

SAVONIA

ammattikorkeakoulu

OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

ENERGIATEHOKKUUDEN
PARANTAMINEN
KORJAUSRAKENTAMISESSA
VALAISTUKSEN AVULLA

TEKIJÄ Tuomas Niskanen

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Tutkinto-ohjelma Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma	
Työn tekijä Tuomas Niskanen	
Työn nimi Energiatehokkuuden parantaminen korjausrakentamisessa valaistuksen avulla	
Päiväys 15.12.2023	Sivumäärä/Liitteet 70/0
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani Servica Oy	
Tiivistelmä <p>Tämän työn tarkoituksena oli perehtyä vanhojen valaistustekniikoiden uusimiseen kiinteistöjen korjausrakentamisessa, sekä tutkia tästä syntyviä vaikutuksia teknisestä ja taloudellisesta näkökulmasta. Työn toimeksiantajana toimi Servica Oy.</p> <p>Työssä tarkasteltiin erityisesti loisteputkivalaisimien korvaamista led-valaisimilla, josta selvitettiin valaistussuunnittelun takaisinmaksuaika, vaikutus valaistuksen laatuun, sekä vaikutus sähkön laatuun. Eli käytännössä laskettiin, kuinka nopeasti uusitut valaisimet maksavat itsensä keskimääräisesti takaisin, sekä uusittujen valaisimien muut mahdolliset hyödyt.</p> <p>Aihe valittiin pääosin sen ajankohtaisuuden vuoksi. Servica suorittaa sähkötekniisiä korjaustarvekatselmuksia vanhoille kiinteistöille osana ennaltaehkäisevää kunnossapitoa. Hyvin usein suurin osa korjauskustannuksista koostuu vanhojen loisteputkivalaisimien uusimisesta led-valaisimiin, niin valaistuksen laadun, kuin energiatehokkuuden parantamiseksi.</p> <p>Kiinteistöjen energiatehokkuus on nykyaikana merkittävää ympäristöystävällisyyden, sekä taloudellisen kannattavuuden vuoksi. Energiatehokkuus korostui hyvin vuoden 2022–2023 talvella, jolloin Suomessa sähkön hinta oli ennennäkemättömän korkealla ja mahdolliseen sähköpulaan varauduttiin koko maassa. Jos kaikkien vanhojen kiinteistöjen valaistus uusittaisiin led-valaistukseen, tästä voisi syntyä tulevaisuudessakin juuri se pieni ero, joka tarvitaan sähköverkon kapasiteetin varmistamiseen.</p>	
Avainsanat LED, valaistus, korjausrakentaminen, energiatehokkuus, ympäristöystävällisyys, sähkön laatu	

Field of Study Technology, Communication and Transport		
Degree Programme Degree Programme in Electrical and Automation Engineering		
Author Tuomas Niskanen		
Title of Thesis Improving energy efficiency by utilizing LED lightning in repair construction		
Date	15.12.2023	Pages/Appendices 70/0
Client Organisation /Partner Servica Oy		
<p>Abstract</p> <p>The purpose of this thesis was to learn about the replacement of old lightning technologies in repair construction of old buildings and investigating the resulting effects from a technical and economic standpoint. The client of this work was Servica Oy.</p> <p>The main examples studied in this thesis were comparisons between fluorescent and LED lightning. Specifically, the focus was to define the energy efficiency and the payback period of installing LED lightning to old buildings and to study the quality of the lightning, and the effect on the quality of electricity when compared against fluorescent lamps.</p> <p>This topic was chosen mainly because of its topicality. Servica conducts electrical repair needs assessments for old properties as part of a pre-emptive maintenance plan. Very often, most of the costs consists of replacing fluorescent lamps with LED lamps, to improve both the lighting quality and energy efficiency.</p> <p>The importance of energy efficiency is significant nowadays due to environmental friendliness. Energy efficiency was also greatly emphasized in the winter of 2022–2023 when there was a possibility of an electricity shortage in Finland and the price of electricity to consumers was extraordinarily high. If the lighting of all old buildings were to be renewed with LED lighting, this could just be the small difference that might be needed to ensure the capacity of the main electricity grid in the future.</p>		
<p>Keywords</p> <p>LED, lightning, repair construction, energy efficiency, environmentally friendly, electric power quality</p>		

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	6
1.1	Sanasto.....	7
2	SÄHKÖVALAISTUKSEN HISTORIA	9
3	VALAISTUKSEN SUUREET JA KÄSITTEET	12
3.1	Sähkömagneettinen säteily	12
3.2	Valaistuksen suureet	13
3.2.1	Valovirta, yksikkö lumen (lm)	13
3.2.2	Valovoima, yksikkö kandela (cd).....	13
3.2.3	Valaistusvoimakkuus, yksikkö lux (lx).....	13
3.2.4	Väriämpötila, yksikkö Kelvin (K)	13
3.2.5	Värintoisto, yksikkö CRI tai R _a	14
3.3	Valaistusstandardi SFS-EN 12464-1	15
3.3.1	Luminanssijakauma	15
3.3.2	Valaistusvoimakkuus	15
3.3.3	Häikäisy	17
3.3.4	Väriominaisuudet.....	18
3.3.5	Välkyntä.....	18
4	VALAISINTYYPIT JA NIIDEN OMINAISUUDET	19
4.1	Hehkulamput	19
4.2	Halogeenilamput.....	20
4.3	Kaasupurkauslamput.....	21
4.3.1	Loisteputket	21
4.3.2	Pienloistelamput	23
4.3.3	Monimetallilamput	23
4.4	LED-valaisimet	24

5	VALAISTUKSEN VAIKUTUS SÄHKÖN LAATUUN.....	30
5.1	Loisteho	30
5.2	Harmoniset yliaallot.....	33
5.3	Eri valaistustekniikoiden vaikutukset sähkön laadussa	36
5.3.1	Sähkön laatumittaus loisteputkivalaisimesta kuristimella ja sytyttimellä	37
5.3.2	Esimerkki loistehon kompensoinnista	40
5.3.3	Sähkön laatumittaus loisteputkivalaisimesta elektronisen liitäntälaitteen kanssa.....	42
5.3.4	Sähkön laatumittaus LED-valaisimella	45
5.3.5	Mittaustuloksien arviointi.....	47
6	TAKAISINMAKSUAIKA JA VALAISTUKSEN LAATU KORJAUSRAKENTAMISESSA	51
6.1	Koulurakennuksen valaistuksen saneeraus.....	51
6.1.1	Arvioidut energiasäästöt.....	52
6.1.2	Mitatut energiansäästöt.....	55
6.1.3	Saneerauksen jälkeinen valaistuksen laatu	57
6.2	Päiväkotirakennuksen valaistuksen saneeraus.....	59
6.2.1	Arvioidut energiasäästöt.....	59
6.2.2	Saneerauksen jälkeinen valaistuksen laatu	60
6.3	Takaisinmaksuaika muuttuvalla sähköenergian hinnalla	64
7	YHTEENVETO.....	65
	LÄHTEET	67

1 JOHDANTO

Yleisesti suurin este valaistuksen uusimiselle on siihen vaadittavan pääoman määrä ja ajattelu, että jos vanha toimii, miksi vaihtaa uuteen? Tämän opinnäytetyön tarkoituksena on selvittää vanhojen rakennusten korjausrakentamisen yhteydessä uusittavien valaisimien tuomat hyödyt ja täten rohkaista esimerkiksi yrityksiä tai kuntia vaihtamaan vanhat loisteputkivalaisimensa uusiin led-valaisimiin. Opinnäytetyössä käsitellään pääasiassa Kuopion kaupungin omistamia kiinteistöjä, joista valaistusta on uusittu, tai aiotaan uusia.

Tämä opinnäytetyö on tehty yhteistyössä Servica Oy:n kanssa, joka vastaa suuresta osasta Kuopion kaupungin kiinteistöjen huolto- ja kunnossapitotehtävistä. Yksi näistä tehtävistä on korjaustarvekatselmukset, joissa valaistuksen uusimista ehdotetaan tarvittaessa.

Tässä työssä tarkastellaan sähkövalaistuksen historian aikana käytetyimpiä valaisintyyppejä ja niiden ominaisuuksia, joita vertaillaan keskenään, sekä led-tekniikkaan. Työssä vertaillaan myös valaistustekniikoiden vaikutusta sähkön laatuun ja lisäksi lasketaan arvioita vanhan valaistuksen uusimisen takaisinmaksuajasta, eli milloin pienemmästä energiankulutuksesta aiheutuvat säästöt vastaavat alkuperäisen investoinnin summaa.

Vanhojen loisteputkivalaisimien uusiminen led-valaisimiin on yksi helpoimmista tavoista saada rakennuksen energiatehokkuutta paremmaksi. Tämä myös kasvattaa rakennuksen yleistä viihtyvyyttä, sillä valaistuksen laatu paranee yleensä merkittävästi oikein suunniteltuna. Jos kyseessä on toimisto tai muu työtila, valaistuksen avulla voidaan saada myös työntekijöiden suorituskykyä tehokkaammaksi.

1.1 Sanasto

Diffuusori	Valaisimen osa, jonka tarkoituksena on hajottaa valonlähteen tuottama kirkas pistemäinen valo ja tehdä siitä pehmeää. Diffuusoreita käytetään esimerkiksi häikäisyn tai kovien varjojen estämiseen.
Diodi	Yleinen elektroniikan komponentti, jonka tarkoituksena on rajoittaa lävitseen kulkevan sähkövirran suunta.
Elektrodi	Virtapiirin osa, josta sähkö siirtyy väliaineeseen tai väliaineesta virtapiiriin.
Emittoida	Säteillä, eli hiukkasten tai energian siirtyminen säteilylähteestä ympäristöön.
Energiatehokkuus	Hyötysuhde, joka energian käytöstä saadaan. (OptiWatti, 2019)
Halidi	Halogeenin yhdiste, jossa on halogeeniatomi, sekä elementti tai radikaali.
Halogeenit	Jaksollisen järjestelmän 17. ryhmän alkuaineet: fluori, kloori, bromi, jodi, astatiini, tennessiini (Christe;Gutmann;& Schneider, 2023).
Jännite	Kahden pisteen välinen potentiaaliero, yksikkö V (voltti).
LED, led	Light emitting diode, sähkövaloa tuottava diodi.
Resistiivinen	Kuvaa aineen kykyä vastustaa sähkövirran kulkemista lävitseen. Resistanssi, yksikkö Ω (ohmi).
RMS-arvo (tehollisarvo)	Eng. Root mean square. Neliöllinen keskiarvo, eli tehollisarvo.
Spektrijakauma	Säteilyn energian jakautuminen eri aallonpituuksiin. Erilaisilla valonlähteillä tai valoa heijastavilla pinnoilla voi olla sama väri, mutta eri spektrijakauma (Arnkil).
Steradiaani	SI-järjestelmän mukainen avaruuskulman suuruuden mittayksikkö
Superpositio	Kerrostamismenetelmä, jossa esimerkiksi useiden eri aaltojen muodostama summa-aalto voidaan esittää useina yksittäisinä osa-aaltoina erikseen.
Sähkövirta	Sähköjohtimen poikkipinnan läpi sähkökentässä kulkeva kokonaisvirtaus aikayksikköä kohden, yksikkö A (ampeeri).
Tasasuuntaaja	Elektroniikassa käytetty virtapiiri, jolla vaihtosähkö voidaan muuttaa tasasähköksi.
Tasasähkö	Virta, jonka suunta ei muutu ajan funktiona tai jännite, jonka potentiaaliero ei vaihtelee merkittävästi ajan funktiona.

Vaihtosähkö

Virta, jonka suunta vaihtuu ajan funktiona tai jännite, jonka potentiaaliero vaihtelee positiivisen ja negatiivisen välillä, esimerkiksi 50 kertaa sekunnissa (50 Hz).

Volframi

Metallinen alkuaine.

2 SÄHKÖVALAISTUKSEN HISTORIA

Ensimmäisen sähköllä toimivan valaisimen kehitti englantilainen kemisti Sir Humphry Davy vuonna 1809 (Chodos, 2020). Kyseessä oli kaarilamppu, joka perustui venäläisen Vasily Petrovin vuonna 1802 kehittämään laitteeseen, joka pystyi ylläpitämään jatkuvan valokaaren. Kaarilampun toiminta perustuu kahteen hiilitankoon, jotka asetetaan koskettamaan toisiaan alussa ja jonka jälkeen ne hiltalalle erotetaan tietylle etäisyydelle toisistaan. Tämä luo valokaaren tankojen välille, joka tuottaa erittäin intensiivistä valoa, sekä lämpöä, mikä puolestaan rappeuttaa hiilitangot erittäin nopeasti (Colite Technologies, 2021).

Kaarilamput eivät vielä alussa olleet käytännöllisiä korkean virtavaatimuksien vuoksi. Hiilitangot vaativat lisäksi jatkuvaa säätämistä oikean etäisyyden takaamiseksi, sillä ne kuluivat erittäin nopeasti, sekä niiden synnyttämä valo oli myös hyvin epätasaista. Teknologian kehittyessä vuonna 1870 Paul Jablochhoff kehitti kaarilampun, missä hiilitangot olivat rinnakkain vierekkäin, mikä pidi lampun käyttökäytössä ja vuonna 1878 ensimmäiset kaarilamput otettiin käyttöön Pariisissa, jonka jälkeen niitä alettiin käyttää myös Lontoossa ja Yhdysvalloissa. (Chodos, 2020)

Kaarilamppujen tuottama intensiivinen valo ei soveltunut hyvin pienien asuinhuoneistojen valaisemiseen. Tämän seurauksena nousi tarve pienemälle ja helppohoitoisemmalle valonlähteelle, jota voisi käyttää asuinhuoneistojen valaisemiseen. Näin syntyi hehkulamput. Hehkulampun käsite oli tunnettu jo 1800-luvun alusta asti, mutta ensimmäisen toimivan hehkulampun keksi Joseph Wilson Swan. Aikaisemmin hehkulampun suurin ongelma oli ollut hehkulangan palaminen liian nopeasti, mutta Swan sai vähennettyä lampun sisäistä ilmanpainetta yhteen miljoonasosaan normaalista. Tällöin hehkulangan saama hapen määrä ei riittänyt hajottamaan sitä välittömästi. Hehkulampun toi maailman tietoisuuteen Thomas Edison, joka teki kokeita tuhansilla eri materiaaleista valmistetuilla hehkulangoilla ja lopulta päätyi bambusta valmistettuun hiilikuituun, jolla pystyttiin saavuttamaan jopa 1200 tunnin käyttöikä lampulle. (Colite Technologies, 2021)

Suomessa sähkön hyötykäyttö alkoi ensimmäisen kerran 1882, jolloin hehkulamput valaistus otettiin käyttöön Finlaysonin kutomosalissa Tampereella. Suomi ei ollut jälkijunassa sähkövalaistuksen käyttöönotossa, vaan pikemminkin edelläkävijä. Finlaysonin tehtaan valaistus oli ensimmäinen pohjoismainen sähkövalo hyödyntävä rakennus. Tehtaaseen asennettiin 150 hehkulamputa, jotka saivat sähkön kahdesta 110 V tasavirtadynamosta. (Lehtimäki, 1980)

Ensimmäiset kaasupurkauslamput tulivat markkinoille vuonna 1901. Kyseessä oli Yhdysvaltalaisen Peter Cooper Hewittin kehittämä elohopeahöyrylamput, jossa oli hyväksyttävä valon väri, sekä käyttöikä. Hänen kehittämä elohopeahöyrylamput oli menestys markkinoilla, jossa kaasu oli suljettu noin 1,2 metriä pitkään lasiputkeen, joka synnytti sinivihreää valoa (Whelan & DeLair, 2010). Elohopealamputa käytettiin pitkään esimerkiksi katuvalaistuksessa, mutta myöhemmin kehitetyt tehokkaammat purkauslamput osittain syrjäyttivät ne. Elohopeahöyrylamput olivat edelläkävijöitä nykyisille loistelampuille. (Halonen & Eloholma, 2005)

Itsenäistymisen aikaan vuonna 1917 Suomessa oli parikymmentä maalaiskuntaa, jotka olivat sähkön piirissä. Vuonna 1920 neljäsosassa Suomen asuintaloista oli sähkövalo ja lukema kasvoi, sillä ennen toista maailmansotaa, Suomen maaseudun sähköistysaste oli jo 40 %. Imatran vesivoimalaitos käynnistyi vuonna 1929, josta skeptikot esittivät arvioita, ettei Suomessa tulla koskaan käyttämään niin paljon sähköä, mitä Imatra tuottaa. Varsinainen kantaverkko sai tästä alkunsa, kun voimalaitos yhdistettiin 563 km pitkällä, Suomen ensimmäisellä 110 kV:n suurjännitesiirottojohtolla Helsinkiin ja Turkuun (Rajala & Juuti, 2012). Sähköverkon laajenemisen seurauksena laajeni samalla myös sähkövalaistuksen käyttö rakennuksissa.

Ensimmäinen loisteputkilamppu, joka tuotti valkoista valoa ja oli tarpeeksi pitkäikäinen saavuttaakseen mahdollisesti kaupallista suosiota, kehitettiin vuonna 1934. Loisteputkivalaisimen kehityksessä oli mukana useita eri henkilöitä, jotka vuosien varrella parantelivat siitä kaupalliseen käyttöön sopivan. (Whelan & DeLair, 2013). Loisteputkilamput alkoivat yleistyä 1940-luvulla ja Suomessa ensimmäiset loistelamput otettiin käyttöön vuonna 1941. Loistelamppujen käyttöönottoa rakennuksien sähkövalaistuksessa voidaan pitää eräänlaisena taitekohtana. Loistelampuilla saatiin kasvatettua valotehokkuutta, käyttöikää, sekä mahdollistettiin enemmän väriominaisuuksia, joka mahdollisti puolestaan osittain myös päivänvalon korvauksen (Halonen & Eloholma, 2005).

Loistelamput yleistyivät kotien valaistuksessa 1960–1980 luvuilla. Insinööriuutisissa kerrottiin vuonna 1961, että silloin tuotettiin enemmän valoa erilaisilla purkauslampuilla, kuin hehkulampuilla, jotka olivat vielä parikymmentä vuotta sitten miltei yksinomaan käytettyjä valonlähteitä. Muutoksen mahdollisti loiste- ja elohopealamppujen aktiivinen kehittämistyö, jota tehtiin eri puolilla maailmaa. Suomessakin oli suunniteltu uudenlaisia lamputyyppejä. (Virta, 2021)

Purkauslampuissa oma lajinsa ovat monimetallilamput, joiden purkausputkissa käytetään erilaisia metalliyhdisteitä. Niiden tuottaman valon ominaisuudet riippuvat käytetystä metallihalogeeniyhdisteestä ja sen ominaisesta säteilystä (Halonen & Eloholma, 2005). Monimetallilamput tulivat markkinoille 1960-luvulla ja niitä on käytössä edelleen.

Pienloistelamppu tai toiselta nimeltään energiansäästölamppu kehitettiin ensimmäistä kertaa vuonna 1976 Edward Hammerin toimesta. Prototyyppi keräsi pölyä käyttämättömänä Hammerin toimistossa, sillä ajateltiin, että 28 miljoonaa dollaria maksava tuotantolaitos, joka tarvittaisiin lamppujen valmistamiseen, olisi liian kallis. Uskotaan, että jonkun kilpailevan yrityksen työntekijä kopioi Hammerin prototyypin vieraillessaan hänen toimistollaan (Whelan & DeLair, 2013). Vuoteen 1990 mennessä pienloistelamput oli kuitenkin saatu kehitettyä tarpeeksi pitkälle, jotta niiden tuotanto kaupalliseen käyttöön oli järkevää. Nykyaikaiset pienloistelamput olivat 50–75 % energiatehokkaampia, sekä kestivät 10 kertaa pitempään verrattuna perinteiseen hehkulamppuun (TCP, 2020).

Ensimmäinen led-valo kehitettiin vuonna 1961 Robert Biardin ja Gary Pittmanin toimesta, jolloin he työskentelivät Texas Instrumentsille. Kyseessä oli pelkästään infrapunavaloa tuottava led, eikä sillä ollut käytännöllistä hyötyä sen mikroskooppisen koon takia. Heti seuraavana vuonna Nick Holonyak, Jr. kehitti ensimmäisen näkyvää punaista valoa tuottavan ledin. Tutkijat ja insinöörit jatkoivat led-tekniikan kehittämistä vuosikymmenien saatossa, mutta merkittävin läpimurto tapahtui vuonna 1994, jolloin Shuji Nakamura kehitti ensimmäisen erittäin kirkkaan sinisen ledin. Tämä keksintö toimi pohjana jokaiselle nykyajan kaupallisille led-valaisimille, sillä valkoista valoa saatiin sinisestä ledistä vuoraamalla sen päälle fluoresoivaa fosforia. (TCP, 2020)

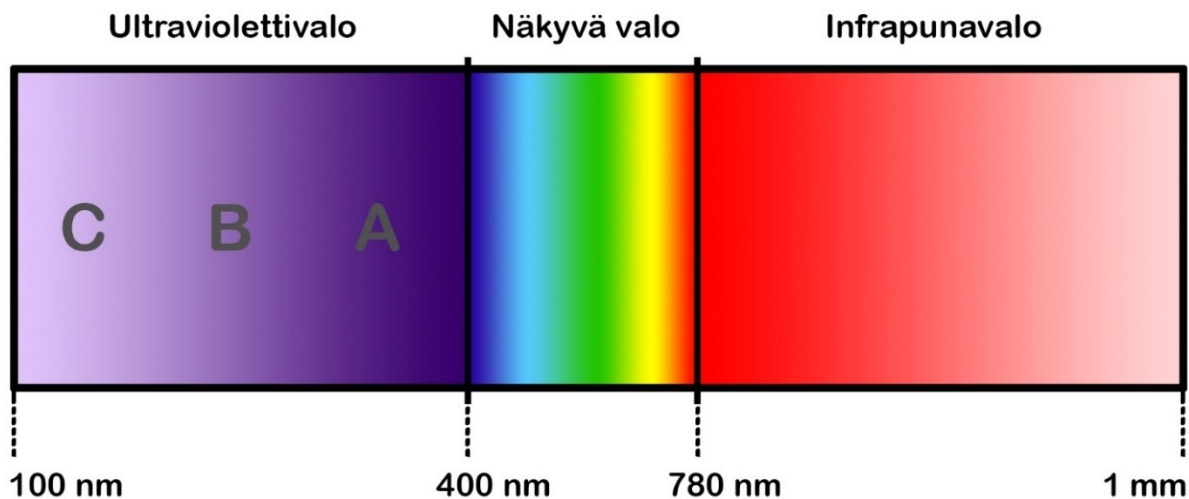
3 VALAISTUKSEN SUUREET JA KÄSITTEET

Puhuttaessa valaistuksesta on hyvä tietää valaistukseen liittyvä termistö ja niiden merkitys, sekä mitä näkyvä valo on. Tässä kappaleessa käsitellään valaistukseen liittyvät suureet ja käsitteet.

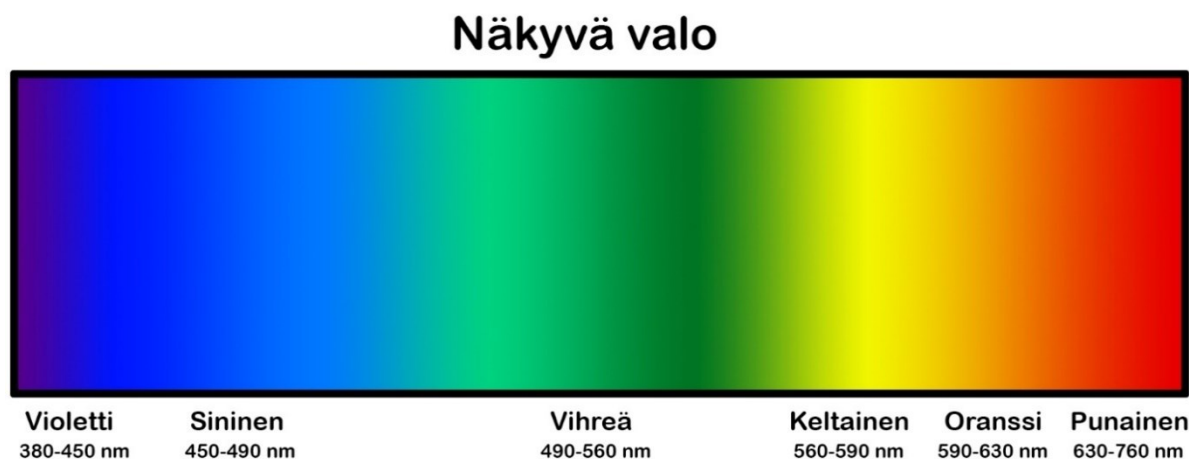
3.1 Sähkömagneettinen säteily

Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus vaihtelee syntyvän mukaan äärimmäisen lyhyestä erittäin pitkään. Ihmissilmälle näkyvä valo on sähkömagneettista säteilyä optisella alueella. Optiseen alueeseen kuuluu kolme eri alalajia: ultraviolettivalo, näkyvä valo, sekä infrapuna- eli lämpösäteily, jotka on havainnollistettu kuvassa 1.

Näkyvän valon alue on likimain 400–700 nm aallonpituuksilla. Sähkömagneettinen säteily tällä aallonpituusalueella on siis ihmissilmälle näkyvää ja siitä voidaan erotella kaikki eri värit aallonpituuksien mukaan, jotka on havainnollistettu kuvassa 2. (FMI-SPACE, ei pvm)



Kuva 1. Optisen säteilyn alalajit.



Kuva 2. Ihmissilmällä nähtävät sähkömagneettisen säteilyn aallonpituudet ja niiden värit.

3.2 Valaistuksen suureet

Valonlähteiden ominaisuuksien kuvaamiseen on olemassa omat suureet, joilla niitä voidaan mitata ja vertailla. Nämä auttavat oikean valaisimen valinnassa ja kertovat tarvittavat ominaisuudet kyseisestä valonlähteestä.

3.2.1 Valovirta, yksikkö lumen (lm)

Valovirta kertoo, kuinka paljon näkyvää valoa valonlähde säteilee joka puolelle, eli lampun antaman valon määrän kokonaisuudessaan. Valonlähteen valinta tulisi perustua niiden antamaan valovirtaan, eikä sähkötehoon, sillä enemmän tehoa käyttävä valaisin ei välttämättä tarkoita, että se olisi valaistusominaisuuksiltaan parempi. (Nikulainen, ei pvm)

3.2.2 Valovoima, yksikkö kandela (cd)

Valovoima kertoo valonlähteen tiettyyn suuntaan ja avaruuskulmaan lähettämän valon voimakkuuden, eli intensiteetin. Suure riippuu valonlähteen valovirrasta, sekä sen suuntauksesta. Esimerkiksi kohdelampun valovoima valokeilan suunnassa on paljon suurempi, kuin saman valovirran omaavassa, ympärisäteilevässä lampussa. Yhden lumenin valovirta $65,5^\circ$ aukeavaan kartioon (1 steradiani) tuottaa yhden kandelan valovoiman. (Nikulainen, ei pvm)

3.2.3 Valaistusvoimakkuus, yksikkö luksi (lx)

Valaistusvoimakkuus kertoo valovirran tiheyden tietyllä pinnalla. Mitä kauempana pinta on valonlähteestä, sitä pienempi on valaistusvoimakkuus, sillä valo jakautuu suuremmalle pinta-alalle. Yhden lumenin valovirta antaa yhden luksin valaistuksen yhden neliömetrin alalle, eli $1 \text{ lx} = 1 \text{ lm/m}^2$. (Nikulainen, ei pvm)

3.2.4 Väriämpötila, yksikkö Kelvin (K)

Väriämpötilalla ilmaistaan valonlähteen värisävy, joka muuttuu suureen kasvaessa keltaisesta/lämpimästä (alle 3000 K) valkoiseksi/viileäksi (n. 4000 K) ja edelleen sinertäväksi/kylmäksi (yli 5000 K). Päivänvalon väriämpötila on 5000–10000 K välillä, vaihdellen eri aikoina, sekä olosuhteiden pohjalta. (Nikulainen, ei pvm)

3.2.5 Värintoisto, yksikkö CRI tai R_a

Värintoistoindeksillä (Color Rendering Index) kuvataan, kuinka todenmukaisesti kyseisellä valonlähteellä valaistut värit toistuvat. Paras värintoisto on 100 CRI ja sisävalaistuksessa sen tulisi olla aina yli 80. (Nikulainen, ei pvm)

CRI mitataan vertaamalla valonlähteen värintoistokykyä kahdeksaan (General CRI tai R_a) tai viiteentoista (Extended CRI) eri testiväriin (R1-R15) ja määrittelemällä tästä, kuinka tarkasti valonlähde toistaa jokaisen värin erikseen, jonka jälkeen tuloksista lasketaan neliöllinen keskiarvo. CRI 100, eli paras värintoisto, vastaa päivänvalon tai hehkulampun värintoistoa (Waveform Lightning, ei pvm).

R_a:ta käytetään yleisesti synonyyminä CRI:n kanssa, vaikka se viittaa keskiarvoon (engl. average) pelkästään testivärien R1-R8 välillä. Käytettäessä CRI-arvoa, se tarkoittaa värintoistoa kaikkien 15 eri testivärin skaalalla (SKILUX OY, ei pvm). Valaistusstandardissa SFS-EN 12464-1 käytetään värintoiston yksikkönä R_a:ta.

3.3 Valaistusstandardi SFS-EN 12464-1

Sisätyötilojen valaistukseen on ollut vuodesta 2003 lähtien EU:n jäsenmailla yhteinen standardi EN-12464-1 valaistuksen laadun takaamiseksi näkömukavuuden ja näkötehtävien suorittamista varten. Standardia on päivitetty vuosien aikana, joista uusin painos on julkaistu vuonna 2021. Standardissa käsitellään kaikkia yleisimpiä näkötehtäviä mukaan lukien esimerkiksi tietokoneella suoritettava työ.

Riittävän ja asianmukaisen valaistuksen ansiosta ihmiset voivat suorittaa pitkäaikaisia ja toistuvia näkötehtäviä tehokkaasti ja tarkasti. Vaadittava näkyvyys ja näkömukavuus määräytyvät toiminnan tyypin ja keston mukaan. Valaistus vaikuttaa vuorokausirytmieihin, mielialaan, sekä parantaa suorituskykyämme ja hyvinvointiamme. (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2021)

Valaistuvaatimukset määritetään kolmen perustarpeen täyttymisenä. Ensimmäinen näistä on näkömukavuus, jolloin työntekijä kokee valaistuksen vaikuttavan positiivisesti hyvinvointiinsa, joka johtaa puolestaan epäsuorasti myös parempaan tuottavuuteen ja työn laatuun. Toisena on näkötehokkuus, jolla taataan, että työntekijä pystyy suoriutumaan näkötehtävästään myös vaativissa olosuhteissa ja pitempien jaksojen aikana. Kolmantena perustarpeena on turvallisuus. (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2021)

Perustarpeiden täyttymistä varten standardissa on lueteltu tärkeimmät valaistun ympäristön tekijät sähkö- ja päivänvalon osalta: luminanssijakauma, valaistusvoimakkuus, häikäisy, valon suuntaus, valon väri, värintoisto-ominaisuudet, välkyntä, sekä valon vaihtelevuus. (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2021)

3.3.1 Luminanssijakauma

Luminanssijakauma näkökentässä määrää silmien sopeutumistason, joka vaikuttaa kohteen näkyvyyteen. Tasapainoinen sopeutumisluminanssi on tarpeen parantamaan näöntarkkuutta, kontrastiherkkyyttä (pienien suhteellisten luminanssierojen havaitseminen), sekä näköaistin toimintojen tehokkuutta (kuten akkommodaatio, konvergenssi, pupillien kokomuutos, silmien liikkeet jne.). Näkökentän luminanssijakauma vaikuttaa myös näkömukavuuteen, jolloin liian suuria luminansseja tai luminanssieroja (aiheuttavat häikäisyä), liian suuria luminanssvaihteluita (aiheuttavat näköväsytystä silmien jatkuvan sopeutumistason muuttamistarpeen takia), sekä liian pieniä luminansseja tai luminanssikontrasteja tulisi välttää (tekevät työympäristöstä yksitoikkoisen ja tylsän). (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2021)

3.3.2 Valaistusvoimakkuus

Valaistusvoimakkuudella ja sen jakaumalla työalueella ja välittömällä lähiympäristöllä on suuri merkitys sille, kuinka nopeasti, turvallisesti ja miellyttävästi henkilö hahmottaa näkötehtävän ja suoriutuu siitä. Valaistusvoimakkuuden tasoille on luotu asteikko lukseina, jotta valaistuserot ovat subjektiivisesti havaittavissa. Standardissa SFS-EN 12665:2018, jossa kuvataan valaistusvaatimusten käsitteet ja perustermit, on esitetty tämä kyseinen asteikko:

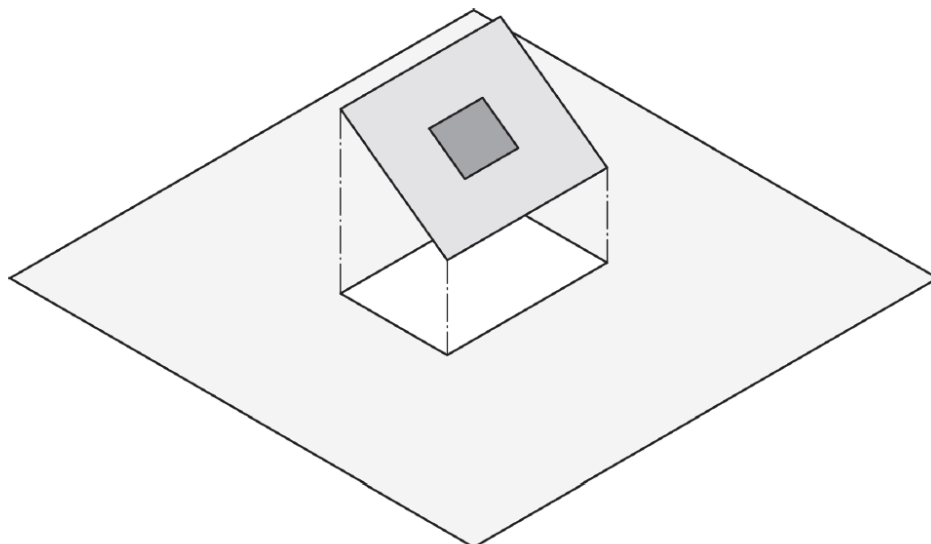
5 – 7,5 – 10 – 15 – 20 – 30 – 50 – 75 – 100 – 150 – 200 – 300 – 500 – 750 – 1000 – 1500 – 2000 – 3000 – 5000 – 7500 – 10 000 lx.

Suunnitellessa valaistusvoimakkuutta, se on hyvä tehdä korkeammalle tasolle, sillä näin mahdollistetaan riittävä kapasiteetti ja säätömahdollisuus valaistuksenohjausjärjestelmien avulla, jolloin valaistusvoimakkuutta voidaan soveltaa tarvittaessa näkötehtävän tai muiden valaistusvoimakkuuteen vaikuttavien tekijöiden mukaan. Suunnittelussa tulee myös ottaa huomioon valaisimen elinkaaren loppupää, jolloin valaisin toimii heikommin, kuin uutena. Korkeammalle tasolle suunnittelu takaa myös sen, että vanhakin valaistusratkaisu saavuttaa standardin vaatimat arvot. (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2021)

Suuret valaistusvoimakkuuden vaihtelut työalueen tai toiminta-alueen ympäristössä saattavat aiheuttaa silmien väsymistä ja epämukavuuden tunnetta. Tämän vuoksi standardissa on annettu välittömän lähiympäristön (eli vähintään 0,5 m levyinen vyöhyke näkökentässä työalueen ympärillä) valaistusvoimakkuudelle suhteelliset vähimmäisarvot, jotka ovat nähtävissä taulukossa 1. Sama pätee myös tausta-alueelle (eli lattian tasossa oleva horisontaalinen alue, joka ympäröi välitöntä lähiympäristöä), jonka on oltava valaistusvoimakkuudeltaan vähintään 1/3 välittömän lähiympäristön valaistusvoimakkuudesta. Esimerkki eri alueista on havainnollistettu kuvassa 3. (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2021)

Taulukko 1. Välittömän lähiympäristön valaistusvoimakkuuden suhde työalueen tai toiminta-alueen valaistusvoimakkuuteen (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2021).

Työalueen tai toiminta-alueen valaistusvoimakkuus \bar{E}_m lx	Välittömän lähiympäristön valaistusvoimakkuus lx
≥ 750	500
500	300
300	200
200	150
≤ 150	<i>yhtäsuuri kuin työalueella</i>



Selitykset

- Tietyn kokoinen ja tietyssä asennossa oleva työkohde, työalue tai toiminta-alue (ei oikeassa mittakaavassa) (katso [5.3.3](#))
- Välitön lähiympäristö (vähintään 0,5 m leveä vyöhyke näkökentässä työalueen ympärillä)
- Tausta-alue (vähintään 3 m leveä välitöntä lähiympäristöä ympäröivä alue tilan asettamissa rajoissa) horisontaalisesti lattian tasossa

Kuva 3. Välittömän lähiympäristön ja tausta-alueen minimimitat verrattuna työ- ja toiminta-alueeseen (kuva ei ole oikeassa mittakaavassa) (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2021)

3.3.3 Häikäisy

Häikäisy on epämiellyttävä tunne, jonka aiheuttavat näkökentässä olevat kirkkaat kohteet kuten esimerkiksi valaistut pinnat, valaisinten osat tai ikkunat. Häikäisy voidaan kokea joko kiusahäikäisynä tai estohäikäisynä ja sitä tulee rajoittaa virheiden, väsymyksen ja tapaturmien ehkäisemiseksi.

Kirkkaiden valonlähteiden häikäisyä voidaan ehkäistä esimerkiksi valonlähteiden häikäisysuojilla tai käyttämällä sopivia varjostimia ikkunoissa (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2021). Sijoittamalla valaisimet siten, että ne eivät ole suoraan näkökentässä, auttaa myös ehkäisemään häikäisyä. Luminaansijakaumalla on myös tärkeä merkitys häikäisyn estämisessä, sillä esimerkiksi yksittäinen piste-mäinen valonlähde häikäisee enemmän, kuin yleinen (600x600 mm) neliön muotoinen paneelivalaisin, vaikka valaisimilla olisi identtinen valovirran arvo. Häikäisyn rajoittaminen on erityisen tärkeää silloin, kun katsesuunta on vaakatasosta ylöspäin valaisimeen päin, kuten esimerkiksi varastotyössä (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2021).

Valaisimista aiheutuva kiusahäikäisyn määrä täytyy määrittää suunnitteluvaiheessa käyttämällä UGR-taulukkomenetelmää (Unified Glare Rating). Valaisinvalmistajan on esitettävä valaisimesta taulukoidut UGR-häikäisyarvot, joissa on ilmoitettava myös valaisinväli. Valaistusstandardissa SFS-EN 12464-1 on määritetty erilaisille tiloille tietyt UGR-häikäisyarvot, joita ei saa ylittää. (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2021)

3.3.4 Väriominaisuudet

Valkoista valoa tuottavan valonlähteen tai päivänvalon väriominaisuuksia voidaan kuvailla kahdella tekijällä. Ensimmäinen on valon tuottama värivaikutelma (värilämpötila). Värivaikutelman valinnassa huomioidaan psykologiset, sekä esteettiset tekijät. Valinta riippuu valaistusvoimakkuudesta, tilan ja kalusteiden väristä, ympäröivästä ilmastosta, sekä tilan käyttötarkoituksesta. Huolellinen harkinta on tärkeää esimerkiksi yövuorotyössä. Päivänvalo on tärkeä valonlähde ihmisten hyvinvoinnille ja tietyt muutokset valon spektrijakaumassa vuorokauden aikana voivat auttaa vakauttamaan ihmisten vuorokausirytmiiä, jolloin sopiva spektrijakauma on yksi osa, jolla voidaan osittain vähentää päivänvalon puutteesta aiheutuvia kielteisiä vaikutuksia. (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2021)

Toinen tekijä on valonlähteiden värintoisto. Näkötehokkuuden, mukavuuden ja hyvinvoinnin vuoksi ympäristön, siinä olevien kohteiden ja ihmisten ihon värien tulee toistua riittävän luonnollisina. Standardin ISO 3864-1 mukaisten turvavärien on toistuttava aina todenmukaisina. Värintoistoindeksin arvon R_a pitää olla vähintään 80 alueilla, joilla ihmiset työskentelevät vakituisesti. Värintoisto on erityisen tärkeää myös työtehtävissä, joihin kuuluu tuotteiden laadunvalvonta. (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2021)

3.3.5 Välkynä

Välkynnällä ja stroboskooppi-ilmiöllä voi olla haittavaikutuksia, kuten näkömukavuuden heikkeneminen tai näkötehtävän suorituksen hankaloittaminen. Siitä voi myös seurata fyysisiä oireita, kuten päänsärkyä, pahoinvointia tai väsymystä. Välkynä voi aiheuttaa pahimmillaan vaaratilanteita, jossa edestakaisin liikkuvan tai pyörivän esineen liike näyttää todellista hitaammalta tai kokonaan pysähtyneeltä. (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2021)

Valaistusjärjestelmien suunnittelussa välkynä tulee ottaa huomioon etenkin himmenninlaitteita valittaessa, jotta kyseinen valonlähde ja himmennin soveltuvat yhteiskäyttöön ilman valonlähteen välkymistä millään säätöalueen arvolla. (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2021)

4 VALAISINTYYPIT JA NIIDEN OMINAISUUDET

Tässä kappaleessa esitellään eri valonlähteitä ja valaisintyyppejä. Nykyään suurin osa tässä kappaleessa käydyistä valonlähteistä on jo poistunut markkinoilta, tai tullaan tulevaisuudessa poistamaan Euroopan unionin EcoDesign-direktiivin seurauksena, jonka tarkoituksena on parantaa ympäristönäkökohtien ja elinkaariajattelun integrointia jo tuotteiden suunnitteluvaiheessa. Tästä huolimatta vanhanaikaisia valonlähteitä on vielä käytössä useassa kiinteistössä.

4.1 Hehkulamput

Hehkulamppujen toimintaperiaate perustuu resistiivisen hehkulangan läpi syötettyyn sähkövirtaan, joka tuottaa lämmön ohella myös valoa. Tyypillisesti materiaalit hehkuvat, ennen kuin ne saavuttavat sulamispisteensä ja hehkulangan materiaali täytyy valita siten, että materiaali ei syty palamaan tai sula lamppua käytettäessä. Hehkulammissa käytetään yleensä volframista tehtyä hehkulankaa, sillä sen sulamispiste on 3422 °C ja se säilyttää lujuutensa muita metalleja paremmin korkeissa lämpötiloissa. (Whelan;DeLair;& Miyajima, Edison Tech Center, 2010). Hehkulampon sisällä on joko tyhjiö tai se on täytetty inertillä kaasulla tai kaasuseoksella kuten tyrellä, argonilla, kryptonilla tai ksenonilla. Inertillä kaasulla tarkoitetaan kaasua, joka ei reagoi muiden aineiden kanssa. Kaasu hidastaa volframin haihtumista ja täten pidentää lampun käyttöikä (Kankare, 2009).

Hehkulamppujen valotehokkuus on erittäin huono, sillä vain 2–5 % käytetystä energiasta päätyy näkyvän valon spektriin. Loput käytetystä energiasta kulutetaan joko infrapunasäteilynä tai lämpönä (MIT Technology Licensing Office, 2016). Hehkulamppujen valovirran suhde tehoon on parhaimmillaan noin 12–18 lm/W (Green Energy Efficient Homes, 2016).

Käyttöikä perinteisellä kuluttajamarkkinoilla myydyillä hehkulamput on yleisimmin 800–1200 tunnin välillä (Cyr, 2016). On kuitenkin tapauksia, kuten Yhdysvalloissa Livermoren paloasemalla, jossa hehkulamput on palanut jatkuvasti jo vuodesta 1901, eli noin miljoonan tunnin ajan. Pitkäikäisyys johtuu lampun paksusta hehkulangasta, jonka lämpötila on käytön aikana pieni verrattuna normaaliin hehkulamputiin, sekä siitä ettei lamppua sammuteta koskaan ja hehkulanka ei näin rasitu yhtä paljon jatkuvista lämpötilamuutoksista (Kykta, 2021).

Väriämpötila hehkulammissa on yleensä noin 2700 K, joka on lämmin valkoinen. Värintoistoindeksi tällaisessa hehkulammissa on CRI 100, eli paras mahdollinen. Värintoistoindeksi laskee hehkulammissa, joissa väriämpötila on korkeampi kuin 2700 K. Tällaisten lamppujen värintoistoindeksin arvo pysyttelee kuitenkin yleensä CRI 95 yläpuolella, mikä on edelleen erittäin hyvä (Stouch Lightning, 2016).

Euroopan unioni alkoi rajoittaa hehkulamppujen myyntiä jo vuodesta 2009 alkaen EcoDesign-direktiivillä, jolloin kiellettiin yli 100 W:n hehkulamppujen maahantuonti ja valmistus. Kielto laajeni portaittain ja vuodesta 2012 alkaen kaikki yli seitsemän watin hehkulamput ovat EU:n rajoitusten piirissä (Ulkoministeriö, 2009).

4.2 Halogeenilamput

Halogeenilamppu on paranneltu versio hehkulampuista, mutta toimintaperiaate on lähes sama. Halogeenilampuissa volframista tehty hehkulanka on kestävämmän kvartsisen kuvun sisällä, sillä halogeenilampun sisällä käytetty kaasu on paljon korkeammassa paineessa (7–8 kertaisessa normaaliilmakehän paineessa), sekä lampun täytyy kestää korkeampia lämpötiloja. Lampun sisällä on käytetty halogeenikaasua, joka estää volframista tehdyn hehkulangan tummenemisen, sekä hidastaa langan ohenemista. Tämä tekee halogeenilampusta pitkäkestoisemman, sekä auttaa volframista tehtyä hehkulankaa saavuttamaan turvallisesti korkeamman lämpötilan, mikä puolestaan tuottaa enemmän valoa hieman paremmalla hyötysuhteella (Whelan & DeLair, *The Halogen Lamp*, 2013).

Halogeenilamput lämpenevät käytön aikana huomattavasti enemmän verrattuna hehkulamppuihin, eikä niitä tulisi käsitellä paljalla käsillä, sillä sormesta kuvun pintaan tarttunut rasva tai lika voi lämmittää yksittäistä kohtaa lampusta enemmän, jolloin se voi hajota. Erittäin korkea lämpötila lamppuissa on myös paloturvallisuusriski, sekä palovammoja aiheuttava tekijä, jos lamppua ei ole suojattu ylimääräisellä lasikuvulla (Whelan & DeLair, *The Halogen Lamp*, 2013).

Halogeenilamppujen valotehokkuus on noin 10 % luokkaa, tai 16–24 lm/W (Green Energy Efficient Homes, 2016), mikä on parempi kuin perinteisellä hehkulampulla, mutta edelleen erittäin huono verrattuna uudempiin valaistusteknologioihin. Niiden käyttöikä on 2000–4000 tunnin välillä, mikä on vähintään kaksi kertaa enemmän, kuin normaalilla hehkulampulla. (Jaric Group, 2020)

Euroopan unioni kielsi halogeenilamppujen myynnin vuonna 2018 EcoDesign direktiivillä, joka alkoi rajoittamaan myös hehkulamppujen myyntiä jo vuonna 2009. Tämä kielto ei kuitenkaan koske kaikkia halogeenilamppuja, sillä pienempien halogeenilamppujen myynti on vielä sallittua, kuten esimerkiksi pöytälamppuissa tai uuneissa olevat halogeenilamput tai 12 V:n pienisjännitehalogeenilamput, sekä rakennusvalojen halogeenilamput. (YLE, 2018).

4.3 Kaasupurkauslamput

Kaasupurkauslamppujen ryhmään kuuluu useita eri valaisintyyppisiä. Seuraavissa kappaleissa on kerrottu tunnetuimmista kaasupurkauslamputyypeistä. Yksi näistä on nykypäivänä varmasti loiste-lamppu, joiden uusimiseen tämän opinnäytetyön lasketut esimerkit painottuvat eniten.

4.3.1 Loisteputket

Rakenne

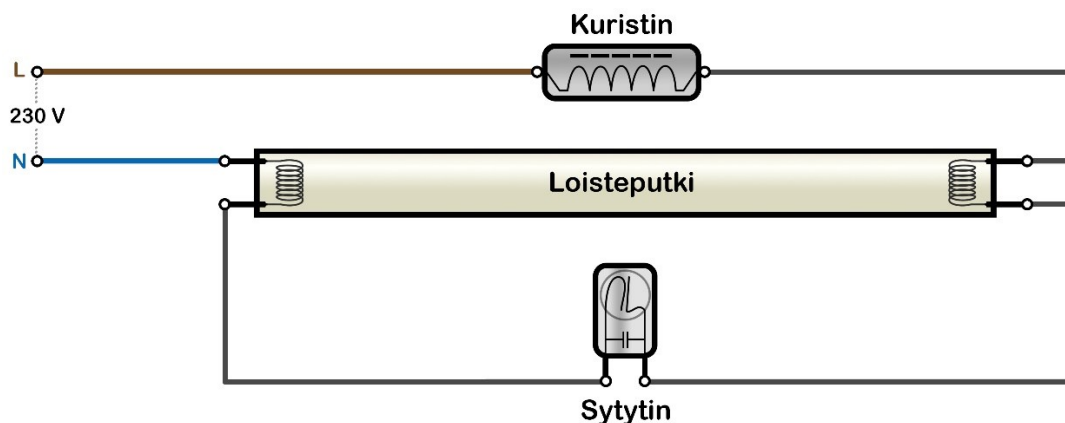
Loisteputken rakenne koostuu lasiputkesta, jonka sisällä on elohopeaa, sekä inerttiä kaasua matalassa paineessa. Kaasun tarkoituksena on hehkulamppujen tapaan hidastaa volframista tehtyjen elektrodien haihtumista, joita loisteputkessa on kaksi molemmissa putken päissä. (Pacific Lamp & Supply Company, ei pvm). Loisteputki tarvitsee toimiakseen myös magneettisen kuristimen, joka rajoittaa lampun läpi kulkevaa virtaa ja näin estää lampun hajoamisen, sekä sytyttimen, jotta lamppu saadaan käynnistettyä.

Loisteputkia on käytössä useampia eri kokoja, joista yleisimmät yhä käytössä olevat suorat putket ovat joko T5- tai T8-mallia. Mallit erottavat toisistaan helposti verrattaessa keskenään, sillä T5-loisteputket ovat ohuempia 16 mm:n halkaisijallaan. T8 loisteputken halkaisija on 26 mm. Pituuksia molemmilla lamputyypeillä on useampia, josta voidaan valita käyttötarkoitukseen sopiva loisteputki. T5-mallilla pituudet vaihtelevat 549–1449 mm:n välillä, sekä tehot 14–80 W:n välillä. T8-mallilla pituudet vaihtelevat 438–1500 mm:n välillä, sekä tehot yleensä 15–58 W:n välillä (Suomen Valotorni Oy, ei pvm).

Toimintaperiaate

Loisteputki tuottaa valoa virittämällä putken sisällä olevan elohopeahöyryn atomeita korkeampaan energiatilaan sähköpurkausten avulla. Kun atomit palaavat takaisin perustilaan, ne emittoivat fotoneita UV-aallonpituuksilla. Tämä UV-säteily muutetaan näkyväksi valoksi loisteputken ulkokuoren pinnoituksen avulla, joka sisältää fluoresenssiainetta (Whelan & DeLair, 2013).

Kun loisteputkeen kytketään jännite, sytyttimen kaksoismetallikärjet ovat aluksi auki, jonka jälkeen sytyttimen sisällä olevassa kaasussa syntyy sähköpurkaus, joka lämmittää kärkiä ja saa ne sulkeutumaan. Kärkien sulkeuduttua virta pääsee kulkemaan putken molemmissa päissä olevien volframielektrodien läpi, jotka lämmittävät putkessa olevaa elohopeaa ja saavat sen höyrystymään. Magneettinen kuristin on kytketty kuvan 4 mukaisesti sarjaan sytyttimen kanssa, joten kun sytyttimen kaksoismetallikärjet jäähtyvät ja avautuvat, saa se kuristimen magneettikentän purkautumaan aiheuttaen korkean jännitteen. Korkea jännite puolestaan aiheuttaa loisteputkessa sähköpurkauksen, joka saa lampun syttymään ja näin virta kulkee nyt sytyttimen sijaan loisteputken läpi. Kuristimen tehtävänä on tämän jälkeen rajoittaa virta lampulle sopivaksi, jotta sen läpi kulkeva virta ei kasva liian suureksi ja hajota lamppua. (Iso-Heiniemi, 2010)



Kuva 4. Loisteputken rakenteen havainnekuva magneettisella kuristimella ja sytyttimellä.

Elektroniset liitännälaitteet

Loistelamppujen kuristimia, sekä sytyttimiä voidaan korvata myös elektronisella liitännälaitteella, joka vastaa lampun sytytyksestä, sekä virran rajoittamisesta. Elektroniset liitännälaitteet ovat yleisempiä uudemmissa loisteputkivalaisimissa. Esimerkiksi T5-loisteputkivalaisimet toimivat vain elektronisella liitännälaitteella, mutta T8-loisteputkivalaisimissa on käytössä molempia, niin elektronisia liitännälaitteita, kuin myös perinteisiä kuristimia ja sytyttimiä.

Elektronisen liitännälaitteen hyöty verrattuna perinteiseen menetelmään on se, että laite muuttaa lampulle syötetyn jännitteen yli 20 kHz taajuuteen. Tämä estää loistelampuille tyypillisen valon välkkymisen, joka ilman elektronista liitännälaitetta on 100 Hz:n taajuuksista. Tämä 100 Hz välkkyminen vaikuttaa suoraan valon laatuun ja siitä voi seurata esimerkiksi päänsärkyä tai väsymystä, vaikka sitä ei suoraan ihmissilmällä havaitse. Elektroniset liitännälaitteet parantavat myös käytetyn lampun hyötysuhdetta.

Energiätehoisuus ja käyttöikä

T5-loisteputket ovat uudempaa tekniikkaa kuin T8-loisteputket ja saavuttavat hieman paremman hyötysuhteen. T5-mallilla valotehoisuus on parhaimmillaan noin 100 lm/W, kun T8 loisteputki voi puolestaan saavuttaa noin 90 lm/W valotehon (Shenzen Benwei Lighting Technology Co., ei pvm). Yleisesti loisteputkien valotehoisuus sijoittuu 50-100 lm/W välille. Loisteputket ovat siis huomattavasti energiatehokkaampia, kuin hehku- tai halogeenilamput.

Loisteputkien käyttöikä vaihtelee 10 000 ja 20 000 tunnin välillä. Huono elektroninen liitännälaitte voi myös alentaa valaisimen käyttöikää hajotessaan ennen lamppua, vaikka teoriassa laitteen tarkoitus onkin parantaa valaisimen hyötysuhdetta (Whelan & DeLair, 2013). Lisäksi loisteputkien valoteho laskee käyttöiän myötä, sekä loppupuolella putkien välkkymisestä saattaa tulla havaittavaa jo ihmisilmällä.

Loisteputkista tulee elinkaarensa päässä ongelmajätettä niiden sisältämän elohopean takia. Elohopeaa pidetään yhtenä vaarallisimmista ympäristömyrkyistä (Valtavalo, 2022) ja tämän vuoksi loisteputkia ei tule rikkoa, vaan ne täytyy toimittaa sopivaan jätekeräykseen (Peda.net, ei pvm).

Ominaisuudet

Loisteputkien värilämpötilaa voidaan muuttaa lampun sisäisen pinnoituksen avulla ja tämän ansiosta loisteputkia on saatavilla kaikissa värilämpötiloissa (esim. 2700–10000 K). Myös erikoissävyjä saadaan loistelampuilla, joihin kuuluu mm: UV-sävyt, punainen, keltainen, vihreä, sininen ja mustavalo.

Värintoistoindeksi loisteputkissa vaihtelee runsaasti, mutta sijoittuu yleisesti 74–90 välille. Tämä on heikompi verrattuna hehkulamppuun, mutta yleensä tarpeeksi hyvä peruskäyttöön teollisuudessa tai toimistoissa. (Whelan & DeLair, 2013) Saatavilla on myös DeLuxe putkia, joiden värintoistoindeksi sijoittuu 90 ja 100 välille.

EcoDesign

Euroopan unionin EcoDesign-direktiivi rajoittaa hehku -ja halogeenilamppujen tavoin myös loisteputkien myyntiä Euroopassa. Direktiivin seurauksena T5- ja T8-loisteputket tulevat poistumaan markkinoilta 24.8.2023 alkaen (Valtavallo, 2022).

4.3.2 Pienloistelamput

Pienloistelamput tai toiselta nimeltään energiansäästölamput ovat loistelamppuja, joiden toimintaperiaate on sama kuin loisteputkissa. Pienloistelampuissa on pitkä ja ohut loisteputki, joka on taivuteltu tiiviiseen muotoon ja jolla päästään samaan kokoluokkaan perinteisen hehkulampun kanssa. Pienloistelamppuja on saatavilla kierrekantaisena tai pistokekantaisena.

Kierrekantaisissa pienloistelampuissa on valmiina elektroninen liitäntälaitte (CFL-i), joten esimerkiksi perinteisen hehkulampun voi suoraan korvata kyseisellä lampulla. Kierrekantaista pienloistelamppua ei kuitenkaan välttämättä voi himmentää kuten perinteistä hehkulamppua. Pistokekantaisissa pienloistelampuissa vaaditaan erillinen liitäntälaitte (CFL-ni), joka on yleensä sijoitettu valaisimen sisälle.

4.3.3 Monimetallilamput

Monimetallilamput ovat kaasupurkauslamppuja, jotka tuottavat valoa luomalla valokaaren erilaisten metallien halidien, sekä elohopeahöyryn läpi (Superior Lightning, ei pvm). Monimetallilamppuja käytetään yleisimmin ulkovalaistuksessa, sillä niiden tuottama valo on hyvin valkoista (lähellä päivänvaloa), sekä lamput ovat myös erittäin kirkkaita. Monimetallilamppujen halideissa käytetään esimerkiksi indiumia ja talliumia, joiden tarkoituksena on parantaa lampun tuottamaa väriä, sekä värintoistokykyä (Kumar;Harikumar;& Halpeth, 2004).

Valotehokkuus monimetallilampuissa vaihtelee 65–100 lm/W välillä. Pienemmissä monimetallilampuissa voidaan päästä jopa 115 lm/W, sillä lampun sisälle saadaan luotua suurempi paine, joka auttaa lampun hyötysuhteessa. Värilämpötiloja on saatavilla lämpimästä valkoisesta (3000 K) täysin siniseen asti (20000 K). Värintoistoindeksi puolestaan sijoittuu 60–90 välille riippuen käytetyistä kemikaaleista, sekä valmistajasta. Monimetallilampun tyypillinen käyttöikä on 10000–20000 tuntia (Edison Tech Center, 2012).

4.4 LED-valaisimet

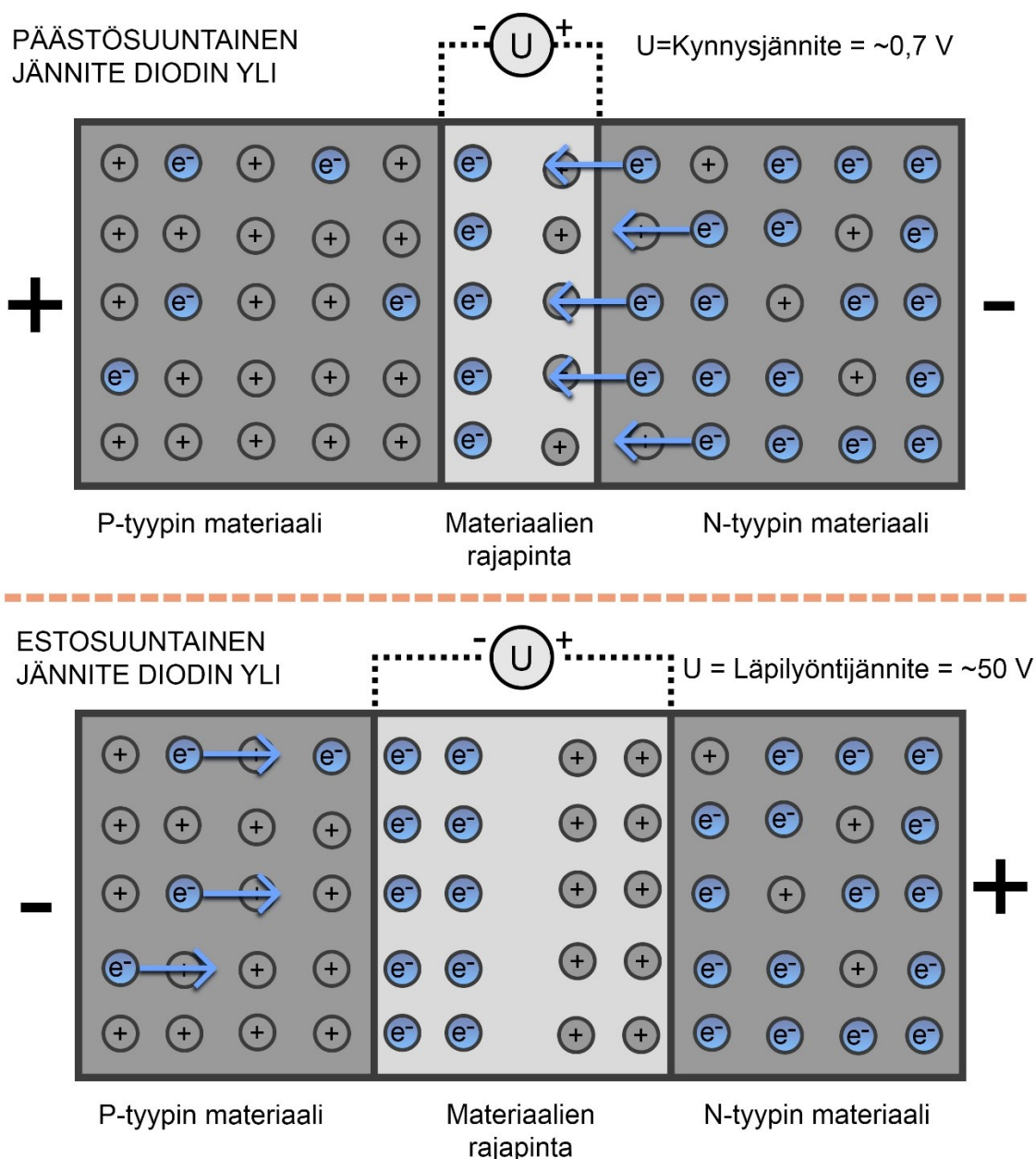
Toimintaperiaate

Led on valonlähde, joka tuottaa valoa puolijohdeiden, sekä elektroluminesenssin avulla. Led on lyhenne sanoista Light Emitting Diode, eli suomennettuna valoa säteilevä diodi. Diodi on yleinen elektronikassa käytetty puolijohdekomponentti, joka päästää sähkövirtaa kulkemaan lävitseen vain yhteen suuntaan.

Diodien toiminta perustuu negatiivisesti varautuneeseen n-tyyppin puolijohdeiden ylimääräisten elektronien siirtymiseen p-tyyppin puolijohdeeseen, joka on positiivisesti varautunut, jättäen "aukkoja" elektronien siirtymistä varten. Tämä vapaiden elektronien siirtyminen kahden materiaalin välissä luo materiaalien välille rajapinnan, joka lopulta rajoittaa vapaiden elektronien liikkumisen n-tyyppin materiaalista p-tyyppiin ja luo rajapintaan kynnysjännitteen, jonka yli n-tyyppin materiaalin ylimääräiset elektronit eivät voi liikkua ilman ulkoista jännitelähdettä. (MKS Instruments, 2023)

Elektronit siirtyvät n-tyyppin materiaalista p-tyyppiin materiaalien rajapinnassa, kun diodin yli vaikuttaa tarpeeksi suuri jännite, joka ylittää diodin rajapinnan kynnysjännitteen. Diodit johtavat sähköä vain päästösuuntaan, sillä estosuuntaisen jännitteen kytkeminen aiheuttaa sähkökentän, joka vetää virrankuljettajat pois rajapinnan läheisyydestä, suurentaen rajapintaa ja estäen samalla elektronien siirtymisen rajapinnassa. Jos diodin yli luodaan tarpeeksi suuri estosuuntainen jännite, niin diodi lämpenee ja lopulta hajoaa, mikä aiheuttaa virtapiirissä diodin läpi syntyvän oikosulun, sillä diodi ei pysty enää tietyn pisteen jälkeen toimimaan eristeenä (MKS Instruments, 2023). Tarvittavaa estosuuntaista jännitettä, jolla diodi hajoaa, kutsutaan läpilyöntijännitteeksi ja se vaihtelee erilaisten diodimallien välillä.

Kuvassa 5 on esitetty yksinkertaistettu havainnekuva diodin toimintaperiaatteesta erikseen päästösuuntaisen, sekä estosuuntaisen jännitteen vaikuttaessa sen yli. Kuvassa elektroneita on kuvattu sinisillä palloilla (e^-) ja vapaita "aukkoja" palloilla, joiden sisällä on $+$ -merkki. Sinisillä nuolilla on kuvattu suunta, johon elektronit yrittävät liikkua sähkökentän vaikutuksen seurauksena.



Kuva 5. Yksinkertaistettu havainnekuva diodin toimintaperiaatteesta.

Perinteisen diodin tapaan, myös led päästää sähkövirtaa kulkemaan lävitseen vain yhteen suuntaan. Ledien valontuotto perustuu elektronien siirtymisen yhteydessä syntyneisiin fotoneihin. Fotonien syntyminen, sekä syntyneiden fotonien aallonpituus, riippuvat käytettyjen materiaalien ominaisuuksista. Kiinteiden aineiden vyöteorialla voidaan selittää puolijohteiden toimintaperiaate, jossa elektronit siirtyvät valenssivyöltä johdinvyölle. Väiden välistä rajapintaa, jonka yli elektronit siirtyvät, kutsutaan kielletyksi energiavyöksi tai energia-aukoksi (engl. band gap). Puolijohteissa käytettyjen materiaalien energiavyön ominaisuuksia voidaan muuttaa "doppaamalla" materiaaleja epäpuhtauksilla, joka määrittää kielletyn energiavyön suuruuden ja näin ollen vapautuneen energian määrän, kun elektroni siirtyy suuremmalta energiatasolta pienemmälle energiatasolle. Mitä suurempi kielletty energiavyö on, sitä suurempi määrä energiaa vapautuu fotonien välityksellä, joka puolestaan määrittää fotonien aallonpituuden, eli värin. (Baguley & McDonald, 2014)

Rakenne

Yksittäisien led-valaisimien rakenne koostuu yleisimmin useammasta pienestä led-komponentista, jotka ovat yhdistettynä joko ulkoiseen, tai valaisimen sisäiseen virtalähteeseen. Kuten aikaisemmassa kappaleessa mainittiin, ledit toimivat vain tasasähköllä, joten niiden liittäminen perinteiseen sähköverkkoon vaatii aina tasasuuntaajan. Energia, mitä ledit eivät vapauta valona, menee hukkaan lämpönä. Liiallinen lämpeneminen voi lyhentää ledien käyttöikää tai heikentää niiden tuottamaa valovirtaa, minkä vuoksi lämpö johdetaan pois ledeistä jäähdytys-elementeillä.

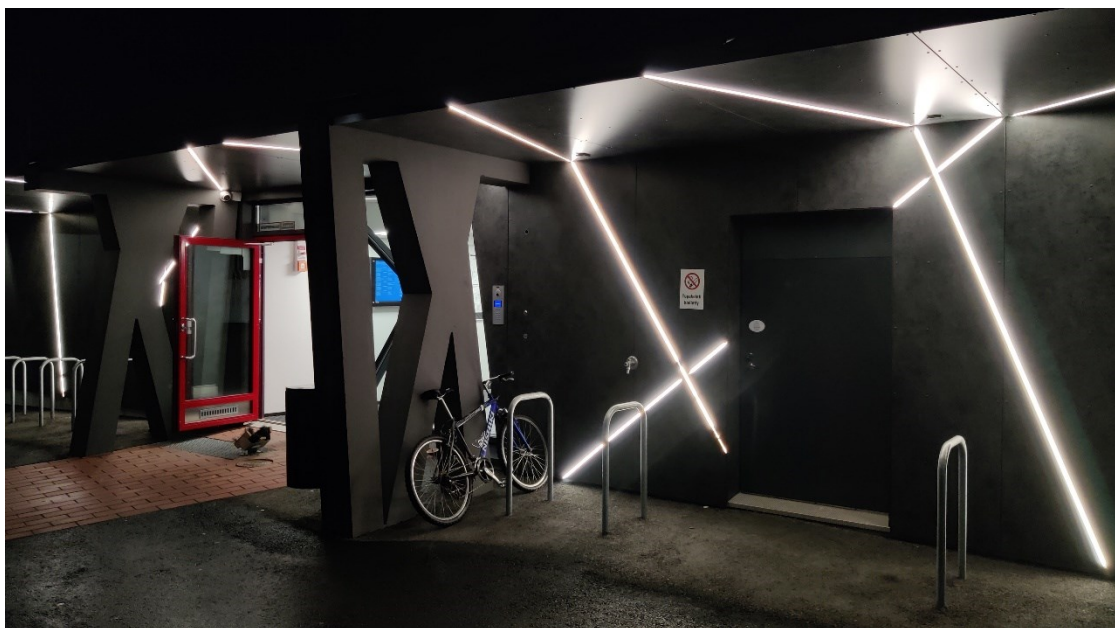
Led-valaisimia on saatavilla lähes jokaiseen käyttötarkoitukseen. Loisteputkivalaisimia voidaan korvata suoraan led-valaisinputkilla, sekä lähes kaikki perinteiset E27-kantaiset valaisimet markkinoilla ovat nykyään led-valaisimia. Ledeistä voidaan myös muodostaa pitkiä ja tasaisesti valaisevia nauhoja, joita käytetään paljon sisustuksessa, sekä arkkitehtuurissa. Ledien tuottamaa valoa voidaan suunnata muuttamalla valaisimen optiikkaa ja rakennetta halutun käyttötarkoituksen mukaiseksi. Kuvissa 6-10 on esitetty esimerkkejä erilaisista led-valaisimista.



Kuva 6. Led-nauha, jossa on liimapinta, jonka avulla se voidaan kiinnittää. Nauhassa on monta erillistä komponenttia, joissa on kaikissa erikseen punainen, vihreä, sininen ja valkoinen led, joita ohjaamalla saadaan luotua visuaalinen illuusio eri väreistä (RGBW). (Niskanen, 2023)



Kuva 7. E27-kantainen sisustusvalo, jossa on pitkä (keltainen) led-säie. (Niskanen, 2023)



Kuva 8. Kerrostalon julkisivun valaistus, joka on toteutettu led-nauhoilla. (Niskanen, 2023)



Kuva 9. Alakattoon asennettavia led-paneelivalaisimia. (Niskanen, 2023)



Kuva 10. GU10-kantainen spottivalo, jonka sisällä näkyy monta erillistä led-diodia. (Niskanen, 2023)

Energiatehokkuus ja käyttöikä

Nyky aikaisten led-valaisimien käyttöikä on yleensä ilmoitettu noin 50 000 tuntiin, mutta moni valaisin pääsee myös 100 000 tunnin lukemaan. Led-valaisimet ovat siis yleisesti, sekä tässä työssä käsitellyistä valaisintyypeistä pitkäikäisimpiä. Ledien valoteho ei myöskään laske valaisimen ikääntyessä samalla tavalla perinteisiin valonlähteisiin verrattuna.

Ledien valotehokkuus vaihtelee paljon riippuen esimerkiksi led-komponenttien tuotannon laadusta. Suurin osa moderneista led-valaisimista ylittää vähintään lukemaan 100 lm/W, mutta ledejä on saatavilla jopa 220 lm/W valotehokkuudella. (Ledrise Led Professional, 2023)

Ominaisuudet

Led-lamppujen yleisimmät värilämpötilat vaihtelevat 2000 K - 6500K välillä perinteisissä kuluttajakäytössä olevissa valaisimissa. Ledejä valmistetaan paljon myös punaisena, vihreänä, sekä sinisenä, (RGB) joita yhdistelemällä saadaan esimerkiksi led-nauhoja, jotka voivat toistaa lähes koko ihmissilmällä nähtävän värispektrin vaihtelemalla näiden kolmen ledin kirkkauksia ja luomalla illuusion eri väreistä. Kuvassa 6 nähdään tällainen led-nauha, mutta siinä on lisäksi erillisiä valkoisia led-diodeja (RGBW). Samalla toimintaperiaatteella toimivat esimerkiksi tietokoneiden tai älypuhelimien näytöt.

Ledien värintoistoindeksi vaihtelee eri valmistajien, sekä mallien välillä. Nykyaikaisissa ledeissä voidaan saavuttaa lähes täydellinen CRI:n arvo, eli 100 (LAMPPUKAUPPA LED STORE OY, ei pvm). Yleisesti markkinoilla saatavilla olevien led-valaisimien värintoistoindeksin arvot sijoittuvat 80–98 välille.

5 VALAISTUKSEN VAIKUTUS SÄHKÖN LAATUUN

Tässä kappaleessa käsitellään sähkön laatua, siihen liittyviä määritelmiä, sekä standardeja. Lopussa tarkastellaan miten eri valaistusratkaisut vaikuttavat kiinteistön sähkön laatuun.

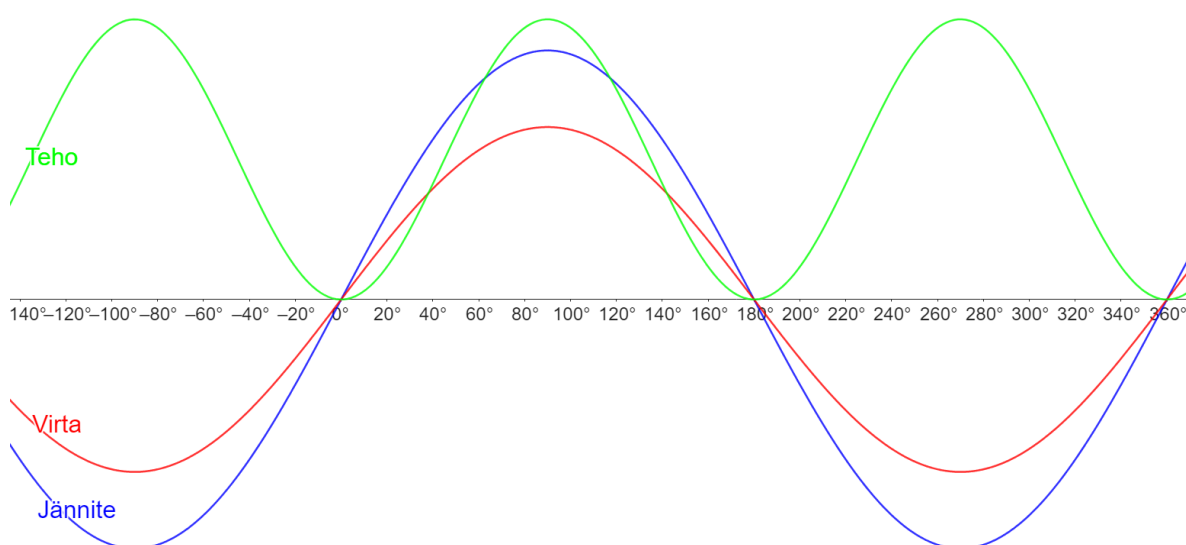
Sähkön laadulla kuvataan, kuinka paljon häiriöitä esiintyy sähköä syöttävässä verkossa. Häiriöt sinimuotoisessa jännitteessä voivat aiheuttaa esimerkiksi laitteiston vaurioitumisia, häiriöitä sähkölaitteiden toiminnassa tai ylimääräistä kuormitusta sähkönjakelujärjestelmissä.

5.1 Loisteho

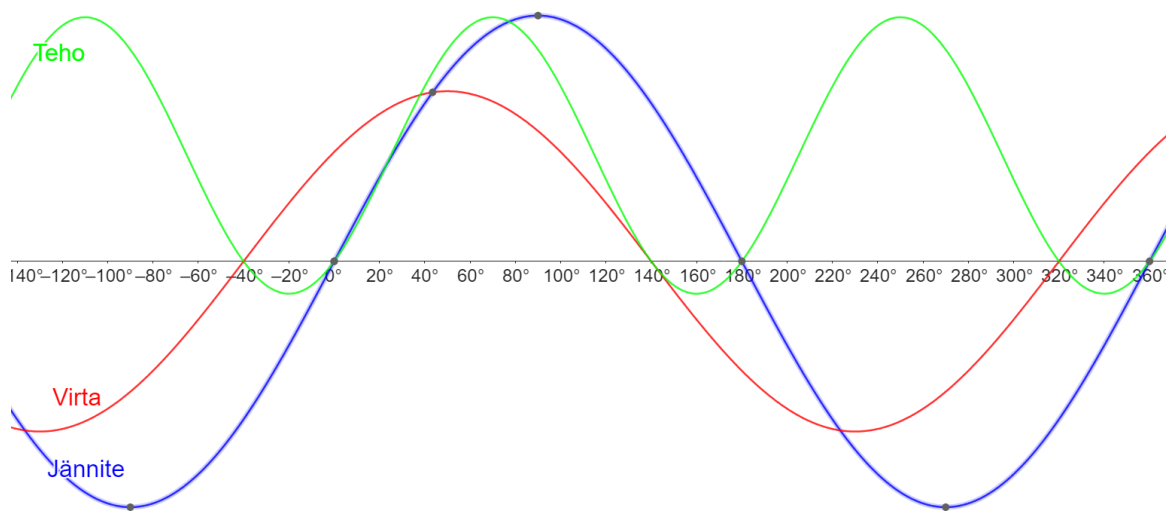
Toisin kuin tasasähköjärjestelmissä, vaihtosähköjärjestelmissä esiintyy pätötehon (W) lisäksi myös loistehoa (VAr). Loistehoa esiintyy verkossa, kun jännitteen ja virran vaihekulmat poikkeavat toisistaan, eli kun siniaaltonen virta kulkee jännitteen edellä tai sitä jäljessä.

Loisteho ei itsessään pysty tekemään työtä, mutta on välttämätön laitteiston toimintaan vaadittavien magneettikenttien ylläpitämiseksi (Savon Voima Oyj, ei pvm). Eli vaikka pätöteho tekee kaiken työn, vaihtosähköjärjestelmä ei toimi ilman magnetointia ja siksi loisteho on välttämätöntä. Loisteho täytyy huomioida verkon kapasiteetin mitoituksessa pätötehon lisäksi, sillä se kuormittaa sähköverkkoa sen vaatiman virran seurauksena ja pienentää verkon energiansiirtokapasiteettia pätötehon osalta (Ijäs, 2021).

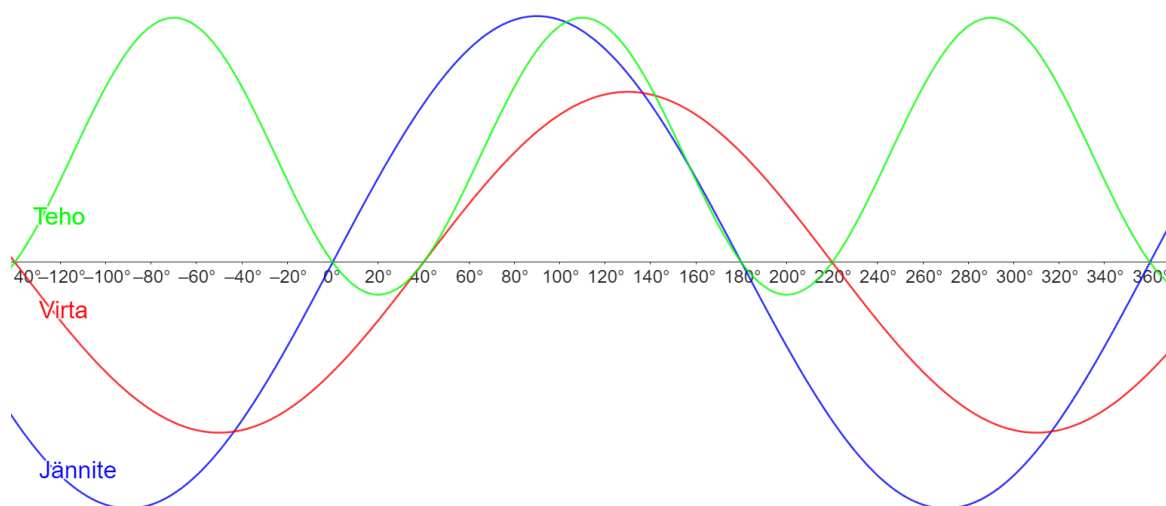
Loistehoa aiheuttava kuorma voi olla induktiivinen tai kapasitiivinen. Induktiivisissa kuormissa virta jää jännitteestä jälkeen ja kapasitiivisissa kuormissa päinvastoin. Täysin resistiiviset kuormat eivät synnytä loistehoa, sillä virralla ja jännitteellä ei ole vaihe-eroa. Kuvissa 11-13 on esitetty havainnekuvat resistiivisestä, induktiivisesta, sekä kapasitiivisesta kuormasta, joissa sinisellä on kuvattu jännite, punaisella virta, sekä vihreällä näiden kahden tulo, eli teho.



Kuva 11. Resisttiivinen kuorma.



Kuva 12. Kapasitiivinen kuorma, jossa virran vaihekulma on 40° edellä jännitteeseen verrattuna.

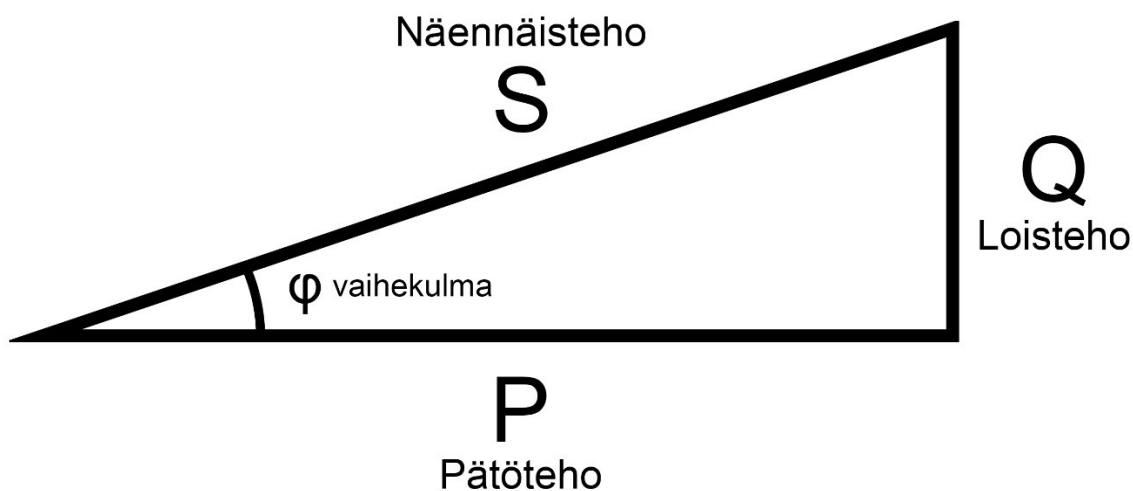


Kuva 13. Induktiivinen kuorma, jossa virran vaihekulma on 40° jäljessä jännitteeseen verrattuna.

Kuvasta 11 huomataan, että täysin resistiivisen kuorman teho ei käy ollenkaan negatiivisena, toisin kuin induktiivisen ja kapasitiivisen kuorman tapauksessa. Hetkellinen teho on välillä siis negatiivinen, eli tehoa siirtyy takaisin syöttävään lähteeseen.

Induktiivisen loistehon määrä täytyy kompensoida mahdollisimman pieneksi, sillä siitä peritään erillistä maksua ja kapasitiivisen loistehon syöttäminen jakeluverkkoon on kokonaan kielletty (Savon Voima Oyj, ei pvm). Kompensoinnissa pyritään perusaaltotaajuiseen rinnakkaisresonanssiin kuorman ja kompensointilaitteen välillä, eli esimerkiksi induktiivista kuormaa kompensoidaan kapasitiivisella kompensoinnilla, jolloin ne kumoavat toisensa (Ijäs, 2021). Näin verkkoon syötetyn loistehon määrä saadaan mahdollisimman pieneksi.

Vaihtosähköjärjestelmissä tehollisen jännitteen ja virran tuloa kutsutaan näennäistehoksi, jossa on pätötehon lisäksi huomioitu myös loisteho. Perusaaltotaajuisessa vaihtosähköjärjestelmässä tehoa voidaan kuvata helposti tehokolmiolla, joka on esitetty kuvassa 14. Tehokolmiossa on Näennäisteho S , loisteho Q , pätöteho P , sekä jännitteen ja virran välinen vaihekulma φ . Tehokolmion avulla saadaan määritettyä perusaaltotaajuiselle kuormalle tehokerroin $\cos\varphi$ (tai eng. DPF, Displacement Power Factor), joka kertoo pätötehon suhteen näennäistehoon. Kaavassa 1 on esitetty tehokertoimen $\cos\varphi$ laskukaava (Ijäs, 2021). Huomioitavaa on, että tätä tehokerrointa ei tulisi käyttää useimmissa vaihtosähköjärjestelmissä, sillä siinä ei ole vielä huomioitu yliaalloista johtuvia häviöitä, jotka selitetään seuraavassa kappaleessa.

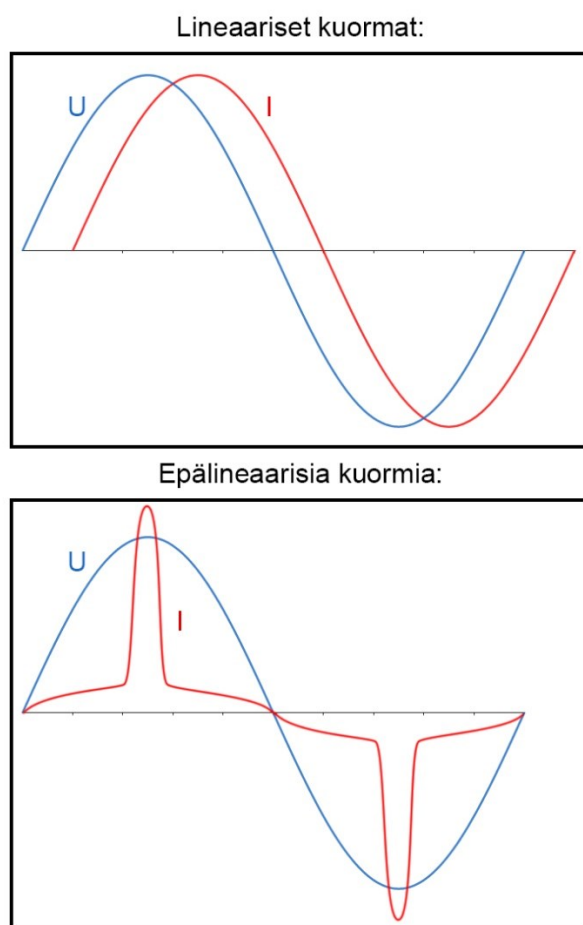


Kuva 14. Tehokolmio.

$$\cos\varphi = DPF = \frac{P}{S} \quad (1)$$

5.2 Harmoniset yliaallot

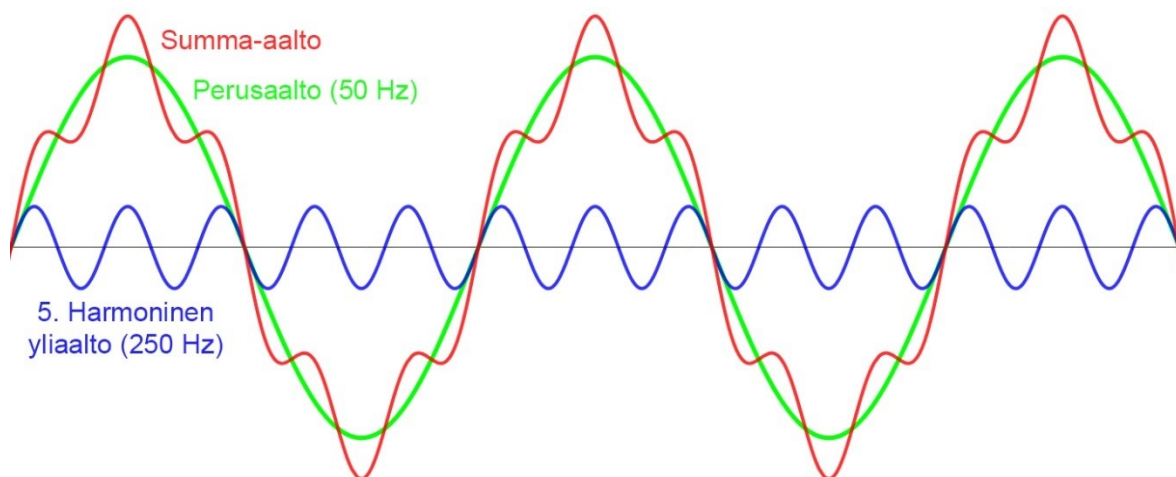
Sähköverkon kannalta epälineaariset kuormat, kuten puolijohdetekniikkaan perustuvat kytkennät (esim. tasasuuntaajat) eivät synnytä sinimuotoista virtaa. Virran käyrämuoto poikkeaa sinimuodosta, jolloin siinä on ns. säröä. Jos virta säröytyy riittävästi, aiheuttaa se myös muutoksia jännitteen käyrämuotoon, jolloin jännite ei ole enää täydellistä sinimuotoista käyrää. Tämä tarkoittaa heikentynyttä sähkön laatua, josta voi aiheutua ongelmia etenkin herkissä sähkölaitteissa. Sähköverkon kannalta lineaariset kuormat, kuten vastukset tai suoraan verkkoon kytketyt moottorit synnyttävät sinimuotoista virtaa, jolloin myöskään jännitteeseen ei synny säröjä. Kuvassa 15 on havainnollistettuna lineaariset, sekä epälineaariset kuormat sinimuotoisessa jännitteessä.



Kuva 15. Lineaariset ja epälineaariset kuormat sähköverkossa.

Jännitteessä ilmeneviä säröjä voidaan kuvata eri taajuuksilla toimivien jännite- ja virtalähteiden superpositioilla. Tavallisimpien tasasuuntaajien virtaa voidaan kuvata sellaisilla lähteillä, jotka ovat verkon perustaajuuden monikertoja. Näitä monikertoja kutsutaan harmonisiksi yliaalloiksi. Harmonisien yliaaltojen tunnus on järjestysluku, joka kertoo, kuinka monikertainen yliaalto on kyseessä perustaajuuteen verrattuna. Esimerkiksi 50 Hz taajuisessa syöttöverkossa 5. harmoninen yliaalto olisi 250 Hz taajuinen. (Ijäs, 2021)

Kuvassa 16 on esitetty esimerkki, jossa vihreällä kuvattuun perustaajuiseen siniaaltoon summataan voimakas 5. harmoninen yliaalto (suuruus noin 20 % perusaallosta), joka on kuvattu sinisellä. Näiden kahden käyrän muodostama summa-aalto on kuvattu punaisella ja se osoittaa, kuinka yliaallot aiheuttavat vääristymiä jännitteen ja virran käyrämuodoissa.



Kuva 16. Perustaajuiseen siniaaltoon summattu voimakas 5. harmoninen yliaalto.

Aaltomuodon harmonista kokonaisyliaaltosisältöä voidaan kuvata THD-arvolla (eng. Total Harmonic Distortion), eli kokonaissärökertoimella, johon on summattu aaltomuodon kaikki harmoniset yliaalto-taajuudet. THD-arvo voidaan laskea kahdella eri menetelmällä, jotka on esitetty kaavoissa 2 ja 3, (Baptista;Cordeiro;& Moura, 2003).

$$THD_f = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + \dots (h_n)^2}}{h_1} \cdot 100 \% \quad (2)$$

$$THD_r = \frac{\sqrt{(h_2)^2 + (h_3)^2 + \dots (h_n)^2}}{\sqrt{(h_1)^2 + (h_2)^2 + (h_3)^2 + \dots (h_n)^2}} \cdot 100 \% \quad (3)$$

jossa h_1, h_2, \dots, h_n kuvastaa harmonisen yliaallon rms-arvoa vastaavalle järjestysluvulle 1, 2, ..., n.

THD_f -arvolla kuvataan aaltomuodon harmonista kokonaisyliaaltosisältöä suhteellisenä perusaaltoon verrattuna, kun taas THD_r -arvo on suhteellinen aaltomuodon kokonais-rms-arvoon (Ijäs, 2021). Yli 100 % arvot ovat siis mahdollisia THD_f -arvoissa.

Nykyään lähes jokaisessa vaihtosähköjärjestelmässä esiintyy yliaaltoja. Aikaisemmassa kappaleessa mainitulla perusaaltotaajuisen vaihtosähköjärjestelmän tehokertoimella $\cos\varphi$:llä (tai DPF) voidaan kuvata vain perusaaltotaajuisista vaihtosähköjärjestelmää. Yliaaltoja sisältävässä verkossa täytyy tehokertoimessa $\cos\varphi$ huomioida myös virran yliaaltosisältö, josta saadaan kokonaistehokerroin PF . Kaavassa 4 on esitetty kokonaistehokertoimen PF laskukaava, jossa on huomioitu pätö-, lois-, sekä näennäistehon lisäksi näiden tehojen yliaaltosisällöstä johtuvat häviöt käyttämällä virran kokonaissä-
rökerrointa THD_i . Jos DPF ja PF arvot poikkeavat toisistaan, se on selkeä merkki yliaalloista. (Ijäs, 2021)

$$PF = \frac{\cos\varphi}{\sqrt{1 + THD_i^2}} \quad (4)$$

Standardissa SFS-EN 50160 on asetettu yleisestä jakeluverkosta syötetyn sähkön jänniteominaisuuksille raja-arvoja. Standardissa on kerrottu harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot pienjänniteverkon liittämiskohdassa, jossa harmonisten yliaaltojännitteiden raja-arvot on osoitettu prosentteina taulukossa 2.

Taulukko 2. Harmonisten yliaaltojännitteiden sallitut arvot pienjänniteverkon liittämiskohdassa (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2022)

Parittomat yliaallot				Parilliset yliaallot	
Kolmella jaottomat		Kolmella jaolliset		Järjestysluku h	Suhteellinen jännite u_h
Järjestysluku h	Suhteellinen jännite u_h	Järjestysluku h	Suhteellinen jännite u_h		
5	6,0 %	3	5,0 %	2	2,0 %
7	5,0 %	9	1,5 %	4	1,0 %
11	3,5 %	15	1,0 %	6 ... 24	0,5 %
13	3,0 %	21	0,75 %		
17	2,0 %				
19	1,5 %				
23	1,5 %				
25	1,5 %				

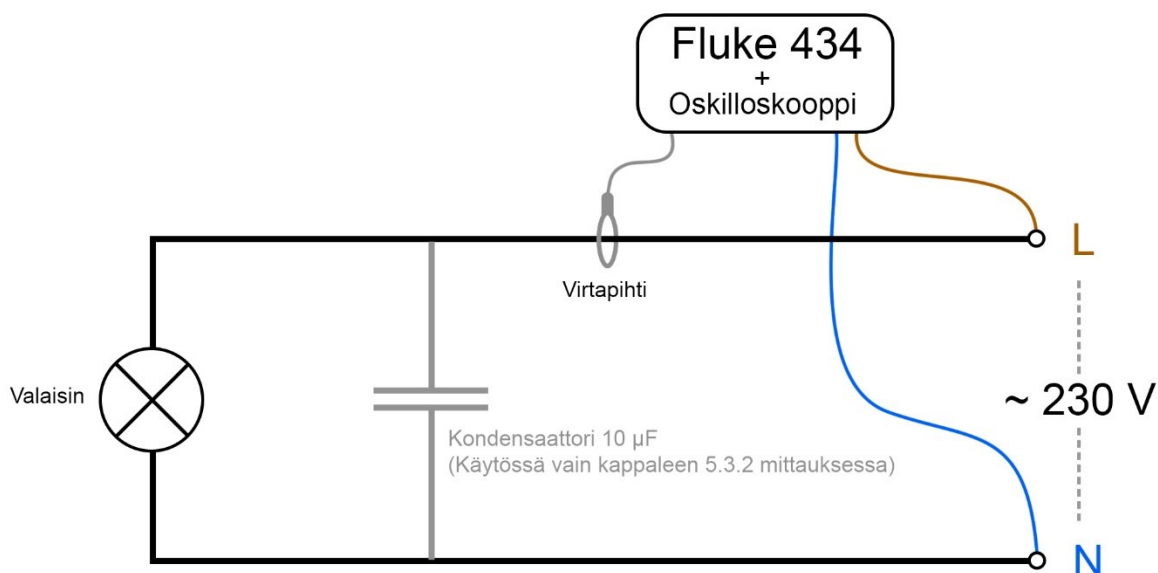
Arvot ovat prosentteina perusaaltoon u_1 nähden.

HUOM. Järjestysluvultaan yli 25 yliaalloille ei anneta arvoja, koska ne ovat tavallisesti hyvin pieniä ja hyvin arvaamattomia resonanssitilanteiden vuoksi.

5.3 Eri valaistustekniikoiden vaikutukset sähkön laadussa

Opinnäytetyötä varten suoritettiin sähkön laatumittaus laboratoriossa loisteputkivalaisimella, sekä led-valaisimella. Loisteputkivalaisimella suoritettiin mittaukset erikseen elektronisen liitälaitteen kanssa, sekä perinteisten kuristimien ja sytyttimien kanssa. Mittauksen tarkoituksena on vertailla näiden kahden valaistustekniikan vaikutusta sähkön laatuun. Yksittäiset valaisimet eivät vaikuta vielä merkittävästi jännitteen aaltomuotoon syöttävässä verkossa, joten mittauksen tarkoituksena on tarkastella yksittäisien valaisimien suhteellisia virtayliaaltoja, sekä valaisimien tuottamaa loistehoa.

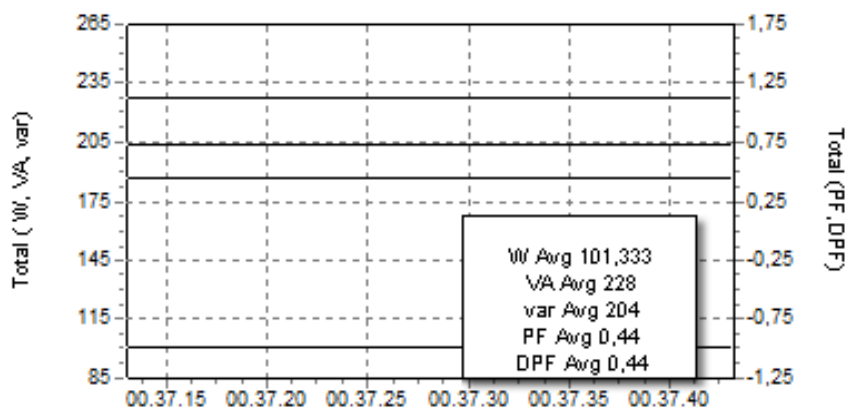
Alla olevassa kuvassa 17 on esitetty käytetty mittauskytkentä. Kuvassa esitettyä kondensaattoria käytetään vain ensimmäisen mittauksen aikana, jolloin demonstroidaan loistehon suodatusta. Muissa mittauksissa kytkennässä oli pelkkä valaisin, josta mitataan virtaa, sekä jännitettä tehoanalysaattorilla, sekä oskilloskoopilla kuvan osoittamalla tavalla.



Kuva 17. Mittauskytkentä laboratoriossa suoritetuissa mittauksissa.

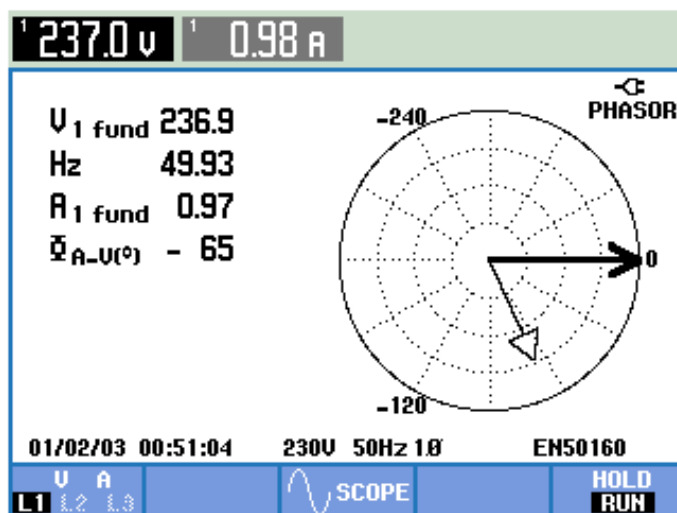
5.3.1 Sähkön laatumittaus loisteputkivalaisimesta kuristimella ja sytyttimellä

Ensimmäisessä mittauksessa käytetään loisteputkivalaisinta, jossa on kaksi 36 W:n T8-loisteputkea. Loisteputket olivat uusia ja ne otettiin tätä mittausta varten käyttöön. Loisteputkivalaisimessa on kuristimet ja sytyttimet erikseen molemmille putkille. Mittauskytkennässä esitettyä kondensaattoria ei ole vielä kytketty kompensoimaan loistehoa.



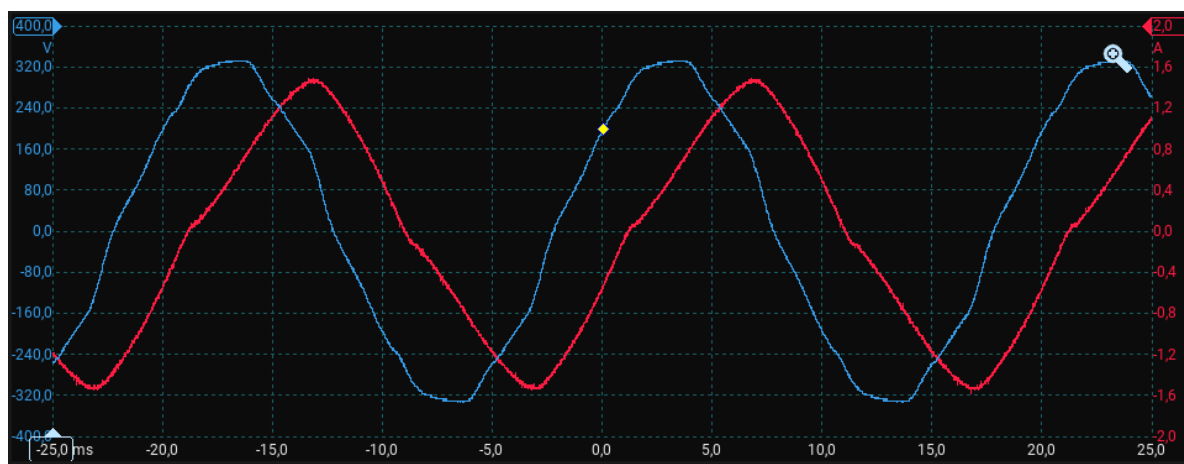
Kuva 18. Loisteputkivalaisimen päto-, näennäis- ja loisteho, sekä tehokertoimet *PF* ja *DPF*.

Aloitetaan mittaustuloksien analysointi kuvasta 18, jossa on esitetty valaisimen kuluttama näennäis-, päto-, sekä loisteho ja tehokertoimet *DPF* ja *PF*. Kuvasta nähdään, että valaisimen kuluttama näennäisteho on keskiarvoltaan 228 VA, josta pätotehota on 101 W ja loistehoa 204 VAr. Loisteputkilamppujen nimellisteho on yhteensä 72 W (2x36 W), jolloin loput mitatusta 101 W:n pätotehosta on pääasiassa kuristimien aiheuttamia häviöitä. Ilman kompensointia valaisin tuottaa yli kaksinkertaisen määrän loistehoa pätotehoon nähden, mikä aiheuttaa merkittävän kasvun valaisimen ottamassa virrassa verrattuna tilanteeseen, missä loisteho olisi kompensoitu pois. Tämän takia valaisimen tehokerroin on 0,44, eli erittäin huono. *DPF* ja *PF* arvoilla ei ole tässä mittauksessa merkittävää eroa.



Kuva 19. Jännitteen ja virran osoitinkuva ilman suodatusta.

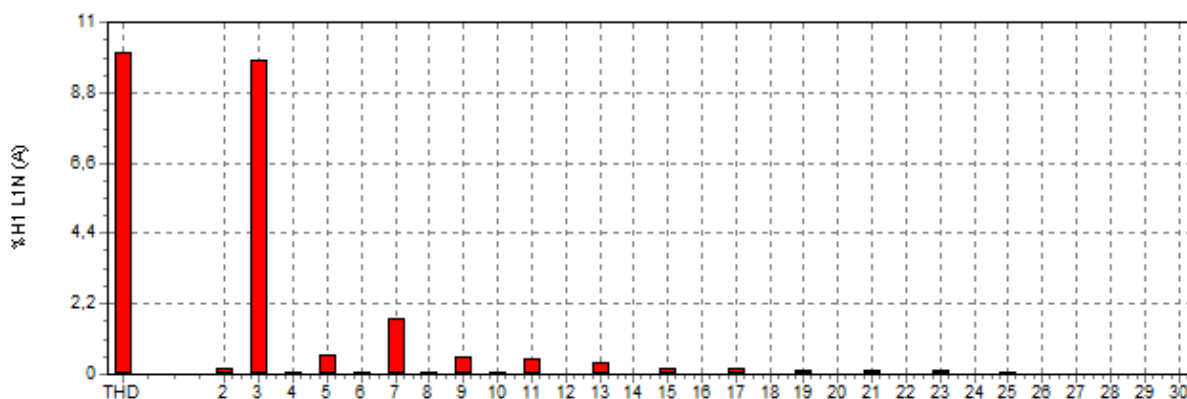
Kuvassa 19 on esitetty virran ja jännitteen osoitinkuva, josta nähdään virran tehollisarvo 0,98 A, sekä virran ja jännitteen välinen vaihe-ero, joka on -65° (A-V). Virta on jännitettä jäljessä, jolloin kuorma on induktiivinen.



Kuva 20. Oskilloskooppikuva, jossa on esitetty sinisellä jännitteen käyrämuoto, sekä punaisella virran käyrämuoto.

Kuvassa 20 on esitetty oskilloskooppikuva virrasta ja jännitteestä, josta voidaan tarkastella niiden käyrämuotoa. Käyrämuoto ei ole kummallakaan täydellistä sinikäyrää, sillä todellisuudessa syöttävässä verkossa esiintyy aina pieni määrä häiriöitä. Molempien kuvaajien käyrämuoto on kuitenkin erittäin lähellä sinikäyrää, eikä virran käyrämuoto vaikuta ollenkaan huonolaatuiselta. Virran yliaaltosisältö ei erotu selkeästi vielä mitattujen DPF - ja PF -arvojen välillä, eikä se ole selkeästi huomattavissa virran käyrämuodosta.

Oskilloskooppikuvasta voidaan kuitenkin havaita suuri vaihe-ero virran ja jännitteen välillä. Tässä tapauksessa virta jää jännitteestä jälkeen tehoanalyysoijan mittaamana 65° , mistä syntyy paljon induktiivista loistehoa ja mikä aiheuttaa valaisimelle huonon tehokertoimen.



Kuva 21. Histogrammi loisteputkivalaisimen tuottamista virtayliaalloista.

Kuvassa 21 on esitetty tehoanalysaattorilla mitatut harmoniset yliaallot virralle. Histogrammin arvot ovat esitetty prosentteina suhteessa virran perusaaltoon ja vaaka-akselin luvut kertovat yliaallon järjestysluvun.

Virran kokonaissärökerroin, eli THD-arvo on 10 %, josta suurin osa koostuu 3. harmonisesta yliaallosta, jonka arvo on 9,8 %. Loput esiintyvistä harmonisista yliaalloista ovat parittomia, eikä parillisia yliaaltoja esiinny lähes ollenkaan. Tämä on tyypillistä, sillä parittomat yliaallot ovat yleisempiä verrattaessa parillisiin yliaaltoihin.

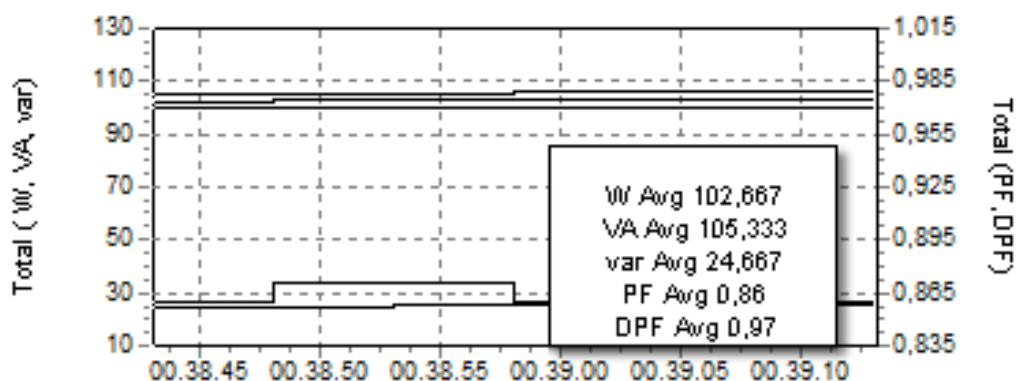
Kolmella jaolliset harmoniset yliaallot ovat erityisen haitallisia sähköjärjestelmän kannalta, sillä kolmivaiheisessa vaihtosähköjärjestelmässä kolmella jaolliset yliaallot summautuvat nollassa johtimeen, mikä voi aiheuttaa merkittävän virran nollassa johtimessa. Tästä voi syntyä tulipalon vaara nollassa johtimen lämpenemisen seurauksena, sillä nollassa johtimessa ei ole erillistä suojausta. Tämä korostuu erityisesti vanhoissa asennuksissa, jossa määräysten mukaan nollassa johtimen poikkipinta-ala saa olla puolet vaihejohtimen poikkipinnasta (Ijäs, 2021). Myös uusissa asennuksissa kolmas yliaalto vaikuttaa nollassa johtimen mitoitukseen. Standardissa SFS 6000-5-52:2022 on esitetty yliaalloista johtuvat 4- tai 5-johdinkaapeleissa käytettävät korjauskertoimet kaapelin mitoitukseen, mikäli järjestelmässä esiintyy merkittävä määrä nollassa johtimeen summautuvia yliaaltovirtoja (Suomen Standardisoimisliitto SFS, 2022).

5.3.2 Esimerkki loistehon kompensoinnista

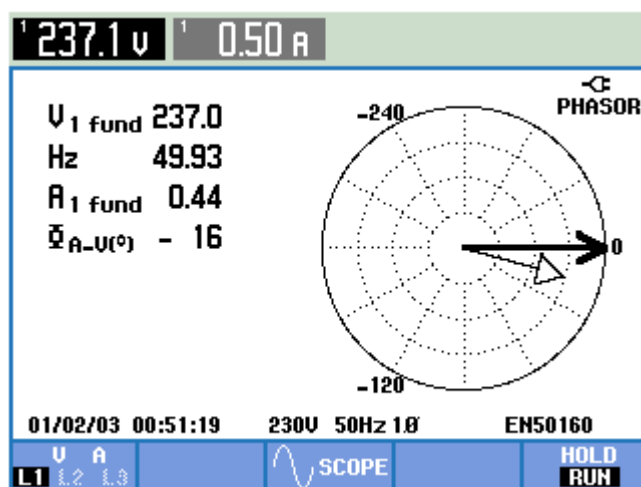
Tässä kappaleessa kytketään 10 μF kondensaattori kompensoimaan induktiivista loistehoa loisteputkivalaisimen rinnalle ja demonstroidaan näin loistehon suodatusta. Loisteputkivalaisin on täysin identtinen aikaisempaan mittaukseen, eli siinä on perinteiset kuristimet ja syyttimet.

Kompensointia ei voida käytännössä toteuttaa pelkällä kondensaattorilla sellaisessa verkossa, jossa esiintyy yliaaltoja. Tämä johtuu siitä, että kondensaattorin kapasitanssin ja verkon induktanssin välille voi syntyä haitallisia rinnakkaisresonansseja. Jos resonanssitaajuus osuu yliaaltotaajuuden kohdalle, kyseinen yliaalto kasvaa merkittävästi. Todellisuudessa kompensointi tapahtuisi estokelaparistolla, jossa on kondensaattorin lisäksi kuristin, joka estää haitallisten rinnakkaisresonanssien syntyminen kompensoinnin ja verkon välillä.

Tämän mittauksen tarkoituksena on tarkastella kuorman ottamassa virrassa tapahtuvaa muutosta, joka syntyy, kun loisteho pienenee. Koska kytkennässä ei ole käytetty estokelaparistoa, virran yliaaltosisältö kasvaa merkittävästi.



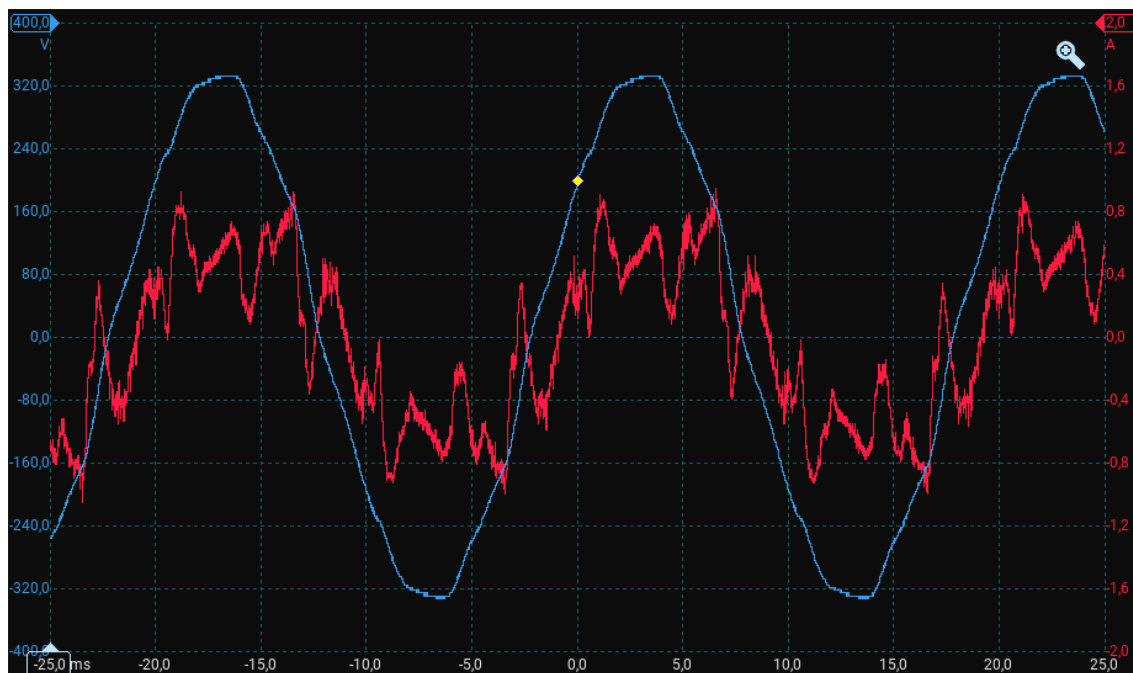
Kuva 22. Loisteputkivalaisimen päto-, näennäis- ja loisteho, sekä tehokertoimet PF ja DPF suodatuksen kanssa.



Kuva 23. Jännitteen ja virran osoitinkuva suodatuksen kanssa.

Kuvassa 22 on esitetty loisteputkivalaisimen pätö-, näennäis- ja loisteho, sekä tehokertoimet PF ja DPF suodatuksen kanssa. Tuloksista huomataan, että pätöteho on pysynyt lähes samassa luke-
massa, kuin ilman suodatusta, mutta loistehoa valaisin tuottaa enää vain 24,6 VAR. Tästä syystä va-
laisimen tehokerroin DPF on 0,97, mikä on huomattavasti parempi, kuin kompensoimattoman valai-
simen 0,44. Tämä puolestaan johtaa pudotukseen valaisimen ottamassa virrassa, mikä nähdään
osoitinkuvasta 23. Virta oli ennen suodatusta 0,98 A ja suodatuksen kanssa 0,50 A. Osoitinkuvasta
nähdään myös virran ja jännitteen välinen vaihe-ero, joka on -16° (A-V).

Kokonaistehokerroin PF on kuitenkin vain 0,86, mikä poikkeaa merkittävästi tehokertoimesta DPF .
Tämä kertoo virran suuresta yliaaltosisällöstä. Tarkastelemalla kuvaa 24, voidaan nähdä virran käy-
rämuoto, missä on selvästi merkittävä määrä yliaaltoja, eikä käyrämuoto vastaa enää ollenkaan puh-
dasta siniaaltoja. Käyttämällä suodatuksessa estokelaparistoa kondensaattorin sijaan, voitaisiin estää
kompensoinnista johtuva merkittävä virran yliaaltosisältö ja samalla kompensoida loisteputkivalai-
simen tuottama loisteho.

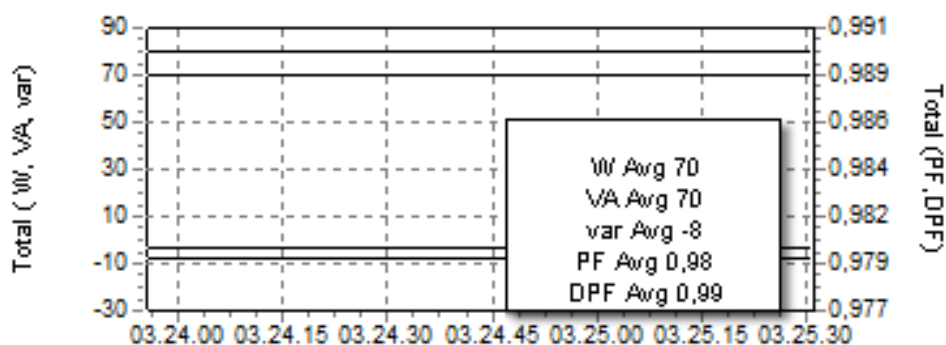


Kuva 24. Oskilloskooppikuva, jossa on esitetty sinisellä jännitteen käyrämuoto, sekä punaisella virran käyrämuoto.

5.3.3 Sähkön laatumittaus loisteputkivalaisimesta elektronisen liitännälaitteen kanssa

Tässä mittauksessa loisteputkivalaisimen kuristimet ja syyttimet poistettiin valaisimesta ja niiden tilalle asennettiin elektroninen liitännälaitte. Käytössä on edelleen sama valaisin, jossa on 2 erillistä 36 W:n loisteputkea.

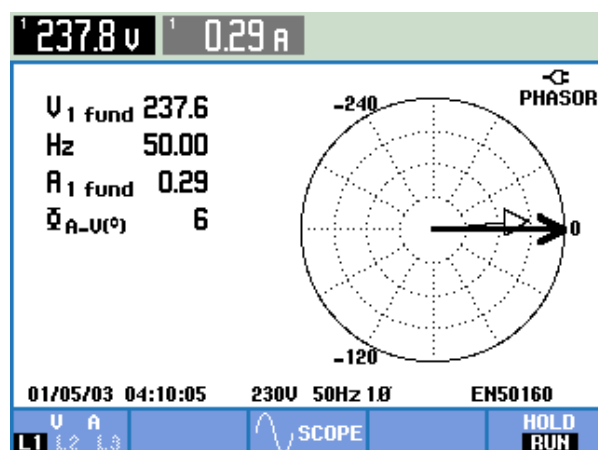
Elektronien liitännälaitte oli uusi, joka tilattiin tätä mittausta varten (Helvar EL2x36ngn). Liitännälaitteessa on lämmin käynnistys, jonka takia kaikki mittaustulokset otettiin vasta silloin, kun valaisimen ottama virta pysyi käytön aikana tasaisena.



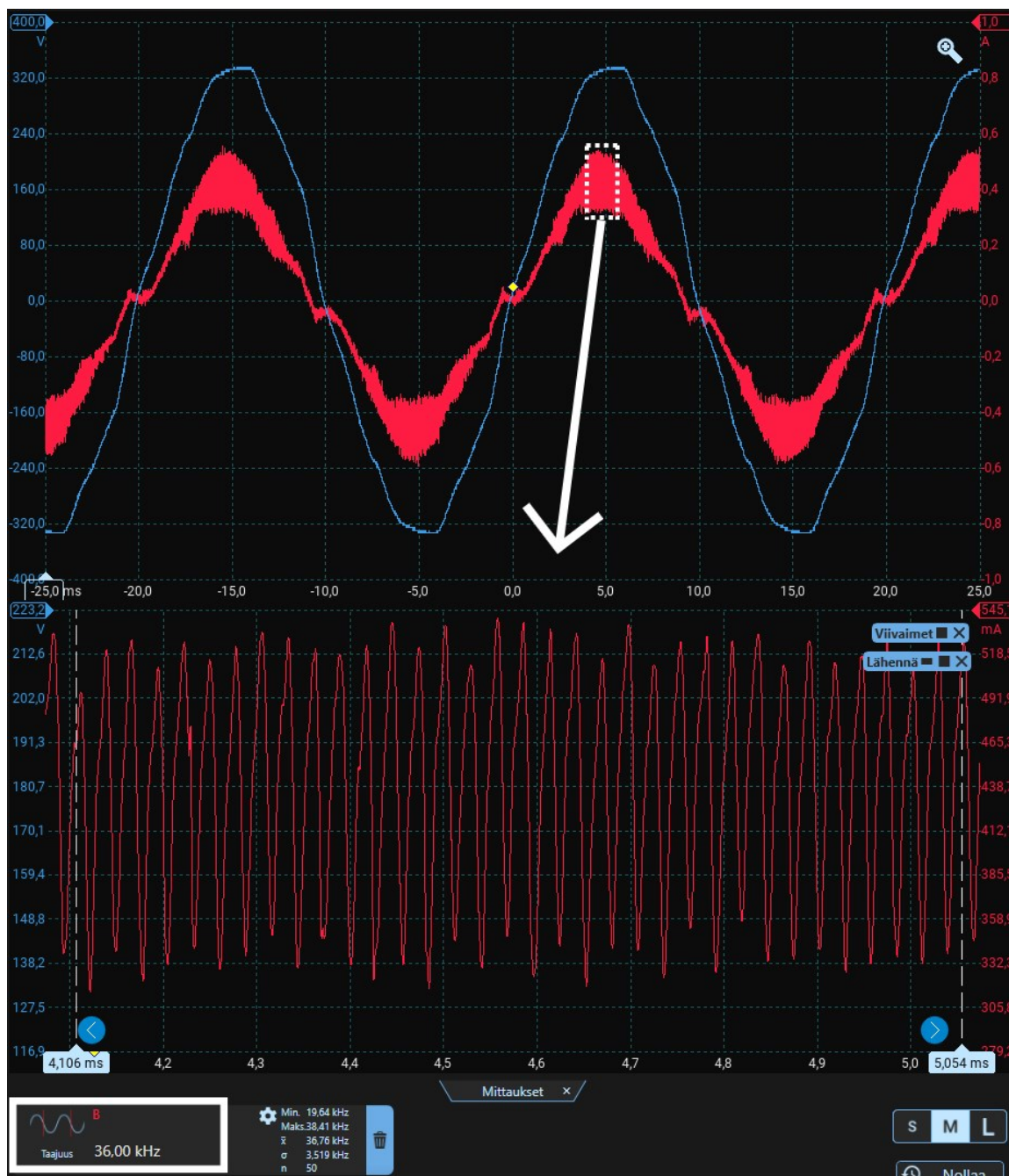
Kuva 25. Loisteputkivalaisimen pätö-, näennäis- ja loisteho, sekä tehokertoimet PF ja DPF .

Kuvasta 25 huomataan elektronisen liitännälaitteen aiheuttama ero valaisimen kuluttamaan pätötehoon, jonka arvo on 70 W. Pätöteho on pienempi, kuin loisteputkien nimellisteho 72 W. Elektroninen liitännälaitte vaikuttaa myös merkittävästi valaisimen kuluttamaan loistehoon, jonka arvo on -8 VAR. Negatiivinen arvo tarkoittaa loistehon olevan kapasitiivista.

Tehokertoimien DPF ja PF välillä on pieni ero, mikä kertoo virran sisältävän yliaaltoja. Kokonaistehokertoimen PF arvo 0,98 on silti erinomainen. Tehokertoimen vaikutus on nähtävissä valaisimen ottamassa virrassa, joka nähdään osoitinkuvasta 26. Kuristimella ja syyttimellä loisteputki otti 0,98 A:n virran, kun taas elektronisella liitännälaitteella lukema on 0,29 A. Kuvasta nähdään myös virran ja jännitteen välinen vaihe-ero, joka on 6° (A-V), eli kuorma on lievästi kapasitiivinen.



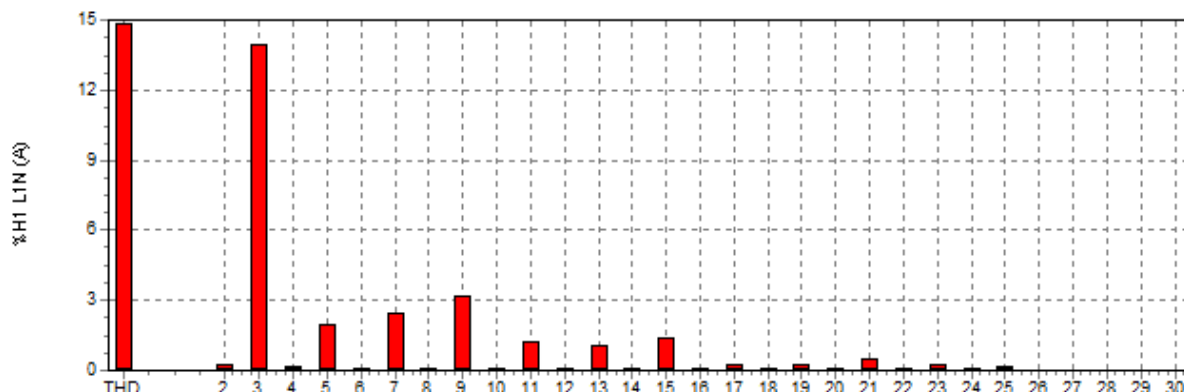
Kuva 26. Jännitteen ja virran osoitinkuva elektronisella liitännälaitteella varustetussa loisteputkivalaisimessa.



Kuva 27. Oskilloskooppikuva loisteputkivalaisimesta elektronisen liitälaitteen kanssa. Sinisellä on kuvattu jännitteen käyrämuoto ja punaisella virran. Kuvan alaosassa on osasuurennos virran käyrämuodosta.

Kuvassa 27 on esitetty oskilloskooppikuva jännitteen ja virran käyrämuodoista. Tarkastelemalla virran käyrämuotoa voidaan huomata sen lähes sinimuotoinen käyrä, jossa on suuri määrä rippeliä ja joka on tehoanalysointilaitteen mittaamana 6° jännitettä edellä. Katsomalla tarkemmin virran käyrämuotoa kuvan alaosassa sijaitsevasta, suurennetusta virran käyrämuodosta, voidaan havaita elektronisen liitälaitteen aiheuttama 36 kHz rippeli virran käyrämuodossa. Mittauksissa käytetty virtapihti toimii luotettavasti enintään 20 kHz taajuudella, jonka takia oskilloskooppikuvassa esiintyvä virran käyrämuoto ei välttämättä vastaa täysin todellisuutta.

Elektroninen liitäntälaitte muuttaa verkosta ottaman vaihtojännitteen ensin tasajännitteeksi, jonka jälkeen se muutetaan takaisin korkeataajuiseksi vaihtojännitteeksi (>20 kHz). Suuri rippeli valaisimen verkosta ottamassa virrasta johtuu siis elektronisen liitäntälaitteen toimintaperiaatteesta.



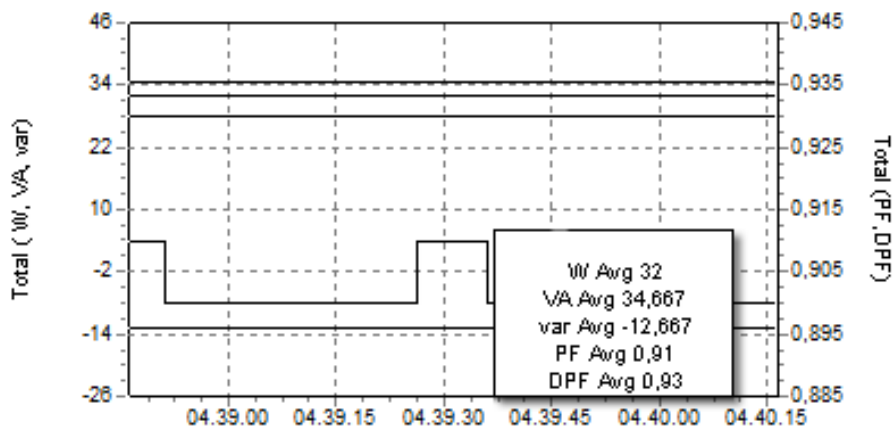
Kuva 28. Histogrammi elektronisella liitäntälaitteella toimivan loisteputkivalaisimen harmonisista virtayliaalloista.

Loisteputkivalaisimen harmoniset virtayliaallot on esitetty kuvassa 28. Virran kokonaissärökerroin, eli THD-arvo on 14,9 %, josta suurin osa on 3. harmonista yliaaltoa, jota esiintyy 13,9 %. Virrassa esiintyvät harmoniset yliaallot ovat myös elektronisen liitäntälaitteen kanssa pääosakseen parittomia.

THD-arvo on suurempi, kuin kuristimella toimivassa loisteputkivalaisimessa. Tämä johtuu elektronisen liitäntälaitteen toimintaperiaatteesta, josta syntyy suhteellisesti enemmän yliaaltovirtaa. Vaikka valaisimen virran yliaaltosisältö on perusaaltoon verrattuna suhteellisesti suurempi, täytyy muistaa, että valaisimen ottama virta on yli kaksi kolmasosaa pienempi, kuin kuristimella ja sytyttimellä varustetussa loisteputkivalaisimessa ilman loistehon kompensointia. Jos oletetaan, että kuristimella varustetusta loisteputkivalaisimesta kompensoidaan kaikki loisteho pois, se kuluttaa pätötehoa silti 31 W enemmän kuristimen häviöiden takia, mikä puolestaan johtaa isompaan virtaan. Elektronisella liitäntälaitteella varustetun loisteputkivalaisimen vaikutus jännitteen kokonaissärökertoimeen on siis lähes identtinen verrattaessa perinteiseen loisteputkivalaisimeen, jossa on kuristin. Merkittävimpänä erona näiden kahden välillä on se, että elektroninen liitäntälaitte aiheuttaa 3. harmonisen yliaallon lisäksi enemmän muita parittomia virran harmonisia yliaaltoja.

5.3.4 Sähkön laatumittaus led-valaisimella

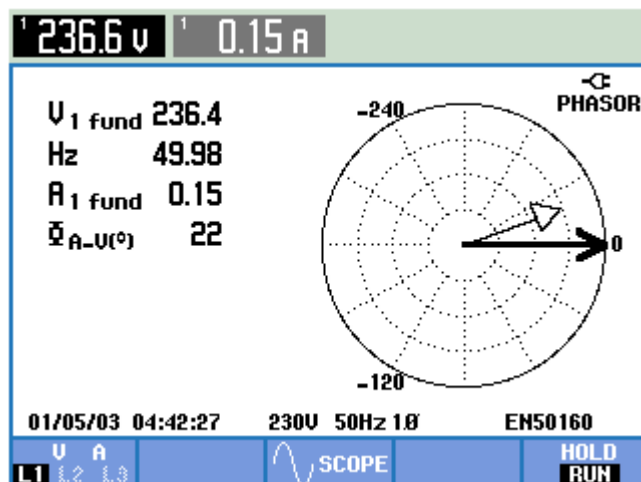
Tässä kappaleessa suoritetaan sähkön laatumittaus led-valaisimella. Led-valaisimen malli on Ensto Pinta-/riipustusvalaisin PRI15L 31W. Kyseisellä valaisimella korvataan normaalisti loisteputkivalaisimia, missä on kaksi 58 W T8-loisteputkea, eli sen tuottama valovirta on suurempi, kuin aikaisemmissa mittauksissa käytetyissä loisteputkivalaisimissa. Tämä otetaan huomioon arvioidessa mittaus tuloksia seuraavassa kappaleessa.



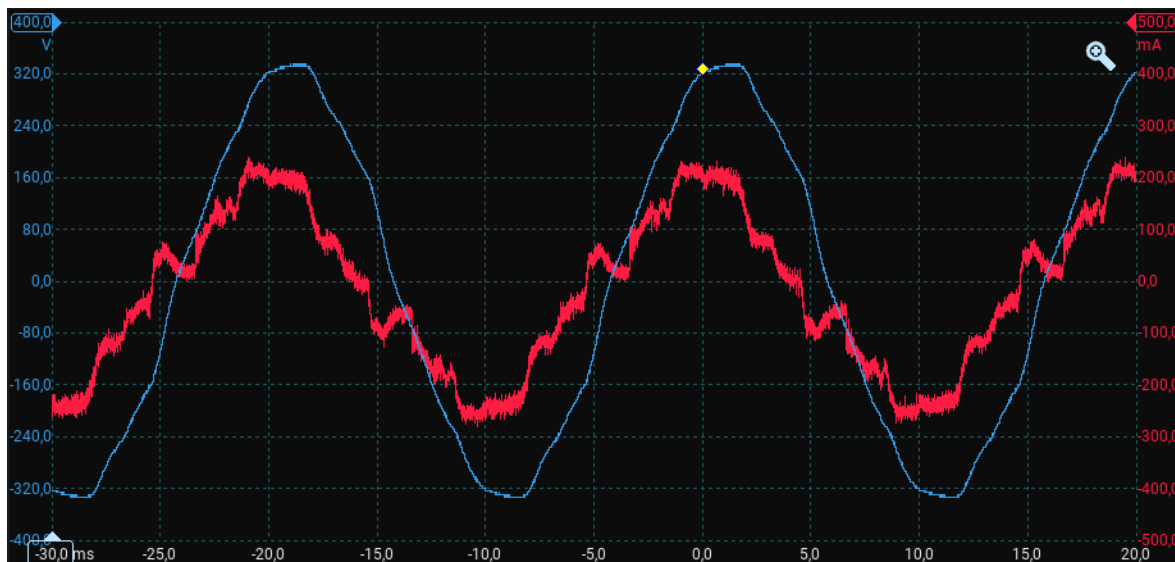
Kuva 29. Led-valaisimen päto-, näennäis-, sekä loisteho ja tehokertoimet *DPF* ja *PF*.

Kuvassa 29 on esitetty led-valaisimen päto-, näennäis-, sekä loisteho ja tehokertoimet *DPF* ja *PF*. Valaisimen ottama kokonaisteho on 34,6 VA, josta pätoehoa on 32 W ja loistehoa -12,6 VAR. Negatiivinen loisteho kuvastaa kapasitiivista loistehoa, joka voidaan myös todeta jännitteen ja virran osoitinkuvasta 30, jossa virran ja jännitteen välinen vaihekulma on 22 ° (A-V).

Tehokertoimien *DPF* ja *PF* välillä on ero, joka kertoo virran sisältävän yliaaltoja. Kokonaistehokerroin *PF* on merkittävästi huonompi, kuin elektronisella liitäntälaitteella varustetussa loisteputkivalaisimessa. Osoitinkuvassa 30 nähdään valaisimen ottama virta, joka on vain 0,15 A.

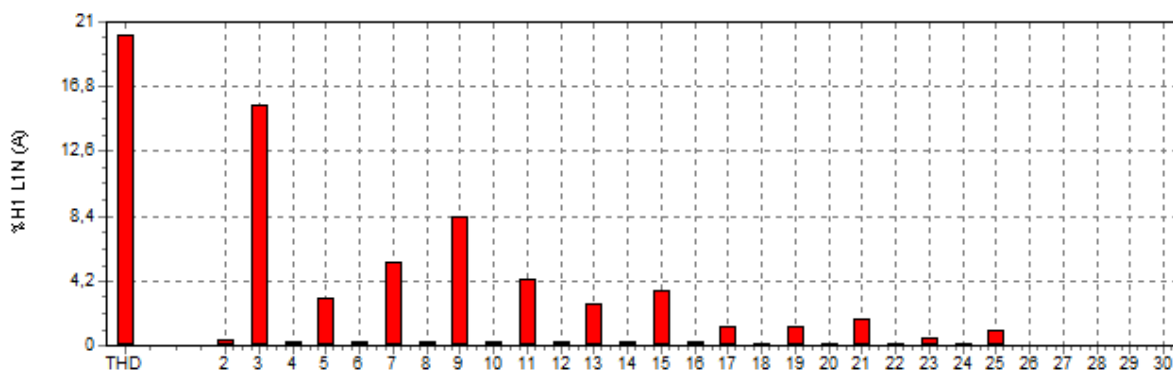


Kuva 30. Led-valaisimen virran ja jännitteen osoitinkuva.



Kuva 31. Led-valaisimen jännitteen ja virran käyrämuodot. Sinisellä on kuvattu jännitteen käyrämuoto ja punaisella virran.

Kuvassa 31 on esitetty oskilloskooppikuva led valaisimen ottaman virran, sekä jännitteen käyrämuodosta. Virran käyrämuoto ei vastaa puhdasta siniaaltoa ja se sisältää selvästi paljon yliaalloista johtuvaa säröä. Tehoanalysaattorin mittaama 22° vaihe-ero on havaittavissa virran ja jännitteen välillä.



Kuva 32. Histogrammi led-valaisimen tuottamista virtayliaalloista.

Kuvassa 32 on esitetty histogrammi led-valaisimen tuottamista virtayliaalloista. Kokonaissärökerroin, eli THD-arvo on 20 %. Suurin osa virran yliaaltosisällöstä koostuu tässäkin tapauksessa 3. harmonisesta yliaallosta. Led-valaisin tuottaa muihin valaistusmenetelmiin verrattuna myös huomattavasti enemmän muita parittomia yliaaltoja. Kolmella jaollista 9. harmonista yliaaltoa on 8 %, 15. harmonista yliaaltoa on 3,6 % ja 21. harmonista yliaaltoa on 1,7 % perusaaltoon verrattuna. Parillisia harmonisia yliaaltoja ei esiinny merkittäviä määriä myöskään led-valaisimen tapauksessa.

5.3.5 Mittaustuloksien arviointi

Tässä kappaleessa on koottu mittaustulokset taulukkoon 3, jossa niitä voidaan vertailla helpommin. Taulukossa on esitetty erikseen harmonisien yliaaltojen järjestysluvut, sekä THD-arvo jokaiselle valaisimelle. Taulukossa on esitetty pelkästään parittomat harmoniset yliaallot, sillä mittausten aikana parillisia yliaaltoja ei esiintynyt merkittäviä määriä minkään valaisimen kohdalla. Nämä arvot on väritytty vastaamaan luvun suuruutta, jossa punainen väri on suurin lukema ja vihreä pienin. Harmonisten yliaaltojen arvot ovat osoitettu prosentteina suhteessa virran perusaaltoon. Taulukon alaosassa on esitetty valaisimen ottama teho ja virta, sekä tehokertoimet DPF ja PF .

Koska led-valaisimella on huomattavasti suurempi valovirta, kuin loisteputkivalaisimella, on taulukossa 4 lisätty korjauskertoimella led-valaisimelle lasketut arvot, jotta tehon ja virran arvoja olisi järkevämpi vertailla keskenään loisteputkivalaisimen ja led-valaisimen kohdalla. Korjauskertoimen perustuu mittauksen aikana valaisimien tuottamaan valaistusvoimakkuuteen, joka mitattiin yhden metrin päästä valaisimista. Led-valaisimen valaistusvoimakkuus oli 1830 lux ja loisteputkivalaisimen 1280 lux. Näistä syntyy korjauskertoimen $a = \frac{1280 \text{ lux}}{1830 \text{ lux}} = 0,699$.

Korjauskertoimesta on huomioitava, että led-valaisimen arvot eivät välttämättä seuraa korjauskertoimen mukaisesti lineaarista käyrää todellisuudessa, kun vertaillaan pienempitehoista led-valaisinta. Valaisimien valonjakokäyrää ei ole myöskään huomioitu valaistusvoimakkuuden mittauksen aikana ja mittaus tehtiin suoraan valaisimien keskikohdasta yhden metrin pituudelta.

Kuristimilla ja sytyttimillä varustetun loisteputkivalaisimen induktiivista loistehoa ei kompensoitu oikealla estokelaparistolla mittauksen aikana. Koska loisteho kompensoitaisiin todellisuudessa pois, on myös tälle valaisimelle luotu erillinen sarake taulukkoon 4, jossa tehokerroin DPF on kompensoitu erinomaiseen lukemaan 0,99. Laskut on esitetty alapuolella ja niissä käytettiin kaavoja 4, 5, 6 ja 7. Näin saadaan arvioitua valaisimen teho ja virta enemmän todellisuutta vastaavaan tilanteeseen.

$$\text{Virta} = I = \frac{P}{U_{L1N} \cdot PF} \quad (5)$$

$$\text{Näennäisteho} = S = U_{L1N} \cdot I \quad (6)$$

$$\text{Loisteho} = Q = S \cdot \sin(\varphi) \quad (7)$$

$$\text{Virta} = I = \frac{101 \text{ W}}{236,66 \text{ V} \cdot \left(\frac{0,99}{\sqrt{1 + 0,10019^2}} \right)} = 0,433 \text{ A}$$

$$\text{Näennäisteho} = S = 236,66 \text{ V} \cdot 0,433 \text{ A} = 102,47 \text{ VA}$$

$$\text{Loisteho} = Q = 102,47 \text{ VA} \cdot \sin(\arccos(0,99)) = 14,46 \text{ VAR}$$

Taulukko 3. Sähkön laatumittauksien tulokset.

HARMONISET VIRTAYLIAALLOT			
Järjestysluku <i>h</i>	Loisteputkivalaisin kuristimella ja sytyttimellä	Loisteputkivalaisin elektronisella liitäntälaitteella	LED-valaisin
THD	10,019	14,863	20,148
3	9,812	13,971	15,602
5	0,608	1,973	3,041
7	1,737	2,479	5,390
9	0,533	3,183	8,347
11	0,457	1,217	4,339
13	0,360	1,066	2,709
15	0,150	1,377	3,583
17	0,200	0,252	1,229
19	0,100	0,271	1,199
21	0,111	0,504	1,695
23	0,093	0,228	0,497
25	0,050	0,162	0,999
TEHO JA VIRTA			
<i>DPF</i>	0,44	0,99	0,93
<i>PF</i>	0,44	0,98	0,91
Näennäisteho (VA)	228	70	34,667
Pätöteho (W)	101	70	32
Loisteho (VAr)	204	-8	-12,667
Virta (A)	0,965	0,29	0,15

Taulukko 4. Led-valaisimen arvot korjauskertoimella a , sekä kuristimella toimivat loisteputkilampun arvot kompensoituna tehokertoimeen $DPF = 0,99$.

TEHO JA VIRTA		
Suure	LED-valaisin korjauskertoimella $\frac{1280 \text{ lux}}{1830 \text{ lux}}$	Loisteputkivalaisin kuristimella ja sytyttimellä (Kompensoitu)
<i>DPF</i>	-	0,99
<i>PF</i>	-	0,985
Näennäisteho (VA)	24,25	102,47
Pätöteho (W)	22,38	101
Loisteho (VAr)	-8,86	14,46
Virta (A)	0,10	0,433

Tarkastelemalla taulukkoa 3, huomataan, että led-valaisimella on suhteellisesti suuremmat virtayliaallot, kuin loisteputkivalaisimella. Perinteisessä kuristimella toimivassa loisteputkivalaisimessa on puolestaan suhteellisesti vähiten virran yliaaltosisältöä. Koska arvot ovat suhteellisia virran perusaaltoon verrattuna, laadittiin virran harmonisista yliaalloista taulukko 5, jossa jokaisen harmonisen virtayliaallon arvot on esitetty ampeereina. Taulukon arvojen laskemiseen on käytetty kompensoidun ($DPF = 0,99$) loisteputkivalaisimen virran perusaaltoa (perusaalto laskettu suhteella alkuperäisestä, mitatusta perusaallosta), sekä korjauskertoimella a laskettua led-valaisimen virtaa. Näin saadaan vertailusta mahdollisimman todenmukainen, jossa jokainen valaisin tuottaa saman valomäärän, sekä kuristimella varustetun loisteputkivalaisimen loisteho on kompensoitu.

Taulukko 5. Harmonisien virtayliaaltojen arvot ampeereina.

HARMONISIEN VIRTAYLIAALTOJEN SUURUUS AMPEEREINA (RMS-ARVO)			
Järjestysluku h	Loisteputkivalaisin kuristimella ja sytyttimellä KOMPENSOITU $DPF = 0,99$	Loisteputkivalaisin elektronisella liitännälaitteella	LED-valaisin KORJAUSKERTOIMELLA $a = 0,699$
THD	0,0430	0,0431	0,0211
3	0,0421	0,0405	0,0164
5	0,0026	0,0057	0,0032
7	0,0074	0,0072	0,0057
9	0,0023	0,0092	0,0088
11	0,0020	0,0035	0,0046
13	0,0015	0,0031	0,0028
15	0,0006	0,0040	0,0038
17	0,0009	0,0007	0,0013
19	0,0004	0,0008	0,0013
21	0,0005	0,0015	0,0018
23	0,0004	0,0007	0,0005
25	0,0002	0,0005	0,0010
1 (Virran perusaalto)	0,429	0,29	0,10

Taulukosta 5 huomataan, että vaikka led-valaisimella on suhteellisesti suurin virran yliaaltosisältö, yliaaltovirran tehollisarvo on puolet pienempi, kuin loisteputkivalaisimilla. Tämä tarkoittaa sitä, että led-valaisimen vaikutus kiinteistön jännitteen laatuun on vähäisempi, kuin loisteputkivalaisimilla. Tämä johtuu siitä, että led-valaisin ottaa vain noin kolmasosan virtaa verkosta verrattaessa loisteputkivalaisimeen elektronisella liitännälaitteella.

Vaikka valaisimien yliaaltovirtojen tehollisarvot vaikuttavat pieniltä, täytyy muistaa, että kyseessä ovat yksittäiset valaisimet ja niiden ottamat virrat. Todellisuudessa arvot voivat olla suurien rakennuksien kohdalla tuhatkertaisia, jolloin ne vaikuttavat jo kiinteistön jännitteen käyrämuotoon.

Kuristimella toimiva loisteputkivalaisin tuottaa tehollisarvoltaan vähiten parittomia virran harmonisia yliaaltoja, jotka ovat suurempia tai yhtä suuria kuin 250 Hz (≥ 5 . harmoninen), pois lukien 7. ja 17. harmoninen yliaalto. Tämä johtuu siitä, että elektroninen liitäntälaitte, sekä led-valaisimen liitäntälaitte molemmat tuottavat puolijohdetekniikkaan perustuvien kytkentöjen tapaisesti paljon parittomia harmonisia yliaaltoja. Kokonaissärön (THD) virran tehollisarvo on lähes identtinen molemmilla loisteputkivalaisimilla, kuten aikaisemman mittauksen kohdalla mainittiin.

Tuloksista on huomioitavaa, että elektronisella liitäntälaitteella toimiva loisteputkivalaisin tuottaa vähemmän kapasitiivista loistehoa, kuin samaan valaistusvoimakkuuteen korjattu led-valaisin, vaikka led-valaisimen näennäisteho on noin yksi kolmasosa loisteputkivalaisimen näennäistehosta.

6 TAKAISINMAKSUAIKA JA VALAISTUKSEN LAATU KORJAUSRAKENTAMISESSA

Tässä kappaleessa lasketaan valaistussaneerauksien takaisinmaksuaikaa, eli milloin alentuneesta sähköenergian kulutuksesta syntyneet rahalliset säästöt ylittävät saneerauksen kustannukset. Kappaleessa tarkastellaan myös saneerauksen jälkeistä valaistuksen laatua, jota verrataan valaistusstandardin SFS-EN 12464-1 vaatimiin arvoihin. Opinnäytetyössä tarkasteluun valittiin kaksi erillistä kohdetta, jossa valaistussaneeraus suoritettiin.

6.1 Koulurakennuksen valaistuksen saneeraus

Opinnäytetyön yhdeksi esimerkkikohteeksi valittiin Kuopiossa sijaitseva, yli 500 oppilaan koulu, johon suoritettiin luokkahuoneiden valaisimien saneeraus. Tässä kappaleessa lasketaan saneerauksen takaisinmaksuaika, sekä tarkastellaan saneerauksen jälkeistä valaistuksen laatua.

Koulussa oli ennen saneerausta käytössä noin 350 loisteputkivalaisinta. 300 näistä valaisimista toimi kahdella erillisellä 58 W:n T8 loisteputkella, ja loput 50 valaisinta kahdella 36 W:n T8-loisteputkella. Valaistus korvattiin kohteessa led-valoputkilla, jotka ovat tarkoitettu korvaamaan T8-loisteputket suoraan hyödyntäen vanhaa valaisinta. Vanhoissa valaisimissa on elektroniset liitäntälaitteet, jotka jätettiin valaisimiin paikoilleen.

Kaikkia led-valoputkia ei välttämättä voi liittää suoraan vanhan elektronisen liitäntälaitteen taakse, mutta tässä saneerauksessa käytetyt valoputket voidaan asentaa joko liitäntälaitteen perään tai halutessaan suoraan verkkojännitesyöttöön (virtalähde valoputken sisällä). Huomioitavaa on kuitenkin, että osassa valaisimista (noin 20-30 valaisinta) jouduttiin poistamaan elektroninen liitäntälaitte jälkeinpäin, koska led-valoputket eivät toimineet vanhojen liitäntälaitteiden kanssa. Ilmiötä ei tutkittu tässä opinnäytetyössä sen pidemmälle. Kyseessä on jokseenkin yleinen ongelma erityisesti normaaliin kuluttajien keskuudessa, jossa ei välttämättä huomioida ollenkaan korvaavan led-lampun yhteensopivuutta liitäntälaitteen kanssa.

58 W:n loisteputket korvattiin Osramin 23 W:n led-valoputkilla, joiden valotehokkuus oli 161 lm/W. 36 W:n loisteputket korvattiin Osramin saman sarjan 15 W:n led-valoputkilla, joiden valotehokkuus oli 160 lm/W. Näiden led-valoputkien keskimääräinen käyttöikä on 60 000 tuntia. Valaisin katsotaan hajonneeksi, kun valaistustehokkuus tippuu yli 70 % alkuperäisestä arvosta. Värintoiston Ra-arvo molemmissa putkissa on 83.

6.1.1 Arvioidut energiasäästöt

Arvioidaan seuraavaksi laskemalla vanhojen, sekä uusien valaisimien kuukaudessa kuluttama energiamäärä käyttämällä kaavaa 8,

$$E = \frac{(\sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i) \cdot t}{1000} \quad (8)$$

jossa E on kulutettu energiamäärä kuukaudessa (kWh),
 n on erilaisten valaisimien mallien lukumäärä,
 P_i on valaisimen nimellisteho (W),
 x_i on kyseisien (P_i) valaisimien/valaistusputkien lukumäärä ja
 t on aika tunteina, jonka valaisin on kuukaudessa päällä.

$$E_{vanha} = \frac{(\sum_{i=1}^2 P_1 \cdot x_1 + P_2 \cdot x_2) \cdot t}{1000}$$

$$E_{vanha} = \frac{(58 \text{ W} \cdot 600 + 36 \text{ W} \cdot 100) \cdot 8 \text{ h} \cdot 15,8}{1000} = 4853,76 \text{ kWh}$$

Työpäiviä kuukaudessa on keskimäärin 21,5, riippuen vuodesta ja arkipyhien ajoittumisesta (Juhlapyhät.fi, 2023). Lukumäärässä ei ole huomioitu henkilökohtaisia lomiam, vaan pelkästään arkipäiville sijoittuvat juhlapyhät. Koska kyseessä on kuitenkin koulurakennus, tulee laskuissa huomioida myös koulujen lomat, jolloin rakennus ei ole opetuskäytössä ja valaistussaneerauksesta syntyneet energiasäästöt ovat arvion kannalta mitättömiä. Perusopetuslain mukaan lukuvuodessa on 190 työpäivää, jolloin niitä on kuukaudessa keskimäärin 15,8 (Opetushallitus, 2022). Olettaen, että valaisimet ovat keskimäärin kahdeksan tuntia työpäivinä päällä, saadaan vanhalla valaistuksella kuukaudessa kulutetuksi energiamääräksi $E_{vanha} \approx 4854$ kWh.

$$E_{uusi} = \frac{(23 \text{ W} \cdot 600 + 15 \text{ W} \cdot 100) \cdot 8 \text{ h} \cdot 15,8}{1000} = 1933,92 \text{ kWh}$$

Uudella valaistuksella kulutetuksi energiamääräksi saadaan $E_{uusi} \approx 1934$ kWh, joten kuukausisäästöjä tulisi teoriassa kertyä $E = E_{vanha} - E_{uusi} = 2920$ kWh:n verran. On kuitenkin huomioitava, että valaisimien käyttöaika päivässä vaihtelee todennäköisesti arvioidusta kahdeksan tunnin keskiarvosta, jolloin tulos olisi enemmän suuntaa antava. Laskukaavassa on lisäksi käytetty valaisimien nimellistehoja, jolloin siinä ei ole huomioitu elektronisen liitännälaitteen tai kuristimien aiheuttamia muutoksia valaisimien todelliseen tehonkulutukseen. Lisäksi koulujen lomat painottuvat pääasiassa pitkään 2,5 kuukautta kestäväan kesälomaan, mutta laskuissa käytettiin keskiarvoa vuoden koulupäivistä.

Takaisinmaksuaikaa laskettaessa on huomioitava vuorokauden aika, johon sähkönkulutus yleensä keskittyy. Yöllä sähkö on huomattavasti halvempaa, kuin päivällä, ellei sähköyhtiön asiakkaalla ole sopimuksessa kiinteä sähköenergian hinta kilowattituntia kohden. Koska kyseessä on koulurakennus, oletetaan, että valaisimien käytöstä syntyneet energiasäästöt sijoittuvat kellonaikojen 8-16 välille, joten säästetty energia tulisi laskea päiväsähkön hinnan mukaan. Sama pätee sähkön siirtohintoihin pienjännitetelesiirrossa, joissa on erikseen päivä (klo 07-22), sekä yö (klo 22-07) hinnasto. Kuopiossa pienjännitetelesiirron hinnastoa sovelletaan yli 63 A:n käyttöpaikkojen kohdalla (Kuopion Sähköverkko OY, 2021).

Tarkkaa sähkösopimuksessa määriteltyä hintaa ei tiedetä asiakkaan kohdalla, joten tässä työssä sovelletaan pörssisähkön yleistä hintaa. Kirjoittamishetkellä sähkön keskihinta 12 kuukauden ajalta on 15,689 snt/kWh. Sähkön hinta oli kuitenkin talvella 2022–2023 ennennäkemättömän korkealla maailman poliittisen tilanteen vuoksi, joten takaisinmaksuajan laskuissa käytetään yleisesti realistisempaa arvoa, esimerkiksi vuoden 2021 spot-keskihintaa 8,95 snt/kWh (spot-hinta määritetään vuorokauden jokaiselle tunnille erikseen).

Sähkön siirtohinnat löytyvät Kuopion Energian verkkosivuilta, joista voidaan takaisinmaksuaikaa laskettaessa soveltaa pienjännitetelesiirron päivähintaa 1,93 snt/kWh. Kuopion Sähköverkko Oy:n sähkönsiirron perus-, sekä loistehomaksut eivät muutu joko ollenkaan tai merkittävästi, mutta tehomaksussa tapahtuu muutos saneerauksen jälkeisenä vuotena. Tehomaksu laskutetaan viimeisen 12 kuukauden suurimman keskituntitehon perusteella ja sen hinta on 4,20 €/kW, kk (Kuopion Sähköverkko OY, 2021). Arvioidaan laskemalla seuraavaksi kiinteistön huipputehossa tapahtuva muutos valaistus-saneerauksen seurauksena käyttämällä kaavaa 9,

$$P_h = \sum_{i=1}^n P_i \cdot x_i \quad (9)$$

jossa P_h on valaistuksen huipputeho (W),
 P_i on valaisimen nimellisteho (W) ja
 x_i on kyseisien (P_i) valaisimien/valaistusputkien lukumäärä.

$$P_{h1} = 58 \text{ W} \cdot 600 + 36 \text{ W} \cdot 100 = 38\,400 \text{ W} = 38,4 \text{ kW}$$

$$P_{h2} = 23 \text{ W} \cdot 600 + 15 \text{ W} \cdot 100 = 15\,300 \text{ W} = 15,3 \text{ kW}$$

$$P_{h\Delta} = P_{h1} - P_{h2} = 38,4 \text{ kW} - 15,3 \text{ kW} = 23,1 \text{ kW}$$

Laskuissa P_{h1} on vanhan valaistuksen tuottama huipputeho, P_{h2} on uuden valaistuksen tuottama huipputeho, sekä $P_{h\Delta}$ on huipputehossa tapahtuva muutos valaistussaneerauksen seurauksena. Kerrottaessa huipputehon muutos $P_{h\Delta}$ tehomaksun hinnalla 4,20 €/kW saadaan kuukaudessa säästetyksi summaksi 97,02 €. Koska tehomaksu laskutetaan 12 viimeisen kuukauden suurimman keskituntitehon perusteella, jätetään tämä summa huomioimatta takaisinmaksuaikaa laskettaessa ensimmäisen vuoden ajalta valaistussaneerauksen valmistumisen jälkeen. Tuloksesta tulee myös huomioida, että se on arvio suurimman keskituntitehon pudotuksesta, eikä todellisuus välttämättä vastaa laskuista saatua tulosta.

Suomessa sähköenergiasta täytyy maksaa myös veroa, jossa on erikseen veroluokat 1 ja 2. Tässä opinnäytetyössä käsitellyt esimerkkikohteet kuuluvat veroluokkaan 1, jossa energiaveron hinta on 2,253 snt/kWh (Valtiovarainministeriö, ei pvm).

Valaistussaneerausinvestoinnin kokonaiskustannus työn tilaajalle oli noin 18 000 € (sisältää arvonlisäveron), jota ei eritellä tässä opinnäytetyössä salassapitovelvollisuuden vuoksi. Kokonaiskustannukseen on laskettu työ, sekä materiaalit.

Lasketaan seuraavaksi valaistussaneerauksen takaisinmaksuaika a (vuotta) käyttämällä kuukaudessa säästettyä energiamäärää $E = 2920$ kWh, valaistussaneerauksen kokonaiskustannusta (18 000 €), sähkölle vuoden 2021 spot-keskihintaa 8,95 snt/kWh, sähkönsiirrolle päivähintaa 1,93 snt/kWh, energiaverolle hintaa 2,253 snt/kWh ja huomioiden tehomaksun aleneman valaistussaneerauksen valmistumisesta kuluneen ensimmäisen vuoden jälkeen.

$$a = 1 + \frac{18\,000 \text{ €} - E \cdot \left(0,0895 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} + 0,0193 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} + 0,02253 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}\right) \cdot 12}{\left(E \cdot \left(0,0895 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} + 0,0193 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} + 0,02253 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}\right) + 97,02 \text{ €}\right) \cdot 12} = 3,3$$

Valaistussaneerauksen lasketuksi takaisinmaksuajaksi saadaan $a \approx 3,3$ vuotta, jonka jälkeen vuotuisen säästö energiakustannuksissa on noin 5 700 €, jos sähköenergian hinta on lähellä vuoden 2021 spot-keskihintaa.

Takaisinmaksuajan arvioissa ei ole myöskään huomioitu led-valoputkien yli kolminkertaista elinikää. Loisteputket eivät yksinään ole kalliita, mutta kiinteistönhoitajan käyttämä työaika, mikä menisi loisteputkien vaihtamiseen vähenee tässä tapauksessa alle kolmasosaan.

6.1.2 Mitatut energiansäästöt

Koko koulurakennuksen energian kulutustiedot on listattu 4 vuoden ajalta taulukkoon 6. Vuosien 2020–2023 kulutustiedot on kuvattu jokaiselta kuukaudelta erikseen, jota verrataan valaistussaneerauksen jälkeisiin kuukausiin. Kuukausien ero on ilmoitettu kilowattitunteina, sekä prosentteina. Opinnäytetyön aikataulullisista syistä vuotta 2023 ei voida kuvata taulukossa kokonaan.

Taulukko 6. Koulurakennuksen kulutustiedot, sekä muutokset valaistussaneerauksen jälkeen.

KUUKAUSI	KULUTUS (kWh)				Δ (%)	Δ (kWh)
	2020	2021	2022	2023		
Tammikuu	28 443	23 821	25 638	23 166	-10,8 %	-2801
Helmikuu	24 985	23 680	25 077	20 660	-16,0 %	-3921
Maaliskuu	18 057	23 658	24 715	20 229	-16,4 %	-3957
Huhtikuu	14 805	22 559	22 536	17 975	-20,3 %	-4572
Toukokuu	13 215	20 299	19 495	17 605	-11,5 %	-2292
Kesäkuu	10 332	15 381	13 861	13 172	-0,1 %	-19
Heinäkuu	11 094	5 355	9 683	-	-	-
Elokuu	16 978	20 315	19 251	-	-	-
Syyskuu	23 284	24 374	24 091	-	-	-
Lokakuu	24 523	23 928	24 132	-	-	-
Marraskuu	27 962	27 868	24 857	-	-11,0 %	-3058
Joulukuu	24 367	23 027	19 249	-	-18,8 %	-4448
				ka.	-14,9 %	-3578

Koulut suljettuina pandemian takia, ei huomioida laskuissa.

Valaistussaneerauksen jälkeiset kuukaudet.

Koulujen kesälomat (kesäkuu-elokuun toinen viikko), ei huomioida keskiarvossa (**ka.**).

Taulukossa vihreät solut havainnollistavat valaistussaneerauksen jälkeistä kulutusta, jota verrataan aikaisempien vuosien kuukausien keskiarvoon. Laskuissa ei ole huomioitu vuoden 2020 maaliskuu-toukokuun välistä aikaa, sillä koulu oli suljettuna koronapandemian vuoksi.

Taulukon *ka.* sarakkeessa on laskettu keskiarvo muutosprosentille, sekä energiankulutuksen muutokselle. Energiankulutus on vähentynyt valaistussaneerauksen jälkeen 14,9 %, tai kuukaudessa keskimäärin 3578 kWh.

Taulukosta voidaan havaita kesäkuun lähes olematon muutosprosentti valaistussaneerausta edeltäviin kuukausiin, mikä johtuu koulujen kesälomasta, jolloin rakennus ei ole opetuskäytössä. Aikaisemmassa kappaleessa laskettu arvio energiansäästöille kuukaudessa oli $E = 2920$ kWh, jossa oli huomioitu myös koulujen pitkä kesäloma. Opinnäytetyön aikataulullisista syistä, emme saaneet kokonaisen vuoden mittauksia kerättyä, eikä taulukon keskiarvossa ole tämän seurauksena huomioitu koulujen kesälomaa.

Toistamalla edellisessä kappaleessa tehdyn arvioitujen kuukauden energiansäästöjen laskun huomioimatta koulujen kesälomaa, saadaan parempi arvio laskun virhemarginaalista verrattuna mitattuihin arvoihin. Käytetään laskuissa koulupäivien sijaan keskiarvoa kuukauden työpäivistä (21,5), josta on vähennetty koulujen joululoma, sekä talviloma (pudottaa keskiarvon 20,41 päivään), sillä nämä on huomioitu myös mitatuissa arvoissa.

$$E_{vanha} = \frac{(58 \text{ W} \cdot 600 + 36 \text{ W} \cdot 100) \cdot 8 \text{ h} \cdot 20,41}{1000} = 6269,95 \text{ kWh}$$

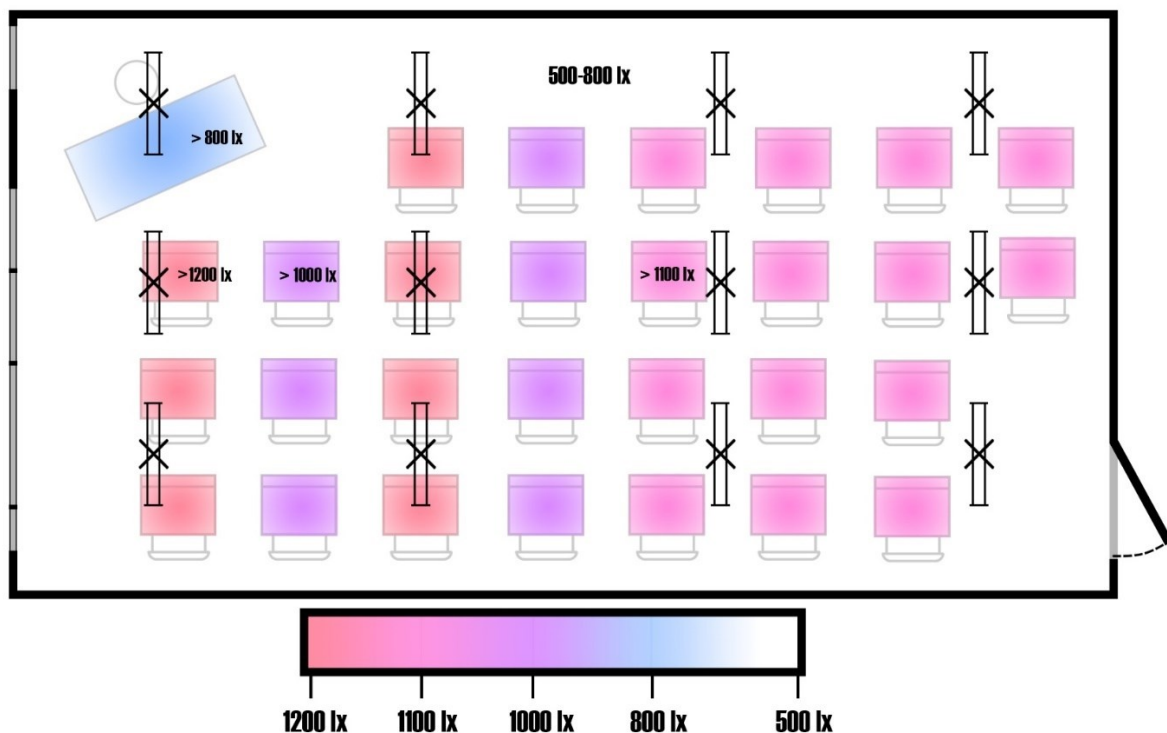
$$E_{uusi} = \frac{(23 \text{ W} \cdot 600 + 15 \text{ W} \cdot 100) \cdot 8 \text{ h} \cdot 20,41}{1000} = 2498,18 \text{ kWh}$$

$$E = E_{vanha} - E_{uusi} = 3771,77 \text{ kWh}$$

Arvioiduksi energiansäästöiksi kuukaudessa ilman, että huomioidaan kesä- ja syyslomaa, saadaan $E \approx 3772$ kWh, mikä on nyt verrattavissa mitattuun keskiarvoon 3578 kWh. Mitattu energiansäästö on siis 5,1 % pienempi, kuin arviossa. Virhemarginaali on kohtuullisen pieni, mutta jos se huomioidaan takaisinmaksuajan laskussa, saadaan todelliseksi takaisinmaksuajaksi $a \approx 3,5$ vuotta.

6.1.3 Saneerauksen jälkeinen valaistuksen laatu

Luokkahuoneiden valaistusvoimakkuutta ei aikataulusyistä mitattu ennen saneerauksen alkua, mutta uusien led-putkien valaistusvoimakkuus mitattiin yhdestä luokkahuoneesta, josta laadittiin kuva 33. Kuvassa näkötehtävien alueet on esitetty eri väreillä, joilla kuvataan tason valaistusvoimakkuutta.



Kuva 33. Luokkahuoneesta mitatuista valaistusvoimakkuuksista laadittu kuva.

Luokkahuoneen korkeiden pulpettien valaistusvoimakkuudet olivat 1250-1000 luksin välillä, riippuen pulpetin sijainnista valaisimeen nähden. Opettajan matalammalla toimistopöydällä valaistusvoimakkuus oli noin 850 lx, sekä lattialla valaistusvoimakkuus vaihteli 500-800 luksin välillä.

Mitatut valaistusvoimakkuudet vastaavat standardin SFS-EN 12464-1 mukaisia arvoja työpisteillä. Standardin mukaan tämän koulun tapauksessa näkötehtävän suorittamista varten luokkatiloissa vaaditaan valaistusvoimakkuudeksi vähintään 500 luksia. Välittömän lähiympäristön valaistusvoimakkuus täytyy olla siis vähintään 300 luksia, joka täyttyy oppilaiden pulpettien, sekä opettajan pöydän suhteen. Tausta-alueen (lattia) valaistusvoimakkuuden eroavaisuus näkötehtävän suoritusalueesta on enintään $\frac{500 \text{ lx}}{1250 \text{ lx}}$, mikä on myös standardin vaatimissa arvoissa, eli vähintään yksi kolmasosa välittömän lähiympäristön valaistusvoimakkuudesta.

Uusissa luokkahuoneissa täytyy standardin SFS-EN 12464-1 mukaan erityisvaatimuksena olla himmennettävä valaistus, mitä ei tämän koulun luokkahuoneissa ole. Saneerauksessa käytetyt valaisinputket eivät ole himmennettäviä, eikä alkuperäisessä valaistuksessa ole käytetty himmennettävää

valaistusta, vaan ohjaus on toteutettu painonapeilla ja kontaktoreilla. Himmennyksen lisääminen jälkikäteen vaatisi ohjauksen muuttamisen lisäksi sitä, että jokaisesta valaisimesta poistettaisiin vanhat elektroniset liitäntälaitteet.

Kuvassa 34 on esitetty kuva luokkahuoneessa käytetyistä valaisimista. Kuvasta huomataan, ettei vanhoissa valaisimissa ole erillistä pystysuuntaista häikäisyä estävää diffusoria, vaan valoputket ovat suoraan nähtävissä valaisinta katsoessa alhaalta päin. Tämä on yleistä vanhoissa loisteputkivalaisimissa, eikä se tuota tässä tapauksessa ongelmaa häikäisyn kannalta, sillä itse valoputket eivät ole häiritsevästi käyttäjien näkökentässä.



Kuva 34. Koulurakennuksen valaisin valaistussaneerauksen jälkeen. (Niskanen, 2023)

6.2 Päiväkotirakennuksen valaistuksen saneeraus

Toiseksi esimerkkikohteeksi opinnäytetyötä varten valittiin päiväkotikäytössä oleva, ennen vuotta 1900 rakennettu puutalo. Kohteessa oli käytössä yhteensä 50 loisteputkivalaisinta, jotka toimivat kahdella 58 W:n loisteputkella. Toisin kuin ensimmäisessä esimerkissä, jossa hyödynnettiin vanhoja valaisimien runkoja, tässä kaikki kohteen valaisimet korvattiin uusilla led-valaisimilla. Korvaavaksi valaisimeksi valittiin Ensto Pinta-/ripustusvalaisin PRI15L 31W. Valaisimen valotehokkuus on 134 lm/W, ja sille luvataan 100 000 tunnin käyttöikä. Valaisin katsotaan hajonneeksi, kun valaistustehokkuus tippuu yli 80 % alkuperäisestä arvosta. Käyttöikä vastaa 48 vuotta, jos valaisin on arkipäivinä kahdeksan tuntia päällä.

6.2.1 Arvioidut energiasäästöt

Arvioidaan seuraavaksi laskemalla vanhojen, sekä uusien valaisimien kuukaudessa kuluttama energiamäärä käyttämällä kaavaa 9,

$$E_{vanha} = \frac{58 \text{ W} \cdot 100 \cdot 8 \text{ h} \cdot 21,5}{1000} = 997,6 \text{ kWh}$$

$$E_{uusi} = \frac{31 \text{ W} \cdot 50 \cdot 8 \text{ h} \cdot 21,5}{1000} = 266,6 \text{ kWh}$$

josta saadaan tulokseksi vanhoilla valaisimilla $E_{vanha} \approx 998 \text{ kWh}$, sekä uusilla valaisimilla $E_{uusi} \approx 267 \text{ kWh}$. Säästöä kertyisi kuukaudessa $E = E_{vanha} - E_{uusi} = 731 \text{ kWh}$ olettaen, että valaisimet ovat päällä 8 tuntia arkipäivisin. Laskuissa on käytetty kuukauden työpäiville ensimmäisessä esimerkissä mainittua keskiarvoa 21,5.

Kohteen pääkeskuksella on käytössä 63 A:n pääsulakkeet, eli sovelletaan takaisinmaksuajan laskussa sähkönsiirrossa Kuopion Sähköverkko Oy:n yleissiirron hinnastoa, jossa ei ole päivän ajankohdan perustuvaa laskutusta. Yleissiirron hinta on 3,41 snt/kWh (Kuopion Sähköverkko OY, 2021).

Saneerauksen hinta asiakkaalle oli noin 9000 € (sisältää arvonlisäveron). Summa on huomattavasti isompi valaisinmäärään nähden verrattaessa ensimmäiseen kohteeseen, sillä valaisimet uusittiin kokonaan.

Lasketaan seuraavaksi valaistussaneerauksen takaisinmaksuaika a (vuotta) käyttämällä kuukaudessa säästettyä energiamäärää $E = 731$ kWh, valaistussaneerauksen kokonaiskustannusta (9 000 €), sähkölle vuoden 2021 spot-keskihintaa 8,95 snt/kWh, sähkönsiirrolle yleissiirron hintaa 3,41 snt/kWh, sekä energiaverolle hintaa 2,253 snt/kWh.

$$a = \frac{9000 \text{ €}}{731 \text{ kWh} \cdot \left(0,0895 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} + 0,0341 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} + 0,02253 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}\right) * 12} = 7,02$$

Valaistussaneerauksen lasketuksi takaisinmaksuajaksi saadaan $a \approx 7$ vuotta, jonka jälkeen vuotuisen säästö energiakustannuksissa olisi noin 1200 €, jos sähköenergian hinta on lähellä vuoden 2021 spot-keskihintaa.

Arvioidussa takaisinmaksuajassa ei ole huomioitu led-valaisimien paljon pidempää elinikää, joka tässä tapauksessa on vähintään viisinkertainen verrattuna vanhoihin loisteputkivalaisimiin. Samoin kuin aikaisemmassa esimerkissä todettiin, loisteputket eivät itsessään ole kalliita, mutta kiinteistönhoitajien valaisimien huoltoon kuluva työaika pienenee vähintään viisinkertaisesti saneerauksen seurauksena. Valaisimen käyttötunnit takaisinmaksuajan, eli 7 vuoden jälkeen, ovat noin 14500 tuntia. Valaisimen eliniästä olisi silloin kulutettu vain 14,5 %.

6.2.2 Saneerauksen jälkeinen valaistuksen laatu

Kohteessa suoritettiin valaistusvoimakkuuden mittaaminen ennen-, sekä valaisimien vaihdon jälkeen. Mittauksien kohteena oli lasten leikki- ja lepohuone. Huoneessa oli matalia, lapsille tarkoitettuja pöytiä, joita käytetään näkötehtävien suorittamiseen. Mittaus toteutettiin merkitsemällä pisteitä satunnaisesti ympäri huonetta, josta molemmat mittaustulokset otettiin samalla valaistusvoimakkuusmittarilla.

Kuvassa 35 on esitetty huone ennen valaistussaneerausta, sekä kuvassa 36 saneerauksen jälkeen. Kuvien oikeassa yläkulmassa on kameran käyttämä ISO-arvo, sekä valotusaika. Nämä molemmat muuttujat vaikuttavat kuvien valotukseen, eli miten hämärältä tai kirkkaalta kuva vaikuttaa. Valotusaika 1/33 sekuntia kertoo, miten pitkään kameran kennolle päästetään valoa. ISO-arvo puolestaan kertoo, miten paljon kameran kennolle tulevaa signaalia vahvistetaan ja näin ollen miten herkkä kenno on valolle. Isompi ISO-arvo tarkoittaa kennon olevan herkempi valolle, mikä johtaa valoisampaan kuvaan (Tanner, ei pvm). Molemmat kuvat ovat lähes yhtä valoisia, sillä ennen saneerausta otetussa kuvassa on huomattavasti isompi ISO-arvo. Molemmat kuvat on otettu samalla kameralla, jossa on sama objektiivi.



Kuva 35. Huone ennen valaistussaneerausta. (Niskanen, 2023)

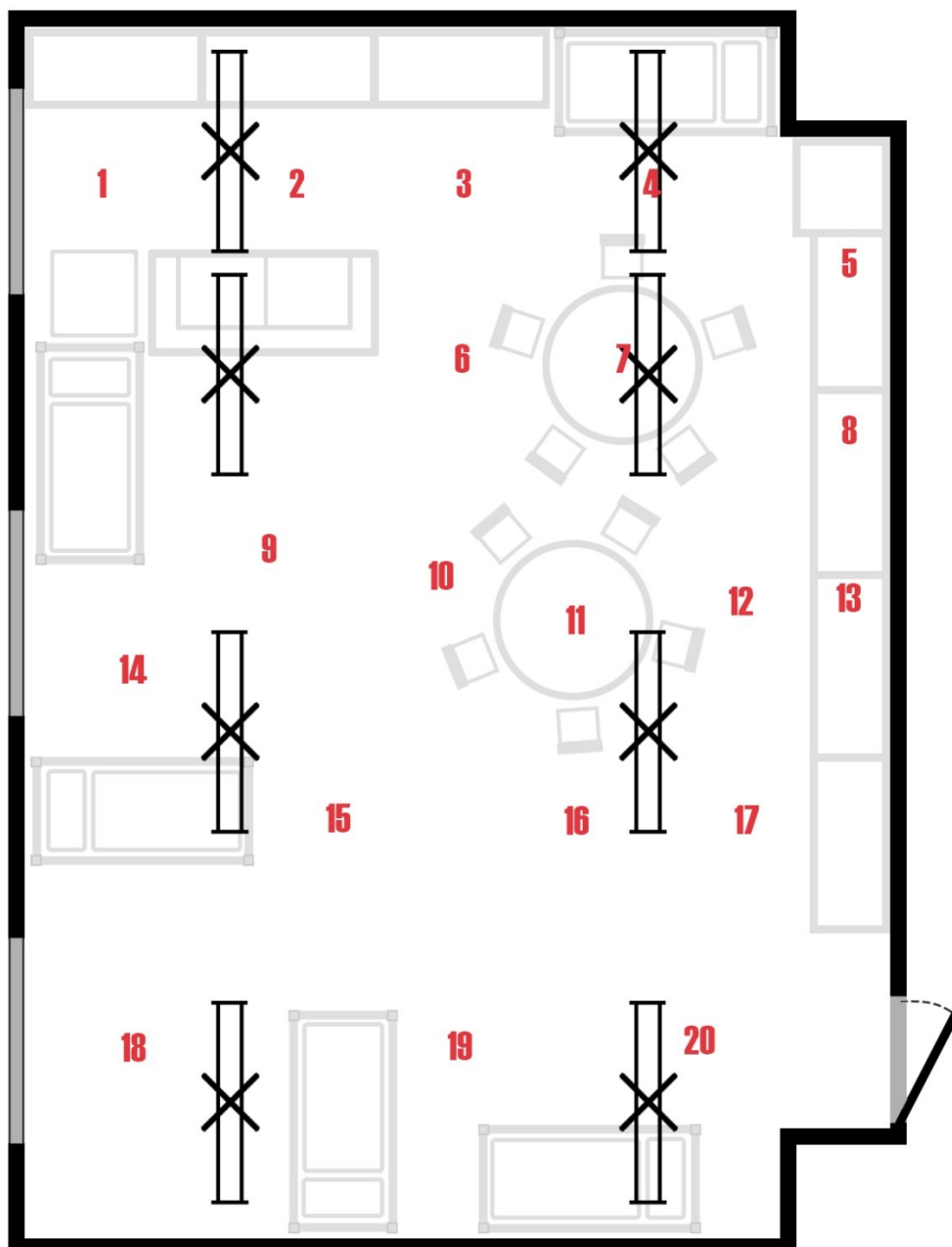


Kuva 36. Huone valaistussaneerauksen jälkeen. (Niskanen, 2023)

Taulukossa 7 on esitetty mitatut valaistusvoimakkuuden arvot lukseina ennen saneerausta, saneerauksen jälkeen, sekä kuinka monta prosenttia valaistusvoimakkuuden arvo kasvoi saneerauksen seurauksena jokaiselle mittauspisteelle erikseen. Taulukon pohjalla on lisäksi keskiarvot jokaiselle sarakkeelle (ka.). Kuvassa 37 on esitetty huoneen pohjapiirustus, johon on merkattu mittauspisteiden paikat (arvio, sillä pohjakuva ei ole mittakaavassa).

Taulukko 7. Päiväkotirakennuksen huoneen valaistusvoimakkuusmittauksen tulokset.

Piste	Ennen (lx)	Jälkeen (lx)	Δ (%)
1	292	376	29 %
2	352	544	55 %
3	332	657	98 %
4	345	516	50 %
5	195	401	106 %
6	329	725	120 %
7	371	717	93 %
8	214	412	93 %
9	322	509	58 %
10	319	713	124 %
11	476	627	32 %
12	323	474	47 %
13	238	393	65 %
14	208	332	60 %
15	328	533	63 %
16	367	502	37 %
17	305	432	42 %
18	146	288	97 %
19	196	457	133 %
20	198	345	74 %
ka.	293	498	74 %

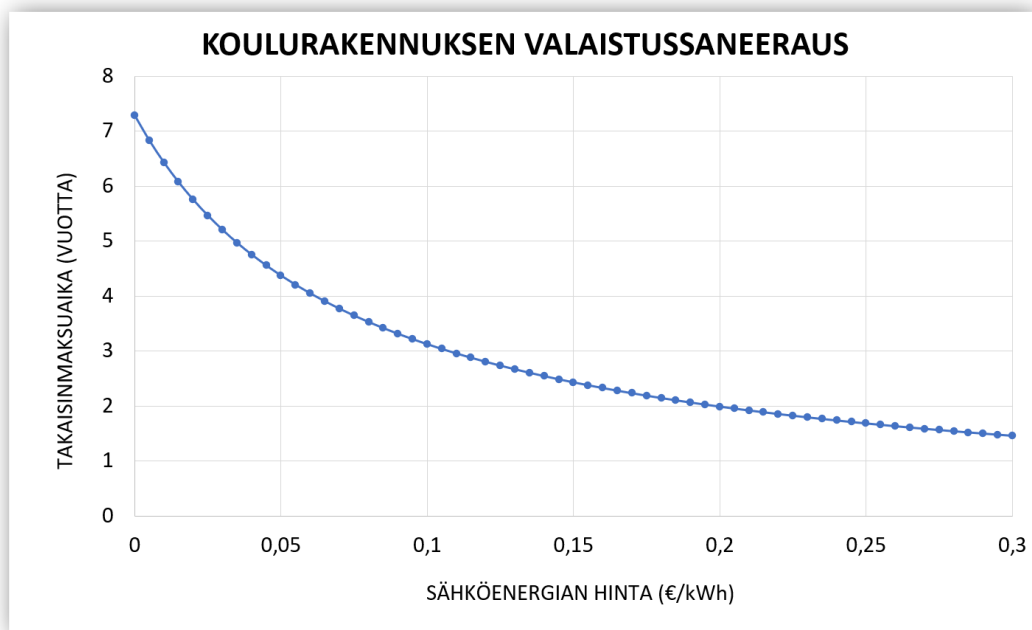


Kuva 37. Päiväkotirakennuksen valaistusvoimakkuusmittauksen mittauspisteiden paikat.

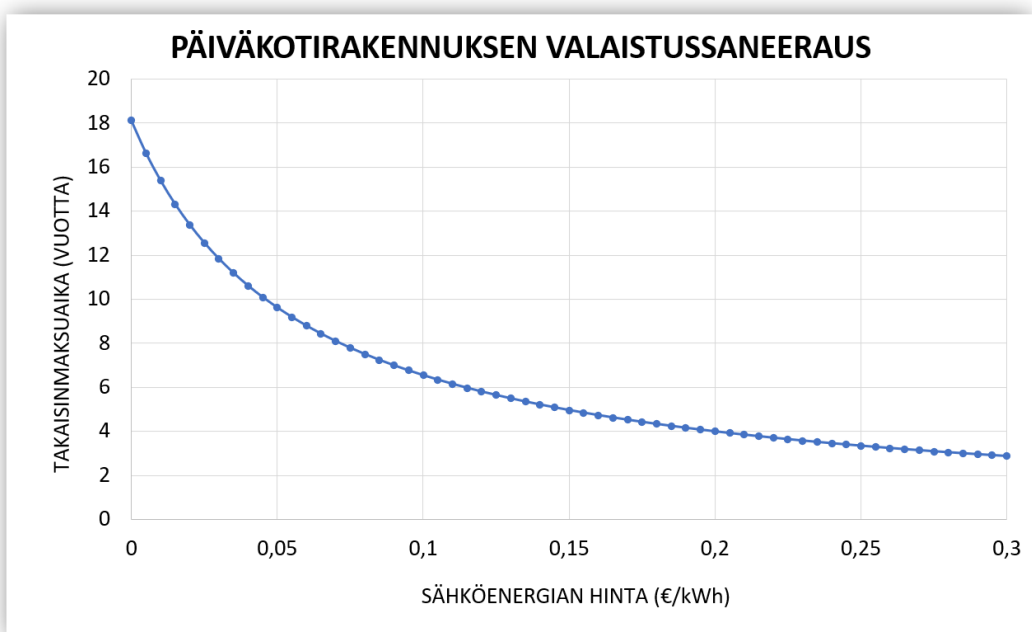
Tuloksista huomataan, että valaistusvoimakkuus huoneessa on parantunut keskiarvoltaan 74 %. Mittauspisteet 7 ja 11 sijaitsevat matalilla pöydillä, jossa suoritetaan näkötehtäviä. Lastentarhojen askarteluhuoneissa näkötehtävien suorittamista varten vaaditaan tässä tapauksessa vain 300 luxin arvo, joten vaikka valaistusvoimakkuus oli ennen saneerausta alhainen pöytien päällä, oli se silti standardin SFS-EN 12464-1 vaatimien minimiarvojen yläpuolella.

6.3 Takaisinmaksuaika muuttuvalla sähköenergian hinnalla

Edellisissä kappaleissa lasketut takaisinmaksuajat laskettiin käyttämällä sähköenergialle vuoden 2021 spot-keskihintaa, eli 8,95 snt/kWh. Koska sähkön hinta on vaihdellut merkittävästi opinnäytetyön kirjoitushetkellä, luotiin tähän kappaleeseen erilliset kaaviot molemmista esimerkkikohteista, joissa takaisinmaksuaika on esitetty sähköenergian hinnan funktiona. Käytetyt laskukaavat ovat muutoin identtisiä kappaleissa 6.1.1 ja 6.2.1 laskettuihin esimerkkeihin, lukuun ottamatta ainoaa muuttujaa, eli sähköenergian hintaa. Kuvassa 38 on esitetty koulurakennuksen takaisinmaksuajat eri sähköenergian hinnoilla ja kuvassa 39 puolestaan päiväkotirakennuksen.



Kuva 38. Koulurakennuksen takaisinmaksuaika sähköenergian hinnan funktiona.



Kuva 39. Päiväkotirakennuksen takaisinmaksuaika sähköenergian hinnan funktiona.

7 YHTEENVETO

Tässä opinnäytetyössä tutkittiin sähkövalaistuksen historian aikana käytetyimpiä valaistustekniikoita, miten ne toimivat ja milloin ne ovat tulleet markkinoille. Näistä tarkempaan vertailuun otettiin loisteputkivalaisimet ja nykyaikaiset led-valaisimet, sillä loisteputkivalaisimia on edelleen käytössä monessa vanhassa kiinteistössä ja niitä korvataan juuri led-valaistuksella. Vertailun tarkoituksena oli selvittää valaisimien erot valaistuksen laadussa, sähkön laadussa ja energiankulutuksessa.

Sähkön laatumittauksien tuloksista voidaan todeta, että led-valaisin tuottaa vähemmän virran yliaaltosisällöstä johtuvaa kokonaissäröä kiinteistön jännitteeseen verrattuna loisteputkivalaisimiin. Led-valaisin tuottaa paljon vähemmän virran 3. harmonista yliaaltoa verrattuna loisteputkivalaisimiin, mutta led-valaisin tuottaa keskiarvillisesti kuitenkin enemmän muita parittomia harmonisia yliaaltoja verrattuna vain kuristimella toimivaan loisteputkeen. Led-valaisimessa ja elektronisella liitäntälaitteella toimivassa loisteputkivalaisimessa ei ollut merkittäviä eroavaisuuksia yli 150 Hz yliaaltotaajuuksilla.

Tässä työssä mitatuista valaisimista elektronisella liitäntälaitteella toimiva loisteputkivalaisin, sekä led-valaisin tuottavat molemmat lähes yhtä paljon kapasitiivista loistehoa, jos valaisimien valaistusvoimakkuus on lähellä toisiaan. Kuristimella toimiva loisteputkivalaisin tuottaa puolestaan erittäin suuren määrän induktiivista loistehoa.

Opinnäytetyötä varten tehtiin sähkön laatumittaus myös esimerkkikohteessa, jossa vaihdettiin loisteputkivalaisimia led-valaisimiin. Valitettavasti kohde oli käytössä molempien mittausten aikana, jolloin emme pystyneet vaikuttamaan käyttäjien sähkönkulutukseen, josta seurasi erittäin suuri poikkeama tehonkulutuksessa mittausten välillä. Tämä teki tuloksien analysoinnista mahdotonta, sillä emme voi varmuudella todeta erojen johtuvan pelkästään valaistuksesta. Tähän olisimme tarvinneet pidemmän mittausajan, joka ei valitettavasti ollut mahdollista, sillä sähkökeskusta ei pystytty jättämään auki mittausta varten ilman valvontaa. Tämän takia kyseinen mittaus on jätetty pois opinnäytetyöstä.

Energiankulutuksesta laskettiin valaistussaneerauksen takaisinmaksuajat kahdessa erillisessä esimerkkikohteessa, jossa loisteputkivalaisimia uusittiin led-tekniikkaan. Molemmissa esimerkeissä takaisinmaksuaika oli suhteellisen nopea, jonka jälkeen valaistussaneeraus tuottaa merkittäviä säästöjä kiinteistön energiakustannuksissa. Led-valoputkilla tehtynä valaistussaneeraus on suhteellisen halpa, mistä seuraa myös nopea takaisinmaksuaika. Koulurakennuksen kohdalla arvioidut energiansäästöt ja mitatut energiansäästöt olivat hyvin lähellä toisiaan. Päiväkotirakennuksen arvioiduissa energiansäästöissä ei huomioitu loisteputkien kuristimien aiheuttamia häviöitä, eli takaisinmaksuaika on todellisuudessa varmasti pienempi, kuin tuloksissa.

Valaistuksen laatu esimerkkikohteissa parani valaistussaneerauksen myötä. Korvaava led-valaistus tuotti merkittävästi enemmän valaistusvoimakkuutta verrattaessa vanhoihin loisteputkivalaisimiin. Valaistusvoimakkuuden arvot täyttivät myös nykystandardien vaatimukset. Led-valoputkien ja led-valaisimien eroa täytyisi tutkia valaistuksen laadun kannalta tarkemmin, sillä henkilökohtaisesti koen valaistuksen laadun olevan vielä parempi täysin uudella led-valaisimella, mutta tästä ei ole opinnäytetyössä esitetty konkreettisia todisteita. Huomioitavaa on, että mahdolliset eroavaisuudet ovat myös hyvin pitkälti valaisinkohtaisia.

Koen, että tässä opinnäytetyössä esitettiin hyvin led-valaisimien tuomat hyödyt valaistussaneerauksien yhteydessä ja toivon, että opinnäytetyö osoitti valaistussaneerauksen kannattavuuden sellaisissa kohteissa, joissa on käytössä vielä vanhoja valaistustekniikoita.

LÄHTEET

- Arnkil, H. (ei pvm). *Valaistus ja värit*. Noudettu osoitteesta Aalto-yliopisto:
https://mycourses.aalto.fi/pluginfile.php/905496/mod_resource/content/2/Arnkil%20-%20Valaistus%20ja%20v%C3%A4rit-%20comp.pdf
- Baguley, R.;& McDonald, C. (18. 11 2014). *Appliance Science: The illuminating physics behind LED lights*. Noudettu osoitteesta <https://www.cnet.com/home/kitchen-and-household/appliance-science-how-led-lights-work/>
- Baptista, J.;Cordeiro, M.;& Moura, A. (2003). *VOLTAGE WAVE QUALITY IN LOW VOLTAGE POWER SYSTEMS*. Noudettu osoitteesta U.T.A.D., Vila Real University: <https://www.icrepq.com/pdfs/BAPTISTA317.pdf>
- Bulbs.com. (Julkaisuvuosi ei tiedossa). *Light Bulb Types*. Haettu 7. 1 2023 osoitteesta Incandescent:
<https://www.bulbs.com/learning/incandescent.aspx>
- Chodos, A. (12 2020). *American Physical Society*. Haettu 7. 1 2023 osoitteesta Volume 19, Number 11:
<https://www.aps.org/publications/apsnews/201012/physicshistory.cfm>
- Christe, K.;Gutmann, V.;& Schneider, S. (2023). *Britannica*. Noudettu osoitteesta
<https://www.britannica.com/science/halogen>
- Colite Technologies. (11 2021). *A short History of Electric Lightning*. Haettu 7. 1 2023 osoitteesta
<https://colitetechnology.com/blog/a-short-history-of-electric-lighting/>
- Cyr, A. (22. 6 2016). *Regency Lighting*. Noudettu osoitteesta <https://insights.regencylighting.com/what-is-halogen-and-how-is-it-different-than-incandescent>
- Edison Tech Center. (2012). *Metal Halide Lamps*. Noudettu osoitteesta
<https://edisontechcenter.org/metalhalide.html>
- FMI-SPACE. (ei pvm). *Valo ja Spektri*. Noudettu osoitteesta
<https://space.fmi.fi/oppimateriaali/envisat/valonsade/spektri.html>
- Green Energy Efficient Homes. (2016). *Halogen light energy efficiency*. Noudettu osoitteesta <https://green-energy-efficient-homes.com/halogen-light-energy-efficiency.html>
- Halonen, L.;& Eloholma, M. (2005). *DUODECIM*. Noudettu osoitteesta Keinovalon historia:
<https://www.duodecimlehti.fi/lehti/2005/23/duo95374?keyword=keinovalo>
- Ijäs, J. (2021).
- Iso-Heiniemi, M. (5 2010). *Teknistaloudellinen tarkastelu T5-loistelamppujen käytöstä*. Noudettu osoitteesta
https://www.theseus.fi/bitstream/handle/10024/16820/Iso-Heiniemi_Marko.pdf
- Jaric Group. (2020). *Replacing halogen lights at your home or business*. Noudettu osoitteesta
<https://jaricgroup.com.au/blog/replacing-halogen-lights/>
- Juhlapyhä.fi. (2023). *Työpäivät 2023*. Noudettu osoitteesta <https://www.xn--juhlapyht-22a.fi/tyopaivat>

- Kankare, M. (15. 2 2009). *Tekniikka & talous*. Noudettu osoitteesta Näin toimivat hehkulamppu ja energiansäästölamppu: <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/nain-toimivat-hehkulamppu-ja-energiansaastolamppu/130d8690-e912-355a-8133-3290e1eccb87>
- Kumar, T. S.;Harikumar, G.;& Halpeth, M. K. (2004). *Light Right: a practising engineer's manual on energy efficient lightning*. The Energy and Resources Institute (TERI).
- Kuopion Sähköverkko OY. (2021). *Kuopion Energia*. Noudettu osoitteesta Verkkopalvelumaksut: https://www.kuopionenergia.fi/wp-content/uploads/2023/10/ke_sahkoverkon_verkkopalveluhinnasto_20231010.pdf
- Kykta, M. (2021). *The Mystery of the Centennial Bulb: an Incandescent Light Bulb*. MAK Electro-Optics.
- LAMPPUKAUPPA LED STORE OY. (ei pvm). *Ledstore.pro*. Noudettu osoitteesta Colour rendering index: <https://ledstore.pro/blog/colour-rendering-index/>
- Ledrise Led Professional. (2023). *Luminous Efficacy and Useful Lumens: A Comprehensive Guide to Efficient Lighting Design*. Noudettu osoitteesta https://www.ledrise.eu/blog/led_efficacy_efficiency_explained-lr/
- Lehtimäki, H. (2. 1 1980). *Sähkötekniikka Oy Kari Sirén*. Haettu 7. 1 2023 osoitteesta Pohjoismaiden ensimmäinen sähkövalo syttyi Tampereella 15.3.1882.: <https://www.sahkotekniikka.fi/?x144273=144836>
- MIT Technology Licensing Office. (2016). *HIGH EFFICIENCY INCANDESCENT LIGHTING*. Noudettu osoitteesta <https://tlo.mit.edu/technologies/high-efficiency-incandescent-lighting>
- MKS Instruments. (2023). *Diode Physics*. Noudettu osoitteesta <https://www.mks.com/n/diode-physics>
- MKS Instruments. (2023). *P-N Junction Physics*. Noudettu osoitteesta <https://www.mks.com/n/p-n-junction-physics>
- Nikulainen, P. (ei pvm). *Tekeville.fi*. Noudettu osoitteesta Valaistuksen peruskäsitteitä ja suureita: <http://www.tekeville.fi/perustietoa-kodin-valaistuksesta/valaistuksen-peruskasitteita-ja-suureita>
- Niskanen, T. (2023).
- Opetushallitus. (2022). *Koulujen työ- ja loma-ajat lukuvuonna 2022–2023*. Noudettu osoitteesta <https://www.oph.fi/fi/uutiset/2022/koulujen-tyo-ja-loma-ajat-lukuvuonna-2022-2023>
- OptiWatti. (2. 2 2019). *Omakotitalon energiatehokkuus – mitä siitä pitäisi tietää?* Haettu 6. 1 2023 osoitteesta <https://www.optiwatti.fi/omakotitalon-energiatehokkuus-mita-siita-pitaisi-tietaa/>
- Pacific Lamp & Supply Company. (ei pvm). *Why are light bulbs filled with argon gas?* Noudettu osoitteesta <https://www.pacificlamp.com/why-are-light-bulbs-filled-with-argon-gas.asp>
- Peda.net. (ei pvm). *Valoa sähköstä*. Noudettu osoitteesta <https://peda.net/jamsa/perusopetus/kuorevesi/luokat-oppiaineet/fysiikka-ja-kemia/fjke/efyke5-6/1/3>
- Rajala, R.;& Juuti, P. (2012). *Yhteistyöllä voimaa*. Haettu 7. 1 2023 osoitteesta 2. Pärevalosta sähkölamppuun: https://trepo.tuni.fi/bitstream/handle/10024/68071/yhteistyolla_voimaa_2012.pdf?sequence=1
- Savon Voima Oyj. (ei pvm). *Loissähkö ja sähkön laatuun vaikuttavat yliaallot*. Noudettu osoitteesta Savonvoima.fi: <https://savonvoima.fi/yrityksille-ja-yhteisolle/sahkoverkko/loissahko-ja-sahkon-laatu/>

- Shenzen Benwei Lighting Technology Co. (ei pvm). *Ero T5- ja T8-loistelamppujen välillä*. Noudettu osoitteesta <https://fi.benweilight.com/lighting-tube-bulb/type-a-b-t5-led-tube/difference-between-t5-and-t8-fluorescent.html>
- SKILUX OY. (ei pvm). *CRI-Ra*. Noudettu osoitteesta <https://www.skilux.fi/tuotteet/hyva-tietaa-valosta/cri-ra.html>
- Stouch Lightning. (21. 4 2016). *Lighting Comparison: LED vs Incandescent Lighting*. Noudettu osoitteesta <https://www.stouchlighting.com/blog/light-comparison-led-lighting-vs-incandescent-lighting>
- Suomen Standardisoimisliitto SFS. (2021). *SFS EN 12464-1:2021*.
- Suomen Standardisoimisliitto SFS. (2022). *SFS 6000-5-52:2022*.
- Suomen Standardisoimisliitto SFS. (2022). *SFS-EN 50160:2022*.
- Suomen Valotorni Oy. (ei pvm). *Tietoa loisteputkista*. Noudettu osoitteesta <https://www.valotorni.fi/category/570/loisteputkien-pituudet>
- Suomen Valotorni Oy. (ei pvm). *Tietoa loisteputkista*. Noudettu osoitteesta <https://www.valotorni.fi/category/570/loisteputkien-pituudet>
- Superior Lightning. (ei pvm). *WHAT ARE METAL HALIDE LIGHT BULBS?* Noudettu osoitteesta <https://www.superiorlighting.com/lighting-resources/light-bulb-learning-center/hid-light-bulbs/what-are-metal-halide-light-bulbs/>
- Tanner, A. (ei pvm). *Kamerakoulu.fi*. Noudettu osoitteesta Valokuvauksen alkeet pähkinänkuoressa – aukko, suljinaika ja ISO-arvo.: <https://kamerakoulu.fi/valokuvauksen-alkeet-aukko-suljinaika-iso-arvo>
- TCP. (3. 9 2020). *Lighting History: What Came Before the LED Bulb?* Noudettu osoitteesta <https://www.tcpi.com/lighting-history-what-came-before-the-led-bulb/>
- Ulkoministeriö. (2009). *Eurooppatiedotus.fi*. Noudettu osoitteesta <https://eurooppatiedotus.fi/2009/09/04/hehkulamput-himmenevat-hiljalleen/>
- Valtavallo. (22. 4 2022). *Loisteputket poistuvat käytöstä EU:n alueella*. Noudettu osoitteesta <https://valtavallo.fi/yritys/tiedotteet/loisteputket-poistuvat-kaytosta-eun-alueella/>
- Valtiovarainministeriö. (ei pvm). *Energiaverotus*. Noudettu osoitteesta <https://vm.fi/energiaverotus>
- Virta, M. (17. 5 2021). *Tekniikka & talous*. Noudettu osoitteesta <https://www.tekniikkatalous.fi/uutiset/suomi-oli-60-luvulla-lampputeknologian-edellakavija/f8aa1fff-3a91-404e-b2c9-55751c791208>
- Walker, N. (14. 7 2014). *The Lightbulb Company*. Noudettu osoitteesta https://www.thelightbulb.co.uk/resources/light_bulb_average_rated_life_time_hours/
- Waveform Lightning. (ei pvm). *What is the difference between CRI and Ra?* Noudettu osoitteesta <https://www.waveformlighting.com/tech/what-is-the-difference-between-cri-and-ra>
- Whelan, M. (2013). *Edison Tech Center*. Noudettu osoitteesta <https://edisontechcenter.org/LED.html>
- Whelan, M.;& DeLair, R. (2010). *Edison Tech Center*. Noudettu osoitteesta Mercury Vapor Lamps: <https://edisontechcenter.org/MercuryVaporLamps.html>

Whelan, M.;& DeLair, R. (2013). *The Fluorescent Lamp*. (Edison Tech Center) Haettu 7. 1 2023 osoitteesta <https://edisontechcenter.org/Fluorescent.html>

Whelan, M.;& DeLair, R. (2013). *The Halogen Lamp*. Noudettu osoitteesta Edison Tech Center: <http://edisontechcenter.org/halogen.html>

Whelan, M.;DeLair, R.;& Miyajima, R. (2010). *Edison Tech Center*. Noudettu osoitteesta Incandescent Lamps: <https://edisontechcenter.org/incandescent.html>

YLE. (2. 9 2018). *Finland to turn off halogen lamps as EU ban starts*. Noudettu osoitteesta <https://yle.fi/a/3-10383249>