuu liesituulettimesta, jonka valaistukseen ei työn puitteissa vaikutettu. Verrattuna alkuperäiseen valaistukseen, valaistusvoimakkuus nousi keskimäärin n. 280 % sekä valo lankesi tasaisemmin väli-tilan työtasolle.



Kuvio 4. Lasikaapin työtason valaistusvoimakkuusprofiili led-nauhavalaisuksella.

Lasikaapin työtasolle tehty valaistusvoimakkuusmittaus suoritettiin samalla tavalla, kuin alkuperäisille valaisimille tehty mittausta. 15 mittauspisteen keskiarvo oli 619 lx sekä huippu- ja minimiarvot olivat 1207 lx ja 178 lx. Kuvio 4 voidaan todeta profiilin olleen keskipainotteinen, mutta valo lankesi tasaisemmin sekä valaistusvoimakkuus nousi keskimäärin n. 260 % verrattuna alkuperäiseen valaistukseen.



Kuva 13. Eteisen vaatekaappi led-nauhavalaisimilla valaistuna.

Alun perin valaisemattomaan eteisen vaatekaappiin suoritettiin led-nauhavalaisimien asennuksen jälkeen käsivaraisesti valaistusvoimakkuusmittaus. Mittaus suoritettiin käsivaraisesti koska, selkeät mittauspisteet puuttuivat sekä vertailumittausta ei ollut suoritettu. Käsivaraisten mittausten tulos oli henkareiden yläpuolelta n. 1 800 lx ja kenkien päällä n. 70 lx. Kuvasta 12 voidaan kuitenkin todeta kaapin olevan hyvin valaistu.

## 9 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä suunniteltiin ja toteutettiin asiakkaan toiveiden ja vaatimusten mukainen sisävalaistus keittiöön sekä eteisen vaatekaappiin led-nauhoilla. Työ osoitti led-nauhojen potentiaalin työtasovalauksessa sekä niiden soveltuvuuden yleisvalaistukseen. Työssä käytiin läpi myös ledien toimintaa ja niiden tyyppisiä valaistukseen liittyviä ominaisuuksia. Lisäksi katsottiin tarpeelliseksi tuoda lisäselvyyttä valoon ja fotometriaan liittyviin suureisiin ja termeihin.

Uudistetulla valaistuksella parannettiin keittiön työtasojen käyttöä niin työturvallisuuden kuin -mukavuuden osalta sekä lisättiin keittiön yleisvalaistusta. Eteisen vaatekaappiin saatiin lisättyä käyttömukavuutta uudella valaistuksella. Näitä seikkoja vahvistaa asiakkaalta saatu positiivinen palaute työn fyysisen osuuden suorittamisesta sekä lopputuloksesta.

Työssä suoritettavat valaistusvoimakkuusmittaukset eivät ole absoluuttisia tai standardimittausten mukaisesti suoritettuja vaan ainoastaan tuomassa havainnollistavia kuvioita alkuperäisen ja uudistetun valaistuksen suhteen. Toisaalta työssä suoritettujen mittausten tarkkuus riittää hyvin jokapäiväiseen tarkasteluun ja voivat toimia ainakin suuntaa antavina tuloksina esim. led-valaistusta harkitsevalle henkilölle.

Työssä käsiteltiin vain pientä osaa led-tekniikalla toteutetuista valaistusratkaisuista. Työtä voisi jatkaa vertailemalla muita ledeihin perustuvia valonlähteitä ja valaisimia. Toisena suuntana voisi olla syventyminen tiettyyn ominaisuuteen esim. ledien lämmönhallinta, valotehokkuus tai niiden valmistaminen.



## LÄHTEET

- [1] Ikinen, P.; Manninen, R.; Tuohi, J., *Momentti 2 – Insinöörifysiikka*, ISBN 951-1-18457-1, Keuruu: Otava, 2. painos 2006.
- [2] Suomen Standardisoimisliitto SFS ry, *SFS-käsikirja 651-1, Ledit. Osa 1*, ISBN 978-952-242-187-6, Helsinki: SFS, 1. painos 2012-08.
- [3] Ahponen, V., *Valaistuksen laskenta, mittaukset ja huolto, Valaistustekniikka-sarja osa 1*, ISBN 952-9756-23-2, Espoo: Gummerus, 1996.
- [4] Halonen, L.; Lehtovaara, J., *Valaistustekniikka*, ISBN 951-672-145-1, Jyväskylä: Gummerus, 1992.
- [5] Zheludev, N., *The life and times of the LED – a 100-year history*, [pdf-dokumentti], Saatavilla: <http://www.nanophotonics.org.uk/niz/publications/zheludev-2007-ItI.pdf>, (Luettu: 14.10.2013).
- [6] Perälä, R., *Elektroniikka I – Diodit ja transistorit*, ISBN 951-559-192-9, Espoo: KymData, kesäkuu 1995.
- [7] Silvonen, K., *Elektroniikka ja puolijohdekomponentit, Analogia- ja digitaalitekniikka, vahvistimet, tehölähteet, suodattimet, teho- ja tietoliikenne-elektroniikka, piirisimulointi*, ISBN 978-951-672-361-0, Helsinki: Hakapaino, 2009.
- [8] Innojok Oy, *Asuintilojen valaistus*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.innojok.fi/valaistus/asuintilat.php#keittio>, (Luettu: 1.10.2013).
- [9] Online, Digitaalinen valaistusmittari malli 1308, käyttöohje.
- [10] Snellman, E., *Ultraviolettia taivaalta ja lampusta*, [pdf-dokumentti], Saatavilla: <http://www.terveyskirjasto.fi/xmedia/duo/duo93214.pdf>, (Luettu: 15.10.2013).
- [11] Lumilab Oy, *LED-teknologia*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.lumilab.fi/index.php/fi/yryitys/led-teknologia>, (Luettu: 7.10.2013).
- [12] Tanabe, S.; Fujita, S.; Yoshihara, S.; Sakamoto, A.; Yamamoto, S., *YAG glass-ceramic phosphor for white LED (II): Luminescence characteristics*, [pdf-dokumentti], Saatavilla: <http://web.archive.org/web/20110511182527/http://lib.semi.ac.cn:8080/tsh/dzzy/wsqq/SPIE/vol5941/594112.pdf>, (Luettu: 1.11.2013).
- [13] OSA – The Optical Society, *Optic Express, Color distribution from multicolor LED arrays*, [pdf-dokumentti], Saatavilla: <http://www.opticsinfobase.org/oe/viewmedia.cfm?uri=oe-15-6-3607&seq=0>, (Luettu: 1.11.2013).
- [14] Sähköturvallisuuden Edistämiskeskus ry, *Valaistus kodin eri tiloissa – keittiö*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.kodinvalaistus.fi/valaistus-kodin-eri-tiloissa/keittio/>, (Luettu: 1.10.2013).
- [15] Euroopan unioni, *Euroopan parlamentin ja neuvoston direktiivin 2005/32/EY täytäntöönpanemisesta ympärisäteilevien kotitalouslampujen ekologista suunnittelua koskevien vaatimusten osalta*, [pdf-dokumentti], Saatavilla: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:076:0003:0016:FI:PDF>, (Luettu: 8.11.2013).

- [16] Osram GmbH, *The history of the LED*, [www-dokumentti], Saatavilla: [http://www.osram.com/osram\\_com/news-and-knowledge/led-home/professional-knowledge/led-basics/led-history/index.jsp](http://www.osram.com/osram_com/news-and-knowledge/led-home/professional-knowledge/led-basics/led-history/index.jsp), (Luettu: 11.11.2013).
- [17] PLDA Greenpages, *Guidelines for Specification of LED Lighting Products 2010*, [pdf-dokumentti], Saatavilla: <http://greenpages.pld-a.org/wp-content/uploads/2010/10/LED-Spec-v5.pdf>, (Luettu 21.11.2013).
- [18] National Instruments Corp., *Fiber-Optic Communications Technology*, Light Emitting Diodes (LEDs), [pdf-dokumentti], Saatavilla: <http://zone.ni.com/devzone/cda/ph/p/id/130/pdf>, (Luettu: 26.11.2013).
- [19] Laser Focus World, *RGB LEDs for Illumination*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.laserfocusworld.com/articles/print/volume-49/issue-08/features/photonic-frontiers-rgb-leds-for-illumination-color-tunable-rgb-led-lighting-goes-far-beyond-replacement-bulbs.html>, (Luettu: 26.11.2013).
- [20] Cree Inc., *XLamp XM-L Color*, [pdf-dokumentti], Saatavilla: [http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Dat a%20and%20Binning/XLampXML\\_Color.pdf](http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Dat a%20and%20Binning/XLampXML_Color.pdf), (Luettu: 4.12.2013).
- [21] Cree Inc., *XLamp XM-L2*, [pdf-dokumentti], Saatavilla: <http://www.cree.com/~media/Files/Cree/LED%20Components%20and%20Modules/XLamp/Dat a%20and%20Binning/XLampXML2.pdf>, (Luettu 4.12.2013).
- [22] Ohno, Y., *Color Rendering and Luminous Efficacy of White LED Spectra*, [pdf-dokumentti], Saatavilla: <http://web.archive.org/web/20110511182632/http://lib.semi.ac.cn:8080/tsh/dzzy/wsqk/SPIE/vol5530/5530-88.pdf>, (Luettu: 4.12.2013).
- [23] Limic Oy, *Yleisopas keittiön valaistukseen*, [www-dokumentti], Saatavilla: [http://www.valokas.fi/fi/index.php?option=com\\_content&view=article&id=135&Itemid=107&gclid=CP3jnpKwqrsCFQZf3godsGIAEA](http://www.valokas.fi/fi/index.php?option=com_content&view=article&id=135&Itemid=107&gclid=CP3jnpKwqrsCFQZf3godsGIAEA), (Luettu 12.12.2013).
- [24] Konica Minolta Inc., *Language of Light, Illuminance meter*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.konicaminolta.com/instruments/knowledge/light/instrumentation/05.html>, (Luettu: 12.12.2013).
- [25] Kodinvalaistus.fi, *Valon laatu*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.kodinvalaistus.fi/valon-laatu/>, (Luettu: 12.12.2013).
- [26] Seesmart Inc., *How to Choose the Right LED Lighting Product Color Temperature*, [www-dokumentti], Saatavilla: [http://www.seesmartled.com/kb/choosing\\_color\\_temperature/](http://www.seesmartled.com/kb/choosing_color_temperature/), (Luettu: 19.12.2013).
- [27] Green Creative LLC, *Lighting Guide*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.gc-lighting.com/led-education/lighting-guide/>, (Luettu: 19.12.2013).
- [28] OMS spol. s r.o., *LED Academy*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.omslighting.com/ledacademy/694/led-academy>, (Luettu: 19.12.2013).
- [29] LEDs Magazine, *LED street light design technology*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://ledsmagazine.com/features/6/3/1>, (Luettu: 28.12.2013).
- [30] LEDs Magazine, *LED system evaluation yields quality analysis*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.ledsmagazine.com/articles/print/volume-10/issue-9/features/led-system-evaluation-yields-quality-analysis-magazine.html>, (Luettu: 4.1.2014).
- [31] Cree Inc., *XLamp MK-R*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.cree.com/LED-Components-and-Modules/Products/XLamp/Arrays-Directional/XLamp-MKR>, (Luettu: 4.1.2014).

- [32] LEDs Magazine, *Metrics for solid-state lighting*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://ledsmagazine.com/features/2/5/4>, (Luettu: 22.12.2013).
- [33] Photonics.Com, *Phosphor Placement in White LED packages*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.photonics.com/Article.aspx?AID=26085>, (Luettu: 4.1.2014).
- [34] LightEmittingDiodes.org, *White light sources based on wavelength converters*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap21/chap21.htm>, (Luettu: 8.1.2014).
- [35] U.S. Department of Energy, *Lifetime of White LEDs*, [pdf-dokumentti], Saatavilla: [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lifetime\\_white\\_leds.pdf](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/lifetime_white_leds.pdf), (Luettu: 16.1.2014).
- [36] Green Creative LLC, *LED 101*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.gc-lighting.com/led-education/Im-80/>, (Luettu: 16.1.2014).
- [37] IMS Research, *Global Market for Packaged LEDs for lighting to Nearly Double in Three Years*, [www-dokumentti], Saatavilla: [http://www.ledmarketresearch.com/press\\_release/global\\_market\\_for\\_packaged\\_leds\\_for\\_lighting\\_to\\_nearly\\_double\\_in\\_three\\_years](http://www.ledmarketresearch.com/press_release/global_market_for_packaged_leds_for_lighting_to_nearly_double_in_three_years), (Luettu: 16.1.2014).
- [38] LEDLuxor Illumination Solutions, *LED Lighting Market to Reach 80 % Market Share*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.ledluxor.com/led-manufacturing/led-lighting-market-to-reach-80-market-share>, (Luettu: 16.1.2014).
- [39] Tiede, *Kvanttipiste pippuroi valon*, [www-dokumentti], Saatavilla: [http://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/kvanttipiste\\_pippuroi\\_valon](http://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/kvanttipiste_pippuroi_valon), (Luettu: 21.1.2014).
- [40] Tiede, *Ihanan tehokas hyötysuhde*, [www-dokumentti], Saatavilla: [http://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/ihanan\\_tehokas\\_hyotysuhde](http://www.tiede.fi/artikkeli/jutut/artikkelit/ihanan_tehokas_hyotysuhde), (Luettu: 21.1.2014).
- [41] Anyang General Electronics Co.,Ltd, *The Encapsulation of the Flexible LED Strip*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.chineselight.com/FAQ/The-Encapsulation-of-the-Flexible-LED-Strip.html>, (Luettu: 21.1.2014).
- [42] LEDLuxor Illumination Solutions, *Flexible LED Light Strips: SMD 5050 vs SMD 3528*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.ledluxor.com/flexible-led-light-strips-smd-5050-vs-smd-3528>, (Luettu 21.1.2014).
- [43] LEDLuxor Illumination Solutions, *LED Light Strips: Top 5 Ideas for Applications*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.ledluxor.com/led-light-strips-top-5-ideas-applications>, (Luettu 21.1.2014).
- [44] AD-Lux Oy, *Laadukas, normaalia hieman kalliimpi ledinauha on edullisin vaihtoehto. Miksi?*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.adlux.fi/public/201304ledinauhanlaatu.html>, (Luettu: 26.2.2014).
- [45] AD-Lux Oy, *Ledinauhan valmistus*, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.adlux.fi/public/ledinauhankorjaus.html>, (Luettu: 26.2.2014).
- [46] Ikatech Group, *Lighting Terminology*, [www-dokumentti], Saatavilla: [http://www.ikatech.net/index.aspx?lang=eng&fn=technical\\_language](http://www.ikatech.net/index.aspx?lang=eng&fn=technical_language), (Luettu: 12.3.2014).
- [47] Journal of Applied Physics 97, *Influence of junction temperature on chromaticity and color-rendering properties of trichromatic white-light sources based on light-emitting diodes*, [pdf-dokumentti], Saatavilla: [http://ecse.rpi.edu/~schubert/Reprints/2005%20Chhajed%20et%20al%20\(JAP\)%20Influence%20of%20Tj%20on%20chromaticity%20and%20CRI%20of%20trichromatic%20white-light%20sources%20based%20on%20LEDs.pdf](http://ecse.rpi.edu/~schubert/Reprints/2005%20Chhajed%20et%20al%20(JAP)%20Influence%20of%20Tj%20on%20chromaticity%20and%20CRI%20of%20trichromatic%20white-light%20sources%20based%20on%20LEDs.pdf), (Luettu: 12.3.2014).

[48] Light-Emitting Diodes (Cambridge Univ. Press), Chapter 21: White light sources based on wavelength converters, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://www.ecse.rpi.edu/~schubert/Light-Emitting-Diodes-dot-org/chap21/chap21.htm>, (Luettu: 12.3.2014).