

Opinnäytetyö (AMK)

Elektroniikan koulutusohjelma

Tietoliikennejärjestelmät

2017

Sam Mononen

AURINKOSIMULAATTORI

– LED-valoilla toteutettu aurinkosimulaattori
aurinkokennojen testaukseen

Sam Mononen

AURINKOSIMULAATTORI

- LED-valoilla toteutettu aurinkosimulaattori aurinkokennojen testaukseen

Tämä opinnäytetyö käsittelee aurinkosimulaattorin suunnittelua ja toteutusta. Tässä työssä mainittu LED-valoja käyttävä testauslaite suunniteltiin Isossa-Britanniassa Gb-Sol Ltd -nimisessä yrityksessä. Aurinkosimulaattorin tarkoituksena on simuloida auringon valoa sisätiloissa. Valolähteen kehittämiseksi jouduttiin suorittamaan spektroskopiaa, yhdistämään LED-valojen spektrit teoreettisesti, toteuttamaan piiri prototyyppilevyllä, mittaamaan prototyypin suorituskyky, kokoamaan simulaattori ja testaamaan lopullinen laite. Laitetta voidaan käyttää aurinkopaneelien tehokkuus- ja toimintatarkastuksessa sekä erilaisten materiaalien valonkestävyyden tutkimiseen. Opinnäytetyön vaatimuksena oli toteuttaa aurinkosimulaattori, joka vastaa sekä tilaajan asettamiin että Euroopan sähkötekniikan standardien komitean (CENELEC) laatiman IEC BS EN 60904-9_2007 -standardin vaatimuksiin. Asetetut vaatimukset saavutettiin ja aurinkosimulaattoria voidaan käyttää testaamaan lisäpinnoiteiden vaikutusta aurinkopaneelien suorituskykyyn, joka oli asiakkaan tavoite. Tämän opinnäytetyön sisältöä voidaan käyttää edistämään aurinkoenergian hyödyntämistä ja vianhakua.

ASIASANAT:

aurinkoenergia, uusiutuva energia, aurinkopaneeli, testauslaite, LED-aurinkosimulaattori

BACHELOR'S THESIS | ABSTRACT

TURKU UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Electronics | Telecommunication systems

2017 | 35 pages

Sam Mononen

SOLAR SIMULATOR

- LED solar simulator for solar cell testing

This thesis is about the design and implementation of a solar simulator. The solar simulator described in this thesis was designed in Great-Britain in a company called Gb-Sol Ltd. The purpose of the solar simulator is to simulate the light of the sun indoors. Developing the light source required performing spectroscopy of LEDs, combining the spectra of the LEDs theoretically, implementing the circuit on a prototype, measuring the output of prototypes, assembling the simulator and testing the final device. The device can be used for testing the performance of solar panels and light exposure durability testing of materials. The goal of the thesis was to develop a solar simulator which complies with the CENELEC IEC BS EN 60904-9_2007 standard and fulfills other requirements set by the client. The set criteria were met and the solar simulator can be used to test the effects of special coatings on solar panel performance under standard test conditions, which was the client's objective. The work done in this thesis may be used to promote solar energy utilisation and troubleshooting.

KEYWORDS:

Solar energy, renewable energy, solar panel, testing equipment, LED solar simulator

SISÄLTÖ

KÄYTETYT LYHENTEET	6
1 JOHDANTO	7
2 TEORIA	8
2.1 Valosähköinen ilmiö	8
2.2 Aurinkokennot	8
2.3 Säteilivoimakkuus	11
2.4 AM 1.5 -standardi	11
3 MENETELMÄ	14
3.1 Tutkimus- ja suunnitteluvaihe	14
3.2 Mittaus ja analyysi	15
3.3 Prototyypin kehittäminen	17
3.4 Valolähteen kehittäminen	18
3.5 Simulaattorin koeajo	28
3.6 Testausohjelmisto ja lopullinen tehojakauma	31
4 POHDINTAA	32
5 YHTEENVETO	33
LÄHTEET	34

KAAVAT

Kaava 1. Elektronin liike-energian lauseke [6]	8
Kaava 2. Aurinkokennon pelkistetty virtalauseke [8]	9

KUVAT

Kuva 1. Aurinkokennojen kytkentä.	9
Kuva 2. Aurinkokennon sijaiskytkentä [8].	9
Kuva 3. Kennon spektraalinen vaste [9].	10
Kuva 4. Erilaisten kennojen spektraaliset vasteet [10].	10
Kuva 5. Mustan-kappaleen säteilyspektri [11].	11
Kuva 6. Valon tulokulma ja erilaiset AM -versiot [13].	12
Kuva 7. AM 1.5 -mukainen spektri, jossa näkyy kaasujen absorbtiot [15].	13
Kuva 8. Puoliarvoleveys [17].	15
Kuva 9. Integrintipallon toimintaperiaate [22].	16
Kuva 10. Integrintipallo laboratoriossa.	17
Kuva 11. Prototyypilevy rykelmästä.	18
Kuva 12. CAT4101 LED-ajuri [25].	19
Kuva 13. Philtronics -levy versio 1.2 kaavio.	20
Kuva 14. Philtronicsin tuottama levy versio 1.2.	20
Kuva 15. Teholähteen säätö potentiometrillä.	21
Kuva 16. Teholähteen CN2 jumpperi [26].	21
Kuva 17. Jännitteenjaon periaate.	22
Kuva 18. Potentiometrin kytkentä.	22
Kuva 19. Ohjausjännitteen ja lähtöjännitteen suhde teholähteessä.	23
Kuva 20. Rykelmän jännitteen ja virran suhde.	24
Kuva 21. HR2000 + spektrometrillä mitattuna rykelmän spektrit erilaisilla virroilla.	25
Kuva 22. Mittausalustan rajoittimet.	26
Kuva 23. Valon sekoituskorkeus.	26
Kuva 24. Simulaattorin sähköistys.	27
Kuva 25. Yksittäisen rykelmän toimintatestaus.	28
Kuva 26. Yhden rykelmäryhmän toimintatestaus.	29
Kuva 27. Jäähdytysputkisto mittausalustassa.	29
Kuva 28. Jäähdytyslaitteisto.	30
Kuva 29. Testausjärjestelmä kokonaisuutena.	30
Kuva 30. Aurinkokennon I-U käyrä testausohjelmassa.	31

TAULUKOT

Taulukko 1. Standardin mukainen tehojakauma [16].	14
Taulukko 2. Lopullisen valolähteen spektri.	31

KÄYTETYT LYHENTEET

A	Ampeeri, sähkövirran yksikkö
AM 1.5	Airmass 1.5 co-efficient, ilmassakerroin
Baudrate	Baudinopeus, tiedonsiirtonopeuden suure
CN2	Channel2, RSP-3000 teholähteen jumpperi
COM-port	Communications port, Microsoft Windows-käyttöjärjestelmän nimi sarjaportteille
FWHM	Full Width at Half Maximum, puoliarvoveveys
HR2000+	Oceanoptics:n kehittämä spektrometri
Irradiance	Säteilytysvoimakkuus, jollekin pinta-alalle saapuvan sähkömagneettisen energian kokonaismäärä
LED	Light emitting diode, hohtodiodi, puolijohde valonlähde
Oceanview	Oceanoptics:in kehittämä spektrometriaohjelma
PWM	Pulse Width Modulation, pulssinleveysmodulaatio
RS-232	Recommended Standard 232, sarjaportti-standardi
V	Voltti, jännitteen yksikkö
Visual Basic	Microsoftin kehittämä BASIC-sukuinen ohjelmointikieli
Ω	Ohmi, resistanssin yksikkö

1 JOHDANTO

Aurinkoenergian yleistyessä ja aurinkopaneeliteollisuuden kasvaessa kilpailu kiristyy ja yritykset pyrkivät kasvattamaan omaa teknistä tietotaitoa [1]. Opinnäytetyön toimeksiantaja Gb-Sol Ltd tuottaa tilaustyönä erikoisaurinkopaneeleja. Ennen kuin kyseinen yritys perustettiin, sen perustaja oli omassa yliopistossaan luonut pienyrityksen nimellä EETS, jonka tehtävänä on kehittää aurinkoenergiaan liittyviä testausjärjestelmiä. Yksi tärkeä testausjärjestelmä aurinkopaneelituotannossa on aurinkosimulaattori. Aurinkosimulaattorilla jäljitetään auringon valoa sisätiloissa aurinkopaneelien tehokkuuden mittaamiseksi. Aurinkosimulaattoreita on toteutettu erilaisilla valoteknologioilla kuten esimerkiksi halogeeni- tai ksenonlampuja hyödyntäen. EETS rakensi vuonna 2009 aurinkosimulaattorin, joka simuloi valoa halogeeni dikroiittisellä valaistuksella. Halogeenilampuja käyttävän mallin tehonkulutus on jopa noin 10 kW luokkaa, valospektri ei ole ihanteellinen ja lampujen huoltotarve voisi olla pienempi. Aurinkosimulaattori LED-valoilla on teollisuudessa tällä hetkellä paras keino testata aurinkopaneelien suorituskykyä, koska sen spektri saadaan mahdollisimman tarkasti standardien mukaiseksi sekä sen tehonkulutus on jopa kuusi kertaa pienempi verrattuna halogeenivaloja käyttävään aurinkosimulaattoriin [2]. Samankaltainen tutkimustyö julkaistiin Intiassa vuonna 2014, jossa suunniteltiin aurinkosimulaattori LED- ja halogeenilampuilla, halogeeniteknologiaa käytettiin infrapuna-alueen LED:ien vähäisen saatavuuden ja korkeiden hintojen takia [3]. Opinnäytetyö on jatkoa vuonna 2015 suoritettuna harjoittelujakson aikana aloitetulle projektille ja sisältää osittain samaa tutkimus- ja kehitystyön materiaalia.

Laitteen suunnittelu alkoi 2015 maaliskuussa, kun Gb-Sol Ltd sai tilauksen toteuttaa LED-aurinkosimulaattori. Tämän simulaattorin suorituskyky on tarkasti määritelty erikseen mainitun standardin sekä tilaajan omien vaatimusten mukaisesti. Tilaajan lisävaatimukset laitteelle ovat valon tulokulma $\pm 5^\circ$ FWHM, linssien tehokkuus $\geq 80\%$, mittausalustan lämpötilan säätö ja mittausalustan kulman säätö. Vastaavia LED-aurinkosimulaattoreita on markkinoilla saatavilla 10 000 – 30 000 € hintaluokassa ilman tilaajan lisävaatimuksia [4] [5]. Tähän opinnäytetyöhön sisältyy teoriaa aurinkoenergia tekniikasta, laitteen suunnitteluvaiheet, tutkimus- ja mittausosuudet, toteutusmenetelmät ja lopullinen yleiskatsaus laitteen toimivuudesta.

2 TEORIA

Tässä luvussa selvennetään valosähköisen ilmiön fysiikkaa ja aurinkokennojen laskelmallista mallintamista.

2.1 Valosähköinen ilmiö

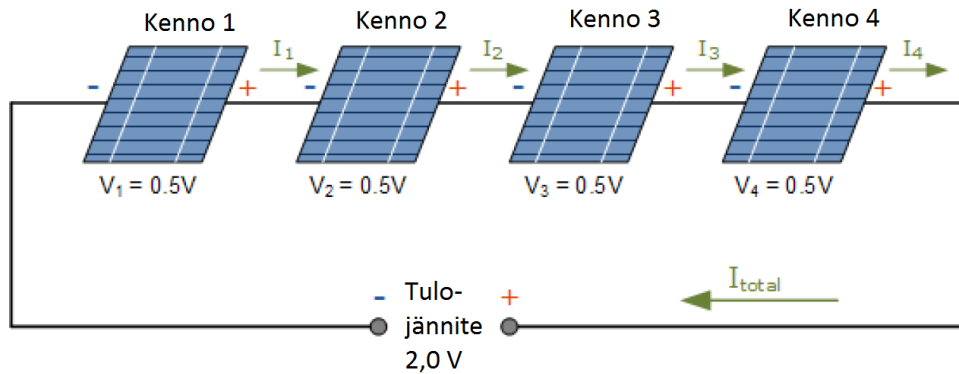
Aurinkosimulaattorin suunnittelu alkaa ymmärtämällä aurinkokennojen toimintaa ja siihen liittyvää valosähköistä teoriaa. Aurinkokenno on puolijohde, johon syntyy jännite, kun siihen osuu riittävästi valoa. Fotonin energia siirtyy elektronille, jolloin fotoni katoaa ja elektroni vapautuu atomista synnyttäen sähkövirran puolijohdteessa. Yhden elektronin irrottamiseen tarvitaan energiaa sidosenergian E_b verran, tämä energiamäärä on ominainen kullekin metallille. Fotonin aallonpituuden oltaessa riittävän lyhyt, sen energia on suurempi kuin elektronin sidosenergia, jolloin loput fotonin energiasta muuttuu elektronin liike-energiaksi E_k . [6]

$$E_k = E - E_b = \frac{1}{2} m_e v^2$$

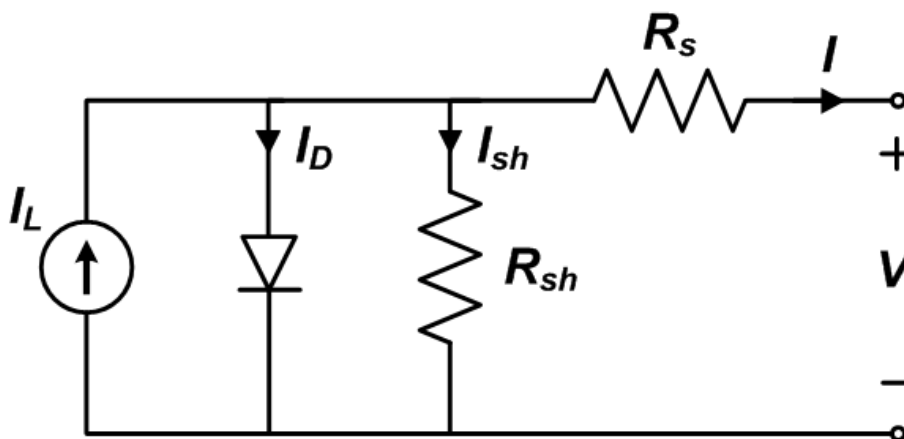
Kaava 1. Elektronin liike-energian lauseke [6]

2.2 Aurinkokennot

Aurinkokenno on puolijohdesovellus, jonka avulla muutetaan auringon säteilyenergia sähköenergiaksi. Aurinkopaneeli koostuu lukuisista kennoista, jotka on yleensä kytketty sarjaan. Kennosarjojen välissä saattaa olla myös ohitusdiodeja, jotka suojaavat varjostuneita kennoja ylikuumentumiselta ja mahdollistavat varjostamattomien kennosarjojen tehon tuotannon. Q-Cellsin tuottama yksikiteinen piikkenno, jonka koko on 156 mm x 156 mm, synnyttää valaistuna 8 A:n virran [7]. Yksittäiseen kennoon syntyy 0,5 – 0,7 V:n jännite, kennot sarjakytketään ja riippuen paneelin koosta summajännitte on 10 – 40 V. Esimerkki tästä näkyy kuvassa 1. Puolijohdemateriaali aurinkokennossa on yleensä yksi- tai monikiteinen pii, galliumarsenidi tai amorfinen pii. Aurinkokenno voidaan kuvata pelkistetysti diodin ja kahden vastuksen sarja- rinnankytkentänä, tämä näkyy kuvassa 2.



Kuva 1. Aurinkokennojen kytkentä.



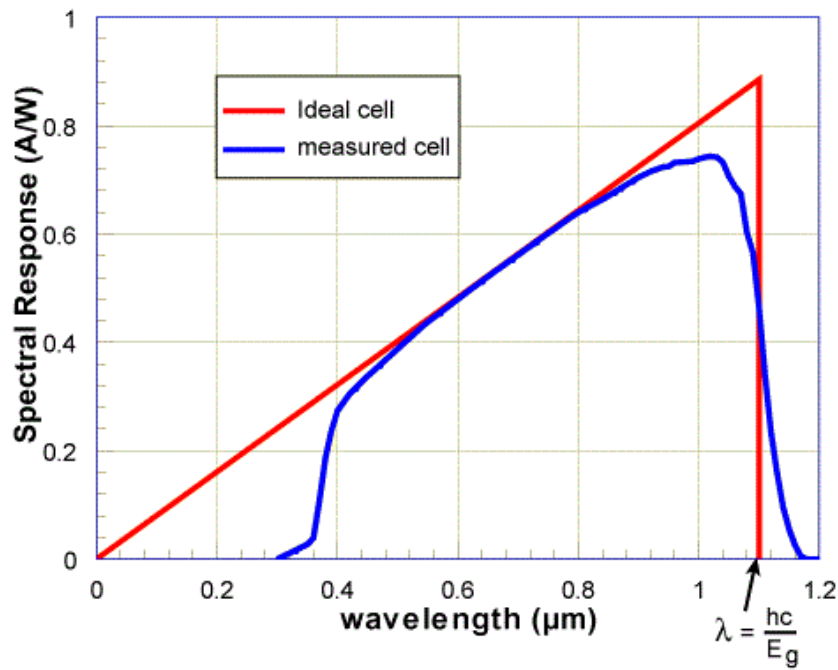
Kuva 2. Aurinkokennon sijaiskytkentä [8].

Aurinkokennossa valosähköisestä ilmiöstä syntynyt virta merkitään I_L . Tämä on säteilyintensiteetistä riippuva suure. I_D on jänniteriippuvainen puolijohteen rekombinaation hukkavirta, I_{sh} on kennon parasiittisen oikosulkuresistanssin R_{sh} aiheuttama hukkavirta. I on lopullinen hyötyvirta, joka on kennon sarjaresistanssin R_s rajoittama.

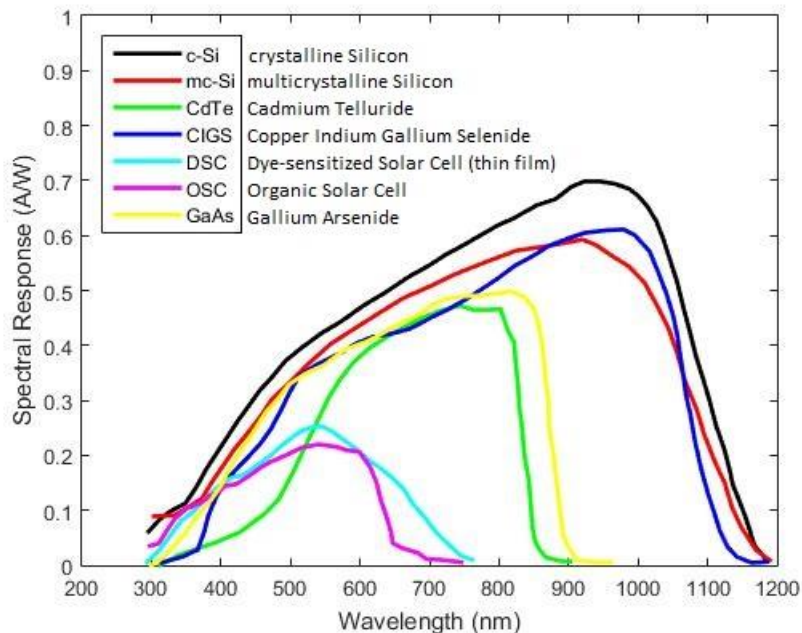
$$I = I_L - I_D - I_{sh}$$

Kaava 2. Aurinkokennon pelkistetty virtalauseke [8]

Aurinkokenno tuottaa lähes lineaarisesti enemmän tehoa pitkillä aallonpituuksilla, kuten näkyy kuvassa 3. Aurinkokennoilla on tuotantomateriaaleista riippuen omat spektraaliset vasteet. Tässä työssä keskityttiin yksikide pii-kennoihin, vaste näkyy mustalla kuvassa 4. Alle 400 nm aallonpituuksilla lasi absorboi suuren osan säteilystä. [9] [10]



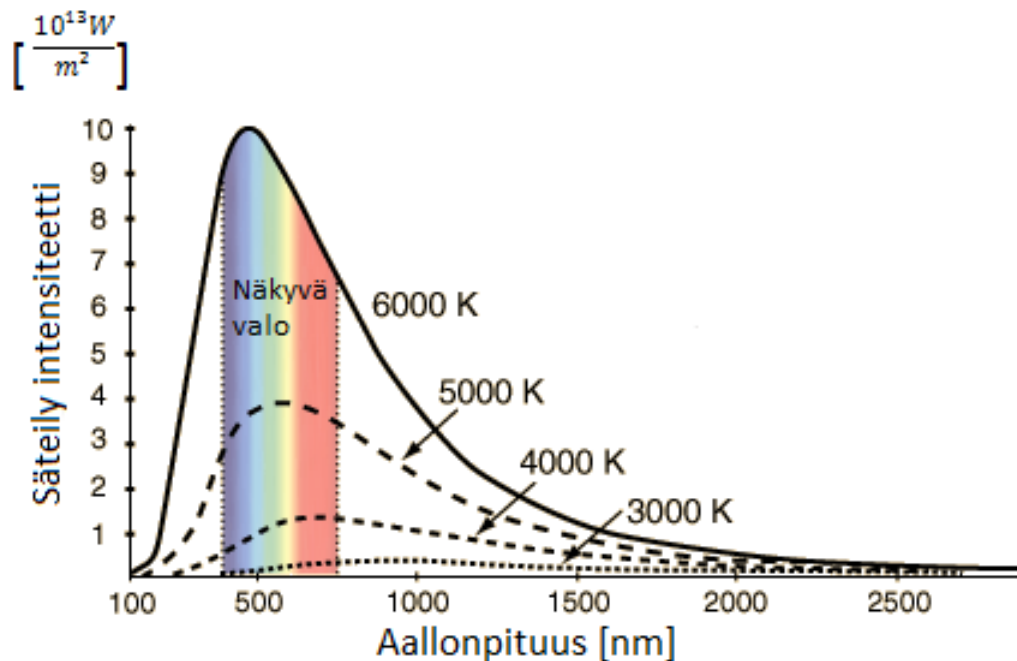
Kuva 3. Kennon spektraalinen vaste [9].



Kuva 4. Erialaisten kennojen spektraaliset vasteet [10].

2.3 Säteilyvoimakkuus

Valosähköinen ilmiö vaatii riittävän määrän säteilyä, tässä olennainen suure on säteilyvoimakkuus. Säteilyvoimakkuus on jollekin pinta-ala yksikölle saapuvan sähkömagneettisen energian kokonaismäärä, tämän yksikkö on $\frac{\text{watti}}{\text{m}^2}$. Aurinkoa voidaan ajatella mustakappale säteilijänä, täten se absorboi kaiken siihen kohdistuvan säteilyn eikä heijasta sitä lainkaan. Tästä johtuen sen säteily spektri riippuu vain sen pintalämpötilasta, joka on käytännössä 5 777 K [11] [12]. Kuvassa 5 on mustakappaleen säteily spektri eri lämpötiloilla.

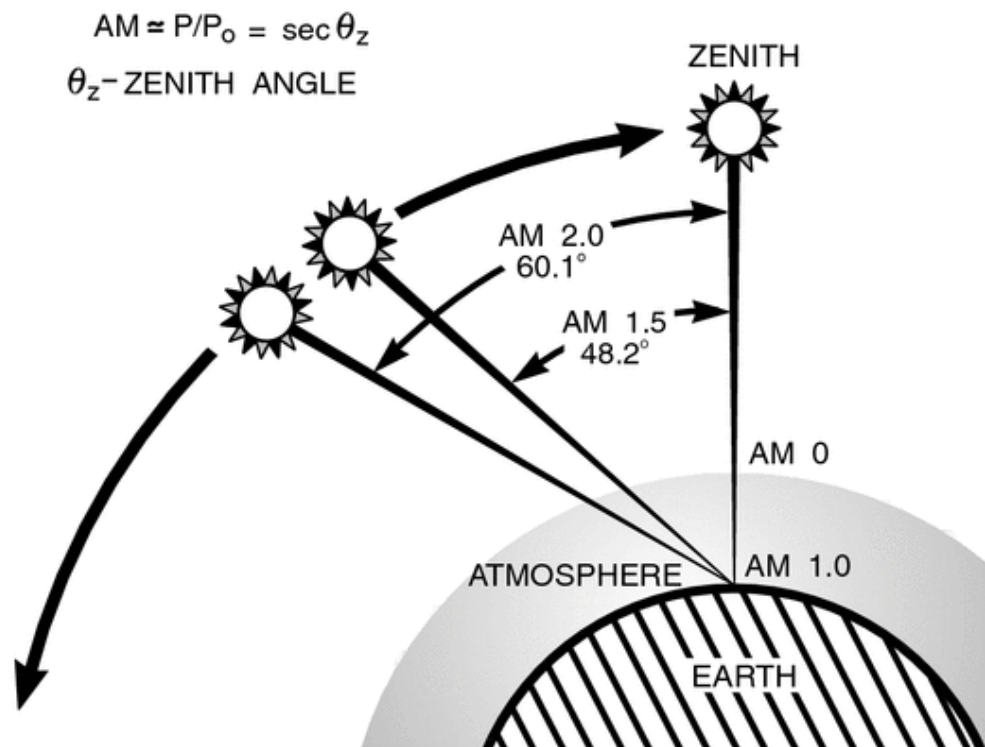


Kuva 5. Mustan-kappaleen säteily spektri [11].

2.4 AM 1.5 -standardi

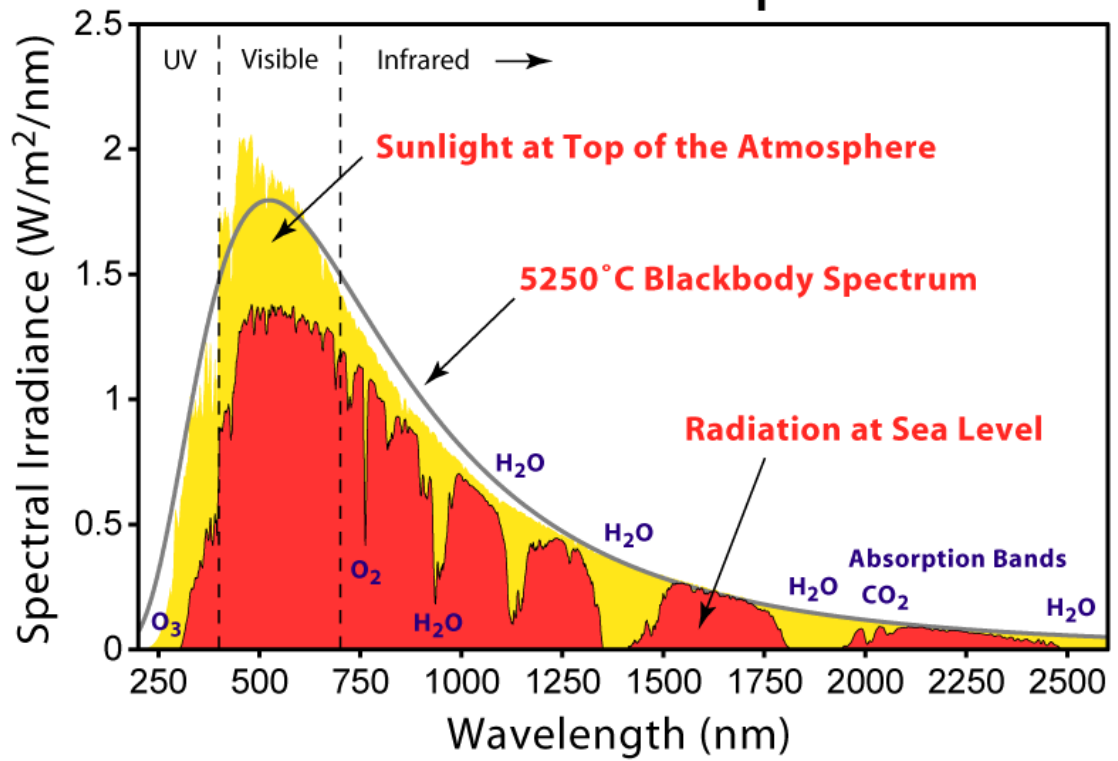
Kuvassa 5 näkyvä säteily spektri toteutuu tyhjiössä. Maahan tai merenpinnalle saapuvan säteilyvoimakkuuden kuvaamiseksi on määritetty AM 1.5 eli *airmass 1.5 coefficient* eli kerroin, jossa on huomioitu maapalloa ympäröivän ilma-massan kaasujen säteilyabsorbtio. Kuvassa 6 näkyy maapallo, ilmakehä ja valon tulokulma. AM 1.5

tarkoittaa käytännössä sitä, että valo läpäisee 1,5 Maapallon ilmakehän korkeutta ennen kuin se saapuu Maan pinnalle [13]. Riippuen valon tulokulmasta ilmakehän kaasut absorboivat tiettyjä aallonpituuksia voimakkaasti vähentäen täydellisen musta-kappale säteilyn voimakkuutta. Suunnitellun aurinkosimulaattorin täytyy vastata AM 1.5 säteilyvoimakkuuden tehojakauman mukaista spektriä. AM 1.5:n tehospektri on teollisuudessa sovittu standardi, jota käytetään aurinkopaneelien testauksessa ja muissa mittauksissa. Standardi määrittää 1 kW auringon säteilytehon 1 m² pinta-alalle, joka jakaantuu kuvan 7 mukaisesti [14] [15]. Kuvassa 7 punainen alue kuvaa merenpinnalla olevaa tehospektriä. Standardissa määritetään tärkeimmäksi spektrin kaistaksi 400 – 1100 nm alue. Standardin vaatimuksista lisää löytyy osuudessa 3.1 Tutkimus- ja suunnitteluvaihe.



Kuva 6. Valon tulokulma ja erilaiset AM -versiot [13].

Solar Radiation Spectrum



Kuva 7. AM 1.5 -mukainen spektri, jossa näkyy kaasujen absorptiot [15].

3 MENETELMÄ

Tässä luvussa kuvataan aurinkosimulaattorin tuotekehitysvaiheet. Nämä vaiheet ovat suunnittelu, LED valoihin perehtyminen, säteilyspektrien mittaukset, valolähteen prototyypin valmistus sekä käyttövalmiin simulaattorin suunnittelu ja testaus.

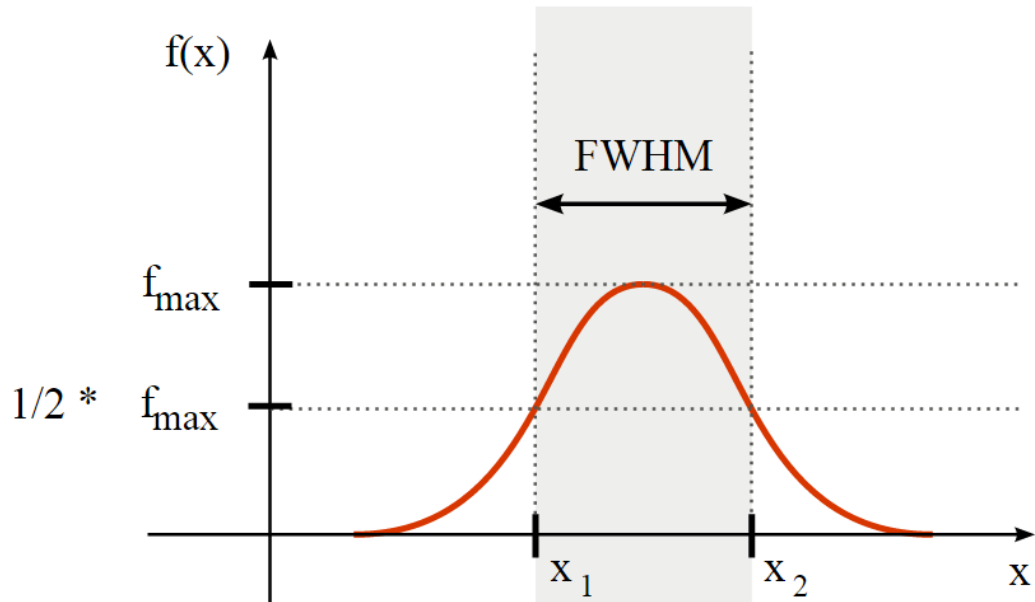
3.1 Tutkimus- ja suunnitteluvaihe

Tuotekehityksen ensimmäisessä vaiheessa perehdyttiin aurinkokennojen toimintaan. Seuraavaksi täytyi suunnitella valonlähde, joka vastaa AM 1.5 -spektriä IEC BS EN 60904-9_2007 -standardin mukaisesti [16]. Käytännössä tämä tarkoittaa markkinoilla olevien LED:ien yhdistämistä yhteen isompaan LED rykelmään, jonka kokonais-spektri on standardin mukainen. Mainittu standardi määrittää säteilyvoimakkuuden tehojakauman, joka näkyy taulukossa 1. Tätä rykelmää kopioimalla voidaan kasvattaa säteilyintensiteettiä säilyttäen spektrin. Standardissa määritellään kolme eri laatuluokkaa tehojakaumalle: A, B ja C. Luokat määräytyvät säteilyvoimakkuuden aallonpituusalueiden toleranssien mukaan. Standardissa määritellään kokonaisuudessaan kolme merkitsevää laatuparametriä auinkosimulaattorille. Ensimmäinen näistä on erikseen mainittu spektrin jakauma, toinen on mittausalustalle saapuvan valon yhdenmukaisuuden toleranssi ja kolmas on valolähteen ajallisen epävakauden toleranssi.

Taulukko 1. Standardin mukainen tehojakauma [16].

IEC Airmass 1.5 Spectra Contributions							
λ [nm]	ASTM % of total irradiance	Limits for class A		Limits for class B		Limits for class C	
		Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper
400-500	18,4	13,8	23,0	11,0	25,8	7,4	36,8
500-600	19,9	14,9	24,9	11,9	27,9	8,0	39,8
600-700	18,4	13,8	23,0	11,0	25,8	7,4	36,8
700-800	14,9	11,2	18,6	8,9	20,9	6,0	29,8
800-900	12,5	9,4	15,6	7,5	17,5	5,0	25,0
900-1100	15,9	11,9	19,9	9,5	22,3	6,4	31,8

Aurinkosimulaattorin tilaaja antoi lisävaatimukseksi valon lähtökulman, tämän täytyi olla $\pm 5^\circ$ FWHM (full width at half maximum) tai pienempi [17]. Puoliarvoveveys eli FWHM, käytännössä tarkoittaa, että valonlähde vaatii linssit, jotta valon lähtökulma olisi 10° , FWHM kuvassa 8. Toinen vaatimus oli linssin tehokkuus $\geq 80\%$.



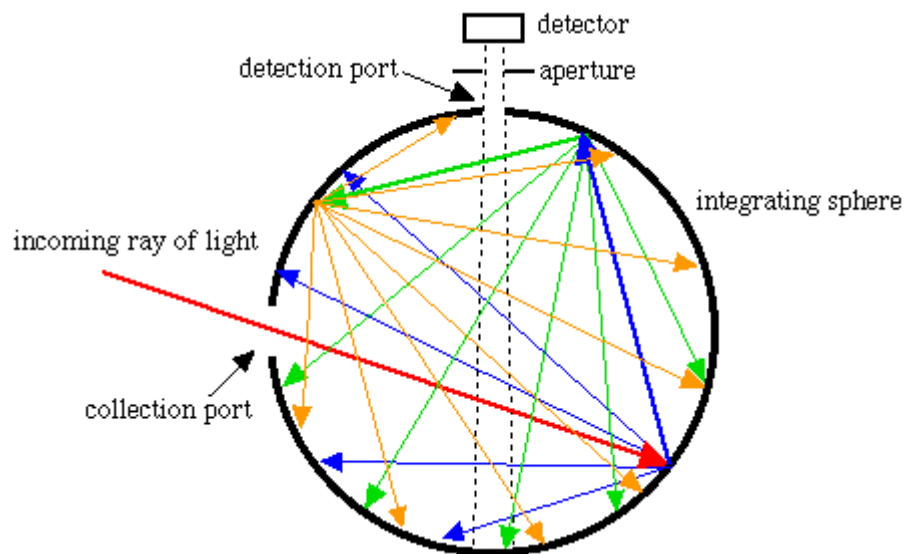
Kuva 8. Puoliarvoveveys [17].

Puoliarvoveveys tarkoittaa välimatkaa kahden sellaisen pisteen x_1 ja x_2 välillä, jotka sijaitsevat funktion $f(x)$ maksimiarvon vastakkaisilla puolilla ja ovat kohdassa, jossa funktion $f(x)$ arvo on puolet maksimiarvostaan, tässä optisessa tapauksessa säteilyintensiteetin täytyy olla puolet maksimiarvostaan $\pm 5^\circ$ kohdalla. Linssin tehokkuudella tarkoitetaan linssin yleistä hyötysuhdetta eli sitä, kuinka suuri osa linssiin osuvasta valosta ohjautuu linssistä läpi. Käytetyn linssin tehokkuus on 91 % [18] [19].

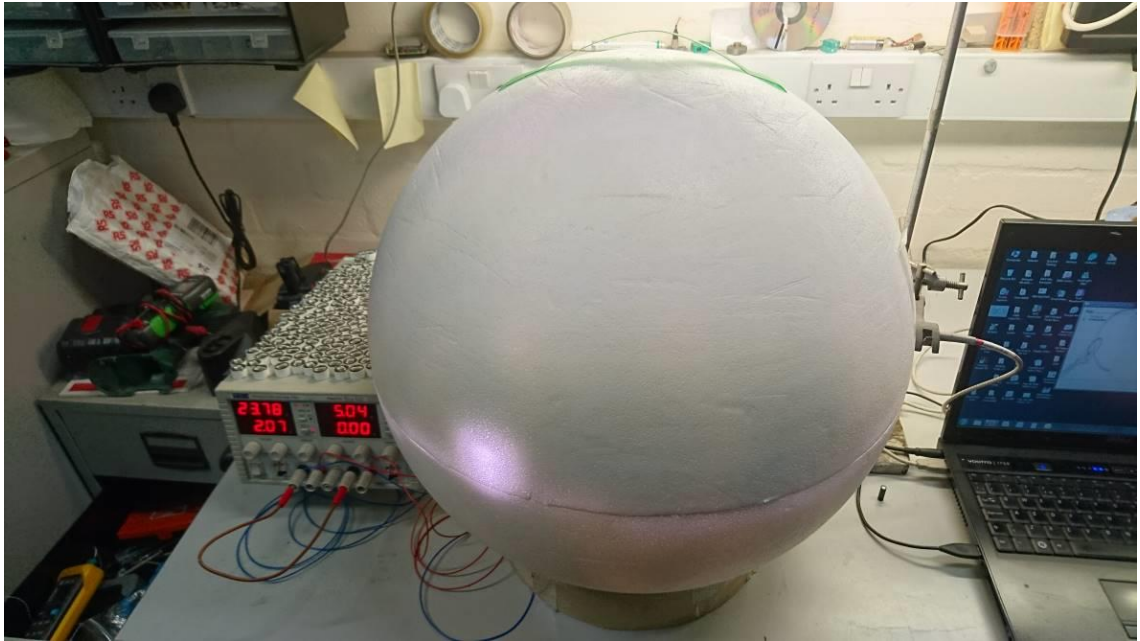
3.2 Mittaus ja analyysi

Kaikki LED valmistajat eivät ilmoittaneet säteilyvoimakkuuden spektriä teknisissä tiedoissa, tästä johtuen kaikkien yksittäisten LED:ien säteily-spektrit täytyi mitata. Yritykseen tilattiin noin 30 erilaista LED:iä pieninä koe-erinä, niiden säteilyvoimakkuus mitattiin samoissa olosuhteissa johdonmukaisen mittaus-datan varmistamiseksi. Mittaustiedot tallennettiin Oceanview -nimisellä ohjelmalla, jota käytettiin HR2000+ -

spektrometrin kanssa [20]. Spektrin pitempien aallonpituuksien alue saturoitui helposti laitteen aiheuttamasta kohinasta. Tästä johtuen jouduimme laskelmallisesti nollaamaan negatiiviset arvot ja nollaamaan 1100 nm jälkeiset arvot kokonaan, tämä näkyy kuvaajassa kuvassa 17. Suunnittelun kannalta tämä ei aiheuttanut ongelmia, koska IEC BS EN 60904-9_2007 -standardissa merkitsevän kaistan yläraja on 1100 nm. Mittausdatan analyysiin käytettiin Microsoft Exceliä. Yksittäisiä LED:ejä mitattiin kohtisuoraan osoittavalla valoanturilla samanlaisissa olosuhteissa. Kokonaisspektrin tutkimiseen käytettiin sovellettua valon integrointipalloa, näkyvillä kuvissa 9 ja 10. Integrointipallon tarkoitus on sekoittaa valoa mahdollisimman paljon ennen kuin se osuu ilmaisimeen. Tätä sovellusta hyödyntäen spektrometri ei saturoidu tietyillä aallonpituuksilla ja ilmaisimeen osuva valo ilmaisee säteilyvoimakkuuden jakauman tarkasti [21]. Kustannussyistä sovellettu integrointipallo vaikutti absorboivan enemmän pitempiä aallonpituuksia, tämä johtui ilmeisesti käytetyistä materiaaleista ja maaleista. Toinen mahdollinen pitempien aallonpituuksien vaimennuksen lähde saattoi olla käytetty linssi. Linssien datalehdessä mainittiin vaimennus, mutta sen määrää ei mainittu erilaisilla aallonpituuksilla tarkasti. Tästä johtuen kokonaisspektriä jouduttiin myös mittaamaan mahdollisimman matalalla teholla kohtisuoralla mittauksella spektrin varmistamiseksi.



Kuva 9. Integrointipallon toimintaperiaate [22].

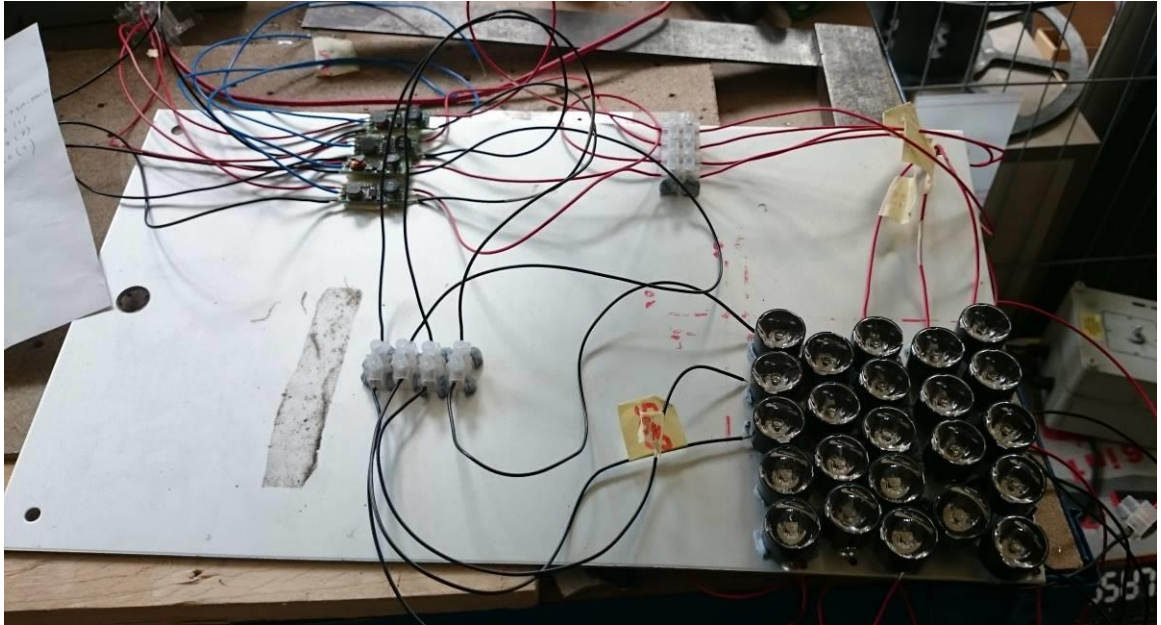


Kuva 10. Integrointipallo laboratoriossa.

Pallon oikeassa reunassa näkyy optinen valokuitu anturi, joka syöttää valon spektrometriin. Valon lähde on pallon pohjalla.

3.3 Prototyypin kehittäminen

Tässä opinnäytetyössä suunnitellussa prototyypilevyssä käytettiin Osram Dragon sarjan teholedejä [23]. Yksittäisten LED:ien spektrit mitattiin, mittaustulokset yhdistettiin laskelmallisesti Excelissä ja kokonais-spektri todettiin sopivaksi. Tämän jälkeen täytyi toteuttaa ensimmäinen fyysinen prototyypilevy. Linsseiksi valittiin suomalaisvalmisteinen Ledil Osram Dragon LO2 -RS -linssi. LED:eistä haluttiin saada mahdollisimman paljon valoa, joten lopulliseen LED-rykelmään valittiin vain 1 A tehoLED:it. Tämä helpotti piirisuunnittelua huomattavasti sekä mahdollisti maksimaalisen valotehon. Protolevy koostui neljästä LED-sarjasta, joiden summajännite olisi maksimissaan 24V. Jokaista LED-sarjaa ohjaa LED-ajuriipiiri, joka pitää virran 1:ssä A:ssa. Protolevyllä käytettiin kalliimpia, mutta helppokäyttöisempiä ajureita, jotka näkyvät kuvassa 11. Ajurien toimintajännite on 12 – 36 V ja ne syöttävät LED:eille 0 – 1 A virtaa riippuen ohjausjännitteestä, joka maksimoitiin 0 V jännitteellä. Johdoksi valittiin 0,5 mm² johto, jonka nimellisvirta on 3 A, jossa oikeasti kulkee maksimissaan 1 A:n virta.



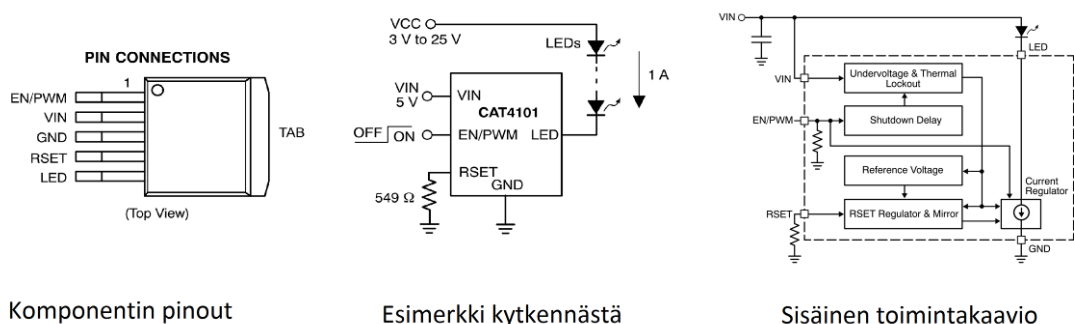
Kuva 11. Prototyypilevy rykelmästä.

Prototyypilevyllä LED:it asennettiin alumiinilevyille mittausten helpottamiseksi sekä lämmönpoiston parantamiseksi. Jokaisen sarjan LED:it valittiin sillä tavalla, että sarjan summajännite ei ylittäisi 24 V. Rykelmän spektri mitattiin eri keinoin tulosten varmistamiseksi. Teoreettisen ja käytännön spektrien välille tuli eroja, joiden syitä ei alkuun ymmärretty. Teoriassa spektri oli lähes täydellinen, mutta käytännön spektrissä esiintyi vaimennusta pitkillä aallonpituuksilla. Erilaisia mittausten menetelmiä käyttämällä selvitettiin itse tehdyn integrointipallon haittapuolet. Tärkein näistä oli pitempien aallonpituuksien absorptio pallossa, joka väärästi mittaustuloksia. Pallon heijastavuutta pyrittiin kontrolloimaan matta-valkoisella värillä, tämä väri vaikutti ilmeisesti eniten absorptioon. Oikeassa integrointipallossa käytetään polytetrafluoroetyyleeniä, joka heijastaa 250 - 2 500 nm alueella melkoisen täydellisesti [24]. Yrityksessä valmistettu polystyreeni integrointipallo oli helppouden ja kustannuksen kannalta paras budjetti vaihtoehto. Oikea integrointipallo maksaa noin 1 000 € mutta yrityksessä tehty sovellus maksoi noin 80 €.

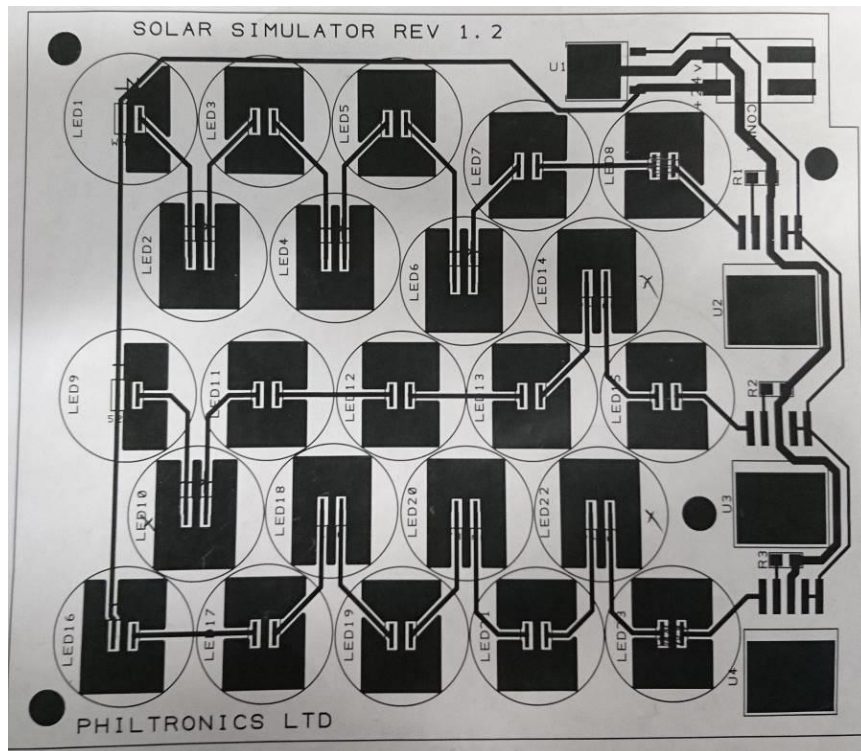
3.4 Valolähteen kehittäminen

Prototyypilevyn testauksen jälkeen jouduttiin tekemään viimeiset muutokset ja korjaukset valolähteen suhteen. Hyvän spektraalisen tuloksen saavutettua otettiin yhteyttä Philtronics -nimiseen paikalliseen elektroniikkatuotanto yhtiöön, jolta pyydettiin

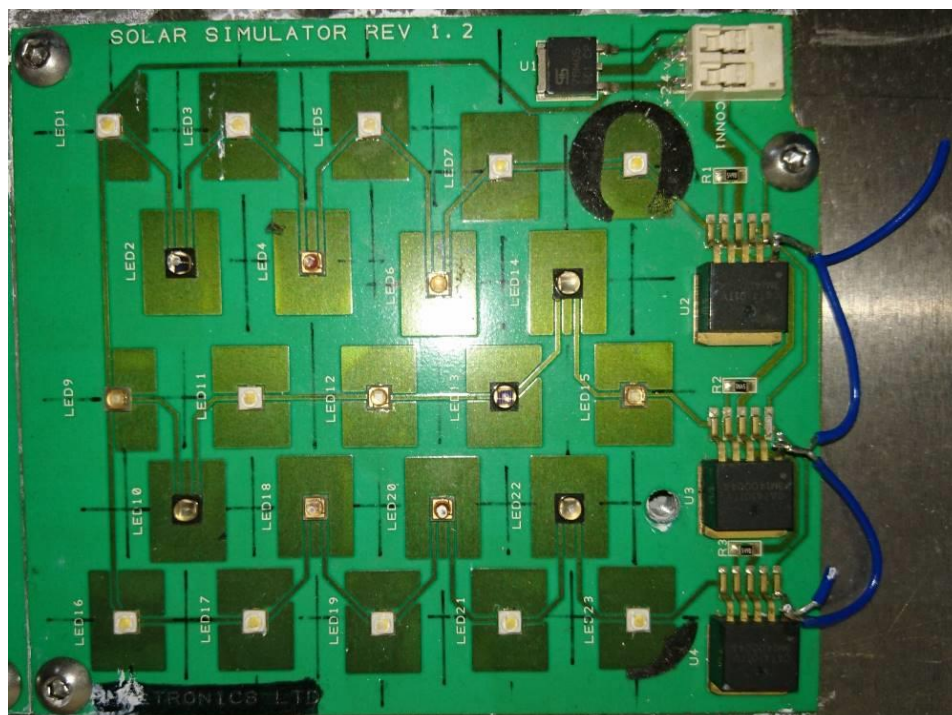
tarjous 35 rykelmän piirilevyn valmistukseen. Philtronics tarjosi ehdotuksia ja korjauksia piirilevyyn, jotka vähensivät tuottamiskustannuksia huomattavasti. Neljä LED -sarjaa vaihdettiin kolmeksi sarjaksi. LED-ajurit vaihdettiin piirilevy-komponenteiksi, joiden virta säädettiin yhdellä pintaliitosvastuksella, kytkentäkaavio kuvassa 12. Kuvassa 13 ylin musta komponentti U1 on 5V jänniteregulaattori, joka toimii LED-ajurien ohjausjännitteenä ja kolme oikeanpuoleista komponenttia U2, U3 ja U4 ovat LED-ajureita. LED-ajureiden yläpuolella näkyvät R1, R2 ja R3 jotka ovat 549 Ω :n pintaliitosvastuksia. Datalehden mukaisesti käyttäen 549 ohmin vastusta RSET pinnissä LED-ajurin sisäinen virtapeili toimii 1 A virralla. RSET pinnissä on datalehden mukaan 1,2 V, tästä nastasta menevä virta vahvistetaan sisäisesti noin 400 -kertaisesti LED:ien ohjausvirraksi. Kuvassa 14 näkyy Philtronicsin tuottama piiri, piirin oikeassa reunassa näkyvät siniset johdot ovat kokeellisia LED-ajurien ohjausjohtoja. LED-ajureita voidaan ohjata erillisellä 5 V:n PWM -signaalilla. Pulssinleveysmodulaatio tuotettiin Arduinolla ja todettiin, että PWM ei tule olemaan kirkkauden säätömenetelmä, koska PWM signaali näkyy mittausjärjestelmän vastaanottopäässä. Pulssinleveysmodulaation käyttö olisi vaatinut ehdon, että lyhyimmän pulssin kesto pitäisi olla pitempi kuin aurinkokennoa kuormittavan elektronikan pyyhkäisy aika oikosulku tilasta avoimen piirin jännitteeseen [3]. Tästä menetelmästä luovuttiin ja nämä kontaktit kytkettiin 5V tasajännite regulaattoriin, tämä jännitetaso EN/PWM-nastassa ohjaa ajuria täydelle teholle. Tilaaja asetti simulaattorin vaatimukseksi myös mittausalustan lämmönsäädön sekä alustan kulman säädön 0 - 90°. Nämä tulittiin toteuttamaan vesijäähdytys järjestelmällä sekä kiinnittämällä alustan pyörítettävään akseliin, jossa näkyy alustan kulman ero kohtisuoraan valolähteeseen nähden. Nämä ongelmat ratkaistiin simulaattorin rungon suunnittelussa.



Kuva 12. CAT4101 LED-ajuri [25].

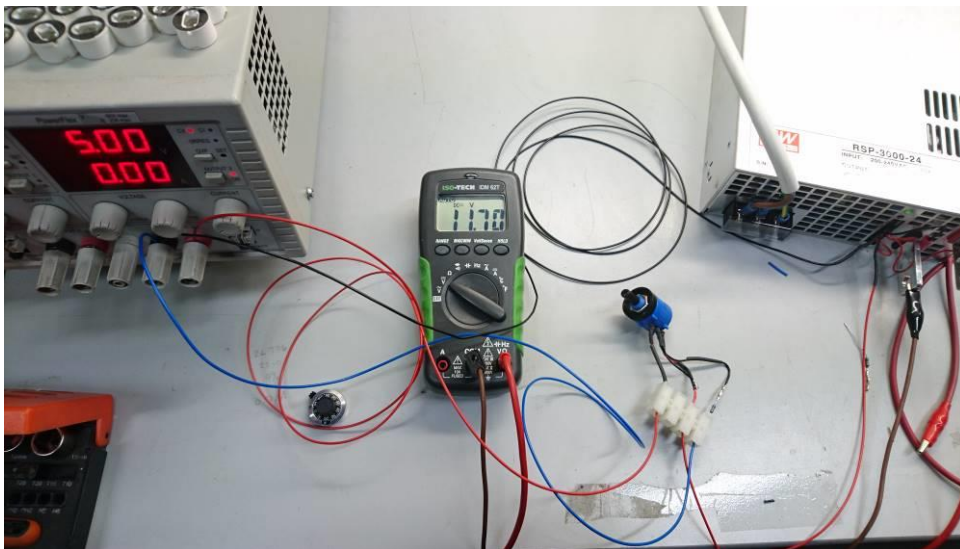


Kuva 13. Philtronics -levy versio 1.2 kaavio.

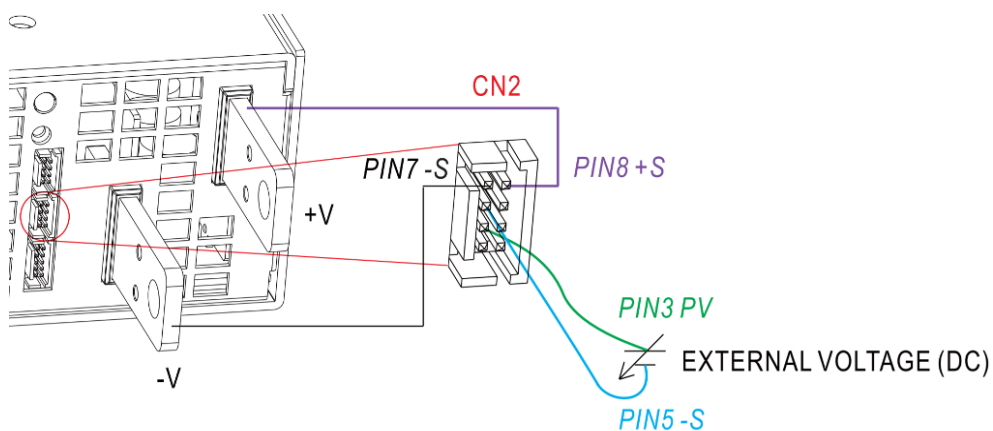


Kuva 14. Philtronicsin tuottama levy versio 1.2.

PWM aiheutti ongelmia referenssi-kennojen jännitelukemissa. Tästä johtuen pyrittiin päästä analogiseen ratkaisuun, ohjaamaan säteilyintensiteettiä tasajännitteellä. Ongelman ratkaisemiseksi olisimme joutuneet vaihtamaan 3 x 35 LED-ajuria kalliimpiin tasajännite-ohjattaviin malleihin, jotka olisivat aiheuttaneet lisäkustannuksia, ongelmia piirilevyllä ja lisätyötä. Lopulta intensiteetin säätöön valittiin syöttöjännitteen ohjaus. Käytössä oleva Meanwell RSP- 3000W 24 V 125 A teholähde mahdollistaa lähtöjännitteen ohjauksen ulkoisella 5 V tasajännitetasolla. Tämä mahdollisti erittäin helpon loppuratkaisun säteilyintensiteetin ohjaukseen. Tehdasasetuksien mukaisesti teholähde oli säädetty vakiona 24 V jännitteeseen. Ulkoisen jännitteen ohjausasetus saavutettiin teholähteen CN2:n jumpperimuutoksilla. Ulkoisen ohjausjännitteen säätö näkyy kuvissa 15 ja 16.

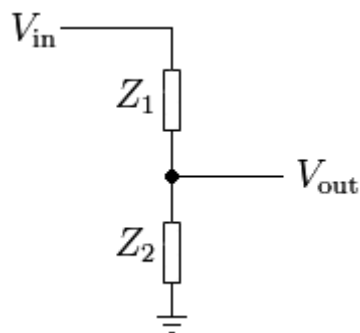


Kuva 15. Teholähteen säätö potentiometrillä.

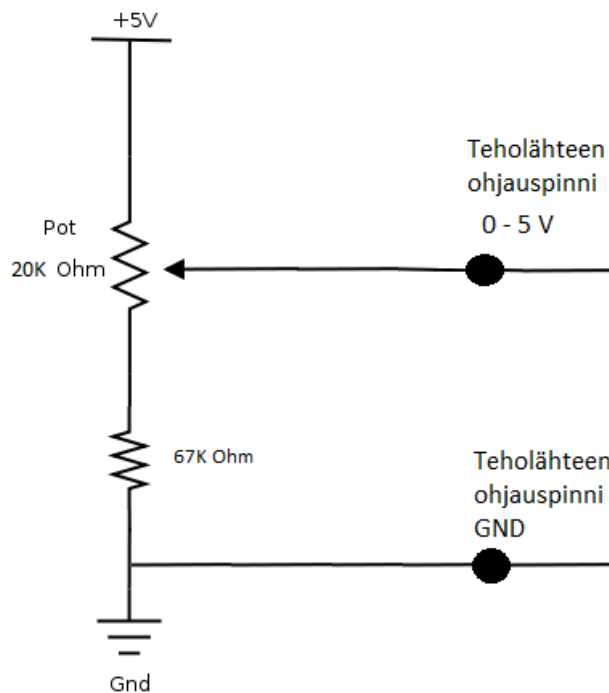


Kuva 16. Teholähteen CN2 jumpperi [26].

Ohjaujännite toteutettiin 5V tasasuuntajalla, johon kytkettiin jännitteenjako potentiometrillä. Potentiometriksi valittiin 20 K ohmin kymmenen kierroksen tarkkuuspotti. Potentiometrin sarjaan kytkettiin 67 K ohmin vastus, jotta teholähteen lähtöjännitettä ei lasketa alle 18 V, jolloin rykelmän kokonaisvirta on noin 0,7 A joka on sen alin toimintavirta. Laskutoimitus ohjaujännitteestä on seuraava $\frac{67k}{20k+67k} * 5V = 3,85V$. Kuvassa 17 näkyy jännitteenjako ja kuvassa 18 potentiometrin kytkentä. Järjestelmän syöttöjännitteen ohjausta suunniteltaessa täytyy huomioida kestääkö komponentit alijännitettä. Suurin osa käytetyistä komponenteista LED-rykelmä levyllä toimii alueella 10 - 28 V, joten käytetty 18 – 24 V ei aiheuta ongelmia.

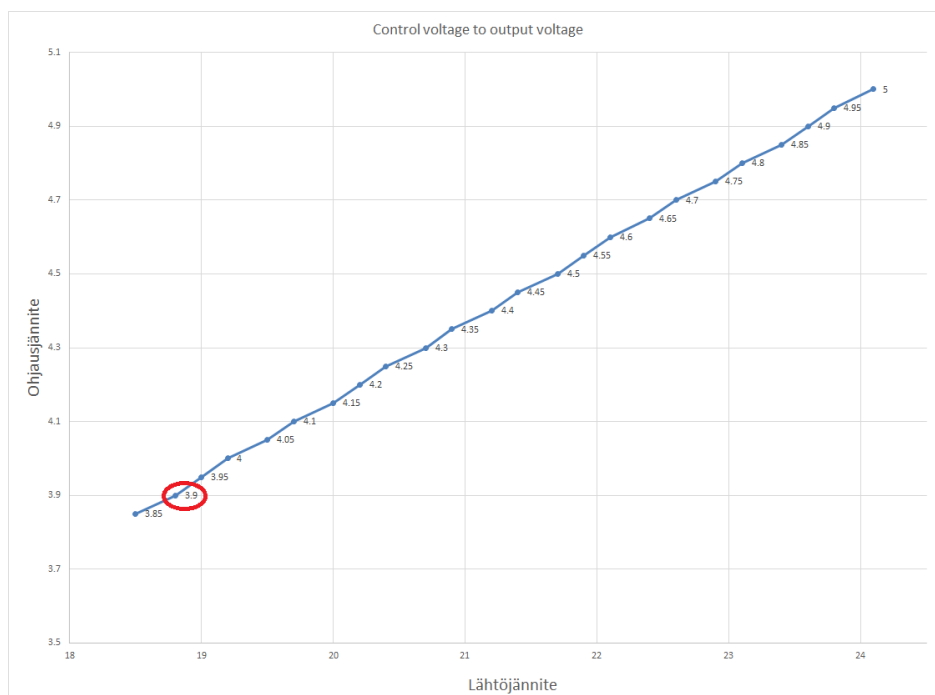


Kuva 17. Jännitteenjaon periaate.

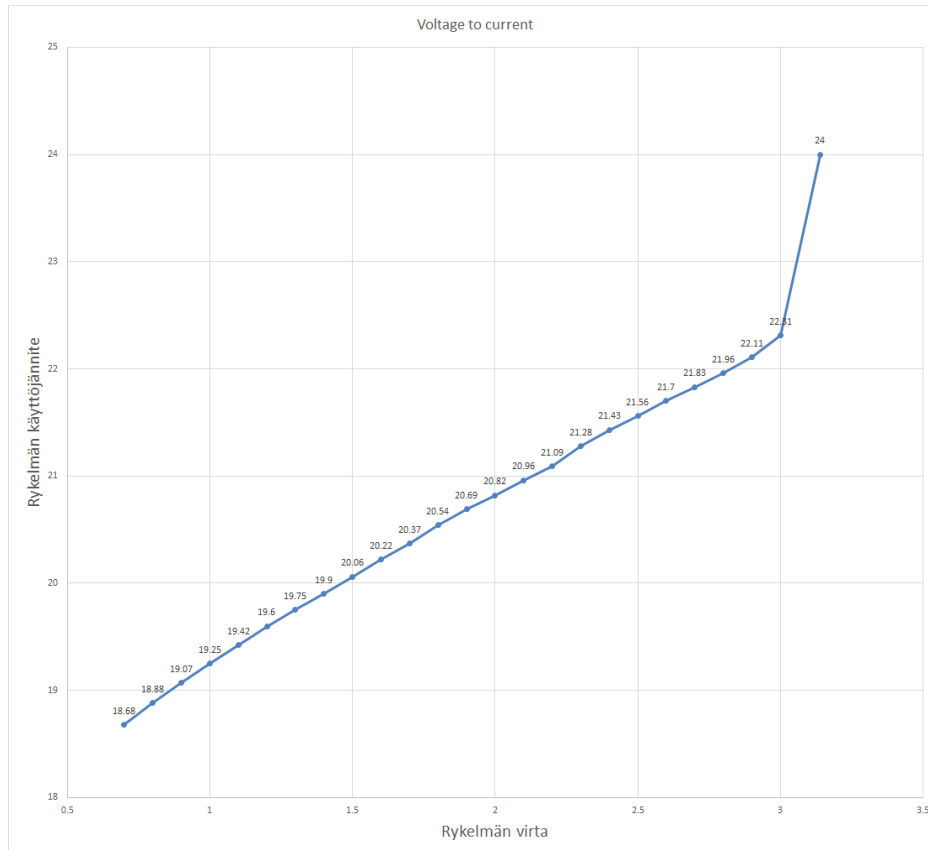


Kuva 18. Potentiometrin kytkentä.

Teholähteen teknisissä tiedoissa mainittiin 0 – 5 V ohjausjännitteen ja lähtöjännitteen välille epälineaarinen korrelaatio. Mutta mittaamalla eri ohjausjännitteiden lähtöjännitteet, saatiin kuvan 19 mukainen lineaarinen suhde. LED:ien kirkkaus on lähes lineaarinen käyttövirran suhteen. Sen tähden pyrittiin vähentämään LED:ien maksimi-intensiteettiä noin 40 % vähentämällä virtaa noin 40 %. Käyttöjännitteen ja käyttövirran suhde ei ole täysin lineaarinen, tästä johtuen mitattiin rykelmän virrat eri käyttöjännitepisteissä, tämä näkyy kuvassa 20. Olennainen piste kuvassa 19 on 3,9 V ohjausjännite, jolloin teholähteen lähtöjännite on 18 V.

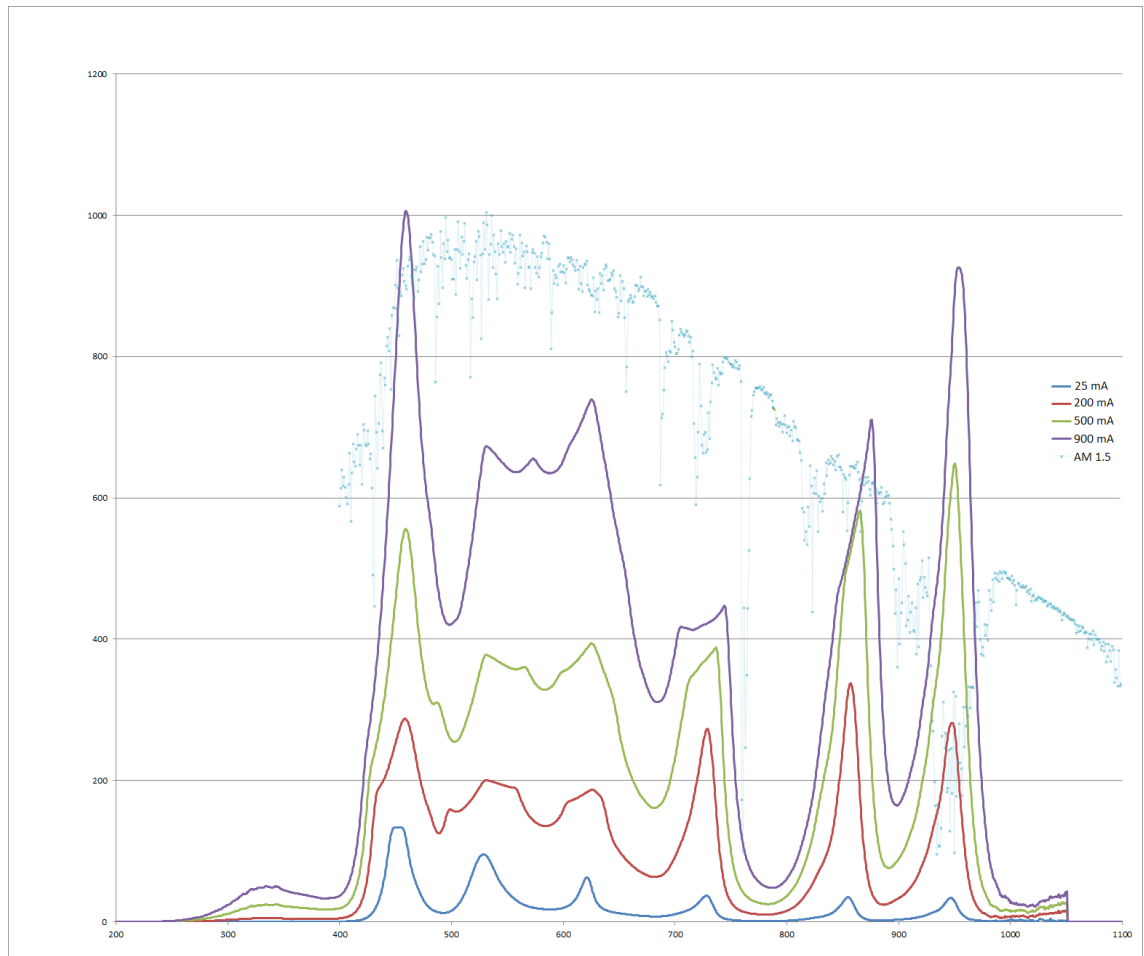


Kuva 19. Ohjausjännitteen ja lähtöjännitteen suhde teholähteessä.



Kuva 20. Rykelmän jännitteen ja virran suhde.

Yksi mahdollinen riski syöttöjännitteen muutoksessa olisi spektrin muutos LED:ien käyttöjännitteiden muutosten takia. Tämän takia jouduttiin mittaamaan rykelmien spektrit erilaisilla syöttöjännite tasoilla. Onneksi LED:ien spektrit pysyivät melkoisen samana ja säteilyintensiteetti laski lineaarisesti kuvan 21 mukaisesti. Lopullinen säteilyvoimakkuus olikin odotettua suurempi. Laskelmallisesti tarkistettuna rykelmän maksimi suorituskyky olisi ollut noin 0,7 auringon tehoa mittausalustalla mitattuna. Referenssi-kennojen avulla mitattuna säteilyvoimakkuus olikin maksimissaan noin 1,4 - 2 aurinkoa. Tämä varmistaa lopullisen simulaattorin suorituskyvyn, jonka täytyy olla AM 1.5 mukaisesti vähintään 1 auringon teho eli $1000 \frac{\text{wattia}}{\text{m}^2}$. Kuvassa 21 näkyy myös AM 1.5 mukainen säteilyspektri vaalean sinisellä.

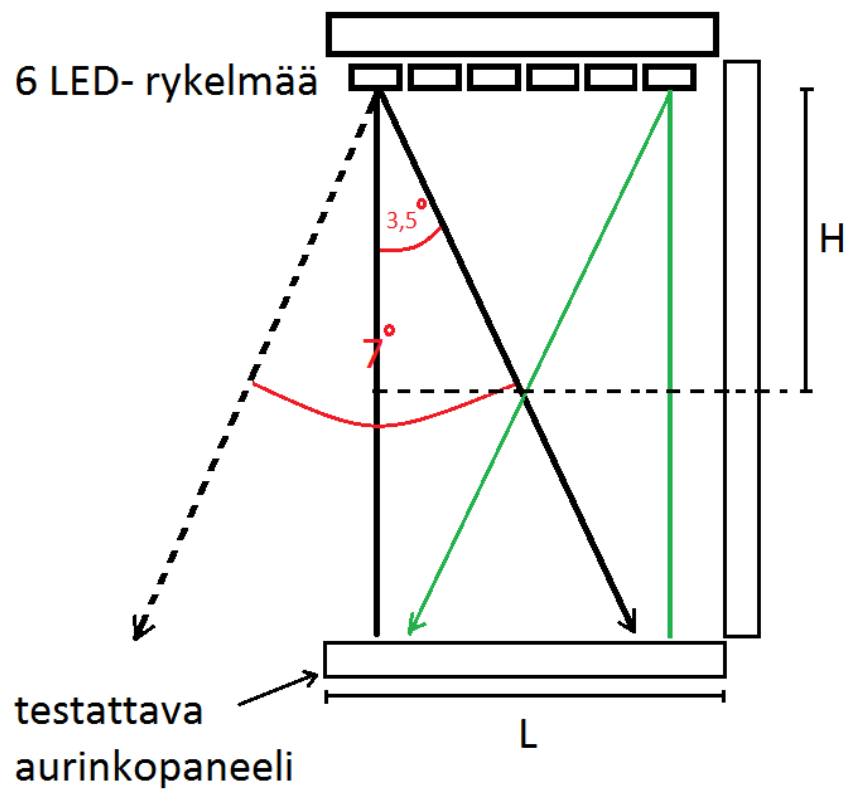


Kuva 21. HR2000 + spektrometrillä mitattuna rykelmän spektrit erilaisilla virroilla.

Valolähteen suunnittelun jälkeen täytyy suunnitella ja rakentaa runko, jäähdytys ja kotelointi. Ensimmäisenä parametrinä täytyi suunnitella rungon mitat, tämä onnistui vasta kun laskettiin valon sekoituskorkeus H , kuvassa 23. Kuvassa L mitta annettiin tilaajan mukaisesti 400×400 mm, joten $L = 40$ cm. Voidaan nyt laskea $H = \frac{40}{\tan(3,5^\circ)} = 326$ cm. Kyseinen luku on toteutuksen kannalta epäkäytännöllinen, tätä kompensoitiin reunaheijastimilla, jotta valo saataisiin sekoittumaan aikaisemmin. Lopullinen korkeus, johon päädyttiin oli 520 mm. Valon jakautumaa mitattiin lopullisella simulaattorilla ja suurimmat erot säteilyvoimakkuudessa esiintyivät mittausalustan reuna-alueilla, tästä johtuen mittausalustaan asetettiin rajoittimet. Mittausalustan rajoittimet näkyvät kuvassa 22.

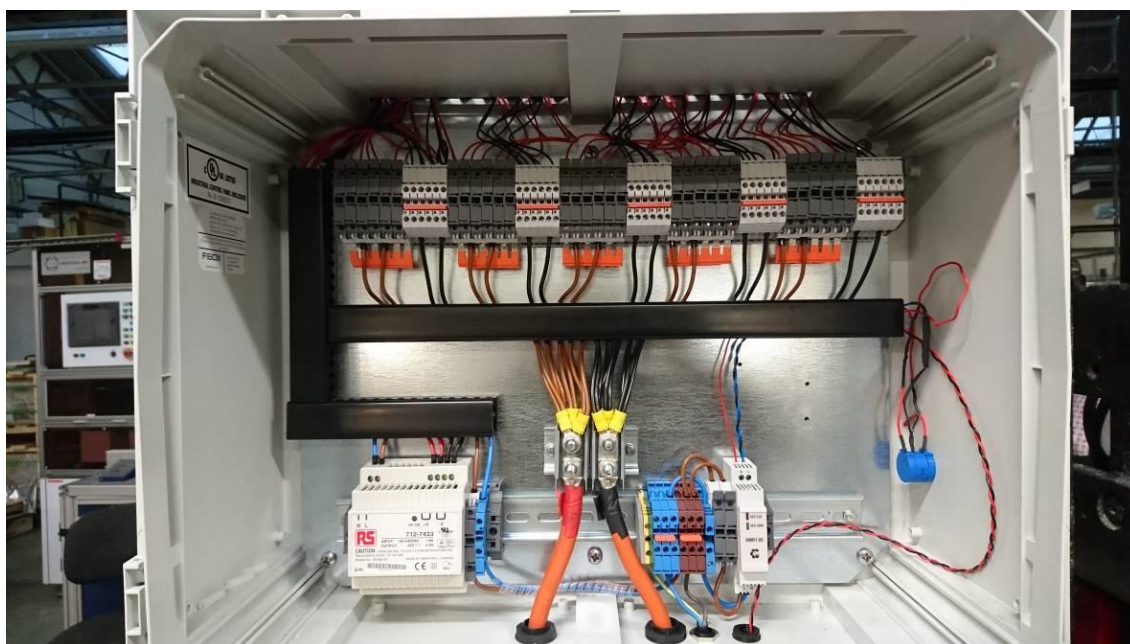


Kuva 22. Mittausalustan rajoittimet.



Kuva 23. Valon sekoituskorkeus.

Koska koko simulaattori koostuu 30:stä LED-rykelmästä, se tuottaa myös huomattavan määrän lämpöä. Tämä oli yksi syy, miksi rykelmän pohjalevy on 4 mm paksua alumiinia. Nämä levyt kiinnitettiin pulteilla suurempaan alumiiniseen jäähdytyslementtiin, näkyvillä kuvassa 29 vasemmalla laatikon päällä. Levyjen ja jäähdytyslementin väliin laitettiin lämpötahnaa. Suurempaa jäähdytyslementtiä jäähdyttää molemmin puolin 6 x 24 V:n puhallinta eli yhteensä 12 puhallinta. Puhaltimien tehollähteenä käytetään erillistä 24 V tasasuuntajaa. Kuvassa 24 näkyy valolähteen sähköistys, suojasulakkeet sekä tasasuuntauslaitteet.

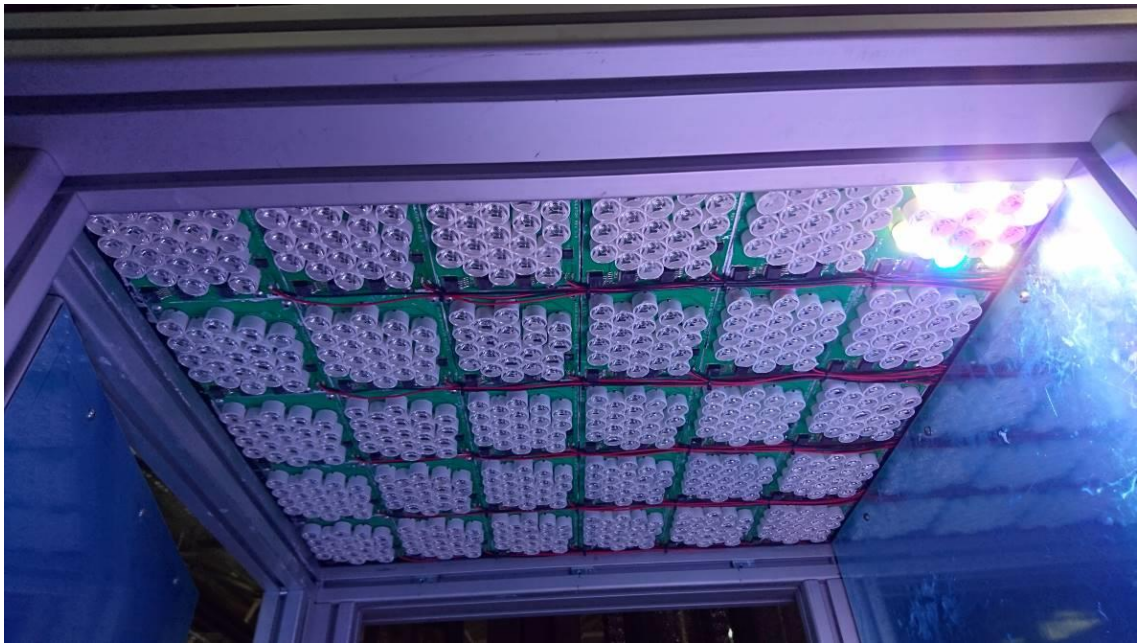


Kuva 24. Simulaattorin sähköistys.

Kuvan vasemmassa alakulmassa näkyy 24 V:n tasasuuntaja, oikealla alareunassa sijaitsee 5 V tasasuuntaja ja siitä oikealla sivuseinässä näkyy sininen potentiometri. Tasasuuntajasta vasemmalla on tasasuuntajan vaihtovirta sulake. Ylempänä mustissa koteloidissa näkyy 5 x 6 kappaletta 4 A tasavirta suojasulakkeita jokaiselle LED rykelmälle. Keskellä näkyvät mustalla ja punaisella teipillä merkityt paksut johdot ovat tehollähteen 18 – 24 V, 50 – 90 A lähtöjä. Koteloinnin suunnitteli ja toteutti osittain firman tekninen johtaja Peter Bookless.

3.5 Simulaattorin koeajo

Simulaattorin kokoonpanon jälkeen jouduttiin testaamaan kaikki rykelmät, valoteho ja toimintakestävyys. Kuvissa 25 ja 26 näkyy yksittäisten rykelmien ja rivien toimintatestaus. Aurinkosimulaattoria tullaan käyttämään testausjärjestelmäkokonaisuudessa johon kuuluu myös vesikäyttöinen jäähdytysjärjestelmä (kuvissa 27 ja 28), tietokone ja BK Precision 8500 ohjemoitava tasavirta kuorma, näkyvillä kuvassa 29.



Kuva 25. Yksittäisen rykelmän toimintatestaus.



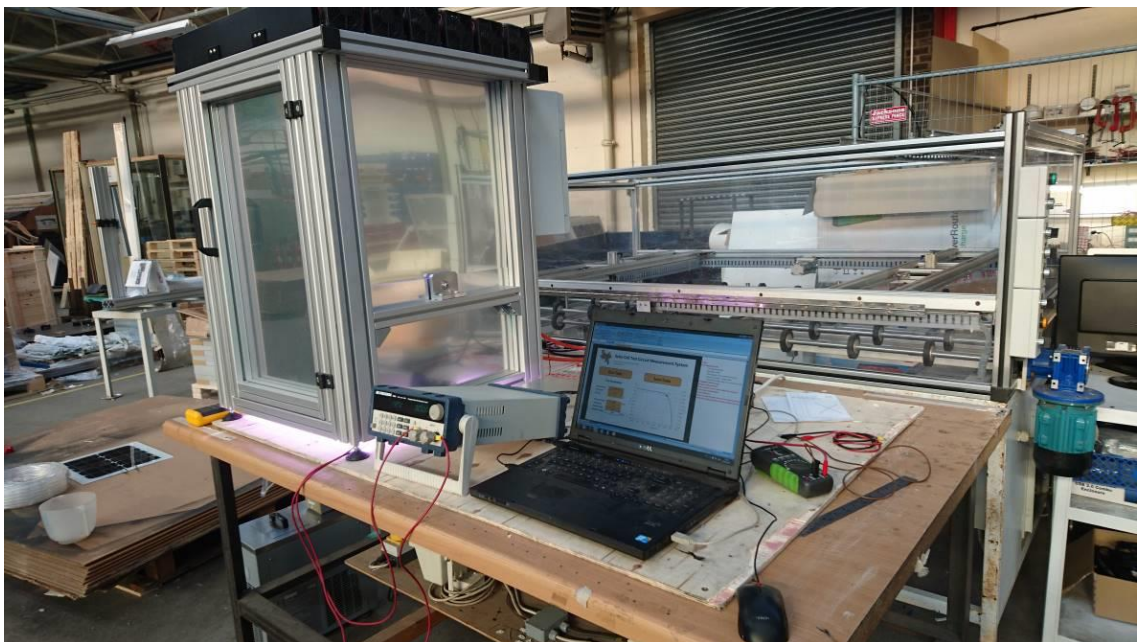
Kuva 26. Yhden rykelmäryhmän toimintatestaus.



Kuva 27. Jäähdytysputkisto mittausalustassa.



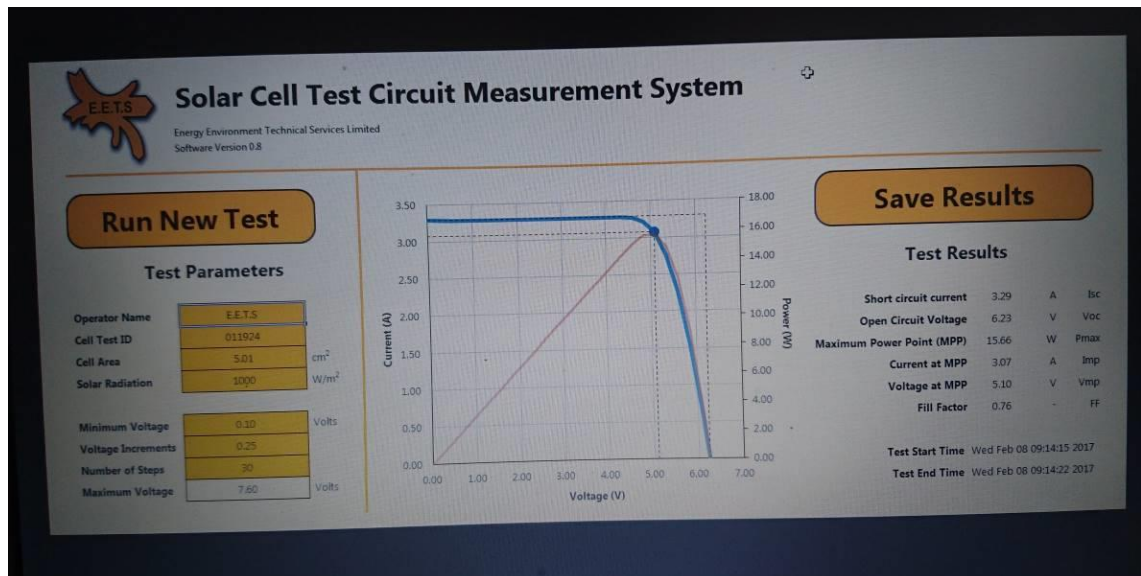
Kuva 28. Jäähdytyslaitteisto.



Kuva 29. Testausjärjestelmä kokonaisuutena.

3.6 Testausohjelmisto ja lopullinen tehojakauma

Testausohjelmisto toteuttiin yhteistyössä firman kanssa samassa talossa toimivan aurinkolämpö-tekniikkaa tutkivan henkilön kanssa. Ohjelma tehtiin Visual Basic ohjelmointikielillä ja käyttöympäristöksi valittiin Microsoft Excel. Visual Basic osuudessa määritettiin tietokoneen COM porttien asetukset, siirtonopeus (baudrate) ja kuorman toimintaosuudet. Tietokoneen ja säätökuorman välillä on USB-to-RS-232 adapteri jolla kuormaa ohjataan. Säätökuorma pyyhkäisee aurinkokennon toiminta-alueen oikosulusta avoimen piirin tilaan ja tallentaa jännitteen ja virran pisteet, jonka jälkeen ne esitetään graafisesti I-U käyränä. Erään kennon jännitteen ja virran käyrä näkyy kuvassa 30. Simulaattorin lopullinen spektri mitattiin ja mittausdatan perusteella verrattiin tehospektriä AM 1.5 jakaumaan. Lopullinen jakauma näkyy taulukossa 2.



Kuva 30. Aurinkokennon I-U käyrä testausohjelmassa.

Taulukko 2. Lopullisen valolähteen spektri.

				IEC Airmass 1.5 Spectra Contributions							
				ASTM	Limits for class A		Limits for class B		Limits for class C		
				% of tot	Lower	Upper	Lower	Upper	Lower	Upper	
Total	301417										
Total 400-1100	290914										
<400nm	10503	% of total	Class								
400-500nm	67703	23.3	B	400-500	18.4	13.8	23.0	11.0	25.8	7.4	36.8
500-600nm	30459	10.5	C	500-600	19.9	14.9	24.9	11.9	27.9	8.0	39.8
600-700nm	27909	9.6	C	600-700	18.4	13.8	23.0	11.0	25.8	7.4	36.8
700-800nm	33620	11.6	A	700-800	14.9	11.2	18.6	8.9	20.9	6.0	29.8
800-900nm	53583	18.4	C	800-900	12.5	9.4	15.6	7.5	17.5	5.0	25.0
900-1100+nm	77639	26.7	C	900-110	15.9	11.9	19.9	9.5	22.3	6.4	31.8
>1100nm	0										

4 POHDINTAA

2015 kevään harjoittelun loputtua jouduin palaamaan Suomeen, en kerinnyt mittaamaan prototyypin 1.2 spektriä. Tästä johtuen tutkimus- ja mittaustyö siirtyi kollegoilleni. He eivät olleet niin perehtyneitä kaikkiin syvempiin teknisiin yksityiskohtiin, ja he mittasivat versio 1.2 rykelmän spektrin integrointipallolla. Kuten edellä mainittu, sovelletulla integrointipallolla oli ongelmia heijastaa korkeampia aallonpituuksia. Tämä vääristi spektriä ja kollegani päättivät muuttaa LED:ien suhdetta, poistamalla alempia aallonpituuksia ja lisäämällä korkeampia aallonpituuksia. Palattuani Walesiin, 35 levyä oli jo tilattu uudella suhteella. Mittasin nämä uudestaan erilaisilla menetelmillä ja varmistin spektrin myös teoreettisesti. Tuloksena oli hieman vääränlainen spektri, liikaa tehoa esiintyi korkeilla aallonpituuksilla. Lopullinen spektri olisi voinut olla parempi. Kustannussyistä nämä levyt päätettiin silti hyödyntää ja asentaa aurinkosimulaattoriin.

Toinen parannusehdotus olisi käyttää tasajännite ohjattavia LED-ajureita, joita pystyttäisiin ohjaamaan yksitellen mikrokontrollerilla. Kolmas parannusehdotus olisi spektrin säätö mikrokontrollerilla, käytännössä tämä olisi toteutettu paremmin harkituilla LED:sarjoilla, jolloin yksittäisten sarjojen tehon säätö vaikuttaisi spektriin halutulla tavalla. Kaiken tämän ohella laite toimi kuten pitää, simulaattorilla pystytään tekemään mittauksia tuotekehitykseen. Mittausolosuhteita pystytään hyvin säätämään ja muokkamaan, jolloin saadaan johdonmukaisia tuloksia.

5 YHTEENVETO

Tässä työssä suunniteltiin ja toteutettiin LED-aurinkosimulaattori aurinkopaneelien testaustarkoitukseen. Aurinkosimulaattorille asetettiin standardien mukaiset vaatimukset sekä erilliset runkoon ja mittausalustaan liittyvät vaatimukset tilaajan puolesta. Simulaattorin valmistamiseksi tehtiin tutkimustyötä, suoritettiin spektroskopiaa, kerättiin ja analysoitiin mittausdataa, valmistettiin prototyyppi ja todettiin lopullisen tuotteen toimivuus.

Aurinkosimulaattorin kehittäminen oli erittäin haastellista sekä antoisaa. Työn aikana perehdyttiin valosähköisen ilmiön fysiikkaan ja erilaisiin valoteknisiin ongelmiin. Lopputuloksena saatiin keinotekoinen auringon spektrin läheinen valonlähde. Tätä valonlähdetä voidaan käyttää aurinkokennojen ja aurinkokennoihin lisättävien lisäpinnoitteiden suorituskyvyn testaamiseen.

Työnantajan toiveiden mukaisesti tässä työssä ei tarkasti kerrottu käytettyjen LED:ien malleja ja niiden suhdetta levyllä. Lopullisen aurinkosimulaattorin materiaalikustannukset jäivät työnantajan asettamiin rajoituksiin. Toisaalta työn loppuvaihe viivästyi noin vuoden, koska firmassa ei ollut ketään aktiivisesti suunnittelemassa lopullista jännitesäätöä ja kokoonpanoa. Tämä ei vaikuttanut tilaajan toimintaan, koska tilaajan oma tuotekehitys oli myös myöhässä. Tälle LED-simulaattorille kirjoitettiin myös englanninkielinen käyttöohje. Toteutetun aurinkosimulaattorin ohella suunniteltiin ja toteutettiin pienoisversio simulaattorista pienempien valosähköisten referenssikennojen testaukseen yrityksen omaan käyttöön. Pienoisversiolla mitataan yrityksessä tuotettujen referenssikennojen toimintaparametrit.

LÄHTEET

- [1] IHS Markit, Top Solar Power Industry Trends for 2015 [www-artikkeli], Saatavilla: https://www.ihs.com/pdf/Top-Solar-Power-Industry-Trends-for-2015_213963110915583632.pdf (luettu 13.2.2017)
- [2] International Journal of Photoenergy, "Construction of Tungsten Halogen, Pulsed LED, and Combined Tungsten Halogen-LED Solar Simulators for Solar Cell IV- Characterization and Electrical Parameters Determination", [www-artikkeli], saatavilla: <https://www.hindawi.com/journals/ijp/2012/527820/> (haettu 26.4.2017)
- [3] Abhay Mohan M.V, Student Member, IEEE, Jishnu Pavithran, Student Member, IEEE, K Lijo Osten, Jinumon A , Prof. C. P. Mrinalini, "LED Based Solar simulator", [www-artikkeli], saatavilla: http://www.ieee.org/education_careers/education/standards/led_based_solar_simulator_mohan_final_paper.pdf (haettu 25.4.2017)
- [4] Wacom Electric Co Ltd, "LED Solar Simulator", [www-katalogi], saatavilla: <http://www.wacom-ele.co.jp/en/products/solar/led/> (haettu 25.6.2015)
- [5] Newport Corporation, " VeraSol-2 LED Class AAA Solar Simulator", [www-katalogi], saatavilla: <https://www.newport.com/f/class-aaa-led-solar-simulators> (haettu 25.6.2015)
- [6] Wikipedia, "Valosähköinen ilmiö", [www-dokumentti], saatavilla: https://fi.wikipedia.org/wiki/Valos%C3%A4hk%C3%B6inen_ilmio (haettu 15.6.2015)
- [7] Q-Cells, "Monocrystalline panel", [www-datalehti] saatavilla: http://be.krannich-solar.com/fileadmin/content/data_sheets/solar_modules/Q.PEAK_BLK-G3_250-270_156-60_EN.pdf (haettu 12.6.2015)
- [8] PVPerformance, Single diode equivalent circuit models, [www-dokumentti], Saatavilla: <http://myelectrical.com/notes/entryid/225/photovoltaic-pv-electrical-calculations> (luettu 1.2.2017)
- [9] PVEducation, Solar cell spectral response, [www-artikkeli], Saatavilla: <http://www.pveducation.org/pvcdrom/solar-cell-operation/spectral-response> (luettu 26.1.2017)
- [10] PVPerformance, Spectral mismatch, [www-artikkeli], Saatavilla: <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-steps/2-dc-module-iv/effective-irradiance/spectral-mismatch/> (luettu 26.1.2017)
- [11] Wikipedia, „Black-body radiation“, [www-dokumentti], Saatavilla: https://en.wikipedia.org/wiki/Black-body_radiation (luettu 16.6.2015)
- [12] PV-Education, "Black-body radiation" [www-dokumentti] saatavilla: <http://pveducation.org/pvcdrom/properties-of-sunlight/blackbody-radiation> (haettu 16.6.2015)
- [13] Newport Corporation, „Introduction to solar radiation“, [www-artikkeli], Saatavilla: <https://www.newport.com/t/introduction-to-solar-radiation> (luettu 1.2.2017)
- [14] PV-Education, "Air mass" [www-dokumentti] saatavilla: <http://pveducation.org/pvcdrom/2-properties-sunlight/air-mass> (haettu 16.6.2015)
- [15] Wikipedia, "Air mass", [www-dokumentti], Saatavilla: [https://en.wikipedia.org/wiki/Air_mass_\(solar_energy\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Air_mass_(solar_energy)) (luettu 16.6.2015)
- [16] BSI-group, Online-kauppa, IEC BS EN 60904-9_2007 [standardi], Saatavilla: <http://shop.bsigroup.com/ProductDetail/?pid=00000000030153132> (luettu 13.6.2015, firma omistaa kopion dokumentista)

- [17] Wikipedia, „Puoliarvoleveys“, [www-artikkeli], Saatavilla: <https://fi.wikipedia.org/wiki/Puoliarvoleveys> (luettu 16.6.2015)
- [18] Ledil, „PLEXIGLAS 8N Molding Compound“, [www-datalehti], Saatavilla: <http://www.ledil.fi/sites/default/files/Documents/Technical/Material/PMMA%208N%20PLEXI-GLAS-Datasheet.pdf> (luettu 16.3.2017)
- [19] Wikipedia, ”Transmittance“, [www-artikkeli], saatavilla: <https://en.wikipedia.org/wiki/Transmittance> (haettu 15.6.2015)
- [20] OceanOptics Inc, „HR2000+ data sheet“, [www-datalehti], Saatavilla: <http://oceanoptics.com/wp-content/uploads/OEM-Data-Sheet-HR2000plus.pdf> (luettu 26.2.2017)
- [21] Wikipedia, „Integrating sphere“, [www-artikkeli], Saatavilla: https://en.wikipedia.org/wiki/Integrating_sphere (luettu 16.6.2015)
- [22] Oregon Graduate Institute, „Collection by aperture of integrating sphere“, [www-artikkeli], Saatavilla: http://omlc.org/education/ece532/class1/collect_intsphere.html (luettu 26.1.2017)
- [23] Osram semiconductors, ”Platinum dragon”, [www-datalehti] saatavilla: http://www.osram-os.com/Graphics/XPic8/00165204_0.pdf/Reliability%20of%20the%20DRAGON%20Product%20Family.pdf (haettu 12.6.2015)
- [24] Gamma Scientific, Integrating Spheres, [www-katalogi], Saatavilla: <http://www.http://gamma-sci.com/wp-content/uploads/2016/03/Integrating-Sphere-Data-Sheet-Gamma-Scientific.pdf> (luettu 26.2.2017)
- [25] On Semiconductor, CAT1401 datasheet, [datalehti], Saatavilla: http://www.onsemi.com/pub_link/Collateral/CAT4101-D.PDF (luettu 19.1.2017)
- [26] Meanwell, RSP– 3000 series, [datalehti], Saatavilla: <http://www.mouser.com/ds/2/260/RSP-3000-spec-795062.pdf> (luettu 26.1.2017)