

Lappeenrannan teknillinen yliopisto
Teknillinen tiedekunta
Sähkömarkkinoiden koulutusohjelma

Tauno Henttu

VALAISTUKSEN KÄYTTÖ KYSYNNÄN JOUSTON RESURSSINA

Työn tarkastajat: Professori Jero Ahola
Nuorempi tutkija Ville Tikka

Työn ohjaaja: Nuorempi tutkija Ville Tikka

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Sähkötekniikka

Tauno Henttu

Valaistuksen käyttö kysynnänjouston resurssina

Diplomityö

2014

98 sivua, 35 kuva, 13 taulukkoa, 1 liite

Tarkastajat: Professori Jero Ahola ja Diplomi-insinööri Ville Tikka

Ohjaaja: Diplomi-insinööri Ville Tikka

Avainsanat: Valaistus, Kysynnän Jousto

Työssä tarkoituksena oli tutkia voidaanko valaistuksella toteutettua kysynnän joustoa. Työssä tutustuttiin mahdollisiin markkinapaikkoihin ja kysynnän jousto tarkoittaa. Työssä käydään läpi valaistuksen perusteita, sekä nykyisien ohjaustapojen energiatehokkuutta tukevia ratkaisuja. Tekniselle toteutukselle ei ole estettä, käytännöntoteutukselle esteeksi muodostuu valaistustason muutoksen häiritsevyys. Järjestelmällä voidaan muodostaa valaistukselle hinta mitä halutaan palvelusta maksaa. Työssä tarkasteltiin ohjauksen sijoittamista esimerkkikuormalle.

ABSTRACT

Lappeenranta University of Technology
Faculty of Technology Management
Degree Program in Energy Technology

Tauno Henttu

Lighting as resource for demand response

Master's Thesis

98 pages, 35 figures, 13 tables, 1 appendices

Examiners : Professor Jero Ahola
M.Sc. (Tech) Ville Tikka

Keywords: Lighting, Demand Response.

The purpose of this master's thesis was to study how the lighting can be used for the demand response. In this thesis was studied where are the potential market places for demand response and what the demand response means. The thesis numerous modern control methods to support energy efficiency solutions for lightning. The technical issues are not a barrier for the practical implementation for demand response in lightning. But the changes lighting level may disturb. The system can bring the price for the lightning solution.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston sähkötekniikan osastolle. Työ on tehty Green campus-hankkeen hengessä.

Kiitän mahdollisuutta päästä perehtymään valaistukseen kokonaisvaltaisesti. Työn tekeminen antoi hyvän näkemyksen valaistuksen energian kulutuksesta sekä vaihtoehtoista kehittää valaistusta.

Ensiksi haluan kiittää hyvistä vinkeistä Eri ihmisille kahvipöytäkeskusteluista ja vinkeistä mitä ottaa huomioon tätä työtä tehtäessä.

Kiitti vitusti(Tommy Taberman, 2001)

Lappeenrannassa 19.06.2014

SISÄLLYSLUETTELO

1	JOHDANTO.....	9
1.1	TAVOITTEET JA RAJAUKSET.....	11
1.2	TYÖN RAKENNE	12
2	ENERGIAMARKKINAT	13
2.1	SÄHKÖN TUUKUMARKKINAT.....	15
2.2	TASE- JA SÄÄTÖSÄHKÖKAUPPA	17
2.3	SÄHKÖN SIIRTOHINTA	19
3	KYSYNNÄN JOUSTO	20
3.1	TAUSTA.....	20
3.2	AGGREGAATTORI.....	22
3.3	JAKELUVERKKOYHTIÖ	23
3.4	SÄHKÖENERGIAN VARASTOINTI	24
3.5	AUTOMAATTINEN TAAJUUDENHALLINTARESERNI FRR-A.....	26
4	VALAISTUSVAATIMUKSET	27
4.1	VALO	27
4.2	VALON SUUREET JA LASKENTA	31
4.2.1	Kandela ja Lumen	32
4.2.2	Valaistusvoimakkuus, luminanssi ja valoeksistanssi.....	35
4.3	VALON MITTAUSTAVAT	40
4.3.1	Valomonistinputki	40
4.3.2	Puolijohdeanturit	42
4.3.3	Mittausjärjestelyt	43
4.4	NÄKEMINEN.....	43
4.4.1	Valon häiritsevyystekijät.....	45
4.5	STANDARDIT	46
4.5.1	Sisätilojen valaistus.....	47
4.5.2	Ulkotilojen valaistus	50
4.6	LENI.....	50
4.7	CO ₂ PÄÄSTÖT SÄHKÖENERGIAN TUOTANNOSSA	52

4.8	TEKNISTALOUDELLINEN LASKENTA	54
5	VALAISIMET	57
5.1	TERMISET SÄTEILIJÄT	57
5.2	LOISTELAMPPU	58
5.3	INDUKTIOVALAISIN	60
5.4	NATRIUMVALAISIMET	60
5.5	MONIMETALLILAMPUT	60
5.6	LED-VALAISIMET	61
5.7	LIITÄNTÄLAITTEET	63
5.8	HYBRIDI VALAISINJÄRJESTELMÄT	65
6	OHJASTAPOJEN VAIKUTUS KÄYTTÖNAIKAAN	67
6.1	KELLOKYTKIMET	69
6.2	MANUAALINEN KYTKIN.	69
6.3	LIIKETUNNISTUS JA LÄSNÄOLOTUNNISTUS	69
6.1	HIMMENNYS	70
6.2	VAKIOVALAISTUS SÄÄTÖ	71
6.3	OHJAUSVÄYLÄT	72
7	SÄÄTÖKAPASITEETIN MUODOSTAMINEN	74
7.1	SÄÄTÖKAPASITEETIN MUODOSTAMINEN	74
7.1	TAAJUUDEN YLLÄPITO	78
7.2	ELSPOT-OHJAUS	81
7.3	CASE RAKENNUSVAIHE VI	81
7.3.1	LENI-arvon parantaminen	82
7.3.2	Kiinteistöautomaatio	84
8	TULOKSET	85
9	POHDINTA	87
10	YHTEENVETO	89
11	LÄHDELUETTELO	90
LIITTEET		
1 SPOT-hinnan mukaiset ohjaukset		

SYMBOLI- JA LYHENNELUETTELO (epätäydellinen)

3G	3 rd generation matkapuhelinten kolmas sukupolvi
AMR	Automatic meter reading, automaattinen mittarin luenta
CCIR	Värintoistokyky
CCT	ekvivalentti värilämpö
CRI	värintoistoindeksi
DALI	Digitaalinen liitäntäväylä valaisimille
Elbas	Toimituspäivän sisäiset sähkömarkkinat Pohjoismaissa
Elspot	Toimitusta edeltävänä käytävät sähkömarkkinat Pohjoismaissa
EU	Euroopan unioni
EU-27	Euroopan unionin jäsenmaiden alue ennen vuotta 2012
FCR-D	Taajuusohjattu häiriöreservi
FCR-N	Taajuusohjattu käyttöreservi
FRR-A	Automaattinen taajuudenhallintareservi
FRR-M	Nopea häiriöreservi
LDR	Valovastus
LED	Valodiodi
LENI	Light Energy Number Index
LTE	Matkapuhelinten neljäs sukupolvi
PC	Henkilökohtainen tietokone
PIR	Passive Infrared
PLC	Power Line Communication, sähköverkkotiedonsiirto
PWM	Pulse width modulation, Piulssisuhdemodulaatio
Ra	Värintoistokyky
VPN	Virtual private network

ALAINDEKSIT

Storageenergy	Varastoidun energian hinta
primary	Varastoitava energia
Storage	Energiavarasto
store	Varastointi
releace	Varastosta otto
m	Keskimääräinen
käyttö	Valaistuksen käyttöaika
kok	Valaistuksen käytön kokonaisaika
lepo	Valaistuksen lepoaika

1 JOHDANTO

Euroopan Unionin 20-20-20 tavoitteella Euroopassa on vähentää kasvihuonepäästöjä vuoden 1990 tasosta kaksikymmentä prosenttia vuoteen 2020 mennessä. Myös lisätä uusiutuvien energialähteiden tuotannon osuutta kahteenkymmeneen prosenttiin sekä parantaa energiatehokkuutta kaksikymmentä prosenttia. Lisäksi etenemissuunnitelman mukaan EU-alueella vuoteen 2050 mennessä kasvihuonepäästöjä on alennettava 80 % - 95 % vuoden 1990 tasosta (EUROPEAN COMMISSION 2011). Energiamarkkinoiden osalta tavoitteet tarkoittavat luopumista fossiilisista tuotantotavoista ja siirtymistä hiilineutraaleihin tuotantotapoihin kuten: aurinko-, tuuli-, vesi-, ydin- sekä biovoima.

Hiilidioksidivapailla tuuli-, aurinko- sekä ydinvoimalla tuotetaan energiaa käytännössä joustamattomasti. Tuotannossa ollessaan tuuli- sekä aurinkovoimalla tuotetun energian polttoaine on käytännössä ilmaista. Näiden uusiutuvien energianlähteiden tuotantohinta koostuu näin ollen investointi sekä huoltokustannuksista, jolloin kannattaa tuottaa aina sään mukaan. Ydinvoimaa käytetään taas turvallisuuden vuoksi niin pienellä riskillä kuin mahdollista, joten ydinvoimalan tuotanto pidetään nimellispisteessä joten tuotantoa ei säädetä (Sandberg 2004). Uusiutuvilla energiantuotantomuodoilla energianlähde on ilmainen jolloin tuotetun energian hinta on sitä halvempi mitä enemmän tuotantolaitoksella saadaan tuotettua. Säättövoima ei tule häviämään energiantuotannosta. Hiilineutraalissa yhteiskunnassa voidaan säättö vielä toteuttaa esimerkiksi vesivoimalla ja biovoimalla, mutta myös energian käytön puolelta voidaan rajoittaa kuormaa tuotannon mukaan.

Kun suuntana on älykäs sähköverkko, tietoliikenneverkko-infrastruktuuri on ratkaisevassa roolissa. Nykyisin suomessa on jo olemassa lähes koko maan kattava tietoverkko, ja jokaisella energia-asiakkaalta on saatavilla kulutustieto lähes reaaliajassa. Teknisesti ei ole estettä ohjata mitä tahansa kuormaa ulkoisen tarpeen mukaan tai kuormien itseohjautumiselle. Nykyisin kuormien ohjauksissa on keskitytty varaavien lämmitysten ohjauksiin. Tulevaisuutta varten on myös tarkasteltava myös pienempien kulutuskohteiden potentiaalista liittämistä kysynnänjouston ohjauksen piiriin. Tässä työssä tarkastellaan mikrokuormaksi luokiteltua valaistusta.

Suomessa toimistorakennuksissa ja kouluissa sähköenergiasta noin 10–20 % kuluu valaistukseen. Ensisijaisesti keinotekoisien valaistuksen tarkoituksena on ylläpitää työtehtävän vaatimaa näkökykyä. Toinen valaistuksen tarkoitus on luoda turvallisuutta ja mukavuutta. Nykypäivänä markkinoilla on keinoja säästää valaistuksen energian käytön aiheuttamia kustannuksia. Toimenpiteinä ovat olleet energiatehokkaat valaistusratkaisut, auringon valoon perustuva säätö ja läsnäoloon perustuva säätö. Taloudellisesti tarkasteltuna käytettävän energian hintaan voitaisiin vaikuttaa myymällä säätökapasiteettia markkinoille.

Valaistuksen on täytettävä näkötyötehtävän vaatimat tarpeet. Valaistusolosuhteet vaikuttavat näön tarkkuuteen sekä näkömukavuuteen. Erilaisin testein on määriteltä eri työtehtäville soveltuvat valaisuolosuhteet. Valaisuolosuhteen käyttämään vuotuisen energiaan voidaan vaikuttaa työympäristön pintamateriaalein, valaisin sijoittelulla, valaisin tekniikan valinnalla sekä valaistuksen ohjausvalinnoilla. Pintamateriaaleilla voidaan vaikuttaa tarvittavan valaisutehon määrään käyttämällä hyödyksi heijastuksia. Valaisinten sijoittelulla saadaan kohdistettua valaistus tarpeen mukaan. Valaisinten valotehokkuus on parantunut tekniikan kehityksen myötä hehkulampun 10 lm/W tämän päivän led-komponentin

jopa noin 215 lm/W valotehokkuuteen (Osram 2014). Ohjaustavoilla voidaan vaikuttaa valaisinten vuotuisten käyttötuntien määrään.

Vaihtoehtoinen tapa olisi säästää käytettävän energian hinnassa. Loppukäyttäjän energian hintaa voitaisiin laskea tarjoamalla osa valaistuksen kuormasta säädettäväksi kuormaksi. Kuormituksen alentaminen vastaa samaa asiaa kuin sähköntuotannon lisääminen. Sähkönmarkkinahintaan reagoimiseen tarkoitetun säätökapasiteetin käyttö voi tarkoittaa pienessä mittakaavassa energiatehokkuuden heikkenemistä (LIITE 1, sivu 2/3). Suuremmassa mittakaavassa kysynnän jouston kapasiteetilla voitaisiin vaikuttaa yleisesti markkinoiden hallittavuuteen sekä kulutusennusteiden toteutumiseen. Periaatteessa säädettävällä kapasiteetilla voidaan saavuttaa energialle pienempi hinta, kun otetaan huomioon säätökapasiteettimaksu, toteutettu säätö sekä säästetyn energian hinta.

1.1 Tavoitteet ja rajaukset

Työssä arvioidaan ohjauksen kannalta eri toteutustapojen kannattavuutta. Työn kirjallisuuskatsauksessa selvitetään määräävät tekijät valaistuksen tasolle. Kirjallisuuskatsauksessa käydään läpivalaistuksessa käytettäviä yleisiä laskentatapoja. Työssä tutustutaan eri valaisinratkaisuihin sekä teoreettiseen toimintaan kyseisillä valaisimilla. Esitellään nykyisin käytössä olevat ohjaustavat. Työn ulkopuolelle rajataan ylemmän asteen rakennusautomaatiojärjestelmät. Työssä esitellään periaate valaistuksenohjausjärjestelmälle, jolla on tarkoitus reagoida energian käytöllä sähkön markkinahinnan mukaan tai muun muuttujan mukaan. Ja lasketaan esimerkkiskenaariot erilaisille säätötoimenpiteille energian hinnan mukaan.

1.2 Työn rakenne

Ensinmäisenä työn kappaleissa kaksi ja kolme esitellään energiamarkkinoita, ja kysynnänjouston osapuolia. Kappaleissa neljä, viisi ja kuusi esitellään valaistustekniikkaa. Kappaleissa seitsemän esitellään pintapuolisesti mahdolliset kohteet sekä kuinka valaisimista voidaan muodostaa säätöpotentiaali. Kappaleessa kahdeksan on laskettu euromääräiset energiakulut valaistukselle. Lopussa kappaleissa yhdeksän ja kymmenen on pohdinta ja yhteenveto.

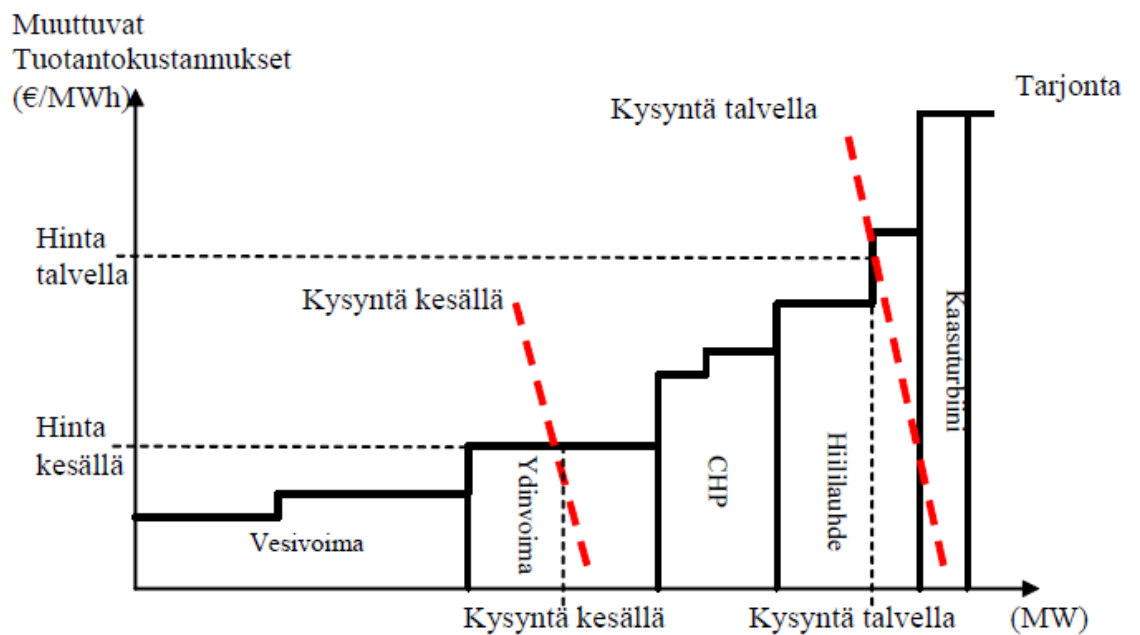
2 ENERGIAMARKKINAT

Euroopassa energiapolitiikkaa ohjataan seuraavaan suuntaan: tuotannossa energiatehokkuutta parannetaan ja ympäristökuormaa vähennetään. Vastaavasti kulutuksessa energian käyttöä tehostetaan. Näillä toimenpiteillä pyritään hillitsemään ilmaston lämpenemistä. Kasvihuonepäästöjen osalta 20-20-20 tavoitteisiin Euroopan Union koko alueella on vielä matkaa (Kuva 2.1). Kuvaajasta pääteltynä vuoden 2008 jälkeisenä aikana päästötaso olisi jo lähellä vuoden 2020 tavoitetta. Vuonna 2008 alkoi taantuma ja samana vuonna kasvihuonepäästöt tippuivat. Kuvaajassa on esitetty kaikki mitattavissa ja arvioitavissa olevat päästölähteet. Mukana arviosta on jätetty pois esimerkiksi ympäristön käytön muokkausten vaikutus kokonaistilanteeseen sekä lento ja meriliikenteen päästöt.



Kuva 2.1 EU-27 alueen kasvihuonepäästötasot ja tavoitetaso vuonna 2020. (European Environment Agency 2013)

Tässä työssä tarkastellaan sähköenergiaa. Tarkastelun kohteena on sähköenergian käyttö kysynnänjouston osalta. Sähkön markkinahintasignaaliin perustuva jousto ei tarkoita uusiutuvien energianlähteiden unohtamista. Uusiutuvat energianlähteet ovat tuotantomuodoiltaan edullisimpia kun taas fossiiliset polttoaineet asettuvat kalleimpiin tuotantomuotoihin (Kuva 2.2).

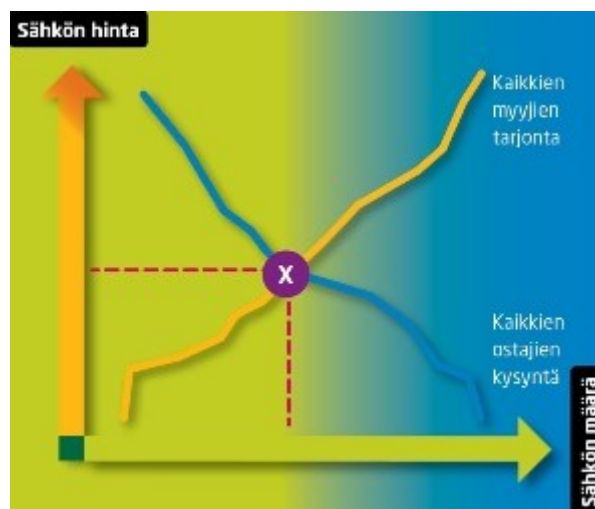


Kuva 2.2 Sähkön hinnan muodostuminen tuotantomuodon mukaan (Lakervi ja Partanen 2008)

Tuotantokustannusten lisäksi energian loppukäyttäjän on maksettava järjestelmän ylläpidosta, sekä siirtoon käytettävän infrastruktuurin kustannukset ja näiden kehityskustannukset. Näiden lisäksi vielä loppukäyttäjät maksavat sähköpörssitoimijoiden riskinoton sähkökaupassa. Ja sähkökaupan osapuolen virhearviointi aiheuttaa suuremman energianhinnan loppukäyttäjälle. Edellisten lisäksi käyttäjät maksavat vielä energiaveron.

2.1 Sähkön tukkumarkkinat

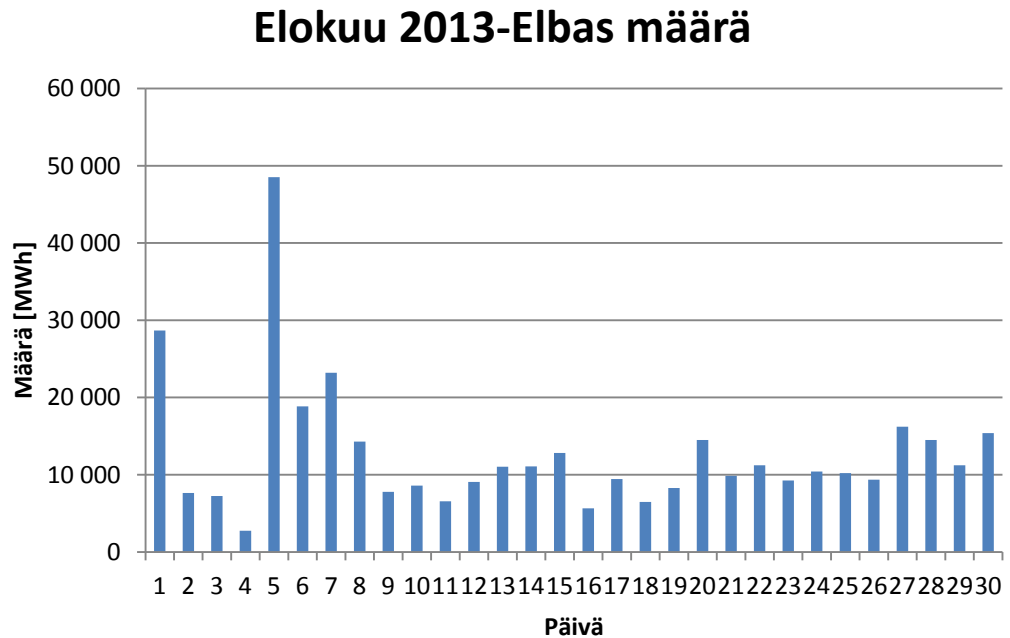
Sähkön fyysiseen toimitukseen johtavat markkinat Suomessa ja pohjoismaissa käydään NordPool pörssissä. Kauppaa NordPool pörssissä käydään Elspot- sekä Elbas-markkina-alueilla. Elspot on kerran päivässä käytävä suljettu huutokauppa. Elspot huutokauppaan tehtävissä tarjouksissa kaupan kohteena olevalle energialle ilmoitetaan hinta sekä määrä vuorokauden jokaiselle tunnille erikseen. Myyjien ja ostajien tarjouksista muodostetaan käyrät joiden leikkauspiste asettuu Spot hinnaksi (Kuva 2.3). Spot-hinta on se hinta millä sähkön toimitus tapahtuu. Nordpoolin toiminta-alueella siirtoyhteyksien rajoittaessa Elspot hinta jakaantuu aluehinnoiksi.



Kuva 2.3 Sähkönhinnan muodostuminen (Energiateollisuus 2013)

Elspot hinta on tukkumarkkinoilla toimivien ostajien paras arvio seuraavan päivän tuntien kulutuksesta. Myyjien osalta spot-hinta on paras arvio käytettävissä olevan tuotannon hinnasta. Säätilan muutos tai muu tuotannon ja kulutuksen tasapainoa muuttava tekijä aiheuttaa arviointivirheen. Tällöin sähkö voidaan vielä hankkia tai myydä päivän

sisäisellä Elbas-markkinoilla. Esimerkkinä suuresta Elbas-kaupankäynnistä on esitetty Kuva 2.4.



Kuva 2.4 Elokuu 2013 Elbas käynnistä, Elspot laskennan epäonnistuttua 4.8.2013, jolloin 5.8.2013 hintoina käytettiin edellisen arkipäivän hintoja. (Nordpool 2014) (Fingrid Oyj 2013)

Kuva 2.4 tapauksessa sähköenergian pörssihinnan laskenta ei onnistunut 4.8.2013. Jolloin 5.8.2013 käytettiin spot-hintana edellisen arkipäivän hintoja. Kyseinen päivä toimii esimerkkinä Elspot-markkinoilla tapahtuvan virhearvioinnin vaikutusta Elbas-kaupankäyntiin. Koska oli kesä ja vakaa sää teknisesti voimajärjestelmän tila pysyi vakaana (Fingrid Oyj 2013).

Sähköpörssin tarkoituksena on sähkön hinnan määrittäminen, jolloin saavutetaan sähkön hinnassa kysynnän ja tarjonnan laki. Markkinat pitävät sähkön hinnan kohtuullisena.

2.2 Tase- ja säätösähkökauppa

Pohjoismaisen synkronialueella on käytössä yhteinen nimellistaajuus 50 Hz. Verkon taajuus edustaa verkossa olevien generaattorien yhteiskäyttöistä synkronitaajuutta. Tuotannon ollessa täsmälleen kulutuksen kanssa tasapainossa taajuus on tasan 50 Hz, todellisuudessa kulutus ja tuotanto muuttuvat kaiken aikaa ja näin ollen taajuuskin elää jatkuvasti (Kuva 2.5).



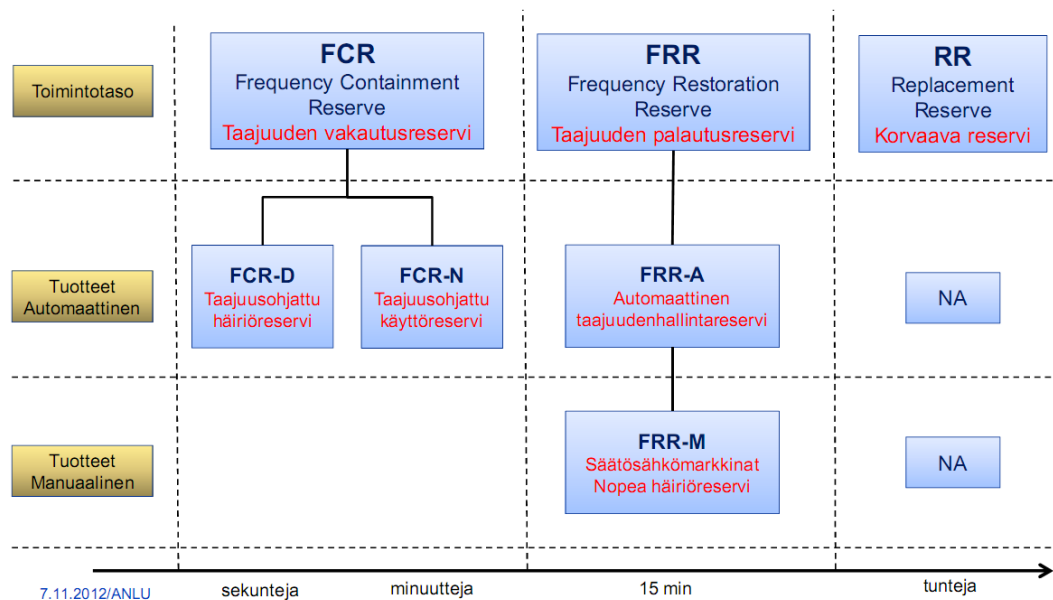
Kuva 2.5 Pohjoismaisen synkronialueen taajuus (Stattnet 2014)

Taajuuden ylläpitoa varten NordPool:in lisäksi pohjoismaisella synkronialueella pidetään tunnin sisäisen tehotasapainon ylläpitämiseen tarkoitettua säätösähkökauppaa. Säätösähkökaupan pitäjinä ovat alueiden systeemioperaattorit. Systeemioperaattorit voi ostaa säätöresursseja myös toisen systeemioperaattorin alueelta, mutta saarekekäyttö on taattava omalla alueella. Jolloin on varmistettava säätösähkömarkkinoilla, että säätökapasiteettia on riittävästi. Fingridillä ylläpitovelvoitteena ovat Taulukko 2.1 mukaiset tehoreservit.

Taulukko 2.1 Fingridin taajuusohjattujen reservien hankintavelvoitteet vuodelle 2014 (Fingrid 2014).

Reservi	Velvoite
Taajuusohjattu käyttöreservi (FCR-N)	Noin 140 MW
Taajuusohjattu häiriöreservi (FCR-D)	Noin 260 MW
Automaattinen taajuudenhallintareservi (FRR-A)	Noin 69 MW
Nopea häiriöreservi (FRR-M)	Noin 880 MW

Resurssit jakautuvat aktivoitumisnopeuden mukaan ja automatisointiasteen mukaan. Nopeimmat reservilajit ovat taajuuden vakautusreservejä, jotka ovat jatkuvatoimisia ja aktivoituvat sekunneissa. Reserviketjun tarkoituksena on taajuusohjattujen reservien kohdalla ylläpitää 50 Hz taajuutta, ja taajuuden hallintareserveillä on tarkoituksena palauttaa taajuusohjattujen reservien säätöpotentiaali. Reservilajit on esitetty Kuva 2.6.



Kuva 2.6 Pohjoismaiset taajuusohjatut reservilajit (Lundberg 2012)

Systeemioperaattorit käyvät säätösähkökaupan lisäksi tasekauppaa, jolla korjataan ELSPOT, ELBAS kaupankäynnin jälkeinen tuotannon ja kulutuksen tasevirhe.

2.3 Sähkön siirtohinta

Kotitalousasiakkaan sähköenergian kokonaishinnasta 28 % on jakeluverkkosiirtoon kohdistuvaa maksua (Energiateollisuus ry ja Fingrid Oyj 2010). Jakeluverkkoyhtiöille maksettavalla sähkönsiirto hinnalla kustannetaan jakeluverkkoyhtiön toiminta.

Jakeluverkkomaksuilla katetaan alle 110 kV sähkönjakelun kustannukset. Kustannuksiin kuuluvat häviöt ja omaisuuden hallinta. Omaisuuden hallinnalla tarkoitetaan verkoston ylläpito investoimista sekä verkon käyttöä. Uusimisen mitoituksessa on neljä mitoittavaa tekijää, terminen kestävyys, häviöt, jännitteen alenema sekä keskeytysten minimointi. Loppukäyttäjän kulutus vaikuttaa edellä mainittuihin mitoitus tekijöihin. Yleisesti häviöiden arvostaminen johtaa investointien mitoituksessa suurempiin johtimien suurempiin poikkipintoihin kuin terminen kestävyys mukainen mitoittaminen. Jännitteen alenema on seurausta liian suuresta oikosulkuimpedanssista, pieni oikosulkuimpedanssi tarkoittaa jäykempää verkkoa jolloin käyttäjien tehonheilahteluista huolimatta jännite pysyy sallituissa rajoissa. Keskeytysten minimoinnilla tarkoitetaan etenkin suomessa ilmastollisista olosuhteista aiheutuvien keskeytysten minimointia. Tämä tarkoittaa mitoituksen osalta lähinnä maakaapelointia.

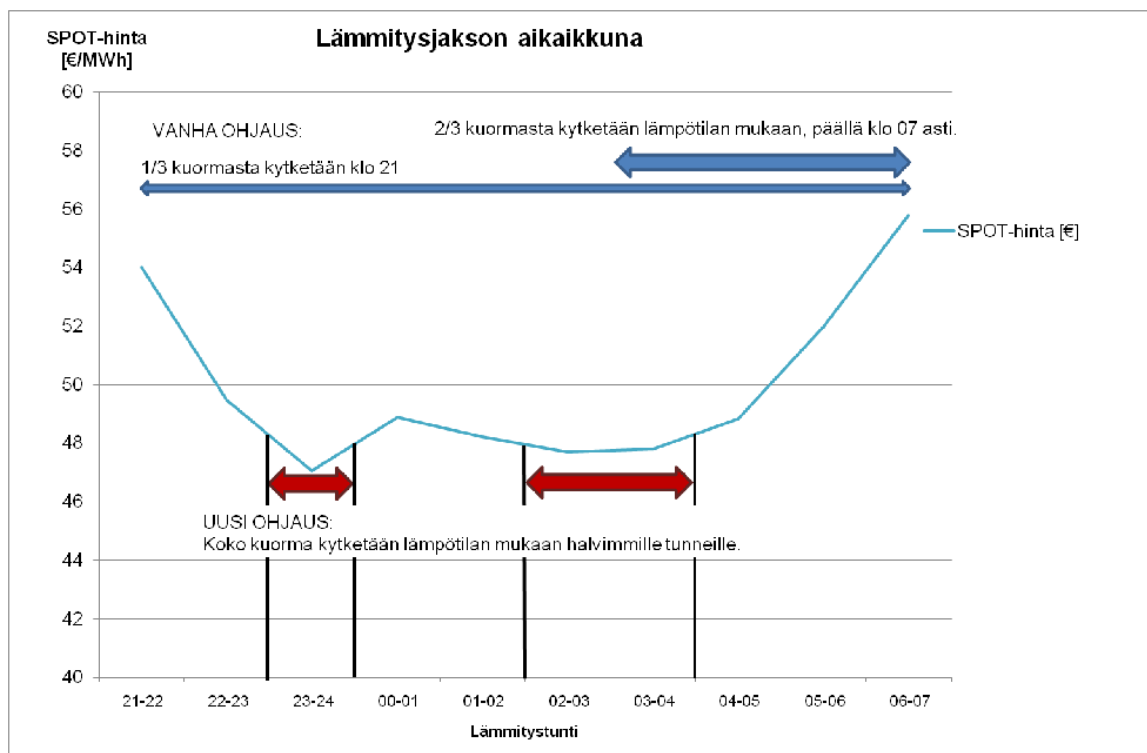
3 KYSYNNÄN JOUSTO

Kysynnän jousto on kulutuksen rajoittamista hyödykkeen arvostuksen mukaan. Koska sähkö on heikosti varastoitavissa oleva hyödyke, sen markkinahinta muuttuu kysynnän ja tarjonnan mukaan kaiken aikaa. Pohjoismaisilla alueilla toistaiseksi sähköhinnan vuorokauden sisäiset muutokset ovat vaikuttaneet kaksi-aikatariffin muodossa kulutustottumuksiin, mutta tuntihinnat eivät ole esiintyneet kotitalousasiakkaiden laskuissa tällöin käyttäjä ei näe välitöntä hyötyä tuntikohtaisilla kulutusmuutoksilla. Kuluttajan reagoiessa sähköhintaan puhutaan kysynnänjoustosta.

3.1 Tausta

Yksi alku tekijöistä kysynnänjoustolle oli 2000 luvun alun Kalifornian energiakriisi. Kalifornian tapauksessa hinnat kohosivat suuriksi, siirtokapasiteetti sekä tuotannon tilanne johti lopulta sähkökatkoihin sekä jopa konkurssiin. Myöhemmin on tarkasteltu että kulutuksen reagoinnilla olisi voitu parantaa tilannetta (Hausman ja Tabors 2004). Kalifornian tapauksessa sähkön hinnan nousu oli usean tekijän lopputulos (Schwartz 2010). Suomessa varsinaiseen kysynnänjoustoon reagointi perustuu sähkömarkkinoiden toimintaan. Teollisuusyrityksillä on olemassa hintataso, jolla kannattaa enemmän ajaa tuotettava sähkö valtakunnanverkkoon ja seisauttaa oman päähyödykkeen tuotanto. Koska suuremman prosessin alasajo ja ylösajo vie aikaa, yksittäisten tuntien ansiosta ei yleensä ole kannattavaa seisauttaa tuotantoa. Tällöin voidaan joustaa pienemmillä tehoreserveillä esimerkiksi kiinteistöjen lämmityksillä. Tarkastelluissa kohteissa omakotitaloissa olevien varaavien sähkölämmitysten on todettu olevan kannattavaa ajoittaa eriaikaisiksi (Kuva 3.1), mutta yleensä yöaikaan tapahtuva varaavan lämmityksen

ajallinen säätö ei auta keskipäivän tehopiikkiongelmassa vaan tarvitaan toisia keinoja.



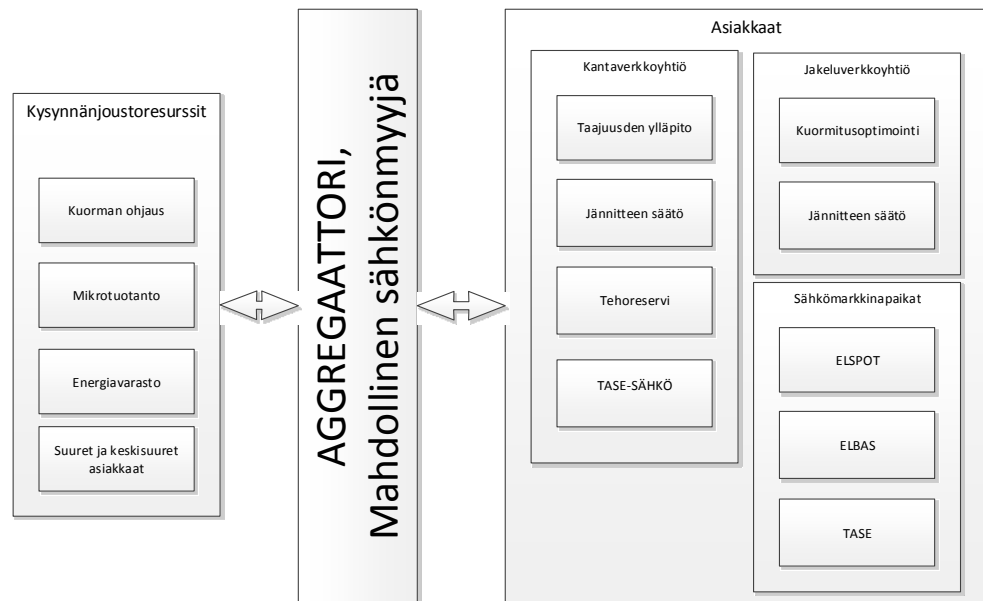
Kuva 3.1 Kuormanohjauksen periaatteellinen sijoittuminen (Seppälä ja Koponen 2011)

Käytettäessä varaavia kuormia kuten lämmitys tai jäähditys aikavakio on pitkä. Rakennuksen eristys ja lämpövarasto voidaan mitoittaa kerran vuorokaudessa lämmitettäväksi. Tällöin käytön ajoituksella ei ole suurta merkitystä. Jolloin voidaan vaikuttaa pienkuluttajillakin lämmitykseen tai jäähdytykseen käytettävään sähköenergian hintaan. Toinen pitkän aikavakion omaava energiankäyttötapa olisi energian varastointi akkuihin tai energiavarastoihin. Suomessa sähkön markkinahinnan päivänsisäiset muutokset eivät vielä nykyisten akkutekniikoiden hyötysuhteilla tai hinnalla ole vielä aiheuttaneet suurinvestointeja satojen megawattituntien kokoihin sähköenergiavarastoihin.

Sähkön SPOT-hintaan reagointi on helpoin tapa toteuttaa päivänsisäistä kysynnänjoustoa. Edellisenä päivänä saadaan tiedot huutokaupasta syntyvästä SPOT-hinnasta, ja energian käyttö voidaan lämmitykseen optimoida hinnan mukaan. Suomessa toimiva kaksi-tariffisähkö on ollut yleinen automaattinen reagointimalli tuotantoon kotitalouksissa, käyttämällä halvempaa yösähköä lämmitykseen. Kuormanhallintaa voidaan myös teoriassa käyttää suuressa mittakaavassa kantaverkon taajuuden hallintaan (kappale 2.2). Sekä jakeluyhtiötasolla saadaan pienennettyä verkostokomponenttien jakeluverkon kuormituksesta johtuvia häviöitä.

3.2 Aggregaattori

Aggregaattori on sähkömarkkinatoimija, joka muodostaa useista pienistä mikrotuotantolaitoksista sekä kysynnänjoustoressurssista virtuaalisen voimalaitoksen helpommin hallittavaksi kokonaisuudeksi. Aggregaattorin tehtäviin kuuluu hajautettujen resurssien hallinnointi sekä hinnan muodostaminen. Aggregaattori voi myydä negatiivista kuormaa sähköinä toisille sähkömarkkinoilla toimiville tahoille. Esimerkkejä mahdollisista tuotteista on esitetty Kuva 3.2. Aggregaattori on toimielin, joka kokoaa yleisesti hajautetut kysynnänjoustoressit yhteen ja tarjoaa resursseja markkinoille.



Kuva 3.2 Aggregaattorin toiminta

Aggregaattorin työkaluina toimivat hallinnointi ohjelmisto hajautetuille energiaresursseille. Hajautetuista energiaresursseista aggregaattori tarvitsee sijainnin, tyyppin sekä kapasiteetin. Näistä tiedoista aggregaattori voi koostaa kapasiteettiennusteen tulevalle ajalle esimerkiksi sään mukaan, ja määrätä mihin käyttöön kyseistä kapasiteettia kulloinkin käytetään. Resurssin ohjaajan on myös varmistettava, ettei resurssin käyttö haittaa päivittäisiä rutiineja.

3.3 Jakeluverkkoyhtiö

Jakeluyhtiön velvollisuutena on toimitettava loppukäyttäjän käyttämä sähkö laadullisesti sekä määrällisesti kohtuulliseen hintaan. Osalla sähköverkon keräämästä siirtomaksusta kustannetaan jakeluverkossa tapahtuvat häviöt. Kuormitushäviöt riippuvat neliöllisesti kuormituksesta. (Lakervi ja Partanen 2008). Koska häviötehot riippuvat neliöllisesti kuormituksesta, ja häviötehojen pienentäminen vaatii johtimien

paksumpaa poikkipintaa. Toimenpiteenä yhtiö voisi rajoittaa siirtojohdolla siirrettävää huipputehoa ja tällöin mitoittaa verkko kevyemmälle kuormalle.

Sähkömarkkinalaki voidaan tulkita siten, ettei jakeluverkkoyhtiö saa toiminnallaan häiritä perusteettomasti sähkön myyjän sekä loppuasiakkaan välistä avointa sopimusta (Sähkömarkkinalaki 588/2013, §18). Sähkön myyjä ostaa tukkusähkösä tuntiperäisiltä markkinoilta ja toimittaa sen loppuasiakkaallensa, jos kuormituksen ohjauksella verkkoyhtiö häiritsee sähkönmyyjän tasetta, ja tällöin voitaisiin todeta että sähkön myyjän sekä loppukäyttäjän avoimeen sopimukseen on puututtu, eli häiritty sähkömarkkinoita.

3.4 Sähköenergian varastointi

Sähköenergian varastointi olisi tehokas tapa tasata tuotannon ja kulutuksen heilahteluja. Tällä hetkellä maailmassa ainoa kaupallisesti laajasti hyödynnetty sähköenergiavarastomuoto on pumppuvoimalaitos (ÅF-Consulting 2012). Suomessa sähköenergian hinnan vaihtelu vuorokaudessa on toistaiseksi ollut niin pientä, ettei erillisten energiavarastojen rakentaminen ole ollut taloudellisesti kannattavaa. (Aalto, ym. 2012) Energiavarastointilaitteistolle voi esittää yhtälön 3.1 kuvaamaan energiavarastosta otetun sähkönhintaa.

$$C_{\text{storageenergy}} = \frac{C_{\text{primary}} + \frac{C_{\text{Storage}}}{n}}{\eta_{\text{store}} \cdot \eta_{\text{release}}} \quad (3.1)$$

Missä

$C_{\text{Storageenergy}}$ on varastosta otettavan energian kustannus [€/MWh]

C_{Primary} on varastoitavan energian kustannus [€/MWh]

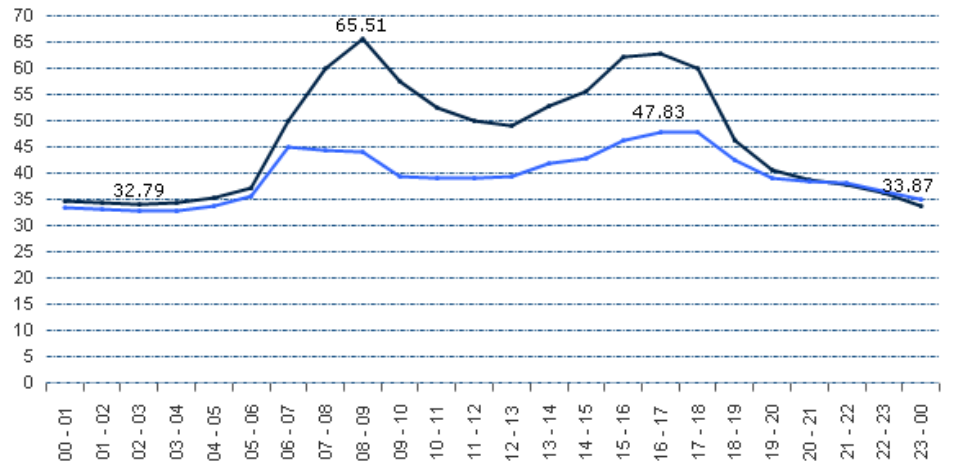
C_{Storage} on varasto kapasiteetin kustannus [€/MWh]

n on varastointisyklien määrä

η_{store} on Varastoinnin hyötysuhde

η_{release} on Varastosta oton hyötysuhde

Yhtälöä 5.1 käyttäen selviää, ettei varastosta otettu energia ole koskaan yhtä edullista, kuin sinne varastoitu energia. Perinteiset akut sähköisinä varastoina toimivat kohtuullisen hyvällä hyötysuhteella (Litium-titanaatti akku 90 % - 95 %) mutta korkea hinta (1500 €/kWh) sekä vähäiset varastointisyklimäärät (5000 – 25000 sykliä) nostavat varastoidun energian hintaa. Kysynnänjouston kannalta on olemassa tilanteita joissa halvemmalla tuotettu varastoitu energia on vielä varastoinnin jälkeenkin edullisempaa, kuin käyttää energiaa kalliimmalla polttoaineella. Esimerkkilaskelma Kuva 3.3 ELSPOT hinnoista päiviltä 9.10.2013 ja 2.10.2013. minimissään hinta on ~33 €/MWh ja maksimissaan ~65 €/MWh.



Kuva 3.3 Sähkönhinnan vuorokauden hintavaihtelu SPOT-markkinoilla (Nordpool 2014)

Kyseisellä päivällä jos akkuun varastoidaan sähköä hinnalla 33 €/MWh. Ja oletuksella että LiPoFe akun käytettävä kapasiteetti maksaisi noin 1000

€/kWh. Laskemalla yhtälöllä 3.1 kyseisellä akulla tarvitsisi tehdä yli 30 000 lataus/purkaus sykliä, jotta akun käyttäminen olisi taloudellisesti kannattavaa.

3.5 Automaattinen taajuudenhallintareservi FRR-A

Automaattinen taajuuden hallintareservi on otettu käyttöön vuonna 2013 kantaverkkoyhtiöillä. FRR:n (Frequency Restoration Reserve) tarkoituksena on vapauttaa aktivoituneet taajuusohjatut reservit pohjoismaiselta synkronialueelta sekä nimellistaajuuden palauttaminen. Aktivoitava tehontarve lasketaan pohjoismaisella synkronialueella Statnetin käytönvalvontajärjestelmässä, josta tarvittavan tehon pyynnöt lähetetään kullekin kantaverkkoyhtiölle ja kantaverkkoyhtiöt lähettävät sanoman edelleen reservinhaltijoille. FRR-A reserviä voidaan käyttää kahteen tarkoitukseen: nimellistaajuuden 50Hz palauttamiseen tai aikapoikkeaman korjaamiseen. Tälle markkinoille toimijat voivat antaa tarjouksia erikseen ylös- ja alas-säätökykyisestä kapasiteetista. Aktivoiminen reserville tapahtuu keskitetysti Suomessa Fingridin toimesta. (Fingrid Oyj 2014)

Korvauksen perusteena ovat Fingridin tiedot käytetystä energiasta sekä toteutuneesta energian hinnasta.

4 VALAISTUSVAATIMUKSET

Valaistus on yksi kiinteistöjen palveluista. Valaistuksen tarkoitus on auttaa näkemään hämärissä ja pimeissä olosuhteissa. Erilaiset ympäristöt ja työtehtävät vaativat erilaista näöntarkkuutta. Ihmissilmän anatomia määrää kuinka hyvin nähdään eri tilanteissa. Jokaisella ihmisellä on yksilöllinen näkökyky, ja ikääntyessä etenkin hämäränäkökyky heikkenee (Halonen; Elovaara ja Lehtovaara, Toimistotilojen valontarve- ja päivänvalonmittaukset 1992). Standardi SFS-EN 12464-1:2011 perustuu keskimääräisen ihmissilmän näkövaatimukseen. Kyseisen standardin ohjearvoja noudattamalla varmistetaan valaistuksen riittävyys eri tiloissa ja työtehtävissä. Jotta saataisiin keskimääräiselle silmälle suuret, ensimmäiseksi täytyy määrittää valonmäärä ja laatu mitattavaksi suureiksi, jotta voidaan vertailla eri valaistustilanteita. Tämän jälkeen voidaan perehtyä ihmissilmän toimintaan eri tilanteista ja lopuksi tarkastella standardin antamia ohjeellisia arvoja ja kuinka standardi liittyy edellisiin tietoihin.

4.1 Valo

Tässä kappaleessa esitellään teoria valosta. Valolla tarkoitetaan sähkömagneettista säteilyä näkyvällä aallonpituusalueella. Seuraavissa kappaleissa avataan teoriaa valon syntymekanismista sekä valon kulkumekanismista. Koska valon säteilyenergialla on sekä hiukkasluonne että aaltoluonne (Halonen ja Lehtovaara, Valaistustekniikka 1992):

- Syntymekanismi: selvitetään atomitason kvanttimekaniikasta fotonin syntyyn.
- Siirtymisessä väliaineessa: tutustutaan aaltoyhtälöperiaatteisiin.

Ensiksi perehdymme valon hiukkasluonteeseen ja taustateoriaan, jonka jälkeen perehdytään valon aaltoluonteeseen.

Valon hiukkasluonne tarkoittaa että valo ei ole jatkuvaa säteilyä, vaan koostuu fotoneiksi kutsutuista hiukkasista. Tässä kappaleessa tutustutaan teoriaan fotonien syntyperiaatteesta. Yleisesti sähkömagneettisella säteilyllä tarkoitetaan etenevää aaltoliikettä, millä on sekä sähkökentän komponentti että magneettikentän komponentti. Sähkövarauksen liike aiheuttaa sähkökentän muutoksen, jonka pitäisi taas aiheuttaa magneettikentän muutoksen. Sähkö- ja magneettikentän komponenttien välistä suhdetta kutsutaan impedanssiksi. Klassisen mekaniikan mukaan atomimallissa, jossa elektronivaraus kiertää ydintä omalla radallaan elektronin liikkeen täytyisi muodostaa sähkömagneettista säteilyä. Koska kokonaisenergian määrä on vakio, täytyisi liike-energian vähentyä. Ja liike-energiansa menettänyt elektroni törmäisi lopuksi atomin ytimeen. Edellisellä periaatteella elektronin lähestyessä ydintä tulisi tämän kulmanopeuden kasvaa, jolloin jokaisella alkuaineen tulisi säteillä jatkuvalla spektrillä. Todellisuudessa kuitenkin eri materiaalit säteilevät eri aallonpituudella. Tähän korjauksena Niels Bohr kehitti vuosina 1913-1915 atomimallin jossa kolme perusväittämää. (Halonen ja Lehtovaara, Valaistustekniikka 1992)

1. Atomissa elektroni voi sijaita vain tietyillä radoilla. Yhdellä radalla elektroni on stabiilissa tilassa eikä voi emittoida säteilyä.
2. Elektroni voi hypätä stabiilista tilasta toiseen, pienempienergiseen tilaan. Samalla se emittoi yhden fotonin, jonka energia on:

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} = W_1 - W_f \quad (4.1)$$

3. Vain ne radat ovat sallittuja, joilla elektronin kulmamomentti on $h/2$:n kerrannainen eli tällöin pätee:

$$m_e \cdot v \cdot r = n \cdot \frac{h}{2\pi} [Js] \quad (4.2)$$

Jossa n on kokonaisluku.

Bohrin perusväittämistä käytännön sovelluksiin pätee esimerkiksi luvussa 3.2 käsitellyn elohopeavalaisimen synnyttävä UV-säteily aallonpituudella 253,7 nm. Tämän aallonpituuden synnyttää elektronin 4,88 eV:n suuruinen energiatason muutos (Pöyhönen 1979, 29). Seuraavassa kappaleessa selvitetään valon aaltoluonne.

Valon aaltoluonteen perusteella voidaan mallintaa valon käyttäytymistä eri väliaineissa. Väliaineilla on erilaisia ominaisuuksia, ja sähkömagnetismista puhuttaessa materiaalin ominaisuuksissa kiinnostavat häviöt sekä impedanssi. Väliaineen ominaisuuksien muuttuessa voidaan aaltoteorian avulla selittää valon seuraavat ilmiöt:

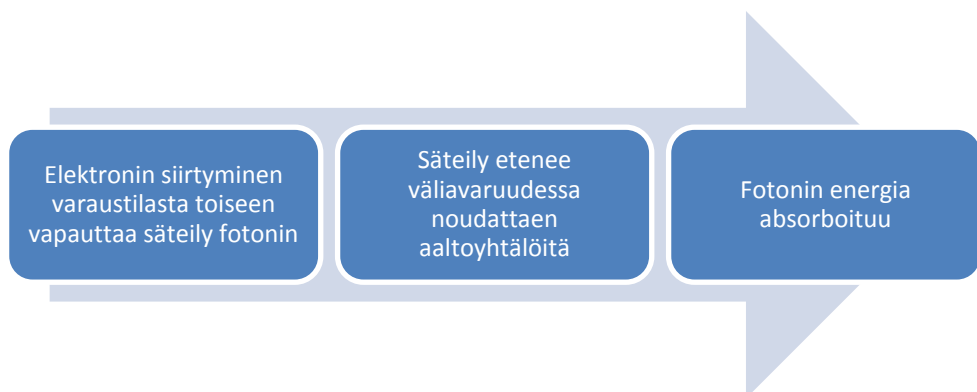
- Heijastuminen
- Taittuminen
- Hajonta
- Polarisaatio
- Interferenssi

Taittuminen selittyy valon aallon kohdatessa pinnannormaalia poikkeavasta kulmasta impedanssimuutoksen. Esimerkkinä ilman ja lasin ominaisuuksista johtuen aallon etenemisnopeudet ovat eriävät. Ja aallon etenemisnopeudella saadaan laskettua rajapinnasta taitekerroin eri taajuuksille. Tätä periaatetta voidaan käyttää esimerkiksi valon spektrikoostumuksen selvittämiseen prisman avulla.

Heijastunut valosäteily on säteilyä joka ei absorboidu pintaan tai siirry väliaineesta toiseen. Heijastuneen valon lähtökulma on sama kuin

tulokulma. Interferenssillä tarkoitetaan kahden saman taajuisen aaltoliikkeen vaikutusta toisiinsa, joko vahvistumista tai heikentymistä: esimerkiksi Laser ja maser ovat saman taajuista samassa vaiheessa eteneviä sähkömagneettisia aaltoja. Polarisaatiolla tarkoitetaan sähkökentän suuntaavuutta. Yleensä auringonvalolla tai lämpösäteilyllä ei ole määriteltävissä olevaa polarisaatiota koska komponenttien suunnat eivät korreloi toisiaan. Kumminkin polarisaatioilmiötä voidaan käyttää hyväksi suodattamalla valosta erisuuntaiset komponentit. Eräs ilmiötä hyväksi kohde on LCD-näytöt.

Yhteenvedona kappaleesta. Valosäteilyllä on sekä hiukkasluonne ja aaltoluonne. Pelkästään hiukkasluonne ei kykene selittämään kokonaisuudessaan ilmiötä. Aaltoluonne ei kykene selittämään kvanttitason ilmiötä. Ilmiöt on tiivistettynä kuvassa 4.1



Kuva 4.1 valon käyttäytymisen mallintaminen

Tässä kappaleessa käsiteltiin lyhyesti yleisesti hyväksytty valon luonne. Käsiteltiin mallintamiseen soveltuvat ilmiöt valon synnystä sekä kohdatessa erilaisilla ominaisuuksia omaavat väliaineet. Nämä teoriat ovat olleet pitkään hyväksytyjä rinnakkain käytettyinä, ja selittävät useimmat valon käyttäytymisen ilmiöt.

4.2 Valon suuret ja laskenta

Tässä kappaleessa käsitellään valaistuksen laskentaa sekä esitellään käytettävät perussuuret. Säteilyteholla olisi luonnollista käyttää yksikkönä wattia. Valoa käsitellessä otetaan huomioon eri taajuuspituusalueiden havaitsemiskyky. Jolloin näkyvän valon alueella käytetään ihmissilmän säteilytehon havaitsemiskyvyn mukaan painottuvaa suuretta valovoima [I] ja sen perusyksikkönä käytetään kandela [cd]. Taulukko 4.1 on esitetty valon perussuuret SI-järjestelmässä.

Taulukko 4.1 Valon perussuuret ja yksiköt

Suure	Symboli	Yksikkö
Valovoima	I	Kandela [cd]
Valovirta	Φ	Luumen [lm]
Valaistusvoimakkuus	E	Luksi [lx]
Valoeksistanssi	M	Luumen/neliometri [lm/m^2]
Luminanssi	L	Kandela/neliometri [cd/m^2]
valomäärä	Q	Luumensekunti [lms], luumentunti, [lmh]

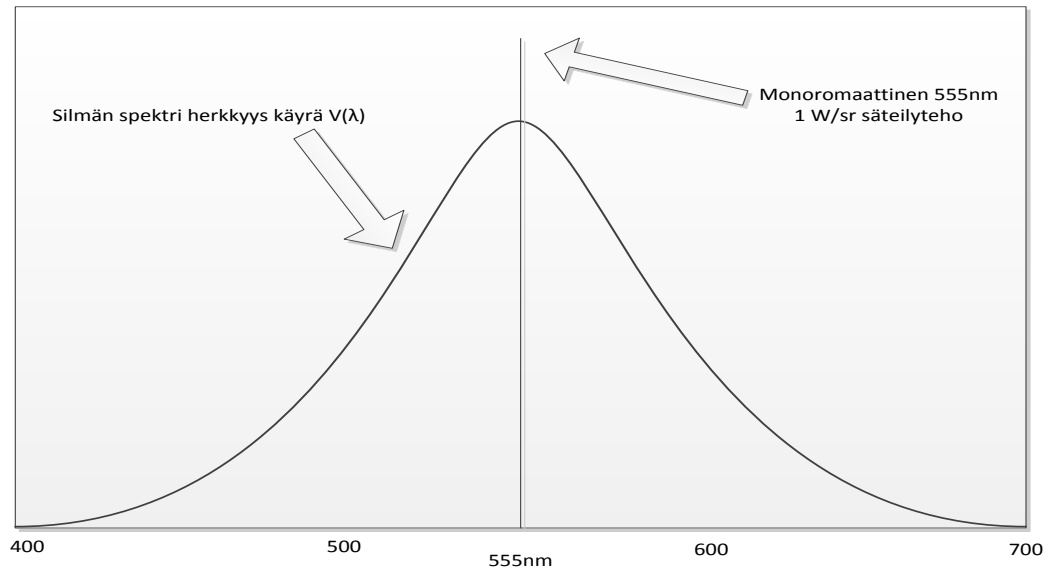
SI-järjestelmän yksiköiden lisäksi valaistuksessa käytetään valaistuksen näkömukavuutta kuvaavia suureita. Valomukavuudessa otetaan huomioon koko valaistustoteutus ja voidaan laskea tai mitata tilakohtaisesti. Valojakauman tasaisuutta merkitään tunnuksella U , Häikäisyindeksiä kuvataan tunnuksella G . Sekä valaisimissa ilmoitetaan ekvivalentti värilämpötila [K] ja värintoistokyky tunnuksilla CCIR tai Ra.

4.2.1 Kandela ja Lumen

Kandela on yksikkö mistä kaikki muut näkyvän valosäteilyn yksiköt johdetaan. Valovoimassa kandela tarkoitti tarkoin määritellyn kynttilän tuottamaa valovoimaa vielä 1800-luvun loppupuolella. Myöhemmin 1900-luvun alkupuolella referenssikynttilä korvattiin 16 kandelan kaasuliekillä. Kyseiset referenssiarvot sisälsivät kumminkin epätarkkuuksia, joten nykyinen kandela määritellään sanatarkasti seuraavasti:

”Valonlähteen valovoima tiettyyn suuntaan on yksi kandela silloin, kun valolähde säteilee monokromaattista, 540 THz:n taajuutta säteilyä ja sen säteilyteho tällä taajuudella on $1/683$ Wattia steradiaania kohden.”

Koska kandelalla mitataan nähtävää säteilyä niin 540 THz taajuus tarkoittaa 555 nm aallonpituutta, jolle ihmissilmä on herkin (Kuva 4.2). Joten Kandela on SI-järjestelmässä sovittu mittayksikkö samoin kuten muutkin perusyksiköt: metri, sekunti tai kilogramma.



Kuva 4.2 yhden kandelan määritelmän esitys monokromaattisella säteilyllä. Valotehokkuus aallonpituudella 555 nm 638 lm/W.

Edellisessä kappaleessa tulkittiin kandelan määritelmä, josta voidaan johtaa valovirta [Φ]. Valovirran yksikkö on lumen [lm] ja yksi lumen tarkoittaa 1 kandelan säteilylähteen tuottamaa säteilytehoa yhden metrin päässä säteilylähteestä. Koska käytännössä valosäteily useamman aallonpituuden säteilystä, otetaan valovirrassa silmän spektriherkkyys $V(\lambda)$ huomioon säteilytehosta muutettaessa lumeneihin (4.3).

$$\Phi = K_m \int_{380}^{770} M_\lambda V(\lambda) d\lambda \quad (4.3)$$

Jossa,

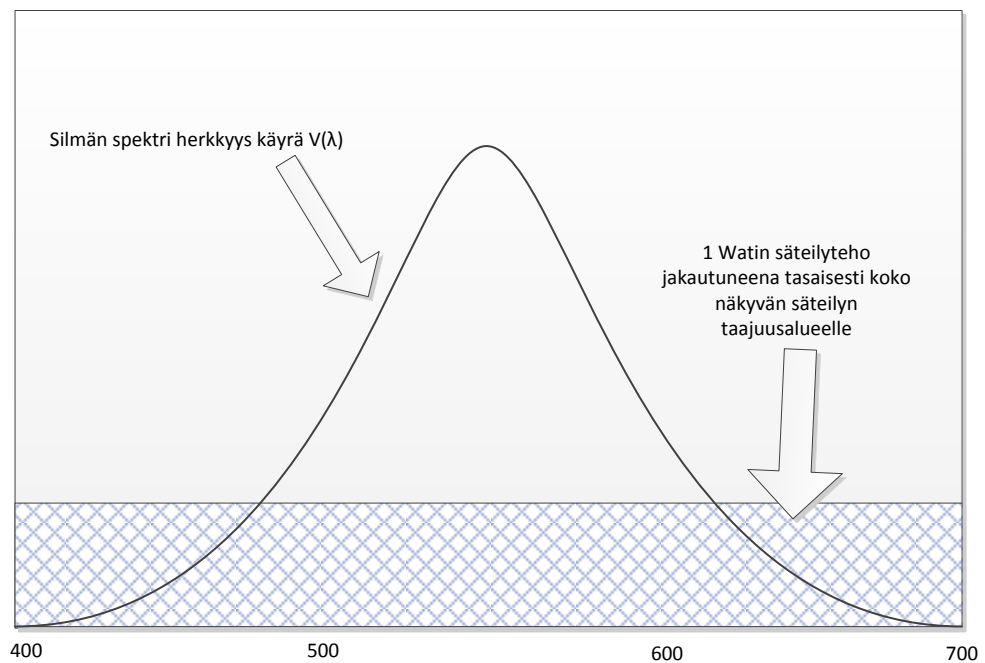
Φ on Valovirta.

K_m on valotehokkuusvakio 638 lm/lW.

M_λ on säteilyeksistanssi.

$V(\lambda)$ on silmän spektriherkkyys.

Väriäkö tarkoittaa useamman aallonpituuden erottelusta valosäteilystä. Kun 1 watin säteilyteho jaetaan koko näkyvän valon taajuus- ja aallonpituusalueelle tasaisesti (Kuva 4.3). Saadaan yhtälön 4.3 mukaan kokonaisvalotehokkuudeksi vain 187 lumenia watille. Tämä johtuu lumen yksikön silmän spektri-herkkyysriippuvuudesta.

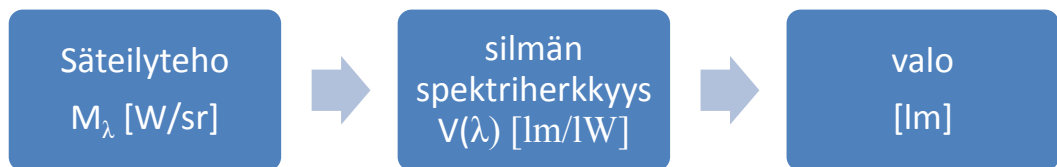


Kuva 4.3: yhden watin säteilytehon tuottama valotehokkuus jakautuen koko silminnähtävälle taajuusalueelle. Valotehokkuus 187 lm/W

Edellä olevan yhtälön mukaan voidaan todeta säteilevän lähteen tuottaessa monokromaattista säteilyä 555 nm aallonpituudella yhden watin säteilyteholla 638 lumenin valovirran (kuva 4.2).

Edellä mainituin laskentaperustein ja olettaen, että termisen säteilylähteen spektrijakauma noudattaa lähes Planckin mustan kappaleen säteilylähteen spektriä. Lämpötilan noustessa yli 1000 K siirtyy sähkömagneettinen säteily näkyvälle aallonpituusalueelle. Tällöin voidaan laskea sähkömagneettisen säteilyn spektrijakauma eri lämpötiloissa. Yhtälöllä 4.3

voidaan laskea termisen säteilijän teoreettinen valotehokkuusmaksimi, noin 90 lumenia watille. Käytännössä ei ole materiaalia, joka kestäisi valotehokkuuden vaatimaa 6500 Kelvinin lämpötilaa. (Halonen ja Lehtovaara, Valaistustekniikka 1992, 159)



Kuva 4.4: Säteililytehon muuttaminen valoksi

Tässä kappaleessa avattiin määritelmät valon perusyksiköille lumen ja kandela. Valon yksiköillä tarkoitetaan silmän näkökyvyllä painotettua sähkömagneettista säteilyä. Valotehokkuus tarkoittaa kahta asiaa: kuinka hyvin käytettävä teho saadaan muutettua näkyvän aallonpituus alueen sähkömagneettiselle säteilylle ja kuinka hyvin aallonpituudet silmä havaitsee (Kuva 4.4).

4.2.2 Valaistusvoimakkuus, luminanssi ja valoeksistanssi

Tässä kappaleessa käsitellään pintojen valosuureita. Aluksi käydään valovoimakkuus E [lx, lm/m²]. Lopuksi luminanssi L [cd/m²] ja valoeksistanssi M [lm/m²]. Valaistusstandardi SFS EN12464-1 määrittelee tiloille neljä arvoa: pienimmän valaistusvoimakkuuden, valon tasaisuuden, häikäisyindeksin sekä värinotoistokyvyn. Näistä valaistusvoimakkuudelle ja valon tasaisuudelle suunnitteluvaiheessa vaikutetaan valitsemalla riittävä valaistusvoimakkuustaso. Valon tasaisuuteen vaikutetaan riittävällä

määrällä valaisimia. Valaistusvoimakkuus tarkoittaa pinnalle kohdistuvaa valovirtaa, eli lumenia neliömetrille [lm/m^2], yksikkönä luxi [lx]. Valaistusvoimakkuus lasketaan yhtälöllä 4.4.

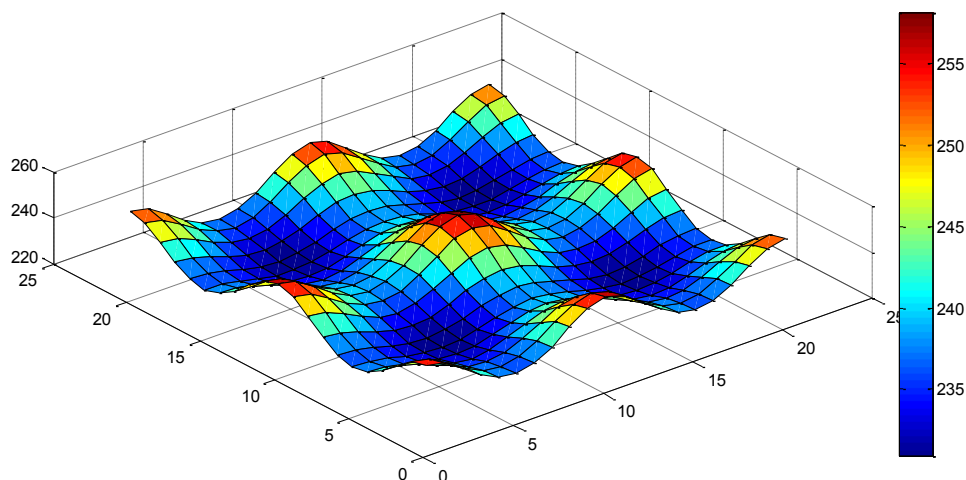
$$E = \frac{\Phi}{A}, \quad (4.4)$$

Yhden kandelan valovoima aiheuttaa yhden metrin päässä olevalle pallopinnalle yhden lumenin neliömetrille. Ja pinnan valaistusvoimakkuus näin ollen on 1 luxi. Kun tiedetään valaisimen valonjako sekä työpisteiden ja valaisinten sijoittelun geometria voidaan käsin laskennalla tarkastella työpisteen valaistusvoimakkuutta.

Laskettaessa useammalle pisteelle valaistusvoimakkuutta, voidaan määritellä valon tasaisuus. Eli pienimmän valaistusvoimakkuuden suhdetta suurimman valaistusvoimakkuuden arvoon. Tasaisuus lasketaan yhtälöllä 4.5.

$$\text{TASAISUUS} = \frac{E_{min}}{E_{max}} \quad (4.5)$$

Pelkästään valaisimien tiedoilla sekä asennuspaikkojen tiedoilla voidaan laskea valaisimista pinnoille muodostuva valaistusvoimakkuus. Kuva 4.5 on laskettu yksittäisten LED valaisimien aikaansaatu valaistusvoimakkuus. LED:it on laskentatason pinnan yläpuolella 1,5 metrin korkeudella 2,5 metrin etäisyydellä toisistaan.



Kuva 4.5: esitys pistelaskumenetelmällä suoritetusta valonjakolaskennasta, valon tasaisuus on 0.89, minimiluminanssiarvo on 230 lx. Keskiarvo 240 lx

Pistelaskumenetelmä voidaan joissakin tapauksissa käyttää yksittäisten tapauksien tarkistamiseen, mutta kohtalaisen hyvään tulokseen päästään myös käsin laskien NB-menetelmällä (Nordisk Belysnings Beregningsmetode). Jolla voidaan: Laskea keskimääräinen valaistusvoimakkuus, arvioida valaistuksen tasaisuutta ja Määrittää häikäisyindeksi. (Halonen ja Lehtovaara, Valaistustekniikka 1992, 375).

Edelliset menetelmät soveltuvat käsin laskentaan. Käytännössä käsin laskentaa ei nykypäivänä ole tarvetta suorittaa. Tietokoneiden laskentakapasiteetti on kehittynyt tarpeeksi, että voidaan laskea mielekkäessä ajassa suurempia kokonaisuuksia ja huomioida samalla useampia tekijöitä valaistustoteutuksen toimivuuden kannalta. Huomioon voidaan ottaa suunnitellut kalusteet, pinnat, ikkunat ja myös mahdollinen auringonvalon käyttö. Ohjelmistot kuten DIALux (DIAL GMBH 2014) tai RELUX (Relux Informatik AG 2014) ovat ilmaisia käyttää, sekä näille ohjelmistoille on saatavilla eri valaisinvalmistajien valaisinten valonjakotiedostot.

Kohteiden näkemisen kannalta parempia suureita ovat kohteiden luminanssi [L] ja valoeksistanssi [M] suureet. Nämä kertovat kuinka paljon valovoimaa pinnat säteilevät ympäristöön. Luminanssissa on otettu huomioon pinnalle saapuvan valon heijastus, kun taas valoeksistanssissa käsitteenä on ainoastaan pinnan säteily. Eri pinnat heijastavat eri tavalla tulevaa valoa näkijää kohden. Teoreettinen täysin musta kappale ei heijasta mitään. Luminanssin yksikkönä toimii kandela pinta-alaa kohden [cd/m^2]. Luminanssi lasketaan yhtälöllä 4.6.

$$L = \frac{E \cdot \rho}{\pi} \quad (4.6)$$

Missä

L on Luminanssi [cd/m^2].

E on Pinnalle tuleva valoteho [Lx].

ρ on heijastuskerroin [Yksikötön].

Tyypillisiä heijastuskertoimia ovat:

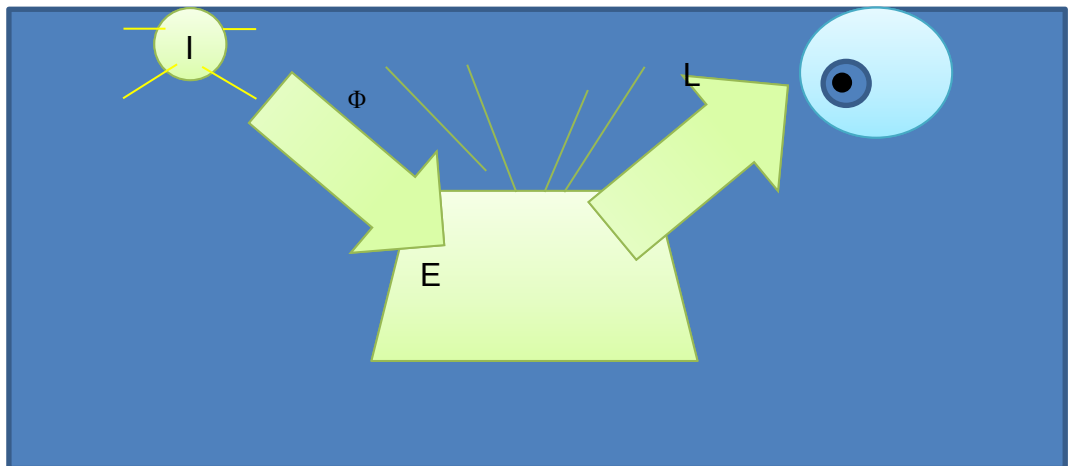
- Katto 0,7 – 0,8
- seinät 0,4 - 0,5
- Lattia 0,1 – 0,2

Luminanssin avulla voidaan arvioida työskentelytilan kontrasteja ja luminanssijakaumaa. Luminanssijakauman on merkityksellinen näöntarkkuudelle (Kappale 4.4). Luminanssi periaatteessa kuvaa valon heijastusta pinnalta ja sitä voitaisiin käyttää myös valaistussuunnittelussa. Luminanssi tasojen käsin laskien on työlästä. Apuna on käytettävä tietokoneavusteista laskentaa. Kun käytetään epäsuoraa valaistusta, tai näkökentässä on normaalisti ikkuna. Luminanssisuhteet on otettava huomioon häikäisyn välttämiseksi (I. Autio 2007, 22).

Valoeksistanssi (M) on lähes sama asia kuin luminanssi mutta siinä ei oteta huomioon tarkastelusuuntaa. Tasaisesti ympäristöön säteilevän pinnan luminanssin sekä valoeksistanssin suhde on vakio π (pi), mutta käytännössä kaikki valonlähteet tai valaistavat pinnat eivät säteile tasaisesti kaikkiin suuntiin.

Viimeisenä perussuureista määritellään Valomäärä (Q). Valomäärä on verrattavissa sähkötekniikan kilowattituntiin. Sähköenergiassa integroidaan tehoa ajan suhteen kun taas valomäärässä integroidaan valovirtaa ajan suhteen. Yksikkönä on lumensekunti [lms] tai luumentunti [lmh].

Yhteenvedona valaisin säteilee valovirtaa. Valovirran osuminen pinnalle tarkoittaa valaistusvoimakkuutta. Pinnalta Havainnoitsijan suuntaan hohtava valomäärä ilmoitetaan luminanssina. Yksinkertaistus on esitetty Kuva 4.6.



Kuva 4.6 Valon yksiköt esitettynä, I on valovoima valonlähteellä, Φ on valovirta, E Valaistusvoimakkuus jonka valovirta aiheuttaa pinnalle ja L on pinnasta pois säteilevä valovoima.

Valo on sähkömagneettista säteilyä jolla on hiukkasluonne sekä aaltoluonne. Tässä kappaleessa käsiteltiin valon piirteitä, syntyteoriaa

sekä valaistustekniikassa käytettävät perussuureet ja perus laskentatekniikat.

4.3 Valon mittaustavat

Kuten muissakin säteilyn mittalaitteissa, saatetaan valon mittalaitteissa valon teho sähköisesti mitattavaan muotoon. Tässä kappaleessa käsitellään valon mittaustekniikoita. Mitattava suure voi olla valaisimen ominaisuuden lisäksi myös pinnoista mitattavat suureet kuten heijastus tai läpäisy. Herkimmillä mittalaitteilla voidaan havaita jopa yksittäisiä fotoneja. Samat tekniikat soveltuvat myös yleisesti säteilyn mittaukseen (Ikäheimonen 2002). Värien mittaaminen voidaan toteuttaa joko suodattamalla tai hajottamalla valon eri aallonpituusalueet fyysisesti eri paikoissa sijaitseville antureille prismalla. Valon mittauksia suorittavat valaisin valmistajat luodessaan valaisimilleen valonjakomallia. Valonjakomallia käytetään hyväksi lopullisessa valaistussuunnittelussa

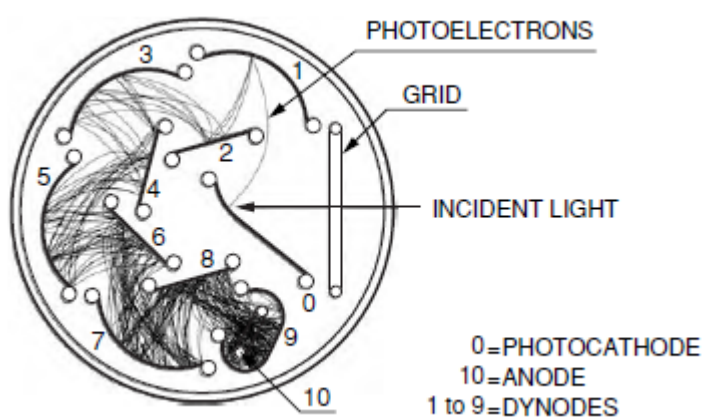
4.3.1 Valomonistinputki

Valomonistinputki (Kuva 4.7) on herkkä mittalaite valon mittaukseen. Nykypäivänä valomonistinputki on käytössä lähinnä erikoismittalaitteissa muun muassa säteilyn mittauksissa. Valomonistinputkella voidaan havaita jopa yksittäisiä fotoneja.



Kuva 4.7 Valomonistinputki (Hamamatsu Photonics K.K. 2014)

Toimintaperiaatteeltaan valomonistinputkessa valon fotonit saavat aikaan elektronivirran elektrodien välille. Valomonistinputki vaatii ulkoisen jännitelähteen sekä oikean toimintalämpötilan. Toiminta periaate Kuva 4.8 mukaan seuraava.



Kuva 4.8 Valomonistinputken toimintaperiaate (Hamamatsu Photonics K.K. 2014)

Valomonistin putken toimintaperiaate:

1. Fotonin saapuessa putken sisällä olevalle dynodi-pinnalle
2. Fotoni irrottaa dynodipinnalta fotoelektronin
3. fotoelektroni jatkaessaan seuraavalle dynodille irrottaen kaksi fotoelektronia seuraavalta pinnalta

4. Koko elektroni-virtaus saavuttaa fotokatodin josta saadaan mitattua virta.

Nykyisin puolijohdeanturit ovat suurelta osin korvanneet valomonistinputkien käytön. Edelleen valomonistinputkia kuitenkin käytetään erikoismittaustilanteissa, kuten astronomia, kemia sekä tuikeilmaisimissa säteilymittauksissa.

4.3.2 Puolijohdeanturit

Normaalissa valaistuksen mittauksessa ei kumminkaan tarvita valomonistinputken saavuttamaa herkkyyttä. Jolloin tarpeeksi suuri tarkkuus saavutetaan puolijohde-tekniikalla. Toisin sanottuna valodiodeilla. Nykyisin valodiodit ovat suhteellisen herkkiä, nopeita sekä edullisia. Valaisinten tai valaistuksen mittaukseen on kumminkin myynnissä kalibroituja mittalaitteita

Nykypäivänä myös kameroilla voidaan mitata valaistuksen tasoa. Yleensä on olemassa ihan luminanssimittauskameroita mutta perusdigitaalikamerakin voi oikein kalibroituna antaa suuntaa-antavia mittaustuloksia. Yleensä kameralla luminanssitasoja mitattaessa käytetään kalansilmäoptiikkaa tai heijastavaa palloa jotta saadaan mahdollisimman kattava kuva ympäristön luminanssitasoista.

Kolmas yksinkertainen mittalaite on valovastus (LDR), joka soveltuu hyvin sovelluksiin missä valonmäärien vaihtelut ovat suuria ja tarkkuus ei ole tärkeää. Valovastus soveltuu hyvin esimerkiksi hämäräkytkimeen. Valovastuksen toiminta perustuu valon fotonien vapauttamiin varauksen kuljettajiin. Ja valovastus on toiminnaltaan hidas valonmäärän muutokseen nähden. Kirkkaassa valossa valovastuksen resistiivisyys on noin 100 ohmia ja pimeässä noin 10 megaohmia.

4.3.3 Mittausjärjestelyt

Vaadittaessa valaistusvoimakkuudelle suoritettavaa todentamista. On mittauksiin käytettävä vastaavia pisteitä tai ruudukkoa kuin suunnittelussa. Todentaessa huomioon otettavia seikkoja ovat kumminkin: mittalaitteen kalibrointi, lampujen ja valaisinten yhdenmukaisuus teknisten tietojen kanssa ja pintojen heijastusten oletukset suunnittelussa (SFS-EN 12464:2011).

Tärkeää on huomioida todentamisessa etenkin alkuperäiset suunnittelupisteet. Tilan käyttötarkoituskkin voi muuttua ajansaatossa, jolloin alkuperäiset valaistussuositukset eivät enää täytä vaatimuksia.

4.4 Näkeminen

Näkeminen eli sähkömagneettisen säteilyn aallonpituusalueen 380...780 nm tehotasojen aistiminen. Tässä kappaleessa esitellään ihmisen näköelimet anatomia lyhyesti ja näkökyvyn toiminta eri valaistustilanteissa. Tarkka näkeminen vaatii ympäristölle tietyn luminanssitason sekä objektien erottamiseen toisistaan vaatii kontrastia luminanssitason tai spektrijakauman välille. Standardit SFS-EN12464-1:2011 esitetyt valaistusvoimakkuuksien perustuvat testattuihin näkötilanteisiin ja näille valaistustehokkuuksille on olemassa biologiset syyt. Tässä kappaleessa käsitellään pintapuolisesti silmän rakennetta ja toimintaa erilaisissa valaistustilanteissa.

Silmän verkkokalvolla on näkemistä varten kahdenlaisia näkösoluja, Tappisoluja ja sauvasoluja. Verkkokalvolla on yhteensä noin 130 miljoonaa solua joista noin 7 miljoonaa on tappisoluja ja loput ovat

sauvasoluja. Tappisolut ovat erikoistuneet värinäkemiseen ja tarkkaan näkökykyyn, Sauvasolut ovat väriä aistimattomia pääasiassa hämäränäkösoluja.

Tappi sekä sauvasolut eivät ole tasaisesti jakautuneita silmän verkkokalvolle. Verkkokalvolla on sokea piste jossa ei ole näkösoluja ollenkaan tästä pisteestä lähtevät näköaistimiseen tarkoitetut hermon aivoihin. Toinen erityinen piste silmässä on keltatäpläksi kutsuttu tarkannäön keskus fovea, jossa on pääasiassa tappisoluja.

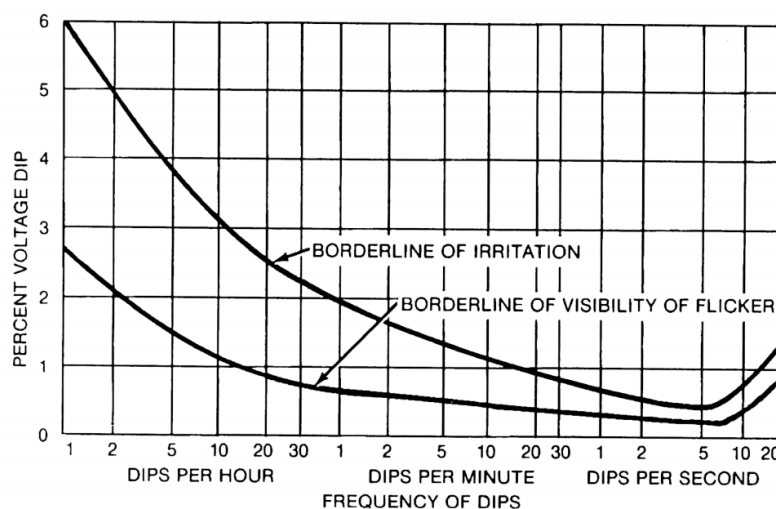
Näöntarkkuus riippuu ympäristön luminanssitasosta. Alhaisillakin valaistusvoimakkuustasoilla (alle 100 lx) pieni valaistustason korotus parantaa näöntarkkuutta, korkeilla valaistustasoilla (yli 500 lx) vaikutus on pienempi (Halonen;Elovaara ja Lehtovaara, Toimistotilojen valontarve- ja päivänvalonmittaukset 1992). Myös luminanssitasojen jakautuminen näkökentässä vaikuttaa näöntarkkuuteen. Silmä sopeuttaa verkkokalvolle koko näkökentässä havaitusta valosta keskimääräisen valonmäärän. Näöntarkkuus on suurimmillaan silloin kuin luminanssijakauma on koko näkökentän alueella tasoltaan suunnilleen vakio.

Valolla on myös psyykkisiä sekä biologisia vaikutuksia. Psyykkisiä vaikutuksia voidaan käyttää markkinointitarkoituksiin sekä turvallisuuden luomiseen. Pahimmillaan vääränlainen valaistus voi laskea työmotivaatiota tätä kautta myös työtehokkuutta. Yhtenä valon biologinen vaikutuksena on vuorokausirytmien asettaminen (Berson;Dunn ja Takao 2002). Yhteenvetona valaistus on silloin hyvä kun se ei häikäise tai sen puute ei häiritse.

4.4.1 Valon häiritsevyystekijät

Tämän diplomityön yksi reunaehto on arvioida valaistuksen säädössä häiritsevyyden raja-arvoja. Häiritsevyyden tekijöitä ovat välkyntä ja riittämätön tai liian suuri valotaso. Tuottava toimisto loppuraportista (Halonen;Elovaara ja Lehtovaara, Toimistotilojen valontarve- ja päivänvalonmittaukset 1992) selviää että lukeminen selkeästi hidastuu alle 200 luksin valaistuksella ja yli 500 luksin valaistuksella ei ole lukunopeuteen merkittävää etua. Myös valaistustilanteen muuttaminen on häiriötekijä. Suuret valaistustason muutokset jatkuvasti ovat häiritseviä, mutta yleensä auringonvalon mukaan kytkeytyvät valaisimet toimivat vain kaksi kertaa päivässä, sammuen aamulla ja syttyen illalla jolloin valaistustilanteen muutoksen aiheuttama häiriö on lyhytaikainen (Dubois ja Blomsterberg 2011). Pääasiassa tehtäessä toimistotyötä, alle 300 luksin valaistus vaikuttaa jo lukunopeuteen, jolloin kyseinen valaistuksen taso voisi toimia alarajana. Kun arvioidaan valaistustason muutosnopeutta. Silmän iiriksen toimintanopeus on jokaisella yksilöllistä jolloin muutoksen havaitsemiskynnyskin on yksilöllinen. Yksi keino millä voidaan arvioida toteutettavaa säädön nopeutta on IEEE 141-1993 standardissa esitetty välkyntäindeksi

Kuva 4.9).



Kuva 4.9 Välkyntäindeksin raja-arvot (IEEE Std 141-1993/IEEE Std 519-1992)

Välkyntäideksi on sähkönjakelun kannalta raja-arvo jännitteen hetkelliseksi tippumiseksi. Esimerkiksi tunnissa jännite saa 10 kertaa heilahtaa vähän yli 1% verran ilman että heilahtelua huomataan. Välkyntäindeksin perusteella sopiva säätönopeus olisi noin 2 % minuutissa.

4.5 STANDARDIT

Tässä kappaleessa tutustutaan valaistusta koskeviin standardeihin määräyksiin. Yleisesti standardointi tarkoittaa yhteisten toimintatapojen laatimista (Suomen standartoimisliitto, SFS ry 2014). Käytännössä valaistuksen osalta standardit määrittelevät arvot millä normaalinäkökykyiselle saavutetaan hyvä näkötehokkuus, näkömukavuus sekä turvallisuus. Valaistukseen liittyvät standardit ovat:

- SFS-EN12464-1:2011 VALO JA VALAISTUS. TYÖKOHTEIDEN VALAISTUS. OSA 1: SISÄTILOJEN VALAISTUS

- SFS-EN12464-2:2007 VALO JA VALAISTUS. TYÖKOHTEIDEN VALAISTUS. OSA 2: ULKOTILOJEN VALAISTUS
- EN 15193 LENI arvon laskemiseen

Tässä kappaleessa tutustutaan ensimmäisenä sisätilojen valaistuksen standardiin SFS-EN12464-1. Tämän tutustutaan jälkeen ulkotilojen valaistusta koskevaan standardiin SFS-EN12464-2. Lopuksi tutustutaan tapoihin kuinka lasketaan energiatehokkuutta rakennuksessa LENI.

4.5.1 Sisätilojen valaistus

Työpaikoilla sisätilojen valaistus kolme tehtävää: Ylläpitää näkötehokkuutta, näkömukavuutta sekä turvallisuutta. Kappaleessa 4.4 käsiteltiin näkemistä. Jossa todettiin näkötehokkuuden riippuvan vallitsevasta luminanssitasosta. Näkömukavuus saavutetaan sopivalla luminanssikontrastilla näkökentässä. Näkömukavuuteen vaikuttavat eri lähteistä muodostuvat liian suuret tai liian pienet luminanssierot. Turvallisuusnäkökohdan suhteen sopiva valaistus auttaa yleensä työturvallisuuteen äärimmäisenä esimerkkinä on stroboskooppisesti välkkyvä valo joka voi heikentää liikkeen havaitsemista.

Standardissa (SFS-EN12464-1:2011) mainitaan ja ohjeistetaan ottamaan huomioon useita asioita, mutta muutamille mitattaville tai ennalta laskettaville suureille kyseinen standardi antaa raja-arvot, jotka pitää toteutua. Joissakin tilanteissa kumminkaan ei ole mahdollista tai taloudellisesti järkevää toteuttaa standardin esittämiä raja-arvoja, esimerkkinä varastoissa hyllyjen taustatilat. Mainittavia asioita standardissa on Taulukko 4.2. kohdat keskimääräinen valaistusvoimakkuus E_m , Häikäisyindeksi U_{gr} , Valon tasaisuus U_o sekä värintoistoindeksi R_a .

Taulukko 4.2 Opetustilat – Opetusrakennukset. (SFS EN12464-1:2011)

Tila, tehtävä tai toiminta	Em [Lx]	UGR _L	U _o	R _a
Luokkahuoneet, opetustilat	300	19	0,60	80
Luokkahuoneet iltakäytössä ja aikuisopiskelijoille	500	19	0,60	80
Auditorio luentosali	500	19	0,70	80
Liitutaulu, Kirjoitustaulut	500	19	0,70	80
Havaintopöytä	500	19	0,60	80
Piirustussalit	500	19	0,70	80
Piirustussalit taidekouluissa	750	19	0,70	90
Teknisen piirustuksen salit	750	19	0,70	80
Harjoitussalit laboratoriot	500	16	0,60	80
Käsityöluokat	500	19	0,60	80
Teknisen työn opetustilat	500	19	0,60	80
Musiikkiluokat	300	19	0,60	80
ATK-Luokat(Valikko-ohjaus)	300	19	0,60	80
Kielistudiot	300	19	0,60	80
Valmisteluhuoneet ja työpajat	500	22	0,60	80
Sisäänkäyntihallit	200	22	0,40	80
Kulkuväylät, käytävät	100	25	0,40	80
Portaat	150	25	0,40	80
Oppilaiden yhteistilat ja kokoontumistilat	200	22	0,40	80
Opettajainhuoneet	300	19	0,60	80
Kirjasto, kirjahyllyt	200	19	0,60	80
Kirjasto Lukutilat	500	19	0,60	80
Opetusvälinevarastot	100	25	0,40	80
Urheiluhallit, Voimistelusalit, Uima-altaat	300	22	0,60	80
Kouluruokat,	200	22	0,40	80
Keittiö	500	22	0,60	80

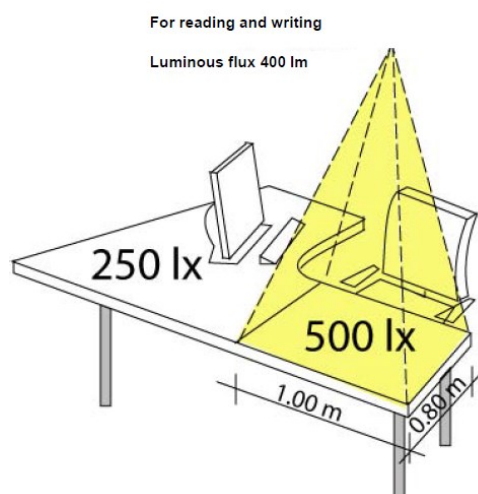
Taulukko 4.2 lisäksi yleisesti mainitaan valaistusvoimakkuudet seinille $E_m > 50 \text{ lx}$ ja $U_o > 0,10$ ja katoille $E_m > 30 \text{ lx}$ ja $U_o > 0,10$. Näkökentässä olevien tasojen luminanssisuhteet on kumminkin suositeltavaa ottaa suunnittelussa huomioon.

Standardi(SFS-EN12464:2011) määrittelee valaistuksen myös tarkemmin työpisteillä seuraaviin alueisiin: Työalue, välitön lähiympäristö sekä tausta alue. Näistä Välitön lähiympäristö tarkoittaa 0,5 m leveää vyöhykettä näkökentästä ja Tausta-alue vähintään 3 metriä leveätä välitöntä vyöhykettä tilan rajoissa. Valaistusvoimakkuudet työalueen ja välittömän lähiympäristön suhde on esitetty Taulukko 4.3.

Taulukko 4.3 Työalueen ja välittömän lähiympäristön suhde (SFS-EN12464:2011)

Työalueen valaistusvoimakkuus E_{task} lx	Välittömän lähiympäristön valaistusvoimakkuus lx
≥ 750	500
500	300
300	200
200	150
150	E_{task}
100	E_{task}
≤ 50	E_{task}

Standardin pohjalta välittömän lähiympäristön tarkoituksena on pitää näöntarkkuus todetulla hyvällä tasolla. Toimistotyön luonne on muuttunut viimeisen 30 vuoden aikana suurimmaksi osaksi näyttöpäätetyöksi sekä tietokoneiden näyttöjen koot ovat kasvaneet suuremmiksi. Nykyisin on kumminkin paremmin suunnattavia ja hallittavia valaisimia. Paperilla tehtävä luku- ja kirjoitustyö ovat edelleen olemassa, mutta kyseiset työt voidaan tehdä pienellä osalla pöytää jolloin valaistuksen suunnittelussa voidaan lukemiseen tarkoitettu valaistuskapasiteetti kohdentaa tarkemmin. Eräs suositeltu työpisteen valaistuskäytäntö on esitetty Kuva 4.10.



Kuva 4.10 Työpisteen optimaalinen valaistus (Halonen; Tetri ja Bhusal, Guidebook on energy efficient electric lightning for buildings 2010)

Kumminkin työpisteiden sijoitukset, ergonomiasuositukset tai koko tilan käyttötarkoitus voi muuttua. Näihinkin muutoksiin on varauduttava. Jolloin on helpompi suunnitella koko tilalle riittävän tasainen valaistus.

4.5.2 Ulkotilojen valaistus

Standardi SFS EN12464-2 sisältää vastaavia raja-arvoja ulkotiloille kuin SFS EN12464-1 sisätiloille. Ulkotiloille standardi on painottunut enemmän turvallisuusnäkökohtiin kuin työn tekemistä vaativiin näkökohtiin. Esimerkiksi rakennusten sisällä olevalle käytävälle suosituksena on minimissään 100 lx valaistus rakennuksen ulkopuolella pienen riskin alueella riittää 5 lx valaistus.

Ulkotilojen valaistuksessa poikkeuksina esiintyvät alueet, joissa tarvitaan parempaa näkökykyä. Paremman näkökyvyn vaatimia alueita ovat portaikot, suuremman liikenteen alueet, koneikkojen asennuspaikat. Kohteissa joissa tarvitaan lukemiseen riittävää näöntarkkuutta. Täytyy olla 100 – 150 lx valaistus. Yli 200 lx valaistusta vaaditaan silloin kun tehdään kohteessa sähkötöitä.

Ulkotiloissa asennetuille valaisimille on selvästi pienemmät vaatimukset. Ulkotiloissa harvoin tehdään tarkkaa näkökykyä vaativaa työtä. Ulkotiloissa tärkeämmäksi tekijäksi muodostuu turvallisuus.

4.6 LENI

LENI-luku on yksi tapa ilmoittaa kuinka paljon energiaa valaistus käyttää vuotuisesti pinta-alayksikköä kohden. LENI on lyhenne sanoista Light Energy Numeric Indicator. Yksikkö LENI-luvulle on kilowattitunti neliömetrille vuodessa [$\text{kWh}/(\text{m}^2 \times \text{a})$]. Tässä kappaleessa esitellään

kuinka standardin SFS EN-15193 mukaan määritellään rakennuksen LENI-luku. LENI-luku lasketaan yhtälön 4.7 mukaan.

$$LENI = \frac{W}{A}, \quad (4.7)$$

Missä

W on valaistukseen käytetty vuotuinen kokonaisenergia [kWh/vuosi]

A on (valaistu) huoneistoala [m^2]

Laskennassa otetaan huomioon kiinteästi asennettu valaisinkapasiteetti ja valaisinten kulutukset eri tilanteissa. Nykyisille valaisimille voidaan arvioida käytönaikainen kulutus ($W_{käyttö}$) sekä myös (4.8).

$$W_{kok} = W_{käyttö} + W_{lepo} \quad (4.8)$$

Valaistuksen vuotuinen kokonaisenergian määrittämiseen voidaan käyttää mitattua tai numeerisesti laskettua tietoa. Mitattu tieto saadaan keskukselta erikseen mittaamalla valaistusta energiat tai jos käytössä on erillinen valaistuskeskus ja tietokannassa tiedot eri valaisinten ominaisarvoista sekä arkistoitu käyttöasteet (päällä/pois, himmennys) sekä energiankulutus tietyllä käyttöasteella. Mitattaessa käytännön LENI-lukua huoneistolle energia mittarilta vaadittava mittaustarkkuus on 0,5. Rakennusmääräyksen D3/2012 mukaan valaistuksen energiankäyttö on pystyttävä selvittämään.

Arvioitaessa ennalta LENI-lukua tai eri toimenpiteiden vaikutusta LENI-luvulle, on valmiiksi määritelty kertoimia ohjaustavoille. Kun arvioidaan LENI-lukua, on rakennuksille olemassa rakennustyyppinmukaiset valaistuksen käyttöajat. Tyypilliset ajat ovat: Kotitalous 550 h/a,

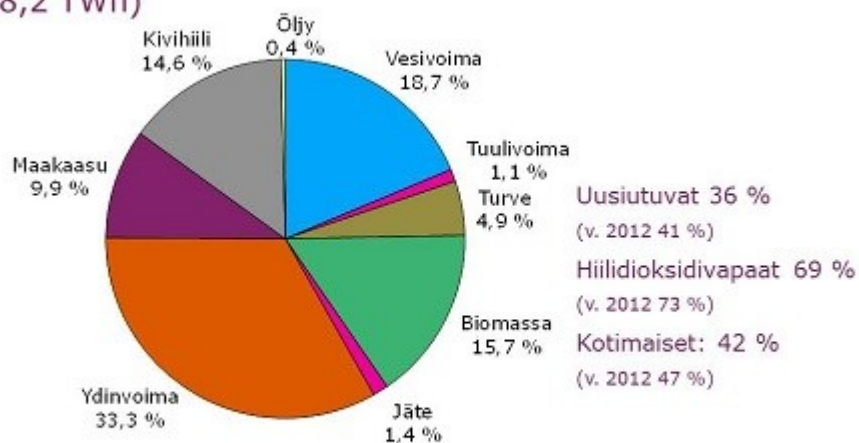
Opetusrakennus 1900 h/a, Toimistorakennus 2500 h/a. Käyttöaikoja voidaan pienentää eri ohjaustavoin esimerkiksi läsnäolotunnistimin ja päivänvalosäätimin. Ohjaustavoille on olemassa ohjauskertoimia: päivänvalonsäädin + läsnäolotunnistin 0,7, läsnäolotunnistin 0,75, huonekohtainen kytkin 0,9. (D5, 2007). Eri ohjaustavat käydään tarkemmin läpi kappaleessa 6.

Keskimääräinen asennettu valaisintehekköisyys neliölle Lappeenrannan Teknillisessä Yliopistossa on noin 15 W/m^2 . Ja tavanomaisesti käyttötunteja voitaisiin verrata toimistorakennukseen eli noin 2500 h/a. valaistus kuluttaa $37,5 \text{ kWh/a/m}^2$. Rakennuksessa on myös monipuolisesti erilaisia läsnäolotunnistimia sekä päivänvaloon perustuvaa ohjausta mitkä laskevat käyttötuntien määrää. Erilaisia tiloja on kumminkin paljon, sekä tiloja käytetään myös iltaisin jolloin käyttöastetta ei pysty tarkalleen määrittelemään.

4.7 CO₂ Päästöt sähköenergian tuotannossa

Sähköenergian tuotantotavat voidaan hiilidioksidipäästöjen mukaan jakaa kahteen ryhmään: hiilidioksidia-päästävät sekä hiilidioksidi vapaat/neutraalit tuotantotavat. Uusiutuvat energialähteet ovat hiilidioksidipäästöiltään erittäin pieniä tai täysin päästöttömiä. Uusiutuvat energialähteet ovat vesivoima, aurinkoenergia, tuulivoima. Biopolttoainetta käytettäessä puhutaan hiilidioksidineutraalista energiantuotantomuodosta. Ydinvoima lasketaan myös hiilidioksidi päästöttömäksi energialähteeksi. Hiilidioksidi päästötiset energialähteet käyttävät fossiilista polttoainetta, polttoaineiksi lukeutuvat: öljy, kivihiili, maakaasu ja turve. Suomen energiantuotannon muodot on esitetty Kuva 4.11.

Sähkön tuotanto energialähteittäin 2013 (68,2 TWh)



Kuva 4.11 Sähkön tuotanto Suomessa vuonna 2013 (Energiateollisuus 2014)

Sähkön tuotannon muodot poikkeavat suuresti maakohtaisesti jolloin jokaiselle maalle voidaan laskea maakohtainen hiilidioksidipäästö megawattitunnin energialle. Säätilat vuosittain pohjoismaissa vaikuttaa energiantuotannon hiilidioksidipäästöihin pohjoismaissa, suurimmat vaikutukset muodostavat vesitilanne ja talven kylmyys. Vuodelle 2012 suomen sähkön tuotannon hiilidioksidi päästöt olivat 210 kg/CO₂-ekv/MWh (Tilastokeskus 2014) (päivitetty 15.1.2013). Tällä tiedolla voidaan laskea sähköenergian hiilijalanjälki.

Taulukko 4.4 Lamppujen elinkaaren hiilijalanjälki on esitetty erilaisten lamputyyppien hiilijalanjälkiä. Taulukossa on saaduista tiedoista laskettu hiilidioksidipäästöt lumentunnille, jolloin saadaan eri valaisintyyppien elinkaarien kokonaishiilidioksidipäästöt vertailukelpoiksi. Laskennassa energialle on käytetty 550 kg/CO₂/MWh, joka tarkoittaisi valmistuksen perusteella suomen tapauksessa, että yksittäinen ympärisäteilevän LED

valaisimen valmistuksen hiilijalanjälki on suurempi kuin pienloistelampun. Tosin pienloistelampussa on ongelmajätteenä luokiteltavaa elohopeaa.

Taulukko 4.4 Lamppujen elinkaaren hiilijalanjälki (Osram 2011)

Valaisintyyppi	Valmistus CO2 [kg]	Käyttö CO2 [kg]	Valomäärä [lm]	Käyttöikä [h]	CO2/lmh [µg/lmh]	CO2/lmh [µg/lmh] (210 kgCO2/MWh)
Hehkulamppu 40W	0.14	22.6	415	1 000	54,7	20,7
Halogeeni 42W	0.33	46.2	630	2 000	36,9	14,2
Pienloistelamppu	0.88	45.2	400	10 000	11,52	4,42
LED 8W	2.4	113	345	25 000	13,37	5,14

Huomattavaa vielä se asia että kyseiset tiedot LED valaisimen kohdalla tiedot ovat vuodelta 2011, jonka jälkeen valmistustekniikka on kehittynyt sekä käytettävien LED-komponenttien valotehokkuus on parantunut.

4.8 Teknistaloudellinen laskenta

Tässä kappaleessa käydään läpi perus laskentatapa investoinnin kannattavuustarkastelulle. Samat laskentatavat pätevät mille tahansa investoinnille. Tässä kappaleessa käydään yksinkertaistettu esimerkki lampun vaihdosta. Valaistustarpeelle esitetään oletukset Taulukko 4.5 Oletuksia laskenta-arvoille:. Oletukset vaihtoehtoisille hehkulampulle sekä LED-valaisimelle on esitetty Taulukko 4.6. Tarkastelutapa ei muutu tulevaisuudessakaan yli 200 lm/W valaisimilla, vaikkakin esimerkin tapauksessa käytetään vuonna 2016 kiellettävää heikomman valotehon omaavaa hehkulamppua.

Taulukko 4.5 Oletuksia laskenta-arvoille:

Sähkönhinta	0,05 €/kWh (energia)+ 0,1 €/kWh (siirto)
Korko:	5 %
Vuosittainen valaisuaika	2000 h
Pitoaika	5 vuotta

Ensimmäisenä lasketaan investointikustannukset molemmille lamppuvaihtoehdoille, tapauksessa jossa 5 vuotta pidettäisiin tiettyä lampputyyppejä.

Taulukko 4.6 Lamppujen oletukset

	Hehkulamppu	LED-lamppu
Teho	40W	4W
Valovirta	400 Lm	350 Lm
Käyttöikä	1000 h	25000 h
Hinta/kpl	0,39 €	10 €
Hinta/5 vuotta	3,90 €	10 €

Oletetaan että hehkulamppun tapauksessa kaikki kymmenen lamppua ostetaan kohteeseen kerralla jolloin kustannuksiin molemmille tapauksille lasketaan korkoprosentin kanssa jaettuna jokaiselle vuodelle yhtälöllä 4.9

$$C_I = I \times \frac{i(1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (4.9)$$

Missä

C_I on investoinnin vuotuinen kustannus

I on Investoinnin kokonaiskustannus

i on korkoprosentti $p/100$

n on pitoaika vuosina.

Pelkästään alkuinvestoinnin osalta hehkulamppu olisi edullisempi komponentti. Mutta ottaen huomioon elinkaaren aikana käytetyn sähköenergian, hehkulampun kokonaishinnaksi muodostuvat lähes 100 % suuremmat kustannukset kuin LED-lampuissa. Osakustannukset ja kokonaiskustannukset ovat laskettu Taulukko 4.7.

Taulukko 4.7 Lamppuvertailun materiaali ja energiakustannukset

	Hehkulamppu	LED-lamppu
Energian (5 vuotta)	200 kWh	20 kWh
Energian hinta	30 €	3 €
kokonaishinta		
Energian korollinen vuotuinen hinta	6,93 €/a	0,69 €/a
Investoinnin vuotuinen hinta	0,83 €/a	2,31 €/a
Kokonaiskustannukset	7,76 €/a	4 €/a

Vaikka tarkastelussa olikin erittäin heikon valotehon omaava hehkulamppu (noin 10 lm/W) ja kohtuullisen valotehon omaava LED-lamppu (noin 89 lm/W) Valaistusjärjestelmän uusimistapauksessa täytyy muistaa. Että olemassa olevan toimivan valaistuksen vuotuisiin kustannuksiin täytyy lisätä vielä ylläpito ja huoltotöiden kustannukset.

5 VALAISIMET

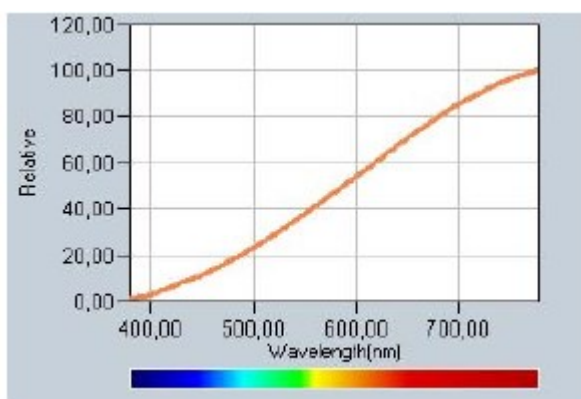
Valaisin koostuu valonlähteestä, rungosta, heijastinpeilistä optiikasta ja nykyisin yleisesti valaisimilla käytetään omaa liitäntälaitetta. Valaisimia valitessa omakotitaloasujalla on käytössä vain muutamanlaista valaisintyyppiä: elohopealoistelamput, pienloistelamput, halogeeni, pientehoiset hehkulamput ja LED lamput. Yleisesti valaisimet on jaettu kahteen pääluokkaan: luminenssisäteilijät ja termiset säteilijät. Valaisimista ilmoitettavia suureita ovat värintoistokyky, värilämpö sekä valotehokkuus. Tässä kappaleessa käydään läpi erilaisia lampputyyppejä ja valaisinten komponentteja.

5.1 Termiset säteilijät

Termisillä säteilijöillä tarkoitetaan valon tuottamiseen tarkoitettuja laitteita, joilla valon tuotanto perustuu riittävän lämpötilan johdosta tuottamaan säteilyyn. Termisinä säteilijöinä valaisintarkoituksiin on vielä 2014 myynnissä pientehoiset hehkulankalamput sekä halogeenivalaisimet. Terminen eli lämpöliikesäteily on emissioprosessi, jossa säteilyenergia peräisin osasten (atomit, molekyylit, ionit jne.) lämpöliikkeestä. Sähkötoimisissa valaisimissa hehkulangan läpi kulkee virta ja langan resistanssi saa aikaiseksi jännitehäviön langan yli, jolloin suurin osa energiasta muuttuu lämmöksi ja sivutuotteena saadaan valoa.

Teoreettinen suurin mahdollinen valotehokkuus, joka termisellä säteilijällä voi olla, on noin 90 lm/W. Se saavutetaan, kun säteilijän lämpötila on noin 6500 K.. Käytännössä materiaalit eivät kestä näin suuria lämpötiloja (esimerkiksi volframin sulamispiste on noin 3655 K). (Halonen, Lehtovaara, 1992)

Termisistä säteilijöistä tänä päivänä ovat käytössä halogeeni valaisimet sekä hehkulamput. Halogeeni valaisimen ero normaaliin hehkulamppuun on kaasun aiheuttama hehkulankamateriaalin kiertokulku lampussa, jolloin langalla voidaan käyttää suurempaa lämpötilaa ja hyötysuhde perinteiseen lämpösäteilijään on noin 125 %.



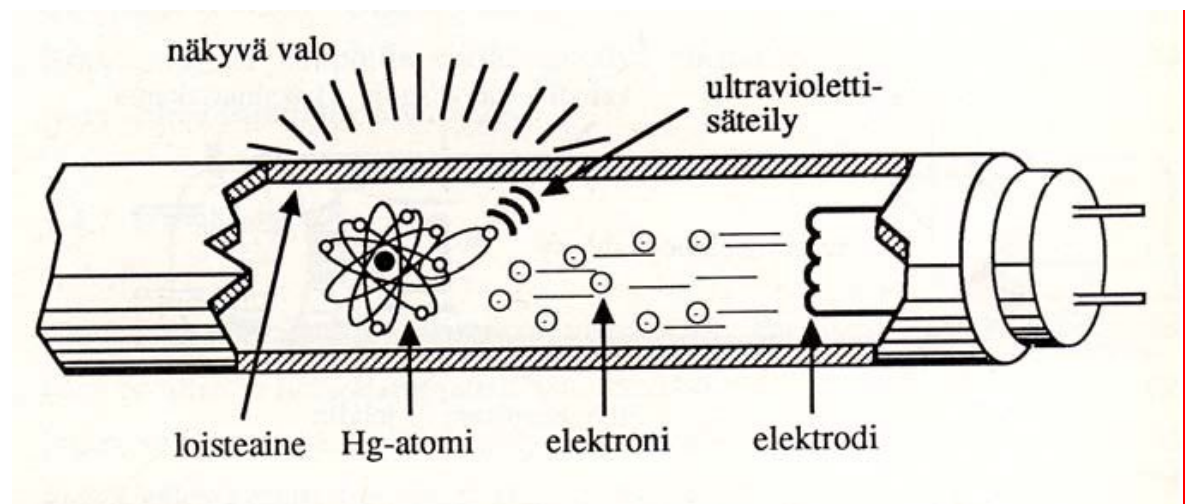
Kuva 5.1 Termisen säteilijän spektrijakauma(CCT=2690 K, CRI= 99) (Halonen;Tetri ja Bhusal, Guidebook on energy efficient electric lightning for buildings 2010)

Termisen säteilijän hyvinä puolina on tasainen taajuusspektri koko aallonpituusalueella (Kuva 5.1) ja resistiivinen pelkästään pätötehosta muodostuva verkon kuormitus. Huonon valotehokkuuden ansiosta kaikki yli 7 W hehkulamput poistuivat markkinoilta EU-direktiivin johdosta syyskuussa 2012.

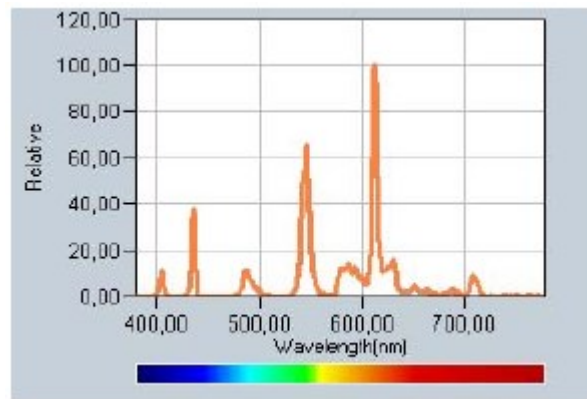
5.2 Loistelamppu

Yleisimmin tällä hetkellä kiinteistöissä käytössä oleva lamputyyppi on loisteputki tai pienloisteputki lamppu. Toimintaperiaate lyhyesti: Elohopealamppu sytytetään ajamalla hetkellinen iso virta katodin läpi jolloin katodi kuumenee, ja saa aikaan sähkövirran höyrystyneessä

elohopeahöyryssä. Liikkuvat elektronit törmäilevät Elohopea-atomeihin ja virittävät atomeja. Elohopean viritystilän purkautuessa aiheutuu 253,7 nm aallonpituudella olevaa sähkömagneettista säteilyä joka on Ultravioletin aallonpituusalueella., joka muutetaan näkyväksi valoksi lampun pinnassa olevalla loisteaine kerroksella. Periaate on esitetty Kuva 5.2.



Kuva 5.2 Loistelampun toimintaperiaate. (Halonen, Lehtovaara, 1992)



Kuva 5.3 Pienloisteputken spektrijakauma (CCT=2780K, CRI=83) (Halonen; Tetri ja Bhusal, Guidebook on energy efficient electric lightning for buildings 2010)

Pienloisteputki on toimintaperiaatteeltaan vastaava kuin loistelamppu, erona on pienempi koko ja mahdollisesti Edison-kantaan käyvä liitäntä.

Pienloistelampuissa loisteputkien vanhoissa asennuksissa käytetty sähkömagneettinen kuristin on korvattu elektronisella liitäntälaitteella.

5.3 Induktiovalaisin

Induktiovalaisimen valontuotannon toimintaperiaate on vastaava kuin Loistelampulla. Elektronien virta synnytetään induktiotekniikalla elektrodien sijasta. Kuluvien elektrodien uupumisen johdosta lampujen elinikä on pitkä. Induktiolampuissa puhutaan noin 100 000 tuntia iästä. Induktiolamppujen ongelmana on ollut epävarma tehoelektroniikka (induktiolampuissa käytettävä taajuus on sadoista kilohertseistä megahertseihin).

5.4 Natriumvalaisimet

Pienpainenaatriumlamput ovat perinteisesti olleet valotehokkuudeltaan parhaita. Pienpainenaatrium valaisimet tuottavat värisävyltään kellertävän oranssia valoa. Valotehokkuus on pienpainenaatriumvalaisimilla luokkaa 100...180 lm/W. Suosituin käyttökohde lampputyypille on tievalaistus, jossa tarvitaan suuria valotehoja ja värienerottelukyky ei ole niin tärkeä.

5.5 Monimetallilamput

Monimetallilamppu (Kuva 5.4) on korkeapaineiseen kaasupurkaukseen perustuva purkaus-lamppu. Monimetallilamput ovat jatkokehitystä elohopeahöyrylampuille, tavoitteena oli saavuttaa elohopealamppuja parempi värintoistokyky. Parempi värintoisto saavutetaan lisäämällä elohopeahöyryn rinnalle eri metallien halogeeniyhdisteitä.

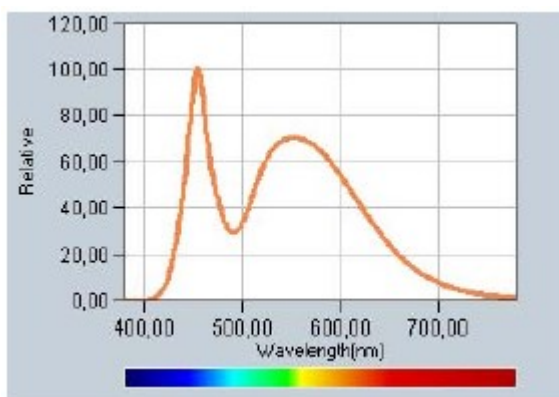


Kuva 5.4 Philips monimetallilamppu (philips.fi)

Monimetallilamppuja löytyy useata väriämpötilaa 3000...6000 K Ja värintoistoindeksi R_a on välillä 65...90, Valotehokkuus 75...79 lm/W, (Philips 2014)

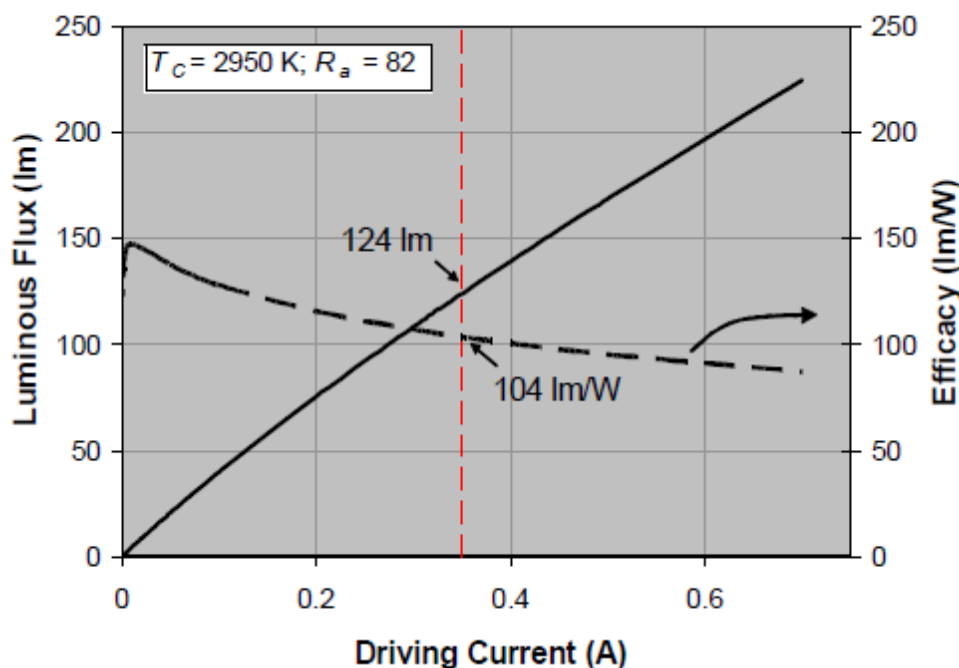
5.6 LED-valaisimet

Tämän hetken kehittyvin valaisinmalli LED (Light Emittin Diode), eli valoa emittoiva puolijohdevalaisin. Alkujaan LED kehitettiin vuonna 1960. Mutta vasta 2000 luvulla LED valaisimet ovat kehittyneet nopeasti. Kehityksen vauhti alkoi sinisen LED-komponentin kehittämisestä josta saatiin loisteaineella muodostettua puuttuvat aallonpituudet valkoiseen valoon. Valkoisen LED:n spektrijakaumasta (Kuva 5.5 Valkoisen LED valon Spectrijakauma (CCT=6010K, CRI 78) Sinisen valon aallonpituuspiikki.



Kuva 5.5 Valkoisen LED valon Spectrijakauma (CCT=6010K, CRI 78) (Halonen; Tetri ja Bhusal, Guidebook on energy efficient electric lightning for buildings 2010)

Laboratorio olosuhteissa LED-tekniikalla päästään jo yli 200 lm/W valotehokkuuteen tuottaen valkoista valoa (Osram 2014). Käytännössä valotehokkuutta laskevat elektroniikka ja lämmöntuotto. Liitäntälaitteiden hyötysuhde on $0.90 < \eta < 0.98$ (Milasevski, 2012). Tarkoittaen huoneenvalaistuksessa noin 70W kuormalla liitäntälaitteen tehohäviö on noin 7W. LED komponentilla kumminkin pienemmällä virralla valotehokkuus (lm/W) kasvaa. Erään LED valmistajan komponentin valovirta sekä valotehokkuus on esitetty Kuva 5.6 Valovirta ja valaisuteho fosfori led:illä (Osram Opto semiconductors 2010)



Kuva 5.6 Valovirta ja valaisuteho fosfori led:llä (Osram Opto semiconductors 2010)

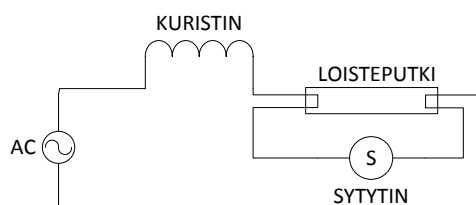
Tämä selittyy osittain suuremmalla virralla aiheutuvista jännitehäviöistä komponentilla. Tämä toiminta asettaa haasteen valaisinsuunnittelijoille optimoidessaan valotehokkuutta sekä komponenttimääriä. Monilla ledeillä lähestytään lampulla hyvää valotehokkuutta. Mutta samalla lampun valmistuskustannukset nousevat.

LED valaisinten hyviä puolia ovat nykyisin hyvä valotehokkuus, jopa yli 200 lm/W (Osram 2014). Toisaalta LED-valaisimet vaativat enemmän suunnittelua sijoittelulle, koska pistemäinen kirkas valonlähde myös väärin sijoiteltuna häikäisee.

5.7 Liitäntälaitteet

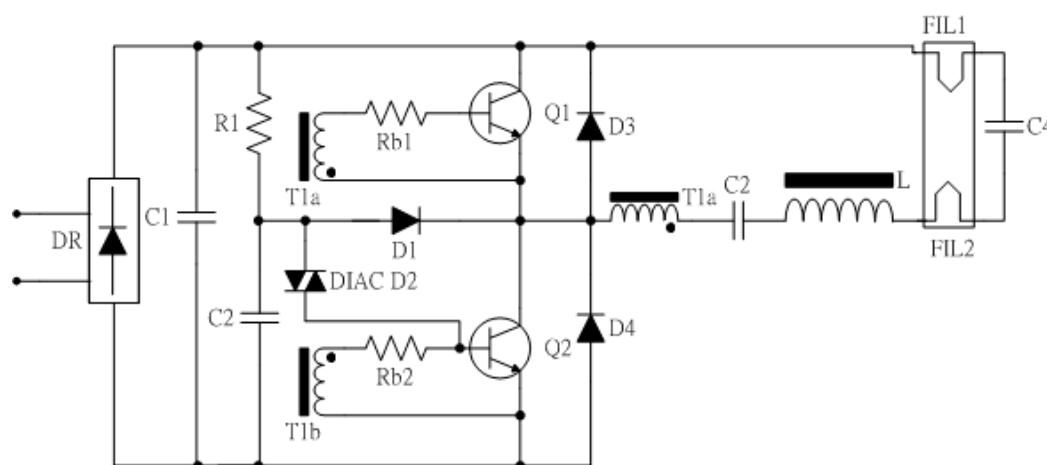
Nykyaikaisilla valaisimilla käytetään liitäntälaitetta. Liitäntälaitteiden tarkoitus on sytyttää valaisin ja hallita valaisinta. Ainoat valaisintyypit mitkä

eivät tarvitse liitännälaitetta ovat termiset säteilijät. Kaasupurkaukseen perustuvilla valaisimilla tarvitaan sytyttämässä suurempi virta sekä jatkuvassa polttamisessa taas kuristin virran rajoittamiseen (Kuva 5.7). Sytytin kuristin yhdistelmällä varustettu valaisin vilkkuu 100 Hz taajuudella mutta tämä taajuus ei ole silmin havaittavaa (Halonen ja Lehtovaara, Valaistustekniikka 1992). Tänä päivänä loistevalaisimille on olemassa elektronisia liitännälaitteita joiden ansiosta myös kaasupurkauslamput kestävät pidempään tarjoavat paremman hyötysuhteen. (OSRAM ei pvm)



Kuva 5.7 Loistelampun liitännälaitteena kuristin ja sytytin periaate

Elektroniset liitännälaitteet ovat tyypillisesti käytössä pienloistelampuissa. Elektronisella liitännälaitteella optimi hyötysuhde saavutetaan noin 30 - 40 kHz taajuudella jolloin liitännälaitteeseen häviöt ovat noin 1 - 2 W. (Wong, ym. 2009). Peruseriaate elektronisesta liitännälaitteesta on esitetty Kuva 5.8.



Kuva 5.8 elektronisen liitännälaitteen peruskenttä (Wong, ym. 2009)

Elektronisen liitäntälaitteella on myös mahdollista himmentää kaasupurkausvalaisinta.

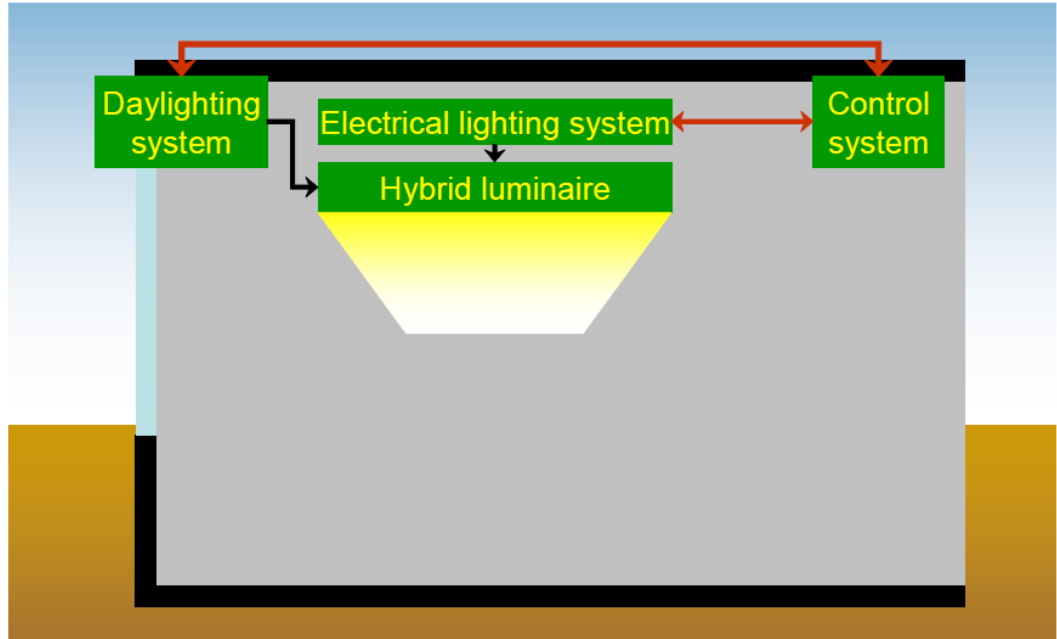
LED-valaisimilla on kahdentyyppisiä liitäntälaitteita. Toimintaperiaatteiltaan liitäntälaitteet ovat virta- ja jännitelähteitä. Virtalähdetyypisillä liitäntälaitteilla on tarkoitus pitää virta vakiona yleensä 350 mA tai 700 mA. Virtalähdetyypisen liitäntälaitteen tarkoituksena on pitää komponenttien läpi menevä virta tasaisena riippumatta kuinka monta komponenttia kyseisen lähteen perässä on. Virtalähdetyypisillä liitäntälaitteilla ilmoitetaan yleensä ulostulevan jännitteen rajat (OSRAM, Philips). Jännitelähdetyypisellä liitäntälaitteella pidetään jännite vakiona ja ilmoitetaan nimellisvirta. Yleensä LED-jännitelähteiden ulostulo on 24 VDC jännitteellä. LED-komponentin kirkkaus on kumminkin paremmin hallittavissa virralla kuin jännitteellä, jolloin parempi lopputulos saavutetaan käyttämällä virtalähdettä kuin jännitelähdettä. Jännitelähde voi kumminkin olla halvempi toteuttaa.

Yleensä Liitäntälaitteissa on mukana tehoelektroniikkaa. Tehoelektroniikka tasasuuntaussiltoineen tuottaa verkkoon harmonisia häiriöitä, suurimmat häiriöt kohdentuvat kolmannelle harmoniselle. Valaisinkuorma on kumminkin pieni suhteessa muuhun rakennuksen sähkönkuormitukseen. Että nykyisten AMR-mittareiden PLC tiedonsiirrolle valaisinten häiriöiden ei todettu vaikutusta. (Pakonen, ym. 2013)

5.8 Hybridi valaisinjärjestelmät

Hybridivalaisinjärjestelmäksi kutsutaan järjestelmää missä on käytössä sekä luonnonvalo sekä sähköinen valo. Hybridivalaisinjärjestelmää ei tule sekoittaa ikkunan kautta tulevaan päivänvaloon. Hybridivalaisinjärjestelmässä rakennus varustetaan aurinkokeräimellä,

josta valo johdetaan valokaapeleita pitkin huoneistoihin erikoisvalaisimiin, mitkä sisältävät esimerkiksi normaalin loistevalaisimen sekä oman valoputken auringonvalon jakoon. Erillisellä ohjauksella säädetään sähkövalaisimen valontuottoa. Järjestelmän periaate on esitetty Kuva 5.9.



Kuva 5.9 Hybridivalojärjestelmäkoonpano (Halonen; Tetri ja Bhusal, 2010)

6 OHJAUSTAPOJEN VAIKUTUS KÄYTÖNAIKAAN

Valaistuksessa energiatehokkuuden toinen peruste on tarpeenmukainen käyttö. Ohjaustapoja muuttamalla voidaan saavuttaa usein kustannustehokkaasti energiansäästöjä myös jo olemassa oleviin valaistusratkaisuihin. Tässä kappaleessa syvennyttään ohjaustapoihin ja niiden merkitystä vuotuisen energiankulutukseen.

Toinen lähtökohta on valaistuksen käytön ohjauksella saavutettavat säästöt. Ohjauksen kannalta sama 50 % säästö tarkoittaisi ajallisesti vuotuisesta 2000 h/a käytöstä noin 1000 tunnin vähennystä. Tämä tarkoittaisi jokaiselta 8h työpäivältä 4 tunnin poiskytkentää. Esimerkkinä tekijöistä jotka vaikuttavat poissaoloihin esitetty Taulukko 6.1.

Taulukko 6.1 arvio työhuoneen päivittäisen läsnäolokytkenän vaikutuksista.

Työhuone	
Kahvitauko	2 x 0,25h
Ruokatauko	1 x 0,5h
Yhteensä	1,0 h / päivä (noin 12,5 % päivittäisestä kulutuksesta)

Kun arvioidaan kannattavuutta läsnäoloperusteisen ohjauksen investoinnin kannattavuuteen, laitteelle täytyy arvioida ohjattavan valaistuksen määrä sekä yksittäisen ohjauksen hinta-raja. Arvioidut vuotuiset säästöt ovat esitetty erikokoisille tiloille ja valaistuksille taulukossa 4.2.

Taulukko 6.2 Arvio erikokoisten kuormien yhden tunnin säästöstä vuodessa

Tila	Teho	Vuotuinen energian säästö	Vuotuinen rahallinen säästö
Yksittäinen työpiste	1 x 20W	0,5 kWh	0,075 €
Pieni työhuone (17 m ²)	4 x 58W = 232W	58 kWh	8,7 €
Työhuone (100m ²)	13 x 2 x 58W = 1508W	377 kWh	56,55 €

Taulukon 4.2 mukaan yksittäisen työpisteen valaisimelle ei löydy taloudellisesti kannattavaa uudisasennusta. Pienen työhuoneen valokuorman ohjaus läsnäolotunnistimin saadaan kannattavaksi markkinoiden halvimmilla kalusteilla jos suunnittelu ja asennuskustannuksia ei oteta huomioon.

Ohjaukselle voidaan esittää kolme eri tulomuuttujaa. Ensimmäinen on tarpeenmukainen käyttö. Tarpeenmukaisella käytöllä tarkoitetaan ylimääräisen valon sammuttamista. Toinen on tasavalaistus, luonnonvalon käyttö. Luonnonvalo on ilmaista valoa, jolloin ohjausta tarvitaan himmentämään tai sovittamaan valaistusympäristö auringonvalon mukaan. Kolmas tulomuuttuja on reagoida kokonaiskulutukseen. Koko NordPool:n markkina-alueella sähkön hinta antaa osviittaa koko pohjoismaiden sähkökäytöstä ja tuotantotavasta.

6.1 Kellokytkimet

Kellokytkimet soveltuvat tilojen aukiolo aikojen mukaiseen valaistuksen ohjaukseen. Nykypäivänä saadaan myös enemmän älyä sisältäviä astrologisia kelloja ohjaukseen. Astrologiset kellot ottavat huomioon asennuspaikan auringon nousu ja laskuajat. Astrologinen kelloa verrattaessa hämäräkytkimeen astrologinen kello ei vaadi valoisuusanturia jolloin asennuskustannukset ovat pienemmät. Kellokytkimien asettelutiedoilla saadaan laskettua myös tarkka vuotuinen käyttöaika. Kellokytkimet voidaan laskea keskitetyksi ohjaukseksi jolloin näiden ohjauskerroin on 1.

6.2 Manuaalinen kytkin.

Manuaalinen kytkin on yleinen ohjaukseen käytetty tapa, jolla suoraan kytketään valaistus päälle tai pois päältä. Manuaalinen kytkin on toimintavarmin sekä myös vikatilanteen paikallistaminen on nopeaa. Nykyisin tosin normaalien päälle/pois kytkinten tilalle on jo saatavilla erilaisilla aikaohjelmilla varustettuja älykkäämpiä kytkimiä, jotka sisältävät jo läsnäolo antureita sekä ajoitettuja sammutuksia. Laskentatavoissa manuaalisen päälle/pois kytkimen kerroin keskitettyyn ohjaukseen on 0.9.

6.3 Liiketunnistus ja läsnäolotunnistus

Harvoin tai lyhyen ajan käytössä olevien tilojen Yksinkertaisin tapa vähentää yleistä valokuormaa on asentamalla liikkeentunnistimia. Yleisimmin käytetyt tekniikat pohjautuvat PIR (Passive Infrared) tai mikroaalto tekniikkaan. Erona läsnäolotunnistimella ja liiketunnistimella on liikkeen erottelu tarkkuus. Liiketunnistimin sekä läsnäoloanturien LENI

arvoa laskiessa ohjauskerroin on automaattisen sammutuksen yhteydessä 0.8 ja sytytyksellä sekä sammutuksella 0,9 (SFS-15193).

6.1 Himmennys

Himmennyksellä tarkoitetaan valaisimen valaistusvoimakkuuden pienentämistä. Himmennyksen toteutustapoja on useita. Perinteinen terminen säteilijä on teknisesti helppo himmentää, mutta samalla värilämpö muuttuu sekä valotehokkuus pienenee. LED-valaisin on toinen teknisesti helposti himmennettävä valaisin. LED-valaisimessa himmennys ei vaikuta värilämpöön. Puolijohde liitos pysyy viileämpänä ja viileämpi puolijohde tarkoittaa samalla pidempää käyttöikää ja suurempaa valovirtaa (Labsphere Inc. 2001) .

Perinteiset himmentimet perustuvat vaihekulmasäätöön. Vaihekulmasäädöstä puhuttaessa tekniikat ovat Trailing edge tai Leading edge tekniikkaan. Erona näillä kahdella vaihekulmasäätötekniikalla on joko katkaiseva tai kytkevä tekniikka. Leading edge tekniikalla kytketään virta valaisimelle verkkojännitteen nollakohdassa ja trailing edge tekniikassa katkaistaan virta nollakohdassa. LED-valaisimissa himmennyksessä voidaan käyttää pulssisuhdemodulaatiota (PWM) tekniikkaa tai virran säätöä.

Yleensä liitäntälaitteiden hyötysuhde on yli 80 % ja paras hyötysuhde saavutetaan täydellä teholla. Eli hyötysuhde pienenee LED:ien virtalähteellä pienemmällä valaisuteholla ja samalla LED:in valoteho paranee. Kyseessä on mitoitusstekijä, oikean tehoinen virtalähde oikean kokoiselle kuormalle. Suuremmilla kokonaiskuormilla (yli 50W) liitäntälaitteen osuus kulutuksesta jää muutamaan prosenttiin.

6.2 Vakiovalaistus säätö

Vakiovalaistussäädöllä tarkoitetaan sitä että pyritään pitämään työkohdepintojen luminanssitasot pysyvät vakioina. Vakiovalaistussäädöstä saatavat energiansäästöt muodostuvat kahdesta tekijästä: ylimitoitettun valaisimen himmennys ja luonnonvalon käyttö. Valaistus täytyy yleensä ylimitoittaa johtuen valaisimen likaantumisen eliniän aikana tapahtuvasta luonnollisesta valotehon heikkenemisestä. Käsiteltävänä asiana tässä kappaleessa on luonnonvalon käyttö.. Taulukko 6.3 on esitetty ABB:n mittaustuloksiin perustuvat säästömahdollisuudet toimistorakennuksen eri huoneista eri päivinä lokakuussa 2008.

Taulukko 6.3 Päivänvalon hyväksikäytöllä toteutuva keinovalonkäytön säästö (ABB Oy 2011)

Huone	Sää	Säästöpotentiaali
Pohjakerros Koulutushuone	Pilvinen	Noin 28 %
Pohjakerros Konferenssihuone	Hyvin Pilvinen	Noin 37 %
Toinenkerros Laboratorio	Aurinkoinen	Noin 66 %

Hanyan yliopistossa testatussa valaistuksenohjausjärjestelmässä saavutettiin yhteensä 40 % energiansäästöt pitämällä valaistustaso työtasolla yli 700 lx:n kello 7:00 – 19:00 välisenä aikana. Sijaintimaana oli Etelä-Korea sekä mittausajankohdiksi oli valittu Marraskuun 22. päivä täydellä valaistuksella sekä Joulukuun 22. Päivä. 10m x 3m x 2,7m Huoneeseen oli asennettu 7 kappaletta himmennettäviä loisteputkia kokonaisteholtaan 448W. (Park ja Hong 2006). Eteläkoreassa tehdyn

tutkimuksen tiedoista käy ilmi huoneen pitkä pituus, sekä talvinen ajankohta. Talvisella ajankohdalla päivä on lyhyempi ja aurinko on matalammalla.

Luonnonvalon käyttö on mahdollista huoneissa missä luonnonvaloa on saatavilla. Luonnonvalon kirkkaus on parhaimmillaan noin 10 000 lx. Huoneistoissa luonnonvalon voimakkuus laskee nopeasti ikkunanpuoleiselta seinältä huoneen perälle siirtyessä. Järjestelmän heikkoutena on kumminkin liian kirkas ulkovalo, jolloin valon tasaisuuden ylläpitämiseksi täytyy käyttää tehokkaampia valoja. Yksinkertaistettu menetelmä päivänvalo-ohjauksen tuomalle säästölle on esitetty standardissa SFS-EN 15193.

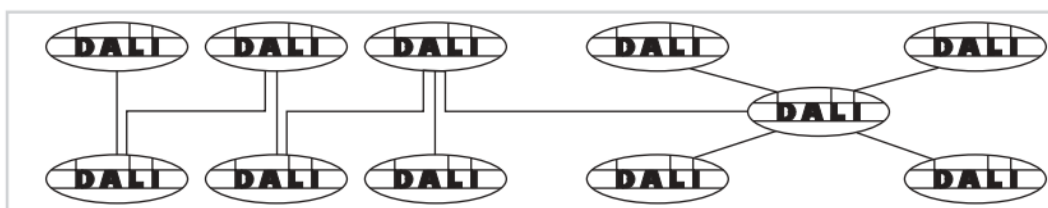
Luonnonvalon hyväksikäytön mallinnus vaatii tiedot rakennuksen sijainnista, paikkakunnan säätiedot, rakennuksen geometrian sekä ympäristön tiedot. SFS-EN 15193 standardi määrittelee LENI laskennassa käytettävät tavat laskea auringonvalon käyttöön sopivan korjauskertoimen. Koska auringonvalo on sääriippuvainen, laskenta-arviossa säästöpotentiaali on niin hyvä kuin on tilastollinen arvio tulevasta säästö. Laskentamallissa antaa kumminkin vain arvion päivänvalon käytettävyydestä tiloissa.

6.3 Ohjausväylät

Valaisinten ohjaustavat ovat perinteinen manuaalinen suorakytkin, erillinen yksinkertainen logiikka- ja releohjaus tai väyläohjaus. Nykypäivänä monilla kiinteistövalaisinvalmistajilla digitaalisena liitäntärajapintana on käytössä DALI (Digital addressable Lightning interface).

DALI-väylä on IEC-60929 standardissa esiintyvä digitaalinen väyläratkaisu valaistuksessa. DALI-liitäntäisiä laitteita ovat valaisimet, kytkimet ja

erilaiset sensorit. Yksinkertaisimmillaan väylä koostuu virtalähteestä, ohjauslaitteesta ja valaisimesta. Yhdessä väylässä voi olla 64 oman osoitteen omaavaa laitetta, jotka voidaan ryhmitellä 16 ryhmään sekä ennalta ohjelmoida 16 eri tilanneohjausta. Tiedonsiirtonopeus väylässä on 1200 bittiä sekunnissa. Topologialtaan DALI-väylä voi olla joko ketju tai tähti tai näiden yhdistelmä (Kuva 6.1). Lisäksi DALI-väylä on galvaanisesti erotettu, joten ohjattavat valaisimet voivat saada sähkönsyöttönsä myös eri vaiheista. Samassa väylässä olevien laitteiden etäisyys toisistaan saa olla 300 metriä. Ja eri väyliä voidaan sillata toisiinsa väyliin tai liittää osaksi laajempaa kokonaisuutta esimerkiksi rakennusautomaatiojärjestelmään. (DALI AG 2001)



Kuva 6.1 DALI-väylän yhdistetty väylätopologia (DALI AG 2001)

Digitaalisella väyläratkaisulla on hyötyjä sekä haittoja. Selkein hyöty saavutetaan jos valaisinten ohjaustapoja halutaan muuttaa jälkeempään. Tällöin ei vaadita johdotusmuutoksia. Mainittavana asiana voidaan myös kerätä tietoa valaisinten käytöstä sekä diagnostiikkaa valaisinten kunnosta. Haittapuolena voi mainita vikaantuvien komponenttien lisääntymisen valaistuskokonaisuudessa.

7 SÄÄTÖKAPASITEETIN MUODOSTAMINEN

Tässä kappaleessa esitetään tekninen toteutusmalli valaistuksen säätöön. Ensimmäisenä käsitellään kuormanohjauskapasiteetin muodostaminen. Tämän jälkeen esitellään toteutettavia säätötoimenpiteitä, myymällä säätöä taajuussäätöön ja ELspot-perusteiselle säädölle. Lopuksi kappaleessa 7.3 tarkastellaan mahdollisuutta Lappeenrannan Teknillisen yliopiston VI-rakennusvaiheen mahdollisuutta säädön implementointiin sekä energiatehokkuuden parantamiseen.

7.1 Säätökapasiteetin muodostaminen

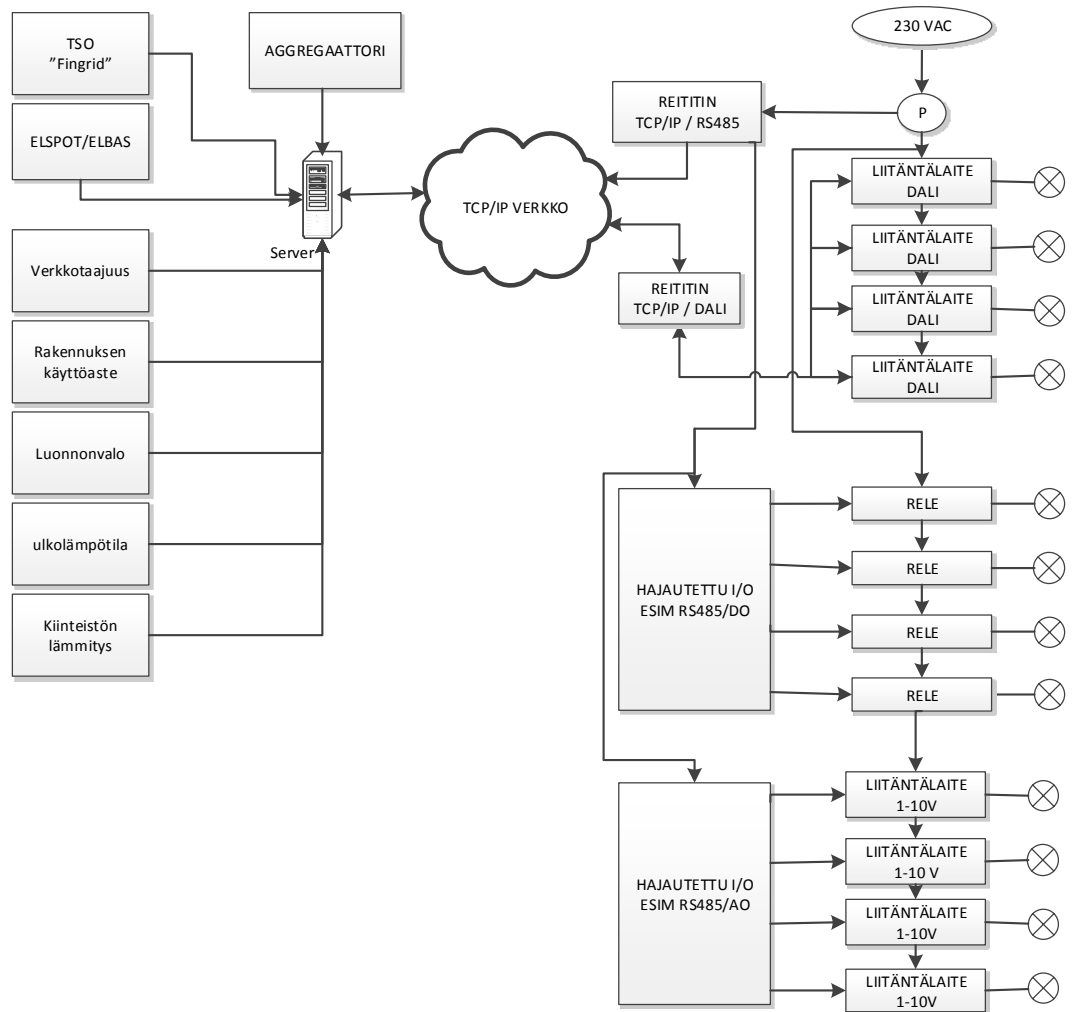
Tässä kappaleessa esitetään tapa jolla voitaisiin muodostaa valaistuskapasiteettista markkinoille myytävä säädettävä kuorma. Järjestelmä koostuu säätökykyisestä kuormasta, ohjauksesta, mittaroinista ja käyttäjän rajapinnasta. Valaistuksesta säätökapasiteetin muodostamiselle voi esittää kolme ehtoa.

- Muu energiankulutus ei saa korreloida säädön kanssa
- Säätö ei saa häiritä päivittäisiä toimia.
- Säätötapahtuma on pystyttävä todentamaan.

Yksi esimerkki ensimmäisestä ehdosta on rakennuksen lämmitys. Vielä uusilla Ledeilläkin käytettävästä sähkötehosta vain noin 50 % saadaan hyödynnettyä valotehoksi (LEDs Magazine 2014), ja osa häviöistä muuttuu lämmöksi. Suomen oloissa valaistuksen energian käytön vähentäminen talvella lisää hieman lämmityksen tarvetta ja kesällä vähentää jäähdytyksen tarvetta. Kokonaisuudessa rakennuksen energiatehokkuus kumminkin hieman paranee.

Toinen ehto tarkoittaa, että tietty valaistustaso täytyy taata joka tilanteessa. Valaistustason muutokset eivät saa kiinnittää ylimääräistä huomiota. Välkyntäindeksi kuvaa millä tasolla lyhytaikainen valaistuksen välkyntä huomataan tai milloin se häiritsee. Säädetäessä hallitusti valaistusta, häiritsevyys on yksilöllistä.

Kolmas ehto tarkoittaa kuinka paljon on olemassa säätökapasiteettia ja onko säätö oikeasti tapahtunut. Voi olla myös tilanteita jolloin valaistustasoa on nostettava hetkellisesti. Järjestelmä valaistus kuormituksen säätö voisi olla kuvan 7.1 mukainen. Järjestelmä koostuu valaisimista, mittaroinista, ohjauksista, tietoliikenne verkosta, ja käyttäjärajapinnasta.



Kuva 7.1 Kysynnänjoustoon tai markkinoille myytävän säädettävän kuorman tekninen toteutus käyttäen valaisimia.

Valaisimet voivat olla väyläohjattuja (esimerkiksi DALI), suoraan ohjattuja tai himmennettäviä (esimerkiksi 1-10V ohjaus), tai Kuvan 7.1 mukaisella tavalla yhdistelmä näistä. Huoltotoimenpiteiden takia järjestelmän ohjaukset tulisi varustaa vielä paikallisohjauksilla.

Tilat mitkä ovat ohjauksen alla, tulisi valaistuksen osalta mitata sähkönkulutus. Pienimuotoista säätöä ei välttämättä voida erotella koko kiinteistön mittauksesta. Valaisinten sähkönkulutus tai säädettävän valaisimen tapauksessa energian käyttö ei ole täysin ennakkotietojen

mukaista. Mittaus mahdollistaa myös säätökapasiteetin joustavan lisäämisen tai poistamisen.

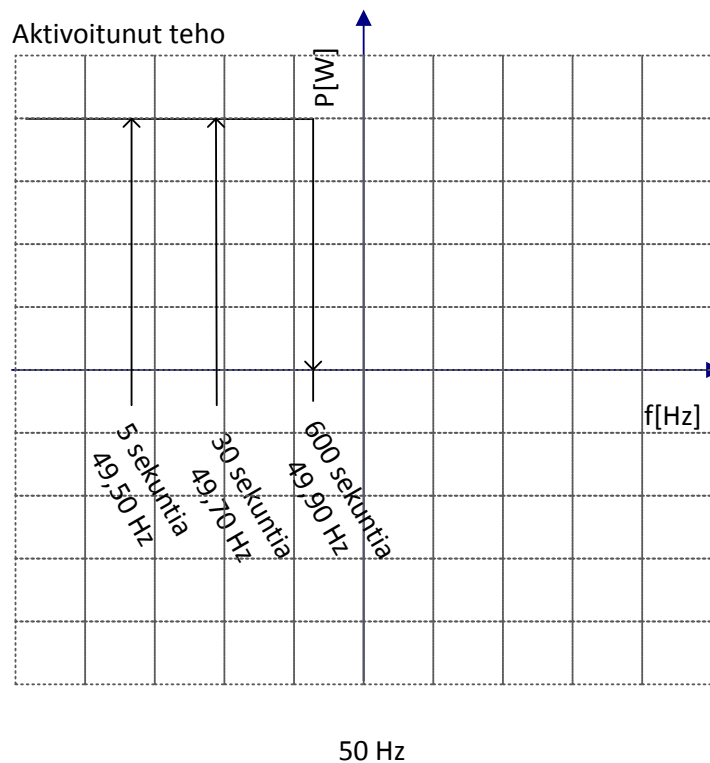
Tietoliikenneverkkoa tarvitaan useiden erilliskohteiden etäohjaukseen. Nykyisin suurimpaan osaan suomen kiinteistöistä on tavalla tai toisella saatavissa internetyhteys. Ohjaukset ja mittarointi täytyy reitittää tietoliikenneyhteyteen. Jos käytetään julkista verkkoa, yhteyteen tulisi käyttää saatavilla olevia VPN-tekniikoita. Säädön käyttötarkoitusta valittaessa on otettava viiveet huomioon. Viive tarkoittaa säädön reagoimisaikaa. Esimerkkinä suomessa mobiilien 3G- tai LTE-verkon viive on keskimäärin alle sekunnin (Aalto-yliopisto 2014). Tietoliikenneverkon viiveeseen vaikuttavia tekijöitä ovat kuormitustilanteet, käyttökatkokset ja niin edelleen (Valtonen 2009).

Käyttäjäraja- pinnasta hallitaan säätöä. Käyttäjäraja- pinta on ohjelmisto muun käyttöjärjestelmän päällä. Käyttäjäraja- pinta kokoaa tiedot käytettävissä olevista ohjattavista kuormista ja tallentaa tapahtumat (esimerkiksi kellon aika, kuorman reagointinopeus, kapasiteetti). Kuormat voisivat sisältää mahdollisesti myös ilmanvaihdon, lämpökuormat ja energiavarastot. Raja- pinnassa koostetuista tiedoista voidaan arvioida mihin koko järjestelmä kykenee mihinkin seuraavan vuorokauden kellonaikaan. Tämän lisäksi käyttäjäraja- pinnassa voisi olla kohdepaikan tiedot (sijainti, rakennustyyppi, ulkolämpötila, sääennuste). Käyttäjäraja- pinnalle voitaisiin tuoda tiedot esimerkiksi verkkotaajuudesta, luonnonvalon saatavuudesta, ulkolämpötilasta, sähkön ELspot-hinnasta.

Kun muutetaan valaistuksen ohjaus etäohjattavaksi. Rakentuu samalla valaisinten infrastruktuuri valmiiksi myös mahdollisille muille ohjauksille. Sekä samalla mahdollistetaan informaation kerääminen valaisinten käytöstä.

7.1 Taajuuden ylläpito

Kantaverkkoyhtiöt pitävät omaa markkinapaikkaansa myös taajuuden säädölle. Taajuus yhteispohjoismaisella alueella on pidettävä välillä 49,9 – 50,1 Hz. Taajuuden ylläpitoon osallistuvat monet voimalaitokset omalla statiikallaan. On myös mahdollista säätää taajuutta pudottamalla kuormia verkosta. Kuorman pudotus vastaa samaa kulutuksen ja tuotannon tasapainossa kuin tuotannon lisäys. Esimerkkinä relekytketyn häiriöreservin toiminnasta on esitetty Kuva 7.2.

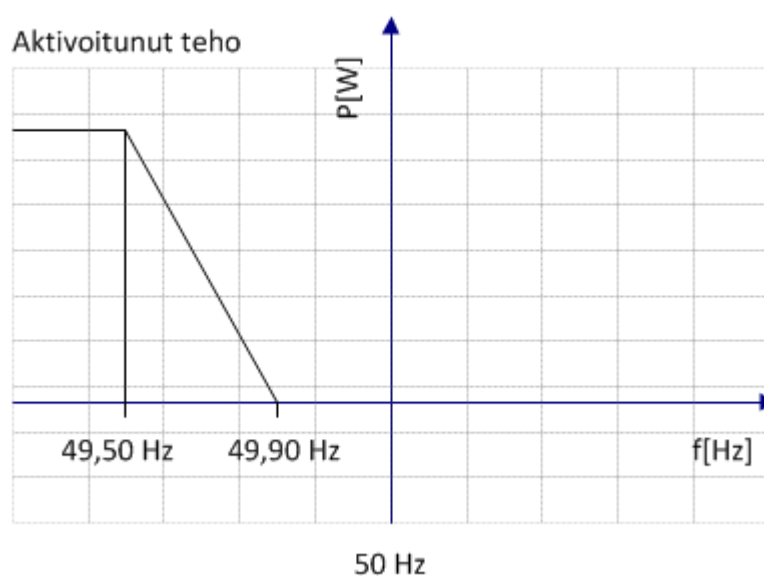


Kuva 7.2 Relekytketyn häiriöreservikuorman ja varavoimakoneen toimintakäyrä

Relekytketyn häiriöreservin toiminta selostettuna lyhyesti: Taajuuden laskiessa, ja pysyessä yli 30 sekunnin ajan alle 49,7 Hz, varavoimakone käynnistyy tai kuormitus tiputetaan pois verkosta. Tai taajuuden ollessa

alle 49.5 Hz varavoimakone aktivoituu tai kuorma tipahtaa viidessä sekunnissa. Varavoima sammutetaan tai kuormitus kytketään uudelleen verkkoon taajuuden ollessa yli 5 minuuttia yli 49,9 Hz. (Fingrid 2014)

Taajuusohjattu häiriöreservi toimii samalla taajuusalueella kuin Relekytketty häiriöreservi. Aktivoituu taajuuden alittaessa 49,9 Hz ja on täysin aktivoituneena 49,5 Hz taajuudella. Taajuusohjattu häiriöreservi on jatkuvasäätöinen. (Fingrid 2014)

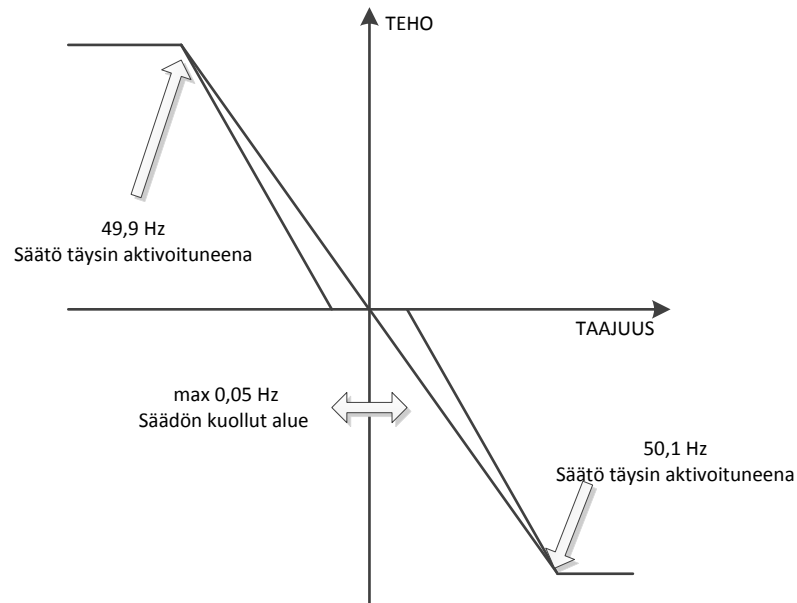


Kuva 7.3 Taajuusohjatun häiriöreservin toimintakäyrä.

Taajuusohjatun häiriöttöreservin korvaukset ovat seuraavanlaiset. Olemassa olevasta häiriöreservistä maksetaan 4,03 €/MW tunnilta ja aktivoituneesta energiasta maksetaan energialle korvaus. Mikäli kapasiteetin haltija ei pysty toimittamaan sovittua kapasiteettia, maksaa kapasiteetin haltija Fingridille toimittamatta jääneestä kapasiteetista 30 % eli 1,21 €/MW,h. (Fingrid 2014)

Jatkuvatoimista taajuudensäätölajia kutsutaan nimellä "Taajuusohjattu käyttöreservi". Tämä reservilaji toimii portaattomasti välillä 49,9 – 50,1 Hz.

Taajuusohjatun käyttöreservin on aktivoiduttava täysimääräisesti kolmessa minuutissa yli 0,1 Hz muutokseen. (Fingrid 2014) Hahmotelma mahdollinen käyttöreservin statiikka esitetty Kuva 7.4.



Kuva 7.4 Taajuusohjatun käyttöreservin toiminta

Kapasiteettikorvaus: 15,8 €/MWh, minkä Fingrid maksaa mikäli mittauksin todennettu reservikapasiteetti on Reservinhaltijan toimittaman reservisuunnitelman mukainen, mikäli mittauksin todennettu reservikapasiteetti alittaa reservisuunnitelman, toimittamatta jääneestä kapasiteetista reservinhaltija maksaa Fingridille 30 % yllämainitusta hinnasta eli 4,74 €/MWh (Fingrid 2014)

Energiakorvaus: Fingrid maksaa Reservinhaltijan tasevastaavalle ostamastaan reservisähköstä energiamaksun, joka lasketaan sovellusohjeenmukaisesti kertomalla kullakin tunnilla taajuusohjatun käyttöreservin aiheuttama tuotanto- tai kulutustaseen laskennallinen energia kunkin tunnin ylössäätöhinnalla. (Fingrid 2014)

Taajuuden säätöön voitaisiin käyttää hajautettuja mikrokuormia, kun säädettävien kuormia on tarpeeksi. Kuormille voidaan muodostaa säädön toteuttama statiikka. Ja käyttäessä säätöä voidaan mittaustiedoin todentamaan säädön vaikutus taajuuteen. Teknisesti taajuuden säätö on tänä päivänä mahdollista.

7.2 ELspot-ohjaus

ELspot-ohjaus tarkoittaa ohjausta sähkönhinnan perusteella. Lyhyesti sanottuna, määritellään hinta mitä halutaan maksaa valaistuksesta. Hinnan muodostusperiaatteena voisi olla esimerkiksi luonnonvalon saatavuus ja rakennuksen käyttöaste. Esimerkkitapauksia:

- Luonnonvaloa reilusti saatavilla: suostutaan maksamaan pienempi hinta
- Erittäin pieni käyttöaste, luonnonvaloa ei saatavilla: suostutaan maksamaan minimihinta.
- Erittäin korkea käyttöaste, Suostutaan maksamaan korkea hinta

Liitteessä yksi, on laskettu kolme esimerkkiviikkoa vuosilta 2013 ja 2014, jolloin on määritelty valaistuksesta maksettava hintaraja päiväkohtaisesti. Laskennassa ei ole huomioitu päivänvaloa. Hinnan perusteena voisi siis pelkästään käyttöasteen mukainen hinta.

7.3 CASE Rakennusvaihe VI

Lappeenrannan Teknillinen yliopisto koostuu seitsemästä rakennusvaiheesta, Rakennusvaiheet ovat rakennettu eri aikakausina. Ja eriaikaisuus näkyy selkeästi eripuolella kampusta. Omaisuuden hallinnassa investointirahat ovat kohdennettu rakennusvaiheisiin sekä

yksittäisten rakennusvaiheen suurempiin remontteihin. Yliopistolla valaisuun on käytetty seuraavia ohjauksia:

- Ulkovalaistuksilla sekä käytävävalaistuksilla on käytössä luonnonvalon mukainen ohjaus, osassa käytäviä myös liiketunnistimia
- Uudemmissa luokissa on olemassa tilanneohjauksia
- WC-tiloissa ja muissa pienemmissä tiloissa käytössä liiketunnistus

Tällä hetkellä valaisinten ohjaus rakennusvaihe-VI käytävillä on toteutettu kolmelle tilanteelle: päällä, 50 % valaistus ja poissa. Tilanneohjaukset saavat ohjausviestinsä liiketunnistimista sekä päivänvalosta. Muuttamalla nykyiset valot LED-valaisimiksi Huoltosuhde paranee, mutta kaupallisen LED-valaisimen kohdalla uusimmat LED komponentit eivät ole vielä (2013) päässyt valaisinmallistoon. LED-valaisimissa puhutaan käytännössä noin 80 lm/W. Tällöin pelkkä valaisinten vaihto ei tule toimimaan missään määrin energiatehokkuutta korottavana tekijänä. Nykyisten yksittäisten loistevalaisinten valontehokkuudet ovat pienemmillä valaisimilla luokkaa 70 lm/W ja putkivalaisimilla luokkaa 90 lm/W

Valaisinten tehokkuuksista useissa paikoissa on jo käytössä elektroniset liitäntälaitteet, uusimmissa rakennuksissa on olemassa LED-tekniikkaa. Sekä valaisimilla on otettu käyttöön erilaisia auringonvalon saatavuuteen perustuvia ohjauksia. Tietyissä luokkatiloissa on jo käytössä erilaisia tilannevalaistusohjelmia Kuten luento, piirtoheitin, PC.

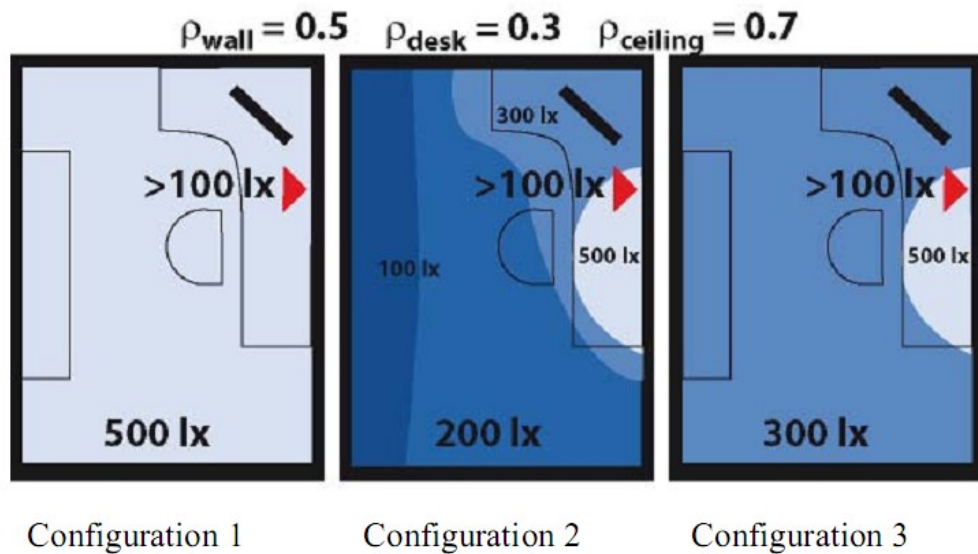
7.3.1 LENI-arvon parantaminen

Valaistusta suunnitellessa ensimmäinen tekijä on tarpeenmukainen valaistuskapasiteetti, toinen tekijä on energiatehokkuus. Näiden tekijöiden summana voidaan pitää LENI-arvoa. LENI-arvolla voidaan arvioida

vuotuisia kustannuksia valaistuksessa ja seuraavien tekijöiden optimointi on nykypäivänä otettava huomioon:

- asennettu valaisinteho/neliometri
- asennetun valotehon käyttö/neliometri

Ensimmäiseen kohtaan eli asennettuun valaisintehoon/neliometri voidaan vaikuttaa nykyisen tasaisesti työhuoneisiin asennettujen valaisimien tuottaman valovoimakkuus jakauman muokkaamisella. Nykyisillä loisteputkilla asennettaessa yli 11 W/m² Saavutetaan riittävä yli 500 lx valaistusteho. Muutettaessa työpisteiden valaistusta Kuva 7.5 mukaan saavutetaan parhaimmillaan noin 50 % säästö vuotuisessa kulutuksessa.



Kuva 7.5 Eri valaistusasennuksilla toteutettu työpisteiden valaistus, Configuration 1: 11 W/m² 22 kWh/m² .a, Configuration 2: 4.4 W/m² + Task area 1.7W/m² 11.5 kWh/m² .a, Configuration 3: 6.6 W/m² + Task area 1.7W/m² 15.9 kWh/m² .a (Halonen;Tetri ja Bhusal, Guidebook on energy efficient electric lightning for buildings 2010)(ECBCS, 2010)

Seuraavaksi valotehokkuudeltaan paremmat valaisimet myös auttavat parantamaan LENI -arvoa. Käytännössä esimerkiksi tänä päivänä loisteputkien valotehokkuus on 70 – 90 lm/W ja näillä toteutettu 13 W/m²

(910 – 1170 lm/m²) valaistuksen korvaus LED-valaistuksella tarkoittaa (70 – 130 lm/W) 7 W/m² – 13 W/m² LENI arvon muutosta. Käytännön mitoituksissa VI-rakennusvaiheessa luokassa 6325 alun perin on 24 kappaletta valaisimia joiden yhteisteho on 1,39 kW. Oletuksena käytettäessä vuotuista luokahuoneen käyttöastetta noin 2000 tuntia, Luokahuoneen valaistuksen vuotuinen energian kulutus maksaa 5 cmt/kWh hinnalla noin €140/a + huoltokustannukset. Vaihdettaessa tilalle LED valaisimet vastaavalle valoteholle samalla sähköhinnalla vuotuinen samoilla asennuksilla samoilla käyttöajoilla olisi 96,3 €/a, tällöin vuotuiset säästöt olisivat noin 43 €/a. Taloudellisesti valaisinten vaihtamista ei saa kannattavaksi. Kumminkin energian kulutus laskisi parhaita komponentteja käyttäen noin 30 %.

7.3.2 Kiinteistöautomaatio

Kiinteistöautomaatioon kuuluu valaistuksen ohjauksen lisäksi yleensä lämmitys, ilmanvaihto ja vesien käsittely. Kiinteistöautomaatiossa voidaan mitata energian ja veden kulutusta reaaliajassa. Tällä hetkellä kiinteistöautomaatio ohjaa käytävävalaistuksia sekä ulko sekä julkisivuvalaistusta. Ovat kiinteistöautomaatiossa päivänvalo-ohjauksella. Pinellä toimenpiteellä kierrättämällä kiinteistöautomaation päivänvalo anturi tieto säätökapasiteetti ohjauksen kautta voitaisiin pienillä muutostöillä valjastaa kiinteistöautomaation perässä oleva valaistus kysynnänjouston.

8 TULOKSET

Tuloksena työstä saatiin arvioitua missä kohteissa ja kuinka paljon valaistuksen osalta säädettävänä kuorman potentiaalia. Lappeenrannan teknillisen yliopiston tiloista, Luokat, työhuoneet ja laboratoriot sisältävät paljon valaistuskapasiteettia, mutta ulkopuolisen säädön aiheuttama ennakoimaton valaistustason muutos on häiriötekijä. Tällä perusteella, vähiten häiriötä aiheuttaa käytävä tai ulkoalueen valaistustason muutos. Esimerkkejä esitetty asennetuista valaistuskapasiteeteista Taulukko 8.1.

Taulukko 8.1 eri tilojen valaistuskapasiteetit

Tila	Kapasiteetti
Käytävät	11 kW
Työhuone (6326, 79,1 m ²)	1,4 kW
Pieni huone (6327, 20,3m ²)	350 W

Valaistuksella ohjattavana kuormana on yksi ominaisuus verrattaessa muihin säädettäviin kuormiin verrattuna: valaistuksella ei varastoidu jolloin myös säätökapasiteetti on periaatteessa aina saatavilla (ilmastointia voi rajoittaa termostaatit ja energiavarastoilla on tietynsuuruiset kapasiteetit).

Taulukko 8.2 on laskettu erilaisille säätötavoille säästöjä. Koska työhuoneet tai luokkatilat soveltuvat huonosti säädön toteuttamiselle. Säädettävän kuorman kooksi valittiin on kymmenen kilowattia, eli noin käytävillä oleva valaistus. Energian laskentaparametri on 15 snt/kWh sisältäen energian hinnan sekä siirtohinnan. Läsnaolo ja luonnonvalo ovat laskettu käyttäen Standardissa SFS-EN15193 esiteltyjä laskentatapoja ja kertoimia. Luonnonvalon kohtalla säästö on arvioitu epäedullisimman tilanteen mukaan jolloin luonnonvaloa on kumminkin käytettävissä toimistoaikana. Jos käytetään SPOT-hintaa ohjauksena, ja koko viikolle

arvioidaan hinta-rajat mitä suostutaan maksamaan valaistuksen käytöstä tunnille. Esimerkkinä kaksi eri viikkoa suomen spot-hinnan mukaisella ohjauksella esitetty liitteessä 1.Taajuuden ylläpidossa säädössä laskettu FCR-N esimerkissä 2013 arvioidun 40 MW käyttöreservistä aktivoituneen tehon mukaan, ja muodostettu valaistukselle oma suora statiikkansa.

Taulukko 8.2Vertailutaulukko eri säätötavoille

	Muutosinvestointi	Vuotuinen käyttökustannus	Vuotuinen säästö
Ei säätöä (päällä 24/7)		13 000 €	0
Toimistoaikana päällä (käyttö valoisin ja pimeän aikana)		3 750 €	0
Läsnäolo toimistoaikana	Kytin, käytävä	2 800 €	940 €
Luonnonvalo toimistoaikana	säätävä	2250 € (0,6 heikko päivänvalon saatavuus, 300 lx)	1500 €
SPOT-markkina	Rele-ohjaus, Analoginen ohjaus + tietoliikenneyhteys	900 – 2400 €/a	3 600 – 4 800 €/a
FCR-N (käytävävalaistus 24/7)	Analoginen ohjaus+ taajuusmittaus + arkistointi	3900 € (vuoden 2013 säätötapahtumien mukaan, Ei huomioitu energian säästöä)	9000 €
FCR-N (käytävävalaistuksen arkipäivä, aurinkoinen aika)	Analoginen ohjaus+ taajuusmittaus + arkistointi	1200 € (vuoden 2013 säätötapahtumien mukaan, energian säästöjä ei huomioitu)	2500 €/kW,a

9 POHDINTA

Valaistuksen energiatehokkuudesta: Selkein asia on se että tekniikka, nimenomaan LED-tekniikka on kehittynyt nopeasti ja jatkaa kehitystään. Ja vaikkakin energiatehokkuus on kehittynyt valaisinten osalta viimeisien vuosien aikana. Taloudellisesti pelkät asennuskustannukset ovat vaikeasti perusteltavissa pelkällä energian säästön hinnalla. Kumminkin LED-tekniikalla on olemassa jo selkeästi energiatehokkaampia valaisinratkaisuja. Jolloin on varauduttava siihen että mahdollisesti elohopeaa sisältävien valaisinten myynti kielletään.

Myös valaistusratkaisun suunnittelulla on suuri merkitys energiatehokkuuteen. Käytetään valaistusta siellä missä sitä tarvitaan ja sen verran mitä tarvitaan. Ratkaisuja tähän on jo olemassa: päivänvalon käyttö, läsnäolon mukainen käyttö ja säädettävät valaisimet. LED-tekniikan mekaaniset ominaisuudet sekä pienoisjännitteen käyttö mahdollistaisi työpisteen valaisun jälkeenpäin muuttamisen myös loppukäyttäjän toimesta.

ELspot-markkinahintaan reagoiminen on mahdollista myös pienkuluttajilla Nykypäivänä pienkuluttajakin soi ostaa sähköä minkä hinta perustuu ELspot-hintaan. ELspot-hintaperusteisella säädöllä, säätö suoritettaisiin kerran tunnissa. Korkeimmat hinnat voivat ajoittua keskipäivälle, tai aamu sekä iltapäivälle. Todennäköisesti näinä ajanhetkinä on myös luonnonvaloa tarjolla, jolloin haitta tai häiritsevyys voi jäädä pieneksi. Toisaalta, tällä tavalla saataisiin hinta valaistukselle, jolloin voidaan arvioida myös esimerkiksi luonnonvalon käyttöllä ikkunoista tapahtuvan rakennuksen lämpöhäviöihin perustuvien kustannuksien.

Mielenkiintoisin ilmiö on taajuussäätökapasiteetin käytön erittäin alhainen valaistuspalvelun hinta. Tästä voisi pikaisesti päätellä että olisi kannattavaa vain lisätä säädettävää kuormaa verkkoon. Kyseisen kuorman käyttäminen tasaisi kyllä sähkön hinnanvaihtelua, mutta samalla kysyntä kasvaisi ja tarvittaisiin lisää tuotantoa, jolloin hinta muodostuisi suuremmaksi. Lisäksi säädettävän kuorman täytyisi reagoida nopeasti, luotettavasti, ja kuorman täytyisi muodostua monista mikrokuormista.

Periaatteessa myös pienellä todennäköisyydellä tulevaisuudessa voi olla tilanne jolloin ylimääräinen niin sanotusti turha sähkönkäyttö voisi olla myös perusteltua. Esimerkkiskenaario, kuuma kesäpäivä, jäähdytys kuormat toimivat jo täydellä teholla, sähköntuotannon seisauttaminen lyhyeksi aikaa aiheuttaa enemmän kustannuksia kuin ylimääräisen kuormituksen kytkeminen verkkoon. Yksi vähiten haittaava kuorma voisi tällöin olla valaistus.

10 YHTEENVETO

Työn tarkoituksena oli tarkastella valaistusta säädettävänä kuormana. Sähkön markkinahinta antaa viitteitä sähköntuotannon energiatehokkuudesta. Työssä tutustuttiin mahdollisiin markkinapaikkoihin ja kysynnän jousto tarkoittaa. Työssä käydään läpi valaistuksen perusteita, sekä nykyisien ohjaustapojen energiatehokkuutta tukevia ratkaisuja. Tekniselle toteutukselle ei ole estettä, käytännöntoteutukselle esteeksi muodostuu valaistustason muutoksen häiritsevyys. Järjestelmällä voidaan muodostaa valaistukselle hinta mitä halutaan palvelusta maksaa. Työssä tarkasteltiin ohjauksen sijoittamista esimerkkipuolelle.

11 LÄHDELUETTELO

- Aalto, Ari, Niina Honkasalo, Pekka Järvinen, Jaakko Jääskeläinen, Markku Raiko, ja Anni Sarvanta. *Mistä lisäjoustoa sähköjärjestelmään?* Loppuraportti, Espoo: Ltd, ÅF-Consult, 2012.
- Aalto-yliopisto. *Nettitutka*. 2014. <http://www.netradar.org/> (haettu 30.. 05. 2014).
- ABB Oy. ”Rakennusten energiatehokkuus - KNX-taloautomaatio.” 05.. 12. 2011. http://www.asennustuotteet.fi/documents/Esitteet/rakennusten_energiatehokkuus_FIN_11-2011.pdf (haettu 10.. 06. 2014).
- ÅF-Consulting. ”Mistä Lisäjoustoa sähköjärjestelmään.” 12.. 11. 2012. http://energia.fi/sites/default/files/joustoa_sahkojarjestelmaan_0.pdf (haettu 28.. 05. 2014).
- Autio, L. *Tuottava toimisto*. ST, 2007.
- Berson, David M, Felice A Dunn, ja Motoharu Takao. ”Phototransduction by Retinal Ganglion Cells That Set the Circadian Clock.” *Science* 295. 2002. 1070-1073.
- DALI AG. ”DALI manual.” 2001. http://www.dali-ag.org/fileadmin/user_upload/pdf/news-service/brochures/DALI_Manual_engl.pdf (haettu 03.. 06. 2014).
- Dubois, Marie-Claude, ja Åke Blomsterberg. ”Energy saving potential and strategies for electric lighting in future North European, low energy office buildings: A literature review.” *Energy and Buildings* 2011, nro 10 (2011): 2572–2582.
- Energiateollisuus. *Energiateollisuus - Hinnan määräytyminen sähköpörssissä*. 2013. <http://energia.fi/sahkomarkkinat/tukkumarkkinat/hinnan-maaraytyminen-sahkoporssissa> (haettu 06.. 05. 2014).
- Energiateollisuus, Energiavuosi 2013 - sähkö.” 21.. 01. 2014. <http://energia.fi/kalvosarjat/energiavuosi-2013-s-hk> (haettu 04.. 05. 2014).
- Energiateollisuus ry ja Fingrid Oyj. ”Hyvä tietää sähkömarkkinoista.” 12.. 05. 2010. http://energia.fi/sites/default/files/sahkomarkkinoista_esite.pdf (haettu 07. 05. 2014).

- Energiateollisuus. ”Tuntimittauksen periaatteita 2010.” 28.. 1. 2014.
<http://energia.fi/julkaisut/tuntimittausuositus-2010-paivitetty-2462013>
 (haettu 10.. 06. 2014).
- EUROPEAN COMMISSION. ”A Roadmap for moving to a competitive low carbon economy in 2050.” 8.. 3. 2011. <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:52011DC0112> (haettu 4.. 5. 2014).
- European Environment Agency. *European Union greenhouse gas inventory 1990 - 2011 and inventory report 2013*. Luxembourg: Publications office of European Union, 2013.
- EY. ”Komission asetus (EY) N:o 245/2009.” 24. 3 2009. <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:076:0017:0044:Fi:PDF> (haettu 04. 05 2014).
- Fingrid. *Fingrid - Reservien hankinta*. 2014.
http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/reservit/reservien_hankinta/Sivut/default.aspx (haettu 07.. 05. 2014).
- Fingrid Oyj. *Automaattinen taajuudenhallintareservi*. 2014.
http://www.fingrid.fi/fi/voimajarjestelma/reservit/reservien_hankinta/automaattinen_taajuudenhallintareservi/Sivut/default.aspx (haettu 05.. 05. 2014).
- Fingrid - Sähköjärjestelmän vakaa tila ongelmilta sähköpörssin toimintahäiriössä*. 2013.
<http://www.fingrid.fi/fi/ajankohtaista/tiedotteet/Sivut%2FS%C3%A4hk%C3%B6j%C3%A4rjestelm%C3%A4n-vakaa-tila-s%C3%A4%C3%A4sti-ongelmilta-s%C3%A4hk%C3%B6p%C3%B6rssin-toimintah%C3%A4iri%C3%B6iss%C3%A4.aspx> (haettu 06.. 05. 2014).
- Halonen, Liisa, Eino Tetri, ja Pramod Bhusal. *Guidebook on energy efficient electric lightning for buildings*. Espoo: Aalto University, 2010.
- Halonen, Liisa, ja Jorma Lehtovaara. *Valaistustekniikka*. Jyväskylä: Otatieto Oy, 1992.
- Halonen, Liisa, Marjukka Elovaara, ja Jorma Lehtovaara. *Toimistotilojen valontarve- ja päivänvalonmittaukset*. Otaniemi: Teknillinen korkeakoulu, 1992.

- Hamamatsu Photonics K.K. *Hamamatsu Photonics*. 2014.
<http://www.hamamatsu.com> (haettu 30.. 05. 2014).
- Hausman, Ezra D. , ja Richard D. Tabors. "The Role of Demand Underscheduling in the California Energy Crisis." Cambridge: Tabors Caramanis & Associates, 2004.
- Ikäheimonen, Tarja K. *Säteily ja sen havaitseminen*. Helsinki: Säteilyturvakeskus, 2002.
- Isto, Autio. *Tuottava toimisto. Valaistus*. Espoo: Sähkötieto ry, 2007.
- Koponen, P, S Kärkkäinen, J Farin, ja H Pihala. *Markkinahintasiinaaleihin perustuva pienkuluttajien sähkökäytön ohjaus*. VTT, 2006.
- Lakervi, Erkki, ja Jarmo Partanen. "Sähkönjakelutekniikka." 2008.
- LEDs Magazine. *GaN on silicon: A breakthrough technology for LED lighting*. 2014. <http://www.ledsmagazine.com/content/leds/en/articles/print/volume-11/issue-2/features/last-word/gan-on-silicon-a-breakthrough-technology-for-led-lighting-magazine.html> (haettu 16.. 06. 2014).
- Lundberg, Anders. "Katsaus reserveihin." 08.. 11. 2012.
http://www.fingrid.fi/fi/asiakkaat/asiakasliitteet/Tasevastaavaseminaarit/8.11.2012/Reservit_tasevastaavap%C3%A4iv%C3%A4_081112.pdf (haettu 07.. 05. 2014).
- Motiva Oy. "Kotitalouksien sähkökäyttö 2011." 26. 2 2013.
http://www.motiva.fi/files/8300/Kotitalouksien_sahkonkaytto_2011_Tutkimusraportti.pdf (haettu 4. 5 2014).
- Nordpool. "Nordpool." 30.. 04. 2014. <http://www.nordpoolspot.com/> (haettu 04.. 05. 2014).
- Osram. *Osram - Life cycle analysis*. 2011.
http://www.osram.com/osram_com/sustainability/sustainable-products/life-cycle-analysis/index.jsp (haettu 7.. 5. 2014).
- Pakonen, Pertti, Marko Pikkarainen, Bashir Siddiqui, ja Pekka Verho. *Energiansäästölamppujen verkostovaikutukset ja elektronisten kuormien mittariluentajärjestelmien yhteisvaikutukset Vaihe 2. Loppuraportti*. Tampere: Tampereen Teknillinen Yliopisto, 2013.

- Park, Tae Jin, ja Seung Ho Hong. *Development of an experimental model of BACnet-based Lightning Control System*. IEEE, 2006.
- Pöyhönen, Otso W. *Sähkötekniikan käsikirja 3*. Kelsinki: Tammi, 1979.
- Rantula, Heikki. *Energiätehokkuuden parantaminen Lappeenrannan Teknillisessä Yliopistossa*. Diplomityö, Lappeenranta: Lappeenrannan teknillinen yliopisto, 2010, 35.
- Sandberg, Jorma. *Ydinturvallisuus*. Säteilyturvakeskus, 2004.
- Schwartz, Jyrki. *USA:n Sähkömarkkinoiden kehittyminen*. -----: ----, 2010.
- Seppälä, J, ja P Koponen. *AMM-Järjestelmällä toteutetun varaavan sähkölämmityksen dynaamisen kuormanohjauksen toimintamalli ja kenttäkokeet*. Espoo: VTT, 2011.
- Statnet. "Statnet." 1.. 1. 2014. <http://www.statnett.no/> (haettu 04.. 05. 2014).
- Suomen stabndarttoimisiitto, SFS ry. *Standarditutuksi*. 2014. <http://www.sfs.fi/> (haettu 01.. 06. 2014).
- Tilastokeskus. "Tilastokeskus." 2014. <http://www.tilastokeskus.fi> (haettu 04.. 05. 2014).
- Valtonen, Petri. *Interaktiivisen asiakasrajapinnan mahdollistamat energiatehokkuutta tukevat toiminnot ja niiden kannattavuus*, Diplomityö. Lappeenranta: Lappeenrannan Teknillinen Yliopisto, 2009.
- Wong, Dillian T.P., Martin Chow, L H, ja C.K. Li. *A DC-DC Converter used as a Light Dimmer for Compact Fluorecent Lamps*. IEEE, 2009.

LIITE 1 SPOT-hinnan mukaiset ohjaukset

1/3

Viikko 9.-15.6.2014

Hintaraja, päivälle	38	38	40	39	31	20	15
Kellonaika	Ma	Ti	Ke	To	Pe	La	Su
06 - 07	0	31,01	34,55	33,09	28,54	0	0
07 - 08	0	0	0	0	0	0	0
08 - 09	0	0	0	0	0	0	0
09 - 10	0	0	0	0	0	0	0
10 - 11	0	0	0	0	0	0	0
11 - 12	0	0	0	0	0	0	0
12 - 13	0	0	0	0	30,9	0	0
13 - 14	0	0	0	0	29,81	0	0
14 - 15	0	36,81	0	0	0	0	0
15 - 16	0	37,12	0	38,35	0	0	0
16 - 17	36,85	37,74	39,57	37,07	29,08	0	0
17 - 18	30,95	0	0	38,27	29,06	0	0
Spot hinnan mukainen käyttö [€/MWh]	67,8	142,68	74,12	146,78	147,39	0	0
Käyttö viikolle	0,5788		€/kW				
Koko vuodelle	30,096		€/kW				

Hintaraja, päivälle	50	56	57	47	42	30	31
Kellonaika	Ma	Ti	Ke	To	Pe	La	Su
06 - 07	59,07	0	0	0	0	20,7	16,83
07 - 08	99,97	40,12	45,36	44,07	34,68	23,79	20,05
08 - 09	84,05	42,28	55,07	46,37	36,85	26,63	24,76
09 - 10	80,46	42,87	59,92	46,58	35,48	28,07	26,57
10 - 11	84,79	43	59,81	46,12	33,95	27,84	27,71
11 - 12	81,46	45,86	59,9	46,68	32,13	27,14	28,12
12 - 13	88,4	40,28	50,98	42,94	0	25,96	27,09
13 - 14	67,1	38,62	45,93	41,05	0	25,65	26,8
14 - 15	38,99	0	43,77	39,34	32,89	25,06	25,96
15 - 16	40,41	0	41,81	0	31,94	25,02	25,62
16 - 17	0	0	0	0	0	25,64	25,62
17 - 18	0	40,9	40,96	0	0	25,99	25,55
Spot hinnan mukainen käyttö	0	333,93	503,51	353,15	237,92	307,49	300,68
Säästö Viikolle	2,4607		€/kW				
Koko vuodelle	127,9564		€/kW				

LIITE 1 SPOT-hinnan mukaiset ohjaukset

2/3

Viikko 20.-26.1.2014

Hintaraja, päivälle	50	53	53	53	53	30	31
Kellonaika	Ma	Ti	Ke	To	Pe	La	Su
06 - 07	0	0	0	0	0	0	30,67
07 - 08	0	0	0	0	0	0	30,8
08 - 09	0	0	0	0	0	0	0
09 - 10	0	0	0	0	0	0	0
10 - 11	45,24	52,03	47,21	47,18	0	0	0
11 - 12	45,24	50,88	45,02	45,95	46,23	0	0
12 - 13	45,21	50,09	45,01	45,45	44,07	0	0
13 - 14	45,03	47,43	45,17	46,05	45,57	0	0
14 - 15	0	50,08	0	0	0	0	0
15 - 16	0	0	0	0	0	0	0
16 - 17	0	0	0	0	0	0	0
17 - 18	0	0	0	0	0	0	0
Spot hinnan mukainen käyttö [€/MWh]	180,7	250,51	182,41	184,63	135,87	0	61,47

viikolta säästö 0,9341 €/kW

Koko vuodelle 48,575 €/kW

Hintaraja, päivälle	50	56	57	47	42	30	31
Kellonaika	Ma	Ti	Ke	To	Pe	La	Su
06 - 07	56,03	60,02	60,04	60,06	63,38	30,94	0
07 - 08	75,05	73,06	64,09	64,08	74,02	33,79	0
08 - 09	64,59	65,02	64,89	60,08	61	35,39	31,29
09 - 10	60,57	60,09	60,01	60,02	60,07	36,01	32,02
10 - 11	0	0	0	0	53,98	36,26	32,89
11 - 12	0	0	0	0	0	34,56	33,07
12 - 13	0	0	0	0	0	33,25	32,98
13 - 14	0	0	0	0	0	33,06	32,11
14 - 15	55,01	0	56,04	56,01	54,96	32,66	31,89
15 - 16	60,01	57,1	60,03	60,02	60	36,94	32,17
16 - 17	66,08	65,08	61,36	62,79	60,09	42,02	35,36
17 - 18	61,03	65,01	69,87	64,07	61,09	42,84	36,93
Spot hinnan mukainen käyttö	0	445,38	496,33	487,13	548,59	427,72	330,71
Säästö Viikolle	2,90352		€/kW				
Koko vuodelle	150,983		€/kW				

LIITE 1 SPOT-hinnan mukaiset ohjaukset

3/3

Viikko 2.-8.9.2013

Hintaraja, päivälle	50	56	57	47	42	30	31
Kellonaika	Ma	Ti	Ke	To	Pe	La	Su
06 - 07	46,41	47,6	53,92	0	0	0	0
07 - 08	0	0	0	0	0	0	0
08 - 09	0	0	0	0	0	0	0
09 - 10	0	0	0	0	0	0	0
10 - 11	0	0	0	0	0	0	0
11 - 12	0	0	0	0	0	0	0
12 - 13	0	0	0	46,62	0	0	0
13 - 14	0	0	55,91	43,89	40,77	0	0
14 - 15	45,06	55,46	53,91	44,4	38,72	0	0
15 - 16	44,45	55,57	53,47	44,89	38,28	0	0
16 - 17	0	53,98	54,94	0	38,04	0	0
17 - 18	48,18	0	55,22	0	40,58	0	0
Spot hinnan mukainen käyttö [€/MWh]	184,1	212,61	327,37	179,8	196,39	0	0
viikolta käyttö	1,1003		€/kW				
Koko vuodelle	57,214		€/kW				
Kellonaika	Ma	Ti	Ke	To	Pe	La	Su
06 - 07	0	0	0	49,55	45,7	37,96	37,9
07 - 08	64,8	63,98	63,58	51,11	49,33	38,88	38,69
08 - 09	63,99	66,61	71,1	63,35	54,47	41,01	39,95
09 - 10	67,94	68,06	77,67	62,1	49,41	43,85	40,55
10 - 11	65,6	68,06	64,83	54,98	45,1	42,56	41,22
11 - 12	66,62	68,04	62,45	50,69	43,58	43,05	41,97
12 - 13	64,08	66,88	58,55	0	43,55	42,11	40,94
13 - 14	50,07	57,16	0	0	0	41,28	40,03
14 - 15	0	0	0	0	0	40,59	38,96
15 - 16	0	0	0	0	0	40,75	38,68
16 - 17	51,48	0	0	47,02	0	41,64	38,45
17 - 18	0	57,96	0	47,76	0	41,51	38,01
Spot hinnan mukainen käyttö	0	516,75	398,18	426,56	331,14	495,19	475,35
Säästö Viikolle	2,6624		€/kW				
Koko vuodelle	138,4448		€/kW				