

**Sami Hanhikorpi**

**AURINKOPANEELISIMULAATTORI**

**Opinnäytetyö  
CENTRIA-AMMATTIKORKEAKOULU  
Insinööri (AMK), sähkö- ja automaatiotekniikka  
Toukokuu 2024**



<b>Centria-ammattikorkeakoulu</b>	<b>Aika</b> Toukokuu 2024	<b>Tekijä/tekijät</b> Sami Hanhikorpi
<b>Koulutus</b> Sähkö- ja automaatiotekniikka		<input checked="" type="checkbox"/> AMK <input type="checkbox"/> YAMK
<b>Työn nimi</b> AURINKOPANEELISIMULAATTORI		
<b>Työn ohjaaja</b> Kari Saaranen		<b>Sivumäärä</b> 44
<b>Työelämäohjaaja</b> Riku Niva		
<p>Tämä opinnäytetyö tehtiin Centria-ammattikorkeakoululle antamaan tietoa markkinoilla olevista aurinkopaneelien standardin mukaiseen testaukseen soveltuvista testauslaitteistoista. Tavoitteena oli tutkia saatavilla olevia uusimpien standardit täyttävien aurinkokennojen testaukseen soveltuvien laitteistojen saatavuutta, hintatasoa ja soveltuvuutta opetuskäyttöön. Opinnäytetyö oli yhtenä osana UUPO-hanketta, jossa Centria-ammattikorkeakoulun opetuslaitteistoa uudistetaan muiltakin osin.</p> <p>Uusiutuviin energianlähteisiin pohjautuva tekniikka on yleistynyt ja kasvattanut suosiotaan viime vuosina. Syyinä tähän ovat sähkön hinnan toisinaan ennalta-arvaamattomat hintavaihtelut ja myös aurinkoenergiatekniikkaan perustuvien aurinkokennojen yleistymisen ja laitteiden yleisesti kohtuullisempaan suuntaan edennyt hintataso. Ihmisten ajattelu on myös muuttunut ekologisempaan suuntaan, jolloin uusiutuvaan energiaan pohjautuvat ratkaisut ovat lisänneet suosiotaan entisestään.</p> <p>Tässä opinnäytetyössä käytiin läpi valaistukseen liittyvä teoria riittävällä laajuudella ja selvitettiin aurinkokennojen testaukseen soveltuvien laitteistojen potentiaaliset toimittajat. Lopputuloksena saatiin käsitys kyseisten testauslaitteistojen hintatasosta, niille asetetuista vaatimuksista ja saatavuudesta.</p>		
<b>Asiasanat</b> Aurinkokenno, Aurinkopaneeli, Spektri, Valaistus, Valaistusvoimakkuus		

**ABSTRACT**

<b>Centria University of Applied Sciences</b>	<b>Date</b> May 2024	<b>Author</b> Sami Hanhikorpi
<b>Degree programme</b> Electrical and Automation Engineering		
<b>Name of thesis</b> SOLAR PANEL SIMULATOR		
<b>Centria supervisor</b> Kari Saaranen	<b>Pages</b> 44	
<b>Instructor representing commissioning institution or company</b> Riku Niva		
<p>This thesis was written for Centria University of Applied Sciences to provide information on the testing equipment on the market suitable for standard testing of solar panels. The goal was to investigate the availability, price level and suitability for educational use of available equipment suitable for testing solar cells that meet the latest standards. The thesis was one part of the UUPO project, in which the teaching equipment of Centria University of Applied Sciences is also being upgraded in other respects.</p> <p>Renewable energy technology has become more common and popular in recent years. The reason for this is the sometimes unpredictable price fluctuations in electricity prices, as well as the increasing prevalence of solar cells based on solar energy technology and the generally more reasonable price level of equipment. People's thinking has also become more ecological, which means that solutions based on renewable energy have become even more popular.</p> <p>In this thesis, the theory related to lightning was reviewed to a sufficient extent and identified potential suppliers of equipment suitable for testing solar cells. As a result, we got an idea of the price level, requirements, and availability of the test equipment in question.</p>		
<b>Key words</b> Illuminance, Lightning, Solar Cell, Solar panel, Spectrum		

## **KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY**

### **AALLONPITUUS**

Värihtelevän aallon pituus. Tunnus  $\lambda$ . Yksikkö nanometri [nm].

### **AM1.5**

Aurinkokennojen suorituskykymittauksia määrittävä standardi.

### **AMPLITUDI**

Värihdyslaajuus. Värihtelevän suureen hetkellinen huippuarvo.

### **COULOMBI**

Sähkövarauksen SI-järjestelmän mukainen yksikkö. Tunnus C.

### **ELEKTRONI**

Alkeishiukkanen, jolla on negatiivinen sähkövaraus. Arvo  $1,60218 \cdot 10^{-19} \text{As}$ .

### **ENERGIA**

Voiman, kappaleen tai systeemin kyky tehdä työtä. Tunnus W. Yksikkö joule [J].

### **FOTONI**

Sähkömagneettinen välittäjähiukkanen, eli valohiukkanen. Tyhjiössä etenemisnopeus on valonnopeuden suuruinen.

### **kWh**

Kilowattitunti. Sähkönkulutukseen viittaava energiayksikkö.

### **kWp**

Kilowattipiikki. Aurinkokennotekniikassa järjestelmän teoreettinen maksimiteho.

### **LUMINANSSI**

Fotometrian suure. Kuvaa pinnan kirkkauden vaikutelmaa. Tunnus L. Yksikkö kandela neliömetrille [ $\text{cd}/\text{m}^2$ ].

## **PLANCKIN VAKIO**

Luonnonvakio. Yhdistää taajuuden ja energian yksiköt. Tunnus  $h$ . Arvo  $6,6261 \cdot 10^{-34} \text{ Js}$ .

## **SPEKTRI**

Havaitun suureen jakautuminen sen eri komponentteihin.

## **SÄHKÖKENTÄN VOIMAKKUUS**

Sähkökenttää kuvaava suure. Tunnus  $E$ .

## **TAAJUUS**

Ilmiön tapahtumat aikayksikköä kohti. Tunnus  $F$ . Yksikkö hertsi [Hz].

## **VALAISTUSVOIMAKKUUS**

Fotometrian suure. Kuvaa tietylle pinta-alalle lankeavan valovirran määrää. Tunnus  $E$ . Yksikkö luksit [lx].

## **VALOEKSITANSSSI**

Kappaleesta poispäin säteilevän valovirran tiheys. Tunnus  $M$ . Yksikkö luumenia neliömetrille [ $lm/m^2$ ].

## **VALOMÄÄRÄ**

Valovirran ja ajan tulo. Tunnus  $Q$ . Yksikkö luumensekunti [ $lms$ ].

## **VALOVIRTA**

Fotometrian suure. Kuvaa valonlähteen näkyvän valon kokonaissäteilyä. Tunnus  $\phi$ . Yksikkö luumen [lm].

## **VALOVOIMA**

Valaistuksen perussuure. Yksikkö kandela [cd].

## **VÄRILÄMPÖTILA**

Näkyvän valon mitattavissa oleva ominaisuus. Valonlähteestä syntyvä värivaikutelma. Yksikkö kelvin [K].

**TIIVISTELMÄ**  
**ABSTRACT**  
**KÄSITTEIDEN MÄÄRITTELY**  
**SISÄLLYS**

<b>1 JOHDANTO</b> .....	<b>1</b>
<b>2 TEORIA</b> .....	<b>3</b>
2.1 Valon aaltoluonne.....	3
2.2 Valon spektri.....	6
2.3 Valon hiukkasluonne .....	7
2.4 Valaistuksen perussuureet.....	8
2.4.1 Valovoima .....	8
2.4.2 Valovirta.....	9
2.4.3 Valaistusvoimakkuus .....	9
2.4.4 Luminanssi.....	10
2.4.5 Valoeksitanssi .....	10
2.4.6 Valomäärä.....	10
2.4.7 Värilämpötila.....	11
2.4.8 Päivänvalon koostumus .....	11
2.5 LED-Valaistus .....	12
2.6 Aurinkopaneelit.....	13
2.6.1 Valosähköinen ilmiö.....	14
2.6.2 Puolijohteet ja P-N-liitos.....	14
2.6.3 Piikennot .....	16
2.6.4 Olosuhteiden vaikutukset .....	18
2.6.5 Yksittäisen kennon varjostus .....	19
2.6.6 Kallistus ja suuntaus .....	20
2.6.7 Spektraalinen vaste .....	21
2.7 Standardi AM1.5 .....	22
2.8 IEC-60904-9 .....	24
<b>3 LAITTEISTON SUUNNITTELU</b> .....	<b>25</b>
3.1 Apogee SS-110 .....	25
3.2 Laboratorio ja uusi testauslaitteisto .....	27
3.3 Laitetoimittajat.....	28
3.3.1 Eternal Sun .....	29
3.3.2 G2V Optics.....	33
3.3.3 Halocell.....	34
3.3.4 UV-Technik.....	37
3.3.5 Wavelabs .....	38
3.4 Testilaitteiston aurinkopaneelit .....	39
<b>4 JOHTOPÄÄTÖKSET</b> .....	<b>40</b>
<b>LÄHTEET</b> .....	<b>43</b>

## **KUVIOT**

KUVIO 1. Sähkömagneettisen aallon ajallinen vaihtelu .....	5
KUVIO 2. Sähkömagneettisen aallon paikallinen vaihtelu .....	5
KUVIO 3. Sähkömagneettisen säteilyn spektrialue .....	6
KUVIO 4. Pistemäisesti säteilevä valonlähde .....	9
KUVIO 5. P-N-liitoksen syntyminen ja elektronin virittyminen.....	16
KUVIO 6. Aurinkopaneelien sarjakytkentäperiaate .....	18
KUVIO 7. Varjostuksen vaikutus .....	19
KUVIO 8. Varjostuksen vaikutus yksittäiseen aurinkokennoon .....	20
KUVIO 9. Aurinkokennojen spektraaliset vasteet.....	21
KUVIO 10. AM1.5 standardi ja valon tulokulman periaate .....	22
KUVIO 11. AM1.5 mukaiset spektrit .....	23
KUVIO 12. Suoran auringonvalon spektri .....	26

## **KUVAT**

KUVA 1. Yksikiteinen piikkeno.....	17
KUVA 2. Apogee SS-110-spektroradiometri .....	25
KUVA 3. Laboratorion nykyinen testilaitteisto .....	27
KUVA 4. Sähkövoimatekniikan laboratorion pohjakuva .....	28
KUVA 5. LED Light Soaker LLS .....	30
KUVA 6. Laboratory Flasher XL .....	33
KUVA 7. G2V Optics havainnekuva.....	34
KUVA 8. Halocell Hyperion IV .....	35

## **TAULUKOT**

TAULUKKO 1. UV ja IR-säteilyn aallonpituudet .....	11
TAULUKKO 2. Valaisintyyppien ominaisuudet.....	13
TAULUKKO 3. Kiteisen piikennon ominaisuudet.....	17
TAULUKKO 4. Kallistuksen vaikutus Pohjois-Pohjanmaalla.....	20
TAULUKKO 5. IEC-60904-9 spektrivasteet .....	24
TAULUKKO 6. Mittaustulokset eri aallonpituusalueilla .....	27
TAULUKKO 7. Asennusalueiden mitat .....	28
TAULUKKO 8. Listausta potentiaalisista laitettoimittajista .....	29
TAULUKKO 9. LED Light Soakerin tekniset tiedot .....	31
TAULUKKO 10. Halocell Hyperion IV tekniset tiedot .....	36
TAULUKKO 11. Halocell Hyperion IV spektrivasteet.....	37

## 1 JOHDANTO

Uusiutuvat energiantuotantomenetelmät ovat viime vuosina lisänneet suosiotaan niin yksityisten kuin teollistenkin toimijoiden keskuudessa. Tähän on vaikuttanut osaltaan sähkön korkea hintataso ja toisinaan ennalta-arvaamaton hintojen heilahtelu. Ihmisten ekologisempaan suuntaan muuttunut ajattelu on myös usein hankintojen taustalla. Suosiotaan ovat lisänneet erityisesti aurinkopaneelijärjestelmät. Järjestelmien hintataso on kohtuullinen ja oheislaitteita on markkinoilla saatavilla kiitettävästi kuluttajaystävälliseen hankintahintaan.

Aurinkopaneelijärjestelmiä hankitaan usein myös opetuskäyttöön. Tämän työn tarkoituksena oli tutkia ja suunnitella aurinkopaneelisimulaattori Centria-ammattikorkeakoulun opetuskäyttöön. Aurinkopaneelisimulaattori on yksi osakokonaisuus UUPO-hankkeessa, jossa Centria-ammattikorkeakoulun opetuslaitteistoa päivitetään muiltakin osin. Järjestelmän on tarkoitus muodostaa kattava ja kokonaisvaltainen laitteistokokonaisuus, joka on opiskelijoiden käytettävissä eri opetustilanteita varten.

Opinnäytetyön tavoitteena oli tutkia eri laitevalmistajien tarjoamia vaihtoehtoja siitä, minkälaisella testilaitteistolla saadaan tuotettua auringon valon spektriä mukaileva  $1000 \text{ W/m}^2$  valaistusvoimakkuus kahdelle normaalikokoiselle aurinkopaneelille. Paneelit tullaan asentamaan telineeseen, jolle oli alustavat suunnitelmat olemassa jo tämän työn kirjoituksen aloitusvaiheessa. Valaistus tulitaisiin toteuttaa LED-tekniikkaan perustuvilla valaisimilla. Testilaitteiston tarkkuusluokaksi oli jo ennalta päätetty vaatimus standardin AM1.5G luokituksen suhteen, joka asettaa vaatimukset valon spektrin jakautumiselle eri aallonpituusalueilla. Tämä oli tärkeää, sillä laitteiston täyttäessä standardin vaatimukset mahdollistaa se samalla testattavien kennojen vertailukelpoisuuden. Valaistuksen tuli olla ohjattavissa alemmalle teholle. Uusi laitteisto tullaan sijoittamaan Ylivieskaan Centria-ammattikorkeakoulun tiloihin sähkövoimatekniikan laboratorioon vanhan jo vuosia palvelleen laitteiston tilalle tai tarpeen vaatiessa vaihtoehtoiselle asennuspaikalle.

Järjestelmä tullaan asentamaan osaksi laboratorion uutta älykästä ohjausjärjestelmää. Ohjausjärjestelmän tarkoituksena on myös mahdollistaa aurinkosimulaattorin etäkäyttö, jolloin Centria-ammattikorkeakoulun laitteistolla voidaan järjestää esimerkiksi erilaisia mittausdemoja etäyhteydellä. Lopullinen ohjausjärjestelmätyyppi ei ollut tiedossa vielä tämän opinnäytetyön kirjoitusvaiheessa. Ohjausjärjestelmän avulla aurinkopaneelisimulaattori saataisiin kytkettyä akustoon tai laboratorion säädettävään keinoakuun opiskelevien testauksia varten.



Opinnäytetyön eräs tärkeimmistä tutkimuksen kohteista oli aurinkopaneelisimulaattorissa käytettävät LED-valaisimet, niiden saatavuus ja mahdollinen jäähtymisen tarve. Nykypäivänä standardin vaatimusten mukainen valaistus on helposti toteutettavissa teholedien ansiosta. Ne ovat energiatehokkaita, niillä on pitkä elinikä ja ne ovat helposti ohjattavissa. Tästä syystä valaisintyyppin valinta aurinkosimulaattoriin oli selkeä. Ledit häviävät muille potentiaalisille valonlähdevalinnoille oikeastaan vain hieman kapeamman spektrialueensa vuoksi.

UUPO-Hankkeessa simulointilaitteiston budjetiksi oli alun perin määritelty 152000 euroa, joten allekirjoittaneella oli kiitettävästi mahdollisuuksia ja valinnanvaraa oikeantyyppisen järjestelmän räätälöintiin. Tässä tapauksessa budjetin ajateltiin mahdollistavan varmasti vaatimukset täyttävän laitteiston suunnittelun ja hankinnan.

Tässä opinnäytetyössä asian ymmärtämiseksi vaadittava valaistustekninen teoria käydään läpi riittäväällä laajuudella, jolloin lukijalle syntyy kattavampi käsitys laitteiston suunnitteluun ja tarvikkeiden valintoihin liittyvistä perusteista.

Uusimman IEC-60904-standardin myötä aurinkopaneelisimulaattorin ominaisuuksien vaatimuksiin on tullut hieman muutoksia valon aallonpituuden ja spektrijakauman suhteen. Tässä opinnäytetyössä otetaan huomioon standardin uusimmat muutokset koskien aurinkokennotestauslaitteistoja. Uusi standardi ja taulukointi ottavat paremmin huomioon tuotekehityksen näkökulman.

## 2 TEORIA

Tämän osion tarkoituksena on luoda lukijalle käsitys valon perusolemuksesta ja avata siihen liittyvät käsitteet. Asian ymmärtäminen on tärkeää, sillä se auttaa muodostamaan kokonaisvaltaisemman käsityksen työn lopullisesta sisällöstä.

Nykymääritelmän mukaisesti valo tarkoittaa näkyvää ja ihmissilmällä havaittavissa olevaa säteilyenergiaa. Määritelmän oletuksen mukaisesti valo on energiaa, joka siirtyy säteilemällä. Ihmissilmän ominaisuuksiin kuuluu sen havaitsemisherkkyys juuri tietyntyyppiselle säteilylle. (Halonen & Lehtovaara 1992, 25.) Tällä säteilyllä tarkoitetaan sähkömagneettista säteilyä, joka johtaa ihmissilmän näköaistimukseen. (Hietalahti 2013, 288).

### 2.1 Valon aaltoluonne

Useat tiedemiehet omaksuivat valon aaltoliiketeorian 1800-luvun puolessa välissä. Huomattiin, että valoalloilla oli taipumus värähdellä tietyssä kulmassa etenemissuuntaansa nähden aaltoina, jotka olivat poikittaisia. Peräkkäisten aaltojen radat kyettiin osoittamaan valonsädeviivoina. Teorian omaksuminen mahdollisti valon taittumisen, hajonnan, polarisaation ja interferenssin selityksen. Myöhemmin 1800-luvun loppupuolella osoitettiin, että valon sähkömagneettiset aallot koostuvat sähkö- ja magneettikentistä. Näille aalloille oli ominaista, että ne värähtelivät tietyssä kulmassa sekä etenemissuuntansa että toisiinsa nähden. Sähkö- ja magneettikentät ovat ajallisesti samanvaiheisia niiden taajuuden ollessa myös sama. Sähköisten ja magneettisten mittausten avulla kyettiin laskemaan aalloille nopeus, joka vastasi valon nopeutta. (Halonen & Lehtovaara 1992, 26.)

Valoaallon etenemisnopeus sen tietyssä kohdassa voidaan määrittää olettamalla kaavan 1 mukainen yhtälö vakioksi ajan suhteen:

$$c = f * t - \left(\frac{s}{\lambda}\right) \quad (1)$$

missä  $c$  on nopeus [m/s],  $f$  on taajuus [Hz],  $t$  on aika [s] ja  $\lambda$  on aallon pituus [m].

Etäisyyden muuttuessa  $s_1$ :stä  $s_2$ :een on myös ajan  $t$  muututtava  $t_1$ :stä  $t_2$ :een. (Halonen ja Lehtovaara 1992, 27). Tällöin termit yhdistämällä ja järjestämällä voidaan johtaa yhtälö:

$$\frac{s_2 - s_1}{t_2 - t_1} = \lambda * f \quad (2)$$

missä  $s$  on paikka.

Sähkömagneettisen aallon magneettikentällä on voimakkuus  $H$  ja se käyttäytyy samalla tavalla sähkökentän voimakkuuden  $E$  kanssa. Kenttien voimakkuuksien suhde voidaan mieltää vakioksi. (Halonen ja Lehtovaara 1992, 28.) Tästä voidaan johtaa yhtälö:

$$\frac{E}{H} = \frac{\mu_0}{\epsilon_0} \quad (3)$$

missä  $\mu_0$  on tyhjän permeabiliteetti  $4\pi * 10^{-7} \text{ N s}^2 / \text{C}^2$  ja  $\epsilon_0$  on tyhjän permittiviteetti

$$\frac{1}{(36\pi * 10^9)} \text{ C}^2 / \text{Nm}^2.$$

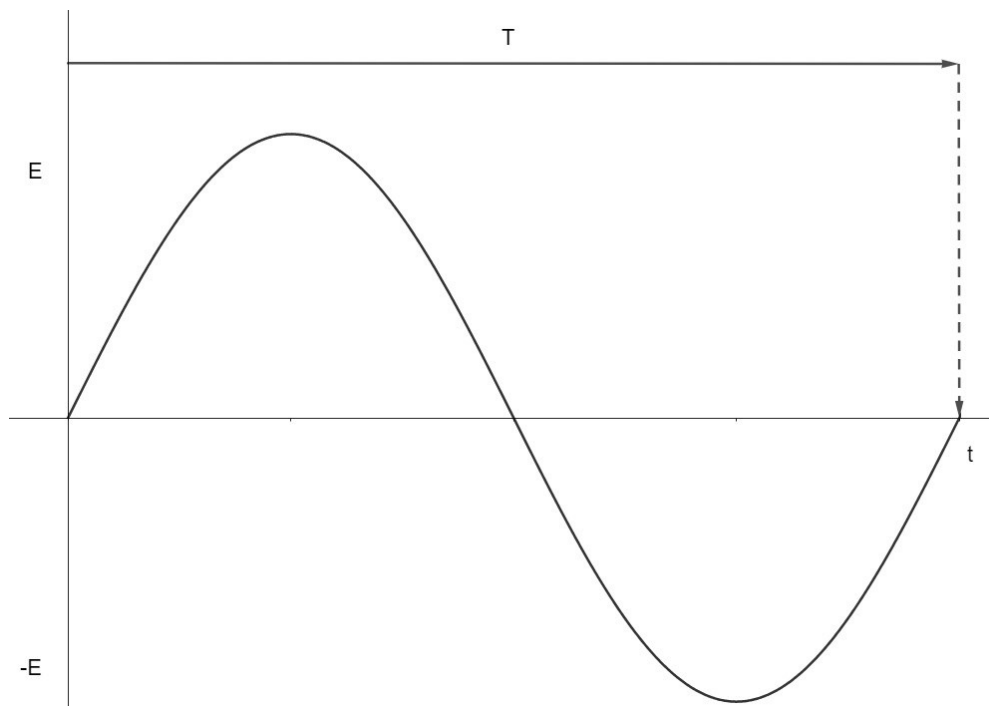
Tästä voidaan laskea sähkömagneettisten aaltojen nopeudeksi  $\mu_0$  ja  $\epsilon_0$  hyödyntäen nopeus  $c$ , joka on tavallisemmin tunnettu valon nopeutena: (Halonen ja Lehtovaara 1992, 28.)

$$c = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}} \rightarrow c = \sqrt{\frac{1}{4\pi * 10^{-7} \frac{\text{Ns}^2}{\text{C}^2} * \frac{1}{36\pi * 10^9} \text{C}^2 / \text{Nm}^2}} = 3 * 10^8 \text{ m/s} \quad (4)$$

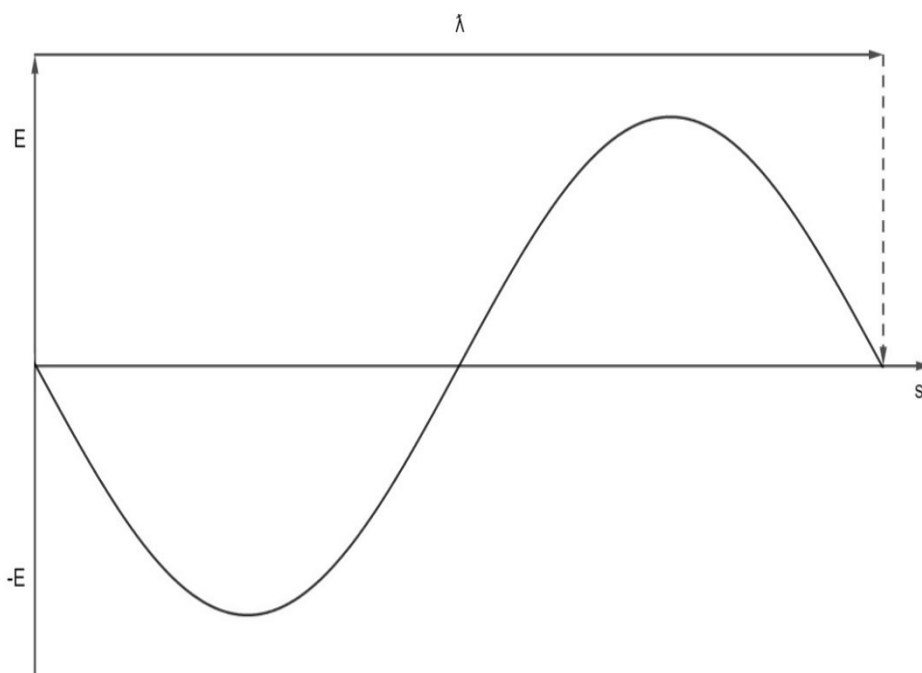
Aaltoliikkeen taajuudella, aallonpituudella ja etenemisnopeudella on olemassa kaavan 5 mukainen yhteys: (Hietalahti 2013, 288.)

$$c = f * \lambda \rightarrow f = \frac{c}{\lambda} \quad (5)$$

Valon luonteen ymmärtämiseksi on sähkömagneettisia aaltoja syytä tutkia hieman tarkemmin. Kuviosta 1 ja 2 voidaan nähdä sähkökentän hetkellinen voimakkuus  $E$ .



KUVIO 1. Sähkömagneettisen aallon ajallinen vaihtelu (mukaiillen Halonen ja Lehtovaara 1992, 27)



KUVIO 2. Sähkömagneettisen aallon paikallinen vaihtelu (mukaiillen Halonen ja Lehtovaara 1992, 27)

Tarkemmin kuvio 1 esittää sähkökentän ajallista vaihtelua tietyllä etäisyydellä  $s$  lähteestä, kun oletetaan, että  $s = 0$ . Sähkökentän voimakkuuden  $E$  vaihtelulle voidaan johtaa kaavan 6 mukainen yhtälö: (Halonen ja Lehtovaara 1992, 26.)

$$E = \hat{e} * \sin (2\pi f * t) \quad (6)$$

missä  $\hat{e}$  on amplitudi [V/m] ja  $f$  on taajuus [Hz].

Kuvio 2 esittää tilannetta, jossa oletuksena on mahdollisen havaitsijan nopea liikehdintä pois päin säteilyn lähteestä. Tämän perusteella sähkökentän voimakkuudelle etäisyydellä  $s$  säteilylähteestä voidaan johtaa kaavan 7 mukainen yhtälö: (Halonen ja Lehtovaara 1992, 26.)

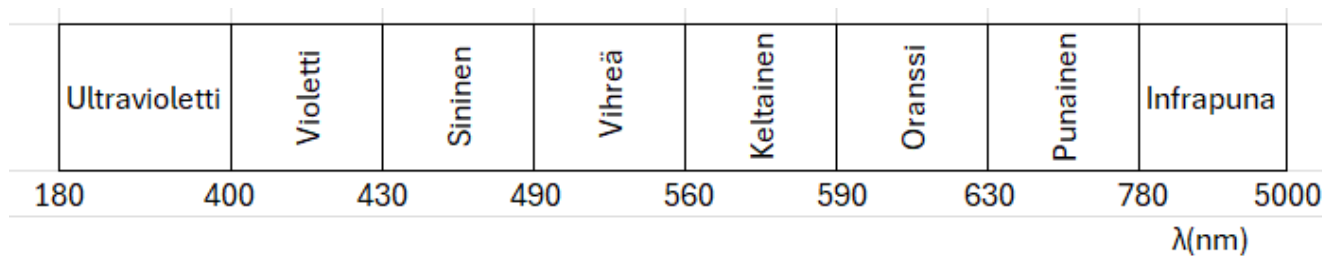
$$E = -\hat{e} * \sin\left(2\pi * \frac{s}{\lambda}\right) \quad (7)$$

missä  $\lambda$  on värähtelevän aallon pituus.

Todettakoon sähkömagneettisen aallon sähkökentän voimakkuuden olevan sinimuotoinen ajan  $t$  ja paikan  $s$  suhteen. Tietyllä ajanhetkellä tarkasteltuna sinimuoto toteutuu paikan suhteen aallonpituuden ollessa  $\lambda$  (KUVIO 1.) Kiinteässä avaruudessa tietyssä pisteessä sinimuotoisuus toteutuu ajan suhteen jaksonajalla  $T$  (KUVIO 2.) (Halonen ja Lehtovaara 1992, 27.)

## 2.2 Valon spektri

Valaistustekniikassa eräs kiinnostavimmista aihealueista on sähkömagneettisen säteilyn spektri. Valon näkyvä osa edustaa todellisuudessa erittäin pientä aluetta koko sähkömagneettisen spektrin alueesta. Näkyvän osuuden aallonpituus  $\lambda$  on noin 400 nm – 780 nm. Yleisesti tämän alueen käsitetään jakautuvan kuuteen perusväriin, jotka eivät ole selvästi erillisiä vaan sekoittuneita keskenään. (Halonen ja Lehtovaara 1992, 28-29.)



KUVIO 3. Sähkömagneettisen säteilyn spektrialue (mukaiillen Halonen ja Lehtovaara 1992, 28)

Kuviosta 3 nähdään valon spektrin värit ja niiden aallonpituudet.

Säteily eri valolähteistä koostuu useista eri aallonpituuksista ja aiheuttavat näkyvällä alueella ihmisilmässä erilaisia väriaistimuksia. Aallonpituus vaikuttaa suoraan valoistimuksen voimakkuuteen ja luonteeseen. (Hietalahti 2013, 288.)

Ultravioletisäteilylle ominaista ovat voimakkaat kemialliset ja biologiset vaikutukset, bakteerien tappaminen ja ihon ruskettuminen. Lisäksi UV-säteily kykenee synnyttämään vitamiineja A ja D. Infrapunasäteilyn (IR) ominaisuuksiin kuuluu kyky läpäistä ilmaa ja tavallista lasia. IR-säteily muuttuu kuitenkin lämmöksi kohdatessaan säteilyä absorboivan aineen. (Hietalahti 2013, 288.) IR-säteilyn vaikutus on tähän työhön liittyen mielenkiintoinen, sillä IR-säteilyn lämmittävä ominaisuus vaikuttaa suoraan aurinkokennojen tehontuottoon.

### 2.3 Valon hiukkasluonne

On päädytty hyväksymään teoria, jonka mukaan valolle on ominaista ns. kaksinaisuusluonne, johon kuuluvat valon aalto ja hiukkasluonne. Kvanttiteorialla pystytään selittämään paremmin ilmiöt valonlähteiden ja valoa vastaanottavien materiaalien tapauksessa, kun taas aaltoteoria antaa paremman käsityksen valon siirtymiseen väliaineessa. (Halonen ja Lehtovaara 1992, 33.)

Bohrin teoria rakentuu ns. kolmesta perusväittämästä. Ensimmäisen väitteen mukaan atomin elektroni voi sijaita vain tietyillä elektroniradoilla. Toisen väittämän mukaan elektronille ominaista on sen kyky loikata stabiilista tilasta toiseen matalaenergiseen tilaan, jolloin tapahtuu emittointi yhden fotonin suhteen. (Halonen ja Lehtovaara 1992, 31.) Fotonin energialle voidaan kirjoittaa yhtälö:

$$\frac{h \cdot c}{\lambda} = W_1 - W_f \quad (8)$$

missä  $h$  on Planckin vakio ( $6,63 \cdot 10^{-34} \text{Js}$ ) ja  $W$  on fotonin energia.

Kolmannen väittämän mukaan elektronin kulmamomentin on oltava  $h/2\pi$ :n kerrannainen, jolloin voidaan määrittellä sallitut elektroniradat. (Halonen ja Lehtovaara 1992, 31.) Tällöin pätee yhtälö:

$$m_e \cdot v \cdot r = n \cdot \frac{h}{2\pi} \text{ [Js]} \quad (9)$$

missä  $m_e$  on elektronin massa,  $v$  on elektronin nopeus ja  $n$  on kokonaisluku.

Ydintä kiertävään elektroniin ei vaikuta kitkavoimaa, jolloin sen sisältämä energia koostuu kahdesta eri osasta,  $W_{POT}$  ja  $W_{KIN}$ . Potentiaalienergian  $W_{POT}$  voi kuvitella syntyvän, kun elektroni tuodaan kiertoradalleen äärettömyydestä. (Halonen ja Lehtovaara 1992, 32.) Potentiaalienergian  $W_{POT}$  laskentaan voidaan hyödyntää yhtälöä:

$$W_{POT} = \int_{\infty}^r F * dr = \int_{\infty}^r \frac{q_e^2 * dr}{4\pi\epsilon_0 * r^2} = \frac{q_e^2}{4\pi\epsilon_0 * r} \quad (10)$$

Kineettisen energian  $W_{KIN}$  laskentaan soveltuu yhtälö:

$$W_{KIN} = \frac{m_e v^2}{2} = \frac{1}{2} m_e v^2 = \frac{q_e^2}{8\pi\epsilon_0 * r} \quad (11)$$

Tällöin elektronin kokonaisenergian ratkaisuun soveltuu:

$$W_{TOT} = W_{POT} + W_{KIN} \quad (12)$$

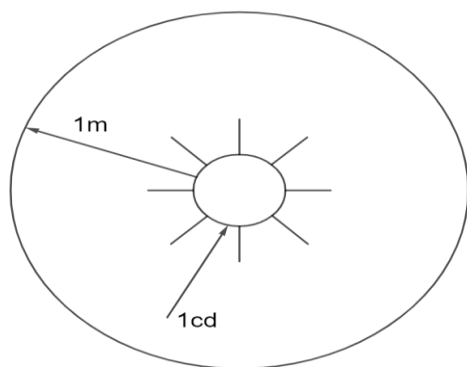
## 2.4 Valaistuksen perussuureet

Tämän osion tarkoituksena on selittää ja esitellä valaistustekniikassa käytettävät perussuureet. Suureet ovat osa SI-järjestelmää. Valaistustekniset asiat ja ratkaisut on helpompi ymmärtää sisäistämällä niihin liittyvät suuret ja yksiköt merkityksineen.

### 2.4.1 Valovoima

Valovoima on perussuure, josta on johdettu kaikki muut valaistustekniikassa käytettävät suuret. Valovoiman yksikkö on kandela [cd]. Kun valolähteestä säteilee tiettyyn suuntaan valoa, kuvataan tätä voimakkuutta eli intensiteettiä valovoimalla. Valonlähteen voimakkuus on yksi kandela [cd] silloin, kun valonlähde säteilee  $540 * 10^{12}$  Hz:n taajuista monokromaattista säteilyä, jonka säteilyteho tähän tiettyyn suuntaan on  $1/683$  W/sr. (Halonen ja Lehtovaara 1992, 34-35.)

Alkujaan sana kandela on peräisin englannin kielestä ja tarkoittaa kynttilää. Alun perin kandela on määritelty juuri tiettyntyyppisen kynttilän tuottaman valovoiman perusteella. Myöhemmin kynttilä on korvattu kaasuliekillä. (Halonen ja Lehtovaara 1992, 35.) Pistemäinen valonlähde, jonka valovoima kaikkiin suuntiin on 1 cd, voidaan nähdä kuvista 4.



KUVIO 4. Pistemäisesti säteilevä valonlähde (mukaiillen Halonen ja Lehtovaara 1992, 35)

Valovoimalle voidaan johtaa yhtälö:

$$I = \frac{\phi}{\omega} \quad (13)$$

missä  $I$  on valovoima [cd],  $\phi$  on valovirta [lm] ja  $\omega$  on avaruuskulma steradiaaneina [sr].

### 2.4.2 Valovirta

Valovirta  $\phi$  on säteilytehoa, jolloin yksikkö lumen [lm] vastaa dimensioltaan tehon yksikköä [W]. Valovirta on valonlähteen näkyvän valon säteilyteho painotettuna ihmissilmän spektriherkkyydellä. Pallon pinta-alan ollessa  $4\pi r^2$  kokonaisvalovirraksi saadaan  $4\pi$  lm. Tällöin ympäristöönsä pistemäisesti säteilevän valonlähteen tuottama valovirta on  $4\pi$  lm. (Halonen ja Lehtovaara 1992, 35.)

### 2.4.3 Valaistusvoimakkuus

Valovirran säteet osuvat lopulta johonkin pintaan kulkeutuessaan kauemmas valonlähteestä. Pinnan saavuttaessaan ne joko läpäisevät, heijastuvat tai absorboituvat kyseiseen pintaan. Valaistusvoimakkuudeksi voidaan tällöin kutsua valovirran tiheyttä, joka saapuu tietylle pinnalle. (Halonen ja Lehtovaara 1992, 36.) Valaistusvoimakkuudelle  $E$  voidaan muodostaa yhtälö:

$$E = \frac{\phi}{A} \quad (14)$$

missä  $\phi$  on tietylle pinnalle tuleva valovirta ja  $A$  on pinnan ala.



Valaistusvoimakkuuden yksikkö on SI-järjestelmän mukaisesti luumenia neliömetrille ( $lm / m^2$ ) eli luksiksi [lx].

#### 2.4.4 Luminanssi

Kun pinta-alkiosta säteilee valoa tiettyyn suuntaan ja tämän säteilevän valovoiman suhde pinta-alkion samaan suuntaan otettuun projektion alaan tarkastellaan, voidaan muodostaa valaistustekniikassa käytettävä käsite luminanssi [L]. Luminanssin yksiköksi on päätetty kandela neliometriä kohti [ $cd/m^2$ ]. Vaikutelma pinnan kirkkaudesta voidaan selittää luminanssin käsitteen avulla. (Hietalahti 2013, 291.) Luminanssille L voidaan johtaa yhtälö:

$$L = \frac{I_0}{A \cdot \cos\theta} \quad (15)$$

missä  $I_0$  on valovoima ja A on pinnan ala.

#### 2.4.5 Valoeksitanssi

Oletetaan jonkin valolähdekappaleen olevan läpinäkyvää materiaalia, jonka ominaisuuksiin kuuluu läpäistä 70 % saapuvasta valosta. Tämä kappale ei myöskään heijasta valoa takaisin kappaleen sisään. Läpäisemätön valon osuus 30 % absorboituu kappaleen pintaan. Valovirran tiheyttä, joka säteilee pois päin kappaleen pinnasta, kutsutaan valoeksitanssiksi, jonka yksikkö on luumenia neliömetrille [ $lm/m^2$ ]. (Halonen ja Lehtovaara 1992, 37.)

#### 2.4.6 Valomäärä

Valovirran ollessa verrannollinen valotehoon on valomäärä verrannollinen valoenergiaan. Valomäärä Q voidaan käsittää valovirran aikaintegraaliksi. Valomäärä Q saadaan laskettua kertomalla valovirta  $\phi$  ajan tarkastelupituudella, kun valovirta oletetaan vakioksi. Valomäärän yksikkönä on luumensekunti [lms] tai luumentunti [lmh]. Valomäärä on siis energian yksikkö, joka on helppo käsittää vertaamalla sitä esimerkiksi sähköenergian kulutuksessa käytettyyn yksikköön kilowattitunti [kWh]. (Halonen ja Lehtovaara 1992, 37.)

### 2.4.7 Värilämpötila

Värilämpötilan avulla voidaan kuvantaa valonlähteestä syntyvää värivaikutelmaa. Värilämpötilan yksikkönä on kelvin [K]. Hieman punertavaa ja lämpimän sävyistä valoa vastaa värilämpötila 2700 K. Valkoisen valon värilämpötila on noin 5000 K...5500 K. Mitä alhaisempi on värilämpötila, sitä keltaisemmalta valonlähde näyttää. Värilämpötilan noustessa valon spektrin sininen osuus tulee hallitsevammaksi ja ennen pitkää valoistimus muuttuu valkoisesta siniseen. (Hietalahti 2013, 292.)

### 2.4.8 Päivänvalon koostumus

Suora auringonvalo, taivaan hajasäteily ja molempien aiheuttama ympäristöstä heijastuva hajasäteily muodostavat päivänvalon kolme komponenttia. Spektrin jatkuvuus näkyvän valon aallonpituusalueella on päivänvalolle tyypillistä. Päivänvalon spektrimuoto ja valon väriominaisuudet vaihtelevat vallitsevien olosuhteiden suhteiden mukaan. Tähän vaikuttavat mm. auringon korkeus, ilman absoluuttinen kosteus, epäpuhtausaste, otsonipitoisuus ja pilvisyysaste. (Halonen ja Lehtovaara 1992, 282.)

Suoran auringonvalon värilämpötilaksi voidaan määrittää noin 5500 K silloin, kun aurinko paistaa korkeammasta kulmasta kuin 30°. Värilämpötila laskee tätä matalammilla korkeuksilla. Pilviselle taivaalle voidaan määrittää värilämpötila, joka vaihtelee tavallisesti välillä 4500 K...7000 K. Yli 10000 kelvinin värilämpötiloja voidaan havaita kirkkaan sinistä taivasta tarkasteltaessa. Valon lähteen lisäksi ympäristön pintojen spektriominaisuudet vaikuttavat suoraan maasta tai ympäristöstä heijastuneen valon väriominaisuuksiin. (Halonen ja Lehtovaara 1992, 282.)

Näkyvän valon aallonpituuden lisäksi ultraviolettisäteily (UV-säteily) ja infrapunasäteily (IR-säteily) voidaan jakaa kolmeen erilliseen aallonpituusalueeseen taulukon 1 mukaisesti.

TAULUKKO 1. UV ja IR-säteilyn aallonpituudet (mukaillen Halonen ja Lehtovaara 1992, 282)

UV-A	315-400nm		IR-A	780-1400nm
UV-B	280-315nm		IR-B	1,4-3µm
UV-C	100-280nm		IR-C	3µm-1mm



Xenon-tyyppiset (Xe) lamput ovat pitkään olleet yleisin valaisinratkaisu aurinkokennojen testauslaitteistoissa laajan aallonpituusalueensa vuoksi. Tekniikan kehityksen ansiosta, tänä päivänä LED-valaisimilla kyetään saavuttamaan täysi auringonvalon spektri aallonpituusalueella 300...1850 nm. Ledit ovat monilta ominaisuuksiltaan parempia kuin tähän asti käytössä olleet monimetalli, xenon ja halogeeni-tyyppiin valonlähteisiin perustuvat ratkaisut. (G2Voptics.)

LED-valaisimien etuihin kuuluvat mm. tehon nopea ja tarkka säädettävyys mikrosekuntien  $\mu$ s tarkkuudella sekä vakaa ja tasainen valoteho. Ledit ovat huoltovapaita ja täyttävät tämän päivän standardien vaatimukset aurinkopaneelisimulaattorikäytön suhteen. Ledit tarjoavat dynaamisemmän ja toiminnallisemmän ratkaisun aiemmin käytössä olleisiin ratkaisuihin verrattuna. (G2Voptics.)

Eri valaisintyyppien ominaisuuksia voidaan tulkita taulukosta 2.

TAULUKKO 2. Valaisintyyppien ominaisuudet (mukailten G2Voptics)

Emission Technology	Spectral Match (nm)	Temporal Stability	Number of Spectra	Maximum Suns	Bulb Life-time h	Initial Cost	Operating Cost
<b>LED</b>	300 - 1850	Very high	Very high	1,1	10000+	High	Low
<b>Xe</b>	300 - 2500	High	1 - 3	10000	2000	Medium	Medium
<b>Metal Halide</b>	300 - 1200	Med	1 - 3	1000	6000	Medium	Medium
<b>Halogen</b>	400 - 2500	-	1 - 3	25	2000	Low	Medium

Taulukon 2 mukaisesti LED-valaisimilla voidaan toteuttaa pitkäikäisiä ja huoltovapaita ratkaisuja eri sovelluksiin. Hankintakustannukset ovat hieman suuremmat, mutta käytössä kustannukset muodostuvat kaikkein pienimmiksi.

## 2.6 Aurinkopaneelit

Tämän osion tarkoituksena on esitellä kaupallisissa aurinkopaneeleissa yleisimmin tarjolla olevien yksi- ja monikidetekniikalla valmistettujen aurinkopaneelien rakenne ja tärkeimmät ominaisuudet. Osi-  
ossa käsitellään myös valosähköistä ilmiötä, jonka ymmärtäminen on työn toteutuksen kannalta oleellista.

### 2.6.1 Valosähköinen ilmiö

Valosähköinen ilmiö, auringon säteily ja puolijohdemateriaalien ominaisuudet mahdollistavat aurinkopaneelien toiminnan ja sähköntuotannon niitä hyödyntämällä. Aurinkoenergiasovelluksissa hyödynnetään auringon säteilystä enimmäkseen ultravioletti (UV) ja lähi-infrapunasäteilyä (NIR). (Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus 2017, 9.)

Auringolla on tietty säteilyintensiteetti, joka on kokonaisuudessaan noin  $73 \text{ MW}/\text{m}^2$ . Tästä säteilystä saapuu maan ulkorajalle noin  $1367 - 1370 \text{ W}/\text{m}^2$ . Kyseinen arvo tunnetaan myös nimellä aurinkovakio SC. Aurinkovakion avulla voidaan määrittää säteilyn teoreettinen yläraja, joka on enintään havaittavissa maan pinnalla. Todellisuudessa tämä arvo ei tietenkään ole näin suuri, vaan maan pinnalla tavanomainen säteilyintensiteetti on noin  $1000 \text{ W}/\text{m}^2$ . Maantieteellisen sijainnin lisäksi tähän vaikuttavat voimakkaasti ilmakehässä vallitsevat olosuhteet. Päiväntasaajan alueella tavataan korkeimmat säteilyn intensiteetti-arvot. Pohjois-Suomessa tavanomainen säteilyintensiteetin vuotuinen keskiarvo on noin  $750 \text{ kWh}/\text{m}^2$ , kun Etelä-Suomessa voidaan mitata jopa  $980 \text{ kWh}/\text{m}^2$  lukemia. (Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus 2017, 9-10.)

Aurinkosähköjärjestelmissä käytetään hyväksi valosähköistä ilmiötä, jossa auringon säteily irrottaa piin [Si] pinnalta elektronin. Elektronin irrottamiseksi tarvitaan fotoni, joka luovuttaa energiansa elektronille mahdollistaen elektronin irrotautumisen ja sähkövirran tuottamisen. Piitä käytetään laajalti aurinkopaneelitekniikassa, sillä se kuuluu puolijohteisiin. (Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus 2017, 10.)

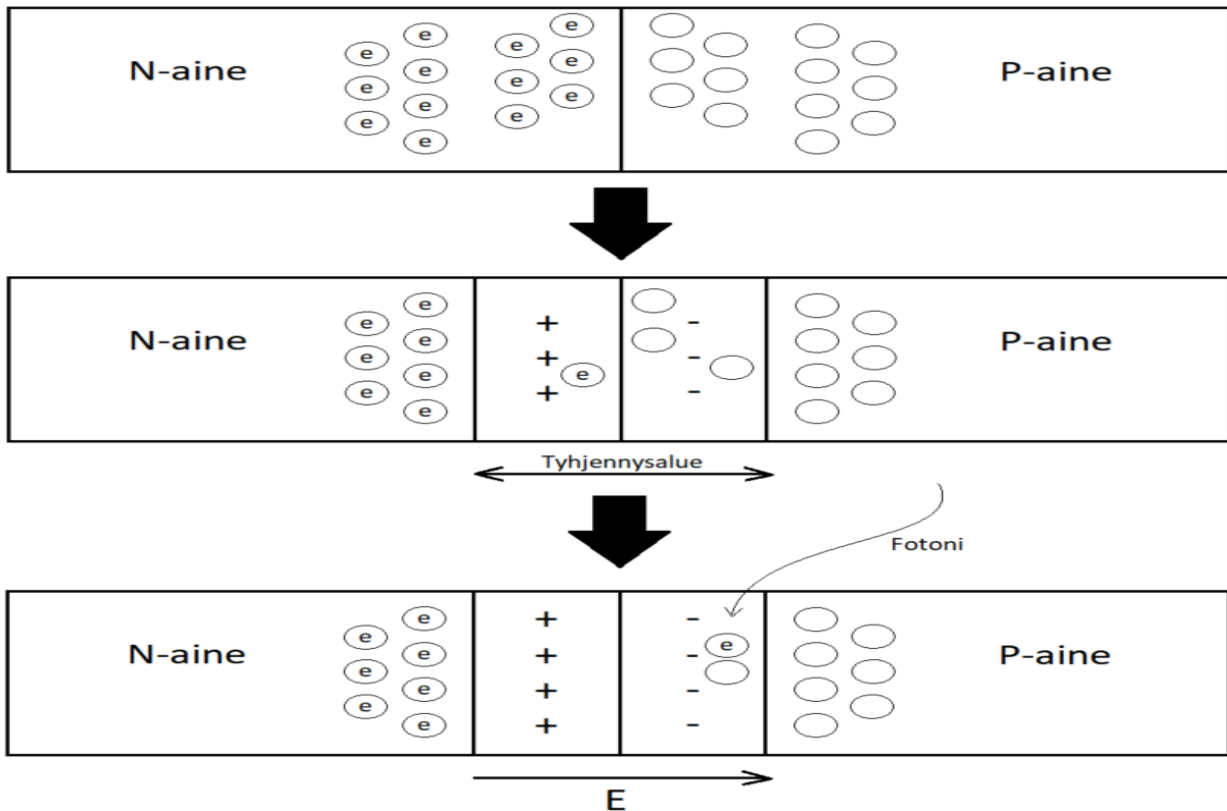
### 2.6.2 Puolijohteet ja P-N-liitos

Puolijohde voidaan määritellä siten, että niiden johtavuus on parempi kuin eristeillä mutta huonompi kuin varsinaisilla johteilla. Tämä ominaisuus ei vielä itsessään ole erityisen hyödyllinen. (Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus 2017, 10.) Puolijohteita seostamalla tai kyllästämällä saadaan varauksenkuljettajia lisättyä tai vaihtoehtoisesti vähennettyä. Seostamalla puolijohdetta esimerkiksi fosforilla varauksenkuljettajien määrä kasvaa ja johtavuus luonnollisesti paranee. Elektronien lisääntyessä aine saa negatiivisen varauksen, jota puolijohdetekniikassa kutsutaan N-aineeksi. Muodostamalla

puolijohdeeseen aukkoja esimerkiksi seostamalla sitä alumiinilla, saadaan aineelle muodostettua positiivinen varaus, jolloin sen johtavuus pienentyy. Tätä pienentyneen johtavuuden ainetta kutsutaan puolijohdetekniikassa P-aineeksi. (Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus 2017, 10.)

Aseteltaessa vierekkäin sekä P-tyypin että N-tyypin aineet saadaan muodostettua P-N-liitos. Tällä mahdollistetaan elektronien vapaa liikkuvuus materiaalien välillä ja aukon kohdatessaan yhdistyminen on mahdollista. Aukot kykenevät myös liikkumaan vapaasti ja elektronin kohdatessaan niillä on mahdollisuus yhdistyä. Yhdistymisestä johtuen P-N-liitoksen rajapinnan läheisyyteen muodostuu ns. tyhjennysalue, jossa ei enää ole varauksenkuljettajia. Positiivinen varaus muodostuu N-aineen puolelle ja negatiivinen varaus P-aineen puolelle. Tässä tilanteessa voidaan P-N-liitoksessa käsittää sijaitsevan aineen sisäinen sähkökenttä  $E$ . (Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus 2017, 10-11.)

Elektroni-aukkopari muodostuu, kun säteilyenergiassa oleva fotoni virittää puolijohdeliitoksen elektronin saaden sen liikkeelle. Edellä esitelty aineen sisäinen sähkökenttä saa negatiivisesti varautuneen elektronin liikkumaan kohti N-ainetta, jolloin myös aukko pyrkii siirtymään kohti P-ainetta. Sähkövirta syntyy, kun sisäinen sähkökenttä estää yhdistymisen. Tämä edellyttää, että virittyminen tapahtuu P-N-liitoksen tyhjennysalueella. Liian kaukana tyhjennysalueesta tapahtuva virittyminen johtaa aukon ja elektronin yhdistymiseen, jolloin sähkövirtaa ei pääse syntymään. Voidaan muodostaa käsitys siitä, että aurinkokennojen valmistuksen yhteydessä varmistetaan elektronien virittyminen pääosin liitoksen tyhjennysalueella. (Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus 2017, 11.)



KUVIO 5. P-N-liitoksen syntyminen ja elektronin virittyminen (mukaiillen Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus 2017, 11)

Kuviosta 5 nähdään P-N-liitoksen syntyminen vaiheittain ja fotonin virittämä elektroni, jolloin syntyy sähkökenttävektorin  $E$  suuntainen sähkövirta.

### 2.6.3 Piikennot

Valmistettaessa yksikiteisiä piikkenoja voidaan valmistuksessa syntyneestä hionta- ja leikkuujätteestä valmistaa monikiteisiä piikkenoja. Yksinkertaisuudessaan työstöjäte sulatetaan, minkä jälkeen se kiteytetään takaisin haluttuun ja vaadittuun muotoon. Kidevirheet, jotka ovat ominaisia monikiteisille kennoille johtuvat tästä sulatus- ja kiteytysprosessista. Aurinkokennon hyötysuhteen tiedetään huonontuvan tämän prosessin seurauksena, sillä kidevirheen alueelta varauksenkantajat (elektronit) eivät pääse poistumaan optimaalisesti. (Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus 2017, 12.)

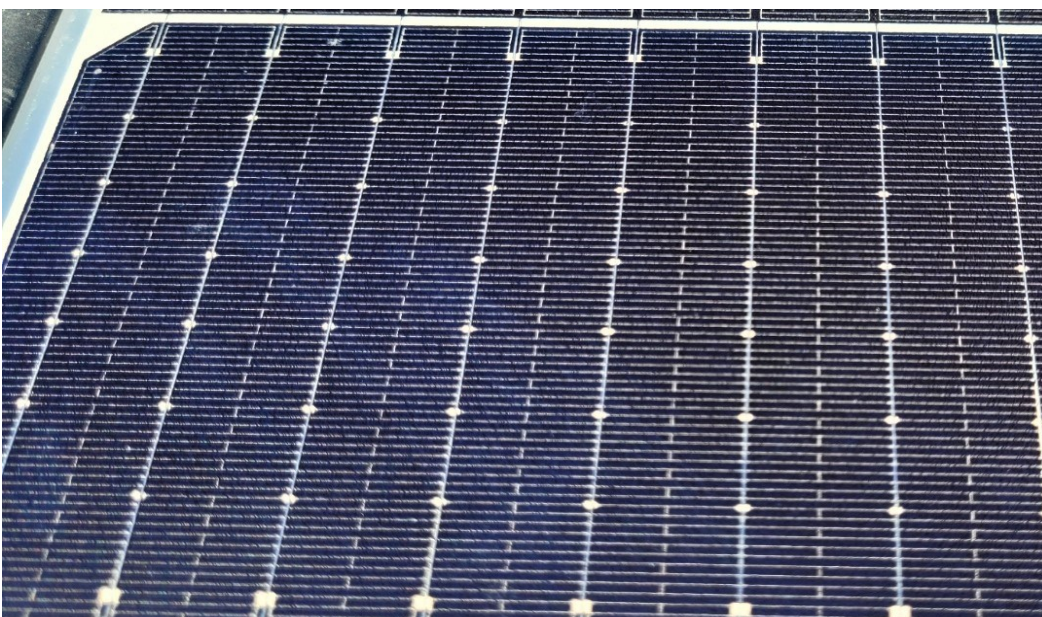
Piikennorakenteisessa aurinkopaneelissa kennojen kontaktipinnat ovat tavanomaisesti hopeaa. Ne kykenevät toimimaan sekä positiivisena että negatiivisena elektrodina, sillä ne painetaan kennon etu- ja takapuolelle. Kennojen kytkentä toteutetaan useimmiten sarjankytkentänä. Kennojen päälle asennetaan

lasi, minkä jälkeen ne koteloidaan ja lopuksi kehystetään alumiinisella kehyksellä. Toteutustapa suojaa kennoja tehokkaasti kosteudelta ja vähentää mekaanisten vaurioiden riskiä. Kennojen kytkentärasiat, kaapeloinnit ja liittimet asennetaan yleensä valmiiksi paneelin takapuolelle. (Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus 2017, 12.)

Kiteisten piikkennojen yleisominaisuuksia voidaan tarkastella taulukosta 3.

TAULUKKO 3. Kiteisen piikennon ominaisuudet (mukaiillen aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus 2017, 12)

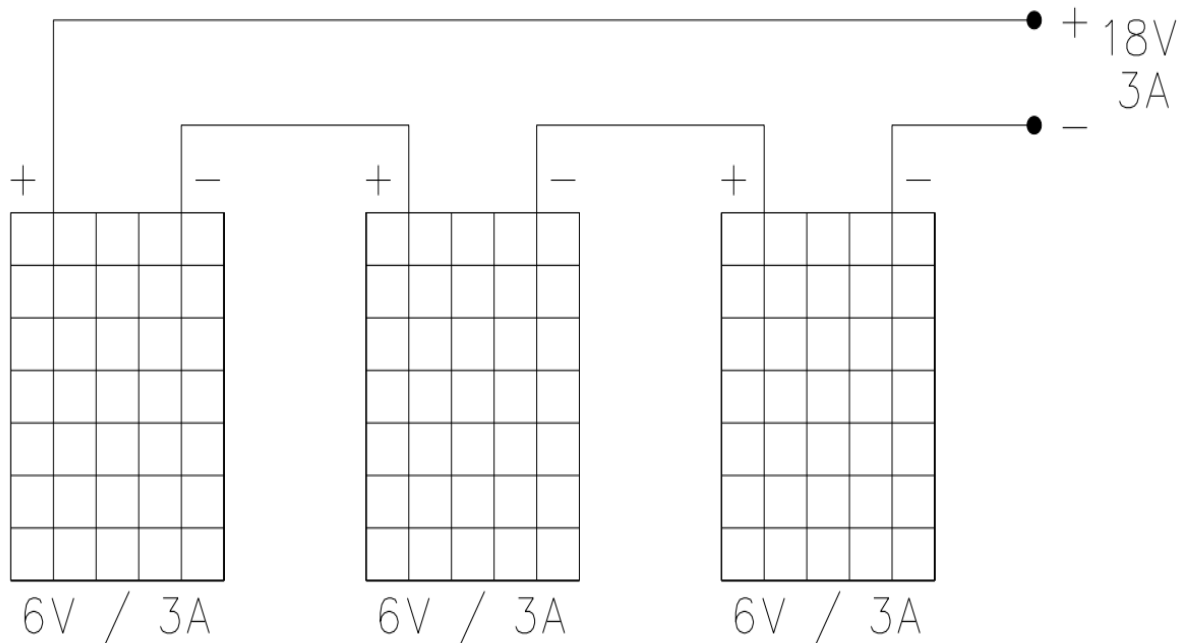
Ominaisuudet	Kiteinen pii	
	Monikiteinen	Yksikiteinen
Hyötysuhde	13-16%	15-20%
Lämpötilan vaikutus STC tehoon (% / +1°C)	-0,42	-0,4
Mekaaninen kestävyys	Hauras	Hauras
Varjostus	Herkkä	Herkkä
Käyttöikä (vuotta)	30+	30+
Hinta	€€	€€€



KUVA 1. Yksikiteinen piikkenno.



Kuvassa 1 nähdään yksikiteisen nykyaikaisen aurinkokennon yleisilme. Kenno on tasalaatuinen eikä siinä ole sävyvaihtelua.



KUVIO 6. Aurinkopaneelien sarjakytkentäperiaate (mukaiillen Alternative-energy)

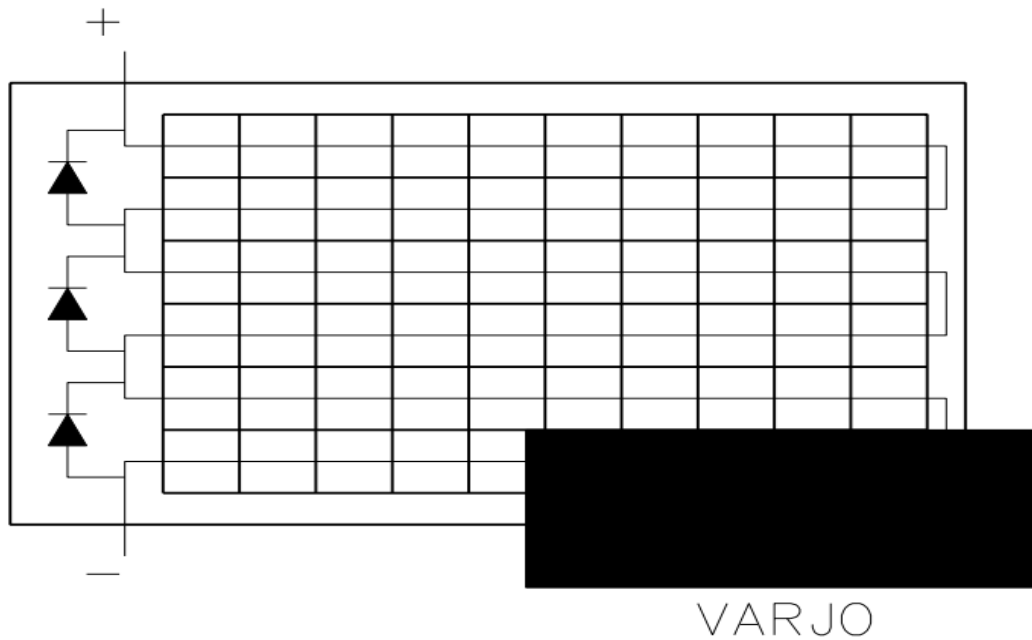
Kuvion 6 periaatteen mukaisesti aurinkopaneelit kytketään sarjaan, jolloin kentän jännitteeksi V muodostuu erillisten aurinkopaneelien napajännitteiden summa.

#### 2.6.4 Olosuhteiden vaikutukset

Varjostus, suuntaus, kallistus ja lämpötila vaikuttavat olennaisesti aurinkosähköjärjestelmän kokonaistuottoon. Erillisten tekijöiden yhteisvaikutusta on kuitenkin usein hankalaa arvioida tarkasti. Merkittäviä lisähyötyjä voidaan saavuttaa tuntemalla ja ottamalla huomioon eri tekijöiden vaikutukset. Lämpötilan suhteen jo parin asteen nousu voi vaikuttaa yksittäisen paneelin tuotantoon noin prosentilla. (Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus 2017, 18-19.) Suuntausten ja varjostusten vaikutukset ja niihin liittyvät testaukset ovat merkittävässä roolissa aurinkopaneelisimulaattorin toiminnallisuuden kannalta.

Tyypillisessä aurinkopaneelissa sen sisäiset kytkennät ovat suuressa roolissa varjostuksen vaikutuksen suuruuden kanssa, sillä varjostus vaikuttaa paneelin tehontuottoon merkittävästi. Vaikutusta voidaan

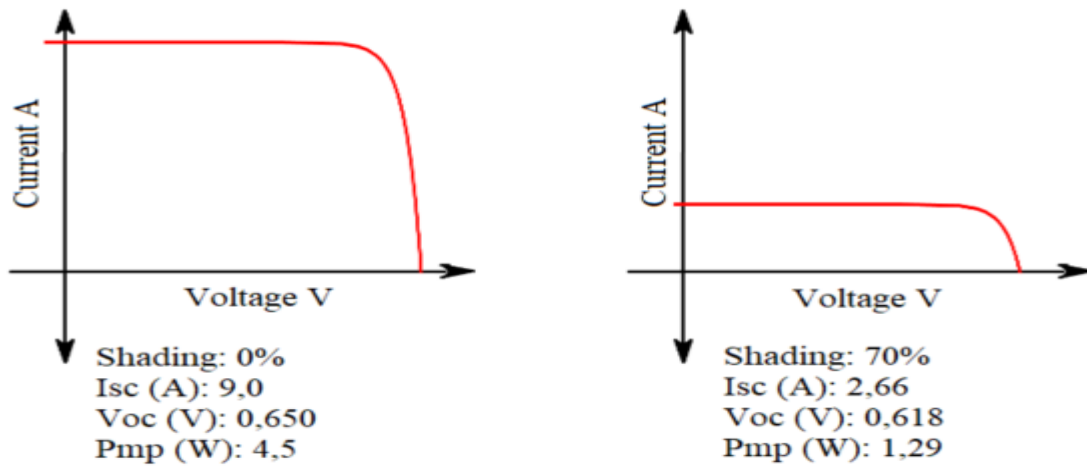
selittää myös paneelien sarjaan kytkennöillä. Pienikin varjostuma paneelin kennon pinnalle voi heikentää paneelin tuottoa tai pahimmassa tapauksessa tuotanto loppuu kokonaan, kun suuremman varjostuksen tapauksessa järjestelmän säätö ei enää selviä jännitteen muutoksesta. Yhden kennon kokonaan peittävä varjostus sammuttaa koko paneelin sisäisen varjostuksen suuntaisen kennoketjun, jolloin ohitusdiodi aktivoituu. Mikäli varjostus olisi pystysuuntaan, sammuisi käytännössä koko aurinkopaneeli. (Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus 2017, 20.)



KUVIO 7. Varjostuksen vaikutus (mukaiillen Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus 2017, 21)

### 2.6.5 Yksittäisen kennon varjostus

Yksittäisen kennon tuottama sähkövirta heikkenee, kun sitä varjostetaan. Tyypillisiä varjostuksen aiheuttajia ovat esimerkiksi kasvillisuus, rakennukset tai niiden osat ja kennon päälle kerääntyvä pöly. Kennon tuottama sähkövirta on suoraan suhteessa sen päälle lankeavan varjostuksen määrään. (Pveducation.) Yksittäisen kennon varjostuksen vaikutus voidaan nähdä kuviosta 8.



KUVIO 8. Varjostuksen vaikutus yksittäiseen aurinkokennoon (mukaien Pveducation)

## 2.6.6 Kallistus ja suuntaus

Suuntauksella tarkoitetaan aurinkopaneeleista puhuttaessa poikkeamaa etelän suunnasta asteina, jolloin suoraan etelää kohti suunnatun paneelin ajatellaan olevan  $0^\circ$  asteen kulmassa.  $-90^\circ$  tarkoittaa suuntausta suoraan itään ja vastaavasti  $+90^\circ$  tarkoittaa suuntausta suoraan länteen. Kallistus kertoo aurinkopaneelin asentokulman horisonttiin nähden.  $90^\circ$  asteen kulma ilmaisee paneelin olevan pystyssä ja  $0^\circ$  asteen kulma tarkoittaa makaavaa paneelia. Paras kokonaisvuosituotanto saavutetaan tavallisesti paneelien ollessa  $30 \dots 60^\circ$  asteen kulmassa. Yli tai alle näiden raja-arvokulmien vuosituotanto alkaa heiketä merkittävästi. Ilmaisella PVGIS laskurilla voidaan tutkia paneelien optimaalista asennus- ja suuntauskulmaa. (Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus 2017, 19-20.) Taulukosta 4 voidaan nähdä kallistuksen vaikutukset. Järjestelmän teho on 3,2 kWp ja suuntaus on suoraan etelään.

TAULUKKO 4. Kallistuksen vaikutus Pohjois-Pohjanmaalla (mukaien PVGIS)

Slope angle °	Yearly PV energy production (kWh)	% of max
25	2606,43	94,9 %
30	2664,85	97,1 %
35	2708,13	98,6 %
40	2735,16	99,6 %
<b>45</b>	<b>2745,34</b>	<b>100,0 %</b>
50	2739,55	99,8 %
55	2718,01	99,0 %
60	2680,86	97,7 %
65	2627,87	95,7 %

## 2.6.7 Spektraalinen vaste

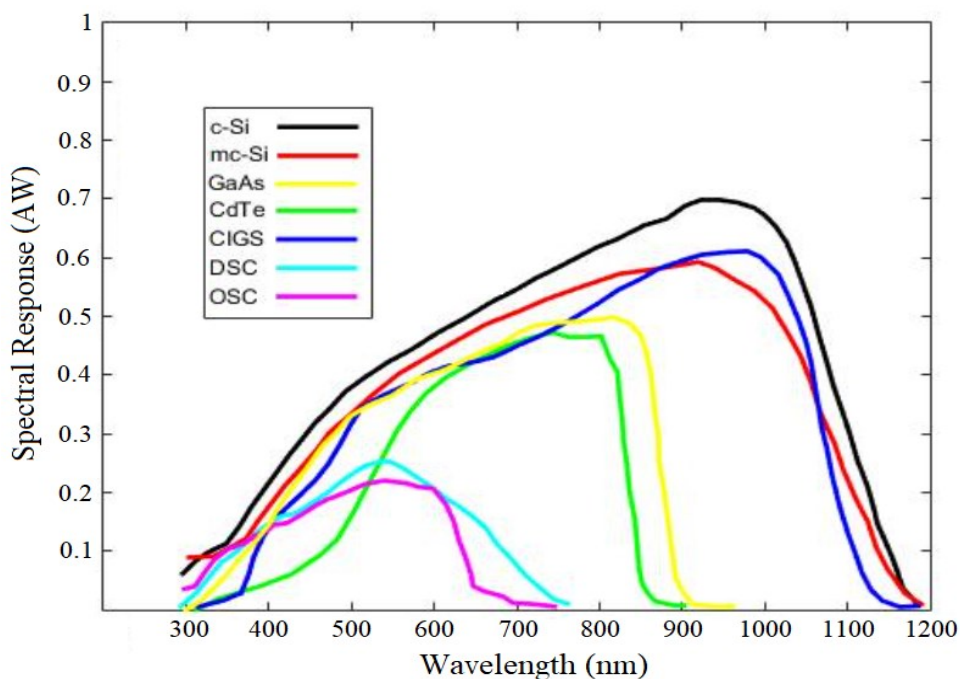
Testattaessa aurinkokennoja erilaisissa olosuhteissa valonlähteen spektri ei aina välttämättä vastaa vertailuspektriä. Vaihtelun vaikutusta aurinkokennon suorituskykyyn voidaan ilmaista spektrisellä epäsuhtakertoimella spectral mismatch factor. Aurinkokennoille on määritelty referenssispektri, joka helpottaa niiden keskinäistä vertailua. (PVPMC.)

Spektrinen epäsuhtakerroin voidaan määrittää käyttämällä standardia IEC-60904-7. Tämä on mahdollista, mikäli I-V-käyrä on herkkä ainoastaan oikosulkuvirralle ja kennon lämpötilalle eikä valonlähteelle ominaiselle spektrille. (PVPMC.)

Käytettävissä olevaa ja virraksi muunnettavaa säteilyn osuutta kutsutaan spektraaliseksi vasteeksi  $SR_\lambda$ . Spektraalinen vaste  $\frac{A}{W}$  on aallonpituuden funktio, jolla on suora yhteys kvanttihyötysuhteeseen QE. (PVPMC.) Aurinkokennon spektraalinen vaste voidaan määrittää yhtälön avulla:

$$SR_\lambda = QE_\lambda * \lambda \frac{e}{hc} \quad (17)$$

missä  $\lambda$  on aallonpituus,  $e$  on elektronin alkeisvaraus  $1,60217656 * 10^{-19}$  C,  $h$  on planckin vakio ( $6,63 * 10^{-34}$  Js) ja  $c$  on valonnopeus  $3 * 10^8$  m/s. Kuviosta 9 voidaan nähdä eräiden tyyppisten aurinkokennojen spektraaliset vasteet.



KUVIO 9. Aurinkokennojen spektraaliset vasteet (mukaihen PVPMC)

## 2.7 Standardi AM1.5

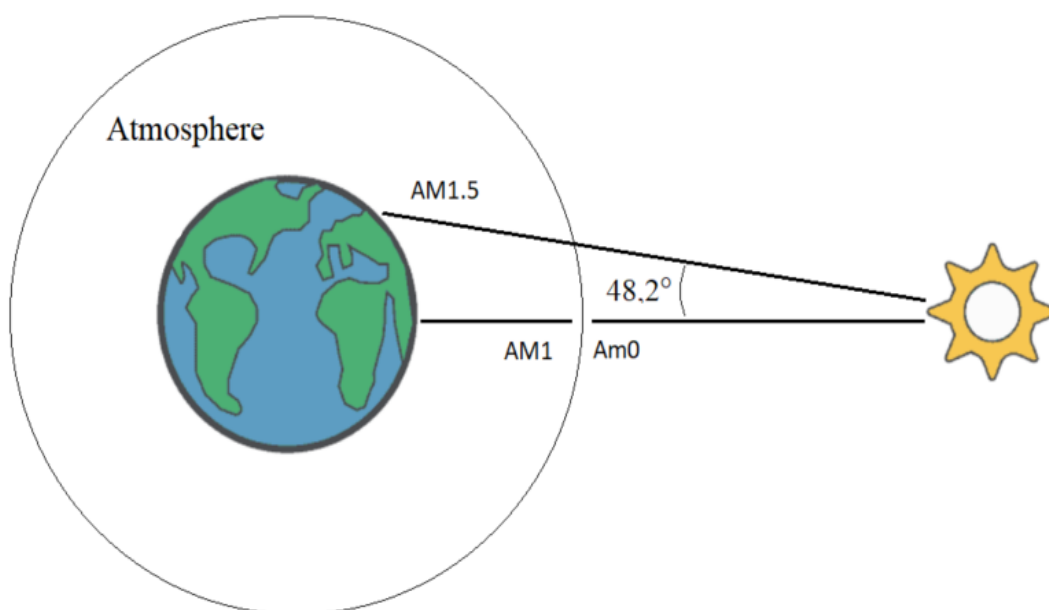
Auringon säteilyvoimakkuus vaihtelee maantieteellisen sijainnin mukaan. Tätä voidaan selittää paikallisten ilmakehässä esiintyvien olosuhteiden ja geometrinen muuttujien avulla. Tästä johtuen erilaisten aurinkokennoratkaisujen keskinäinen vertailu muodostuisi erittäin haastavaksi, kun mittauksia toteutetaan eri sijainneissa. Auringon spektri on standardoitu tästä syystä, jolloin mahdollistetaan aurinkokennoratkaisujen luotettava testaus ja keskenään vertailu. Standardia suunniteltaessa määritettiin auringon säteilyintensiteetiksi  $1000 \text{ W/m}^2$ . (O’Kane.)

AM viittaa ilman massa (air mass) ja aurinkoenergiatekniikassa tarkoitetaan (air mass coefficient). Auringon voidaan ajatella olevan mustakappale säteilijä, jonka pintalämpötila on noin 5800 K. Lämpösäteily saavuttaa maan kiertoradan edettyään 150 miljoonaa kilometriä. Tyhjiössä etenemisen vuoksi säteily ei tällä matkalla absorboitu tai hajoa ympäristön hiukkasten vaikutuksesta. Käytännössä standardi vastaa kysymykseen, kuinka pitkän matkan valo kulkee maan ilmakehässä ennen saapumistaan maan pinnalle. (G2Voptics.)

Valon tulokulmalla  $\theta_s$  ja AM standardilla on yhteys seuraavan yhtälön mukaisesti:

$$AM = \frac{1}{\cos\theta_s} \quad (18)$$

missä AM on kerroin valon kulkemalle matkalle maan ilmakehässä ja  $\theta_s$  on valon tulokulma.

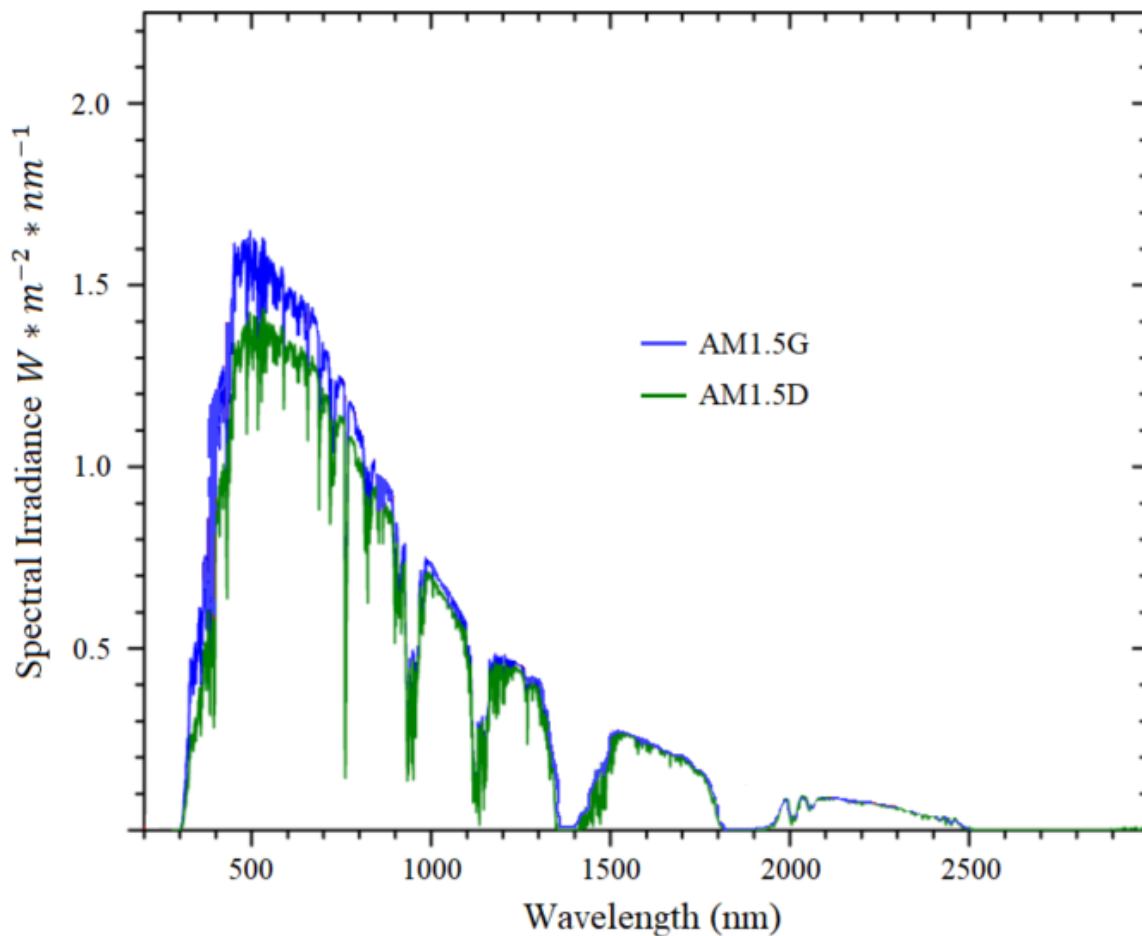


KUVIO 10. AM1.5 standardi ja valon tulokulman periaate (mukaillen G2Voptics)

Valon tulokulmaksi saadaan tällöin  $AM = \frac{1}{\cos(48,2)} = 1,5$ , kuten on esitetty kuviossa 10.

Vuotuista keskimääräistä säteilyä maan päällä eri leveysasteilla standardi AM1.5 edustaa hyvin, joten se on valikoitunut käytettäväksi standardiksi aurinkokennotestauksessa. Standardi jaetaan kahteen erityyppiin, jotka ovat standardi AM1.5D ja AM1.5G, joista 1.5D edustaa suoran auringonvalon referenssisäteily-spektriä ja 1.5G maailmanlaajuista horisontaalista säteily-spektriä. Yleisemmin aurinkokennotestauksessa käytetty standardityyppi on AM1.5G. (O’Kane.)

Täysi standardin mukainen aallonpituuden spektri käsittää aallonpituudet välillä 350...2500 nanometriä [nm]. Tämän alueen integroiduksi kokonaistehoksi luetaan standardin mukaan tällöin  $1000 \text{ W/m}^2$ . Todellisuudessa usein kiinnostavampi ja hyödyllisempi on aallonpituusalue välillä 300...1000 nm, jonka integroiduksi kokonaistehoksi arvioidaan karkeasti noin  $700 \text{ W/m}^2$ . Tämä perustellaan yleisesti niin, että fotonien energian ollessa kaistaväliä pienempi, eivät pidempien aaltopituuksien fotonit kykene imeytymään aurinkokennomateriaaleihin. (O’Kane.)



KUVIO 11. AM1.5 mukaiset spektrit (mukaillen Pveducation)

## 2.8 IEC-60904-9

Kansainvälinen standardi IEC-60904-9 määrittelee aurinkopaneelien testaukseen käytettävän laitteiston luokitukset ja vaatimukset spektrin ja säteilytehon suhteen. IEC-60904-9 on tarkoitettu aurinkopaneelisimulaattorin suunnitteluun aurinkokennojen monipuolista testausta varten. Standardi täyttää tarpeet myös tuotekehityksen näkökulmasta. (IEC-60904-9-2020, 6.)

Standardin 60904 yhdeksännen osan tarkoitus on määrittää luokitukset erityisesti aurinkokennotestauslaitteistolle, jota käytetään sisätiloissa, ja sitä voidaan soveltaa maan pinnalle asennettaville aurinkokennoille. Aurinkopaneelisimulaattorit luokitellaan niiden tuottamien spektrijakaumien vastaavuuksien perusteella yhteensä neljään eri luokkaan. Näitä ovat luokitukset A+, A, B ja C. Testauslaitteistoa ei voida luokitella standardin mukaiseksi, mikäli se ei täytä alimman luokituksen C vähimmäisvaatimuksia. Edellä mainitut luokitukset ottavat huomioon ja asettavat kriteerit simulaattorilaitteiston spektrijakaumalle, säteilyn epätasaisuudelle testitasossa ja säteilyn ajalliselle epävakaudelle. Simulaattorin standardin mukainen luokitus kertoo simulaattorin laadusta. (IEC-60904-9-2020, 6.)

TAULUKKO 5. IEC-60904-9 spektrivasteet (mukaillen IEC-60904-9, 10-12)

Wavelength (nm)	% of total irradiance. Wavelength 300 to 1200nm	Spectral match %			
		A+	A	B	C
		0,875 - 1,125	0,75 - 1,25	0,6 - 1,4	0,4 - 2,0
300 - 470	16,61	14,5 - 18,7	12,5 - 20,8	10 - 23,3	6,6 - 33,2
470 - 561	16,74	14,6 - 18,7	12,6 - 20,9	10 - 23,4	6,7 - 33,5
561 - 657	16,67	14,6 - 18,8	12,5 - 20,8	10 - 23,3	6,7 - 33,3
657 - 772	16,63	14,6 - 18,7	12,5 - 20,8	10 - 23,3	6,7 - 33,3
772 - 919	16,66	14,6 - 18,7	12,5 - 20,8	10 - 23,3	6,7 - 33,3
919 - 1200	16,69	14,6 - 18,8	12,5 - 20,9	10 - 23,4	6,7 - 33,4

### 3 LAITTEISTON SUUNNITTELU

Tämän osion tarkoituksena on esitellä aurinkopaneelisimulaattorin kehitysvaiheet ja määritellä laitteistossa käytettävät ratkaisut. Tarvikevalintoja verrataan edellä esiteltyyn valaistusteknisen teorian kokonaisuuteen.

#### 3.1 Apogee SS-110

Tuotekehitys aloitettiin mittaamalla ja tutkimalla päivänvalon spektriä suorassa auringonpaisteessa. Mittalaitteena toimi otsikon mukainen Apogee SS-110-spektroradiometri, jonka avulla eri valonlähteiden koostumusta voidaan mitata luotettavasti. Mittalaite lainattiin Centria-ammattikorkeakoululta. Laite on Centrian sähkötekniikan opiskelijoille entuudestaan tuttu, sillä tätä kyseistä laitetta on käytetty opintojen aikana eri yhteyksissä. Apogee SS-110 kykenee mittaamaan valon spektrin aallonpituuksia välillä 340...820 nm.

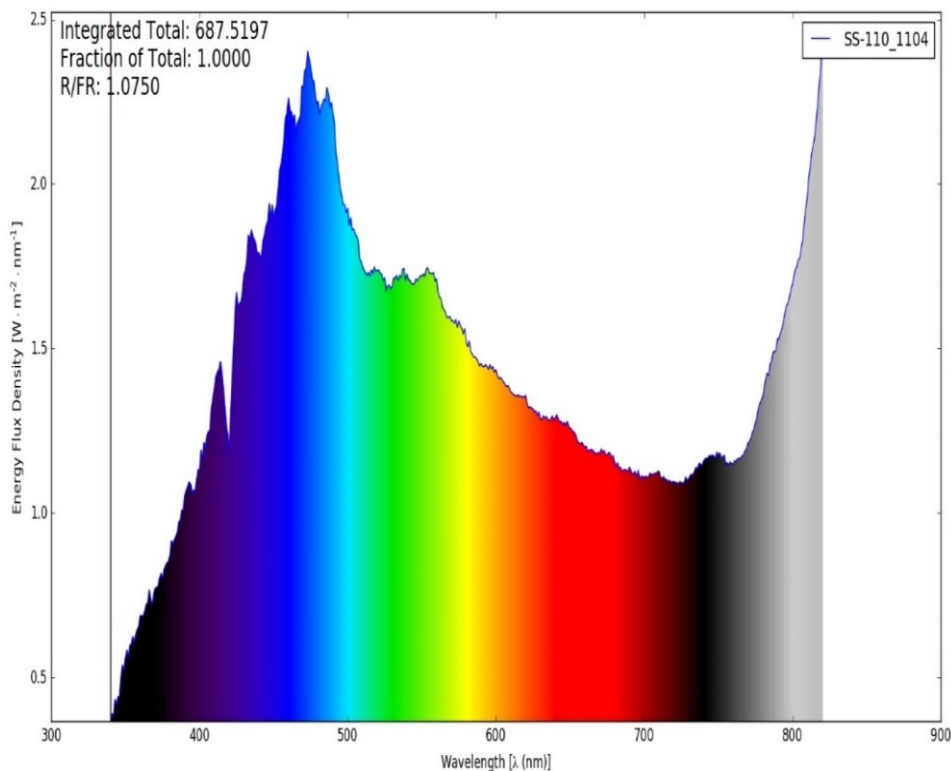


KUVA 2. Apogee SS-110-spektroradiometri.



Mittalaitetta ohjataan tietokoneella Apogee spectrovision-ohjelmistolla. Laite kytketään tietokoneen usb-porttiin sen omalla liitäntäkaapelilla. Laite otetaan käyttöön asettamalla sille ensin ns. dark reference-tieto, jolloin laitteen mittauspää peitetään säteilyä läpäisemättömällä materiaalilla, minkä jälkeen ohjelmistolla asetetaan tämä referenssitila.

Spektroradiometrillä voidaan mitata jatkuvaa tietoa valon spektrijakaumasta (continuous measurements) tai sillä voidaan ottaa yksittäisiä hetkellisiä kuvakaappauksia (single measurement). Mittaustiedot saadaan tallennettua JPG-kuvatiedostoina ja Microsoft Excelin tukemana CSV-tiedostona. Kuva-tietotallennus antaa graafisen esityksen valon spektrijakaumasta ja integroidusta valotehosta valitulla aallonpituusalueella. CSV-tiedosto taas sisältää erittäin tarkan dataerottelun valon sisältämästä tehosta sen eri aallonpituusalueilla.



KUVIO 12. Suoran auringonvalon spektri.

Kuviossa 12 nähtävissä oleva auringonvalon spektri on mitattu suorasta auringonpaisteesta 14.4.2024 spectrovision ohjelmistolla. Integrated total 687,5197 ilmaisee auringon säteilyintensiteetin  $W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$ . Havaitaan, että mittaustulos vastaa melko hyvin standardin AM1.5 määrittämää spektriä. Todellisuudessa mittaustulosten vaihtelu on kevätauringossa suhteellisen suurta riippuen myös ympäristön vaikutuksesta aiheutuvasta säteilystä.

TAULUKKO 6. Mittaustulokset eri aallonpituusalueilla.

Wavelength (nm)	300 - 470	470 - 561	561 - 657	657 - 772	772 - 820	Sum
$W \cdot m^{-2} \cdot nm^{-1}$	168,8348	171,6305	134,2361	131,7319	81,08651	<b>687,5197</b>
% of irradiance	24,55709	24,96371	19,52469	19,16045	11,79406	100

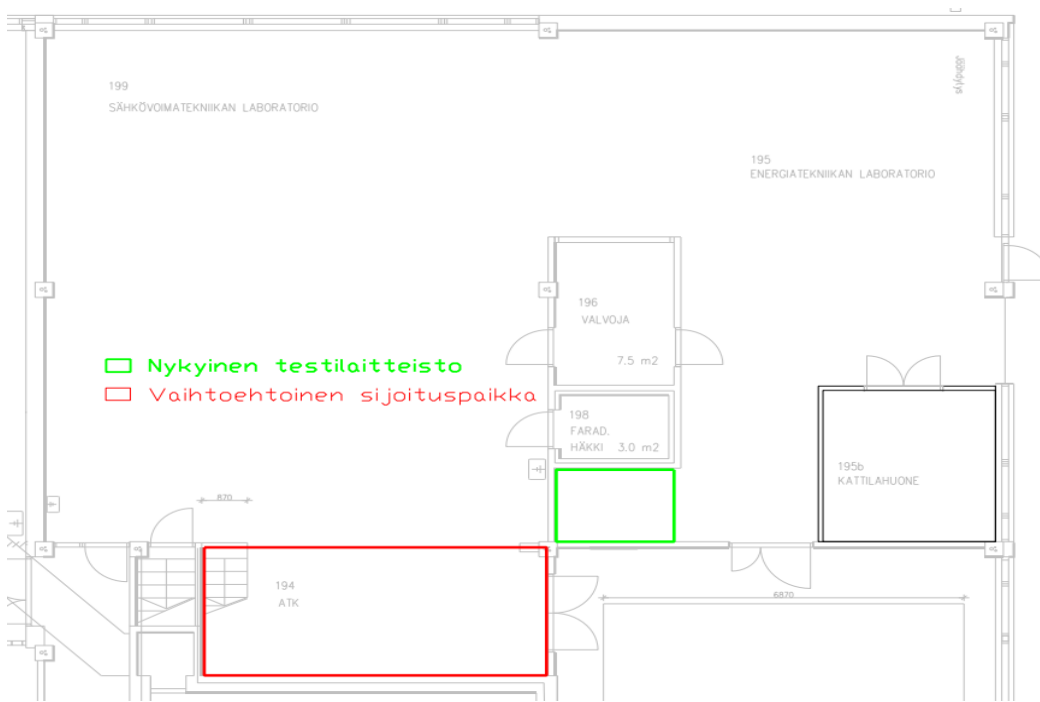
Taulukosta 6 huomataan, että pihalla suoritettu mittaus ei vastaa arvoiltaan standardin IEC-60904-9 asettamia vaatimuksia aurinkokennotestauslaitteistolle, kuten on esitetty taulukossa 5. Tämä on sinänsä odotettavaa, sillä standardi asettaa vaatimukset testauslaitteistolle eikä satunnaisotanta suorasta aurin-  
gonvalosta useinkaan tämän vuoksi voi täsmätä uusimman standardin vaatimuksiin. Huomion arvoista on myös mittalaitteen mittauskyky spektrin aallonpituusalueella. Mittausalueella ei saavuteta standar-  
dissa IEC-60904-9 määritettyä aluetta kokonaan.

### 3.2 Laboratorio ja uusi testauslaitteisto

Alun perin tavoitteena oli, että uusi testauslaitteisto voitaisiin asentaa suoraan vanhan tilalle olemassa olevaan tilaan. Nykyinen testauslaitteisto nähdään kuvassa 3. Nykyinen laitteisto sisältää 12 kpl FTLight merkistä 300 W LED-valaisinta. Valaisinten nykyinen syöttö on 3x16 A. Laitteisto ei vas-  
taan standardien vaatimuksia.



Kuva 3. Laboratorion nykyinen testilaitteisto.



KUVA 4. Sähkövoimatekniikan laboratorion pohjakuva.

Kuvassa 4 nähdään Centria-ammattikorkeakoulun Ylivieskan yksikön sähkövoimatekniikan laboratorion pohjakuva, josta käy ilmi nykyisen laitteiston sijainti (vihreä alue) sekä vaihtoehtoinen laitteiston sijoituspaikka (punainen alue). Vaihtoehtoista sijoituspaikkaa voidaan harkita, mikäli osoittautuu, ettei uutta laitteistoa voida asentaa olemassa olevan tilalle esimerkiksi mittojen tai laitteiston etäisyysvaatimuksen vuoksi.

Asennusalueiden mitat nähdään taulukosta 7.

TAULUKKO 7, Asennusalueiden mitat.

	Pituus m	Leveys m	Korkeus m
<b>Vihreä alue</b>	2,23	1,65	2,34
<b>Punainen alue</b>	6,58	2,97	2,25

### 3.3 Laitetoimittajat

Varsinaisen testauslaitteiston kartoittaminen aloitettiin etsimällä tietoa soveltuvista ratkaisuista internetistä. Nopeasti kävi ilmi, että potentiaalisia testauslaitteiston toimittajia standardien AM1.5G ja IEC-60904-9 täyttävälle valonlähteille ei ole koko maailmassa kuin muutama. Standardien vaatimukset täyttävistä laitetuottajista laadittiin listaus taulukon 8 mukaisesti.

TAULUKKO 8. Listaus potentiaalisista laitetoimittajista.

Supplier	Country	City	Homepage
Eternalsun	Alankomaat	Haag	<a href="https://www.eternalsun.com/">https://www.eternalsun.com/</a>
G2V Optics	Kanada	Edmonton	<a href="https://g2voptics.com/">https://g2voptics.com/</a>
Halocell	Australia	Fyshwick	<a href="https://halocell.energy">https://halocell.energy</a>
UV-Technik	Saksa	Ilmenau	<a href="https://www.uvtechnik.com/de">https://www.uvtechnik.com/de</a>
Wavelabs	Saksa	Leipzig	<a href="https://wavelabs.de/">https://wavelabs.de/</a>

Kaikkiin laitetoimittajiin oltiin yhteydessä sähköpostitse tai valmistajan omilta internetsivuilta löytyvän yhteydenottolomakkeen välityksellä. Jokainen taulukossa 8 listattu laitetoimittaja reagoi yhteydenottoon ja keskustelua käytiin sähköpostin välityksellä aktiivisesti. Toimittajista Eternalsunin, G2V Opticsin ja Wavelabsin edustajien kanssa käytiin myös Teams tai Google Meet-palaverit, joissa yritysten edustajien kanssa käytiin läpi laitteistolta vaadittavia ominaisuuksia ja mietittiin testauslaitteiston soveltuvuutta sekä asennuspaikkaa laboratorion pohjakuvaa ja olemassa olevaa esitietoa hyödyntäen.

Laitetoimittajien ehdottamat ratkaisut poikkesivat toisistaan hankintahinnan, fyysisten mittojen sekä valonlähteen ja aurinkopaneelien väliin vaaditun etäisyysvaatimuksen osalta. Asennustilojen mittojen asettamat rajoitteet ja laitetoimittajien eri tyyppiset ratkaisut eivät välttämättä olisi täysin ongelmattomia yhdistää toimivaksi testauskokonaisuudeksi, sillä nykyisten tilojen fyysiset mitat asettavat tulevalle laitteistolle omat rajoituksensa. Ennalta määritetty hankkeen osabudjetti tulisi myös suurella todennäköisyydellä ylittymään.

### 3.3.1 Eternal Sun

Eternal Sunin päätoimipiste sijaitsee Haagin kaupungissa Alankomaissa. Yrityksen internetsivut ovat yleisilmeeltään luotettavan oloiset ja antavat vaikutelman asiantuntijuudesta. Yritys on erikoistunut auringon valoa simuloivien valonlähteiden kehitykseen ja myyntiin.

Eternal Sunin mainoslauseen mukaan jokaiseen päivään kuuluu maailman tarvitseman aurinkoenergian suorituskyvyn varmistaminen. He rakentavat huippuluokkaisia auringonvaloa tuottavia simulaattoreita. Yritys tarjoaa myös maailmanlaajuisessa aurinkoenergian toimitusketjussa tarvittavia tarkastus- ja testauspalveluja. (Eternalsun 2024.)

Yhteyttä Eternal Suniin otettiin 22.4.2024. Reagointi oli nopeaa ja Google Meet-palaveri järjestettiin 24.4.2024. Palaverin jälkeen saatiin Eternal Sunilta esitteet ja hinta-arviot heidän tarjoamistaan tuotteista. Tuotteita oli kaksi erilaista, joista toinen soveltuisi huomattavasti paremmin Centria-ammattikorkeakoulun käyttöön. Vaihtoehtoista parempi esitellään tässä opinnäytetyössä tarkemmin.

LED Light Soaker (LLS) on ns. steady state-simulaattori aurinkopaneelitestauksiin. Laitteisto on ilma-jäähdytteinen, joten se ei tarvitse toimiakseen erillistä jäähdytysratkaisua. Laite on skaalautuva ja sillä voidaan testata kaikenkokoisia aurinkopaneeleita. LED Light Soaker täyttää kaikki viimeisimpien standardien vaatimukset. (Eternalsun.)



KUVA 5. LED Light Soaker LLS. (Eternalsun)

Testilaitteessa on tarkka lämpötilanohjaus ja säädettävä säteilytehonvoimakkuus, jolloin testiympäristö voidaan räätälöidä tarkasti vastaamaan haluttuja olosuhteita. Spektrialue on laaja ja se on myös säädettävissä. Johtavat aurinkopaneelitestaukseen erikoistuneet laadunvalvontalaboratoriot ovat antaneet LED Light Soakerille tunnustusta maailmanlaajuisesti. (Eternalsun.) Eri laboratorioiden myöntämä tunnustus laitetta kohtaan kertoo aukottomasti sen laadusta sekä hyvistä ominaisuuksista. Taulukosta 9 voidaan nähdä testilaitteen tärkeimmät ominaisuudet.

TAULUKKO 9. LED Light Soakerin tekniset tiedot (mukaillen Eternal Sun)

General Specifications			Thermal performance	
Test area	2300 x 1300mm		Temperature range	+55 to +85 °C
Optical axis	Horizontal		Temperature stability	<±2°C
PV Module orientation	Landscape		Temperature uniformity	<±4°C
Cooling	Air		Temperature sensors	4 x surface TC
Light Performance	Steady	Pulsed	Measurement performance	
Classification at start of life @1000W/m <sup>2</sup>	A+A+A+	A+A+A+	Voltage ranges	7 ranges: 10...450V
			Current ranges	4 ranges: 3...25A
Classification after 5k hours @ 1000W/m <sup>2</sup>	AAA+	AAA+	Power ranges	5W - 700W
			IV Sweep duration	0,1 - 120 seconds
Spectral match	<±25% A	<±12,5% A	Sweep direction	Isc to Voc, Voc to Isc
Non-uniformity	<±2% A	<±1% A+	DAQ meas. Resolution	16-bit
Temporal instability	<±1% A+	<±1% A+	Measurement method	4-wire
IEC classification range	300 - 1200nm		DUT connector	Stäubli MC4
Irradiance range	200 - 1000W/m <sup>2</sup>		PV module state	MPP, Voc, Isc
Intensity monitoring	Monitor cell		MPP Tracking	Yes
Lamp Type	LED		Electronic load	Single-quadrant
Light source lifetime	36k hours or 5 years		Number of modules meas.	1
Software and controls				
Control system	PLC, connected to PC via network			
User Interface	Graphical User Interface (browser based)			
Data logging	SQL database on PC			
IV sweep options	Sweep time, Sweep direction, Post IV state, Temperature correction on/off, Irradiance correction on/off			
Recipe options	Step duration, nr. of cycles, Temperature setpoint, Module state (Pmax, Voc, Isc), Intensity setting, IV on/off, light on/off			
Database module parameters	Serial no., Pmax, Eff, Isc, Voc, Temp, Irr, Imp, Vmp, FF, Rs, Rsh, Sweep time, Sweep direction			
Fault detection/diagnostics	PLC controlled monitoring of LED PCBs, temperatures & functioning of critical components			
Installation requirements				
Dimensions [L x W x H]	3,460 x 900 x 2,560 mm (doors closed)			
Weight	1500 kg			
Electrical	230/400 V, 50/60 Hz, 3P+N+PE, 63 A			
Power consumption	23.5 kVA (continuous at 1000 W/m <sup>2</sup> )			
Heat load to environment	27 kW			
Ambient air temperature	20 - 25 °C			
Ambient humidity	30 - 70% RH, non-condensing			

Taulukon 9 tietojen perusteella havaitaan kyseisen testilaitteiston täyttävän standardin AM1.5G vaatimukset ja sen spektrijakauman olevan standardi IEC-60904-9 mukainen. Valaistuksen säteilyintensi-

teetti on säädettävissä alueella  $200 - 1000 \text{ W/m}^2$ . Valmiiksi kalibroituja asetuksia on 5 kpl koko intensiteettiskaalan alueella aina kahdensadan watin tasavälein. Itse testilaitteisto on ilmajäähdytteinen, mutta suuren ympäristöönsä luovuttavan lämpötehon vuoksi asennustilojen ilmanvaihdosta on huolehdittava. Laitetta ohjataan tietokoneella selainpohjaisella graafisella käyttöliittymällä.

Testilaitteiston suuren koon vuoksi asentaminen nykyisen simulointilaitteiston paikalle vihreälle alueelle (KUVA 4) ei ole mahdollista, vaan kyseinen testilaitteisto tulisi vaihtoehtoisesti asentaa esimerkiksi kuvassa 4 näkyvälle punaisella rajatulle alueelle, joka tulisi vaatimaan hieman enemmän käytännön järjestelyjä. Vaihtoehtoisessakin ratkaisussa ongelmaksi muodostuu tilan korkeus, joka ei ilman muutostöitä tule riittämään. Laitteiston huoltokustannukset on myös syytä ottaa huomioon, sillä taulukon 9 mukaisesti valonlähteen eliniäksi on ilmoitettu 36000 tuntia tai 5 vuotta. Käyttötuntien tai ajan täytyessä valmistaja ei enää voi taata valonlähteen standardien vaatimuksien toteutumista.

Eternal Sunin edustajan kanssa käydyn sähköpostikeskustelun perusteella LED Light Soaker-testauslaitteiston lopullinen hankintahinta asettuu 300000 – 350000 euron väliin. (Miliou 2024). Tässä tapauksessa se tulisi ylittämään alkuperäisen testauslaitteistolle varatun budjetin reilusti, mutta täyttää muilta ominaisuuksiltaan vaatimukset sen jokaisella osa-alueella. Lopullinen hankintahinta muodostuu laitteiston lisäoptioista, jotka määritellään tapauskohtaisesti ja tilaajan tarpeet huomioon ottaen.

Eternal Sunin tarjoama toinen aurinkokennojen testauslaitteisto oli ns. flasher-tyyppinen laitekokonaisuus, joka eroaa toiminnaltaan Light Soaker-laitteistosta huomattavasti. Laitteisto on nimeltään Laboratory Flasher XL. Testilaitteisto on toteutettu xenon-tyyppisellä valonlähteellä ja se on nimensä mukaisesti välähdykseen perustuva laitekokonaisuus. Testilaitteisto täyttää kaikki standardin vaatimukset, mutta soveltuu paremmin esimerkiksi aurinkokennojen IV-kuvaajien piirtoon ja näistä tehtävään tulkintaan. Ominaisuuksiensa vuoksi se soveltuu paremmin laboratorio-olosuhteisiin aurinkokennojen tuotekehityspoolelle, jolloin erityisesti opetusikäisessä mielenkiintoisten aurinkopaneelin kallistuksen ja varjostuksen vaikutuksen tutkiminen tehontuotto silmällä pitäen ei olisi yhtä helppoa. Tämän laitekokonaisuuden lopullinen hankintahinta LED Light Soakeriin verrattuna on huomattavasti edullisempi. Sähköpostikeskustelun perusteella Laboratory Flasher XL-laitteiston lopullinen hankintahinta asettuu 200000 - 250000 euron väliin. (Miliou 2024). Tämänkin laitteiston lopullinen hankintahinta ylittää ennalta määritetyn budjetin, eikä se sovellu ennalta mietittyyn käyttötarkoitukseen yhtä hyvin. Flasher tyyppisen laitekokonaisuuden yleisilme voidaan nähdä kuvasta 6.



KUVA 6. Laboratory Flasher XL. (Eternalsun)

### 3.3.2 G2V Optics

G2V Opticsin päätoimipiste sijaitsee Edmontonissa Kanadassa. G2V Optics on erikoistunut LED-tekniikalla toteutettujen aurinkosimulaattorien suunnitteluun ja toteutukseen. Yrityksen valikoimassa on ratkaisuja erilaisiin ja erikokoisten aurinkokennojen testaukseen soveltuvista laitteistoista. Valikoimassa ei ole ainoastaan tietyn tyyppisiä tuotteita, vaan erilaiset ratkaisut ovat räätälöitävissä tilaajan tarpeen ja toiveiden mukaisesti.

Yrityksen internetsivut ovat yleisilmeeltään todella luotettavat. Yhteistyökumppaneina ilmoitetaan olevan esimerkiksi Yhdysvaltain liittohallituksen alainen ilmailu- ja avaruushallintovirasto NASA, Belgialainen yliopisto U Hasselt, Belgialainen yliopisto KU Leuven ja Yhdysvaltalainen ohjelmistoalan yritys Microsoft. Yritys tuottaa internetsivuilleen artikkeleita ja tieteellisiä julkaisuja lähes kaikesta auringon simulointiin ja valon perusolemukseen liittyvästä tekniikasta.

Yhteyttä G2V Opticsiin otettiin 23.4.2024. Yritys reagoi yhteydenottoon nopeasti ja Google Meet-palaveri sovittiin pidettäväksi 26.4.2024. Palaverissa päästiin tutkimaan ja pohtimaan Centria-ammattikorkeakoululle sopivaa aurinkopaneelitestauslaitteistoa. Yrityksen tuotteet olivat jo valmiiksi todella



kiinnostavia, mutta palaverissa päästiin saamaan tietoa eräästä aurinkopaneelitestaukseen suunnitellusta laitteistosta, joka on vielä osittain tuotekehityksen alla ja tullaan julkaisemaan myöhemmin vuoden 2024 aikana.



KUVA 7. G2V Optics havainnekuva. (G2V Optics Knowledge base)

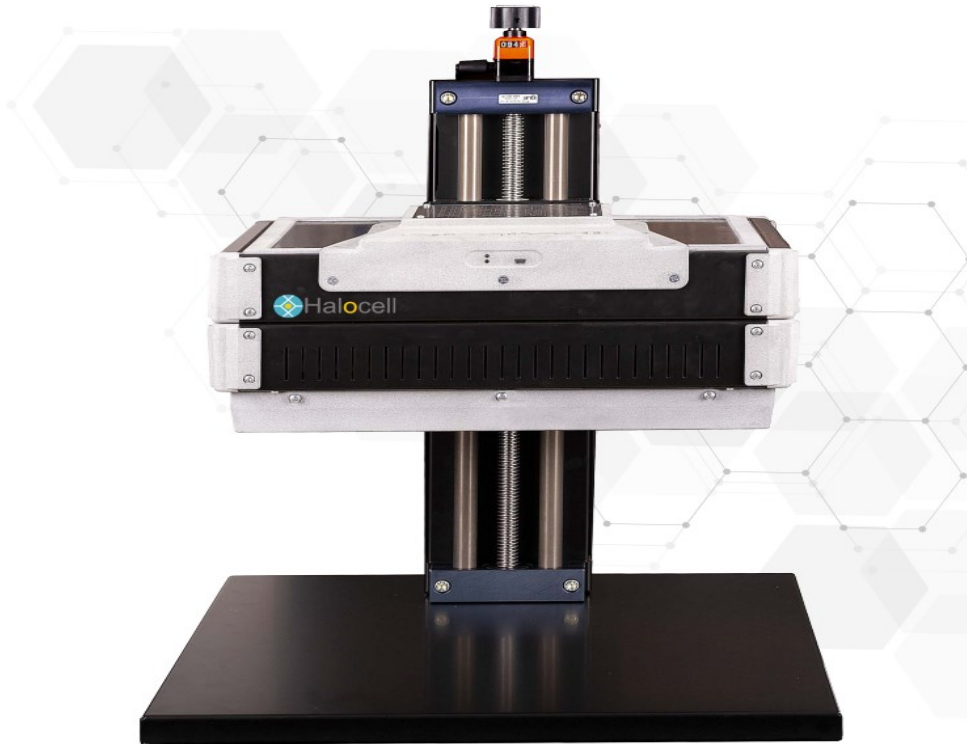
Tuotekehityksen alla olevaan testauslaitteistoon liittyvät tiedot olivat tämän opinnäytetyön kirjoitushetkellä luottamuksellista ja salassa pidettävää tietoa. Edellä mainitusta syystä niitä ei tässä opinnäytetyössä voitu esitellä.

### 3.3.3 Halocell

Halocellin päätoimipiste sijaitsee Australiassa Fyshwickin kaupungissa. Yrityksellä on toimipiste myös Italiassa Rومان kaupungissa, jossa he kokoavat ja rakentavat myymänsä tuotteet. Halocellin mukaan yritys on Australian mahdollisuus olla maailman johtava perovskiitin käyttöön erikoistunut yritys aurinkokennotekniikassa. (Halocell 2023). Perovskiitti on mineraali, jolla ferrosähköisiä ominaisuuksia. Perovskiitin käyttö on yleistynyt nopeasti aurinkokennotekniikassa ja se nähdään monissa yhteyksissä nousevana tähtenä aurinkokennotekniikassa. (DS New Energy 2019.)

Halocell on perustettu vuonna 2019. Yhtiön nimi oli alun perin Great Cell Energy, mutta se nimettiin uudelleen vuonna 2023. Uudelleen nimeämisen perusteeksi yritys ilmoittaa sen, että uusi nimi heijastaa paremmin yrityksen toiminnassa vahvasti mukana olevaa kemiantekniikan asiantuntemusta. (Halocell 2023a.)

Yhteyttä Halocelliin otettiin 22.4.2024. Yritys reagoi yhteydenottoon seuraavana päivänä 23.4.2024. Yritykseltä saatiin esitteet heidän tarjoamista tuotteista. Tarjottuja tuotemalleja oli kaksi erilaista. Tässä kohtaa kävi ilmi, että Halocellin tarjoamat tuotteet soveltuivat ominaisuuksiensa vuoksi ainoastaan pienempien yksittäisten aurinkokennojen testaukseen. Tuotesarja on nimeltään Hyperion IV ja muodostuu kahdesta mallista, (HYP10) ja (HYP20). Tuotteen mallinimi viittaa suoraan laitteella testattavaan pinta-alaan senttimetreinä.



KUVA 8. Halocell Hyperion IV. (Halocell)

Testilaitte täyttää vaatimukset standardien IEC 60904-9-2007 ja AM 1.5G mukaisesti. Huomattavaa oli, että kyseinen IEC-standardi on päivittynyt tämän jälkeen vuonna 2020. Uudessa standardissa spektri-kaumaa on päivitetty, kuten on esitetty tämän opinnäytetyön taulukossa 5.

Neljännän sukupolven Hyperion aurinkokennotestauslaitte on energiatehokas ja sen sähkön syöttö voidaan ottaa tavallisesta schuko-pistorasiasta. Valonlähde on toteutettu LED-tekniikalla, jolloin valonlähteen elinikä on saatu pitkäksi. Simulaattori on kevyt ja mahdollistaa näin ollen sen helpon liikuteltävyyden. Testilaitteen valon spektri on käyttäjän kustomoitavissa ja kustomoidut spektrit voidaan tallentaa laitteen ohjausjärjestelmään, jolloin ne ovat sieltä helposti saatavissa ilman tarvetta uudelleenkalibroinnille. (Halocell 2023b.)

Laitteen ohjausjärjestelmänä toimii tietokoneella ajettava käyttäjäystävällinen ohjelmisto. Ohjelmiston avulla valonlähteen spektriä voidaan muokata käyttäjän tarpeiden mukaisesti. Valonlähteen ledit on jaettu neljään erilliseen vyöhykkeeseen, joista jokainen on ohjelmiston avulla säädettävissä ja himmennettävissä. Tämä mahdollistaa esimerkiksi auringon nousun simuloinnin testilaitteen avulla. LED-tekniikalla toteutetun valonlähteen etuina verrattuna esimerkiksi xenon-tekniikalla toteutettuun valaistukseen on, että ledit eivät tarvitse suodattimia halutun spektrin simuloimiseksi. (Halocell 2023.)

Taulukosta 10 voidaan nähdä testilaitteen tärkeimmät ominaisuudet.

TAULUKKO 10. Halocell Hyperion IV:n tekniset tiedot (mukaillen Halocell)

<b>Dimensions</b>	<b>HYP10</b>	<b>HYP20</b>
L 42cm x W 42cm x H 20cm		x
L 22cm x W 22cm x H 12cm	x	
Distance from the light source to achieve 1 SUN (Default)	9cm	10cm
<b>Solar Output</b>		
Energy level	Less than 0,1 SUN up to 1,1 Sun	
Power output	1000W/m <sup>2</sup> tuneable (below 0,1 SUN up to 1,1 SUN)	
Spatial Uniformity	±2% on area larger than 10x10cm (Class A)	±2% on area larger than 10x10cm (Class A+)
Spectral match	±6,5% on area larger than 10x10cm (Class A++)	±6,5% on area larger than 20x20cm (Class A++)
Temporal stability	Below ±0,1% (Class A++++)	
Emission band nm	360 - 1100	
<b>Lamp specifications</b>		
Lamp type wattage	LED matrix single dot <180W	LED matrix single dot <450W
Lamp life	20k hours	
<b>Power supply specs</b>		
Source	100-260 Vac 50-60Hz	
Ripple	250mVP-P	
RFI/EMI	EN55015 , EN61000-3-2, EN61000-3-3, EN61547,EN55024	
Line regulation	0,5 %	
Current regulation	0,5 %	
Safety	Isolation resistance: 100 Mohm/500vdc 25°C/70% RH	
Filters	No filters required to match AIR MASS1.5G (360 nm -1100 nm)	

Taulukosta 11 voidaan nähdä testilaitteen spektraalisen vasteen jakauma.

TAULUKKO 11. Halocell Hyperion IV spektrivasteet (mukaiillen Halocell)

Spectral Match	% of irradiance
400 - 500nm	17.6% - 19.6% (Typical: 18,6%)
500 - 600nm	18.7% - 21.4% (Typical: 19.8%)
600 - 700nm	17.6% - 19.6% (Typical: 18,8%)
700 - 800nm	14.0% - 15.8% (Typical: 14.2%)
800 - 900nm	11.8% - 13.3% (Typical: 12,3%)
900 - 1100nm	14.9% - 16,9% (Typical: 16.3%)

Saatujen tietojen perusteella Halocellin tuotteet ovat ominaisuuksiensa vuoksi kiinnostavia, mutta ne eivät sovellu Centria-ammattikorkeakoulun käyttöön siinä käyttötarkoituksessa kuin alun perin on suunniteltu. Tuotteet eivät sovellu testilaitteistoksi, sillä näillä laitteilla testattavissa oleva pinta-ala jää liian pieneksi eikä laitteilla kyetä testaamaan nykyajan normaalikokoista aurinkopaneelia. Pienempien aurinkokennojen testaukseen laitteet olisivat erittäin potentiaalinen vaihtoehto.

Sähköpostikeskustelun perusteella laitteiden lopulliseksi hankintahinnaksi muodostuisi HYP10 laitteelle 23000 euroa ja HYP20 laitteelle 33000 euroa. (Sorbello 2024). Laitteet mahtuisivat helposti hankkeelle suunniteltuun budjettiin, mutta eivät täyttäisi tulevalle laitteistolle suunniteltua käyttötarkoitusta.

### 3.3.4 UV-Technik

UV-Technikin päätoimipiste sijaitsee Saksassa Ilmenau kaupungissa. Yritys on perustettu vuonna 1991. Yrityksellä on toimipiste myös Isossa-Britanniassa ja se on ollut vuodesta 2011 lähtien Hoenle Groupin omistuksessa. Yritys on maailmanlaajuisesti menestyvä lamppuasiantuntija erikoisosaamisenaan UV-valaistus ja niihin liittyvät komponentit. (UV-Technik 2024.)

Yhteyttä UV-Technikiin otettiin sähköpostitse 24.4.2024. Yritys reagoi yhteydenottoon nopeasti jo saman päivän aikana. Sähköpostikeskustelujen aikana kävi ilmi, ettei yrityksellä ollut tarjota auringonvalon spektrin mukaista ja standardit täyttävää LED-tekniikalla toteutettua ratkaisua. (Norris 2024a). Vaihtoehtoinen ratkaisu olisi kuitenkin olemassa, joten se päätettiin ottaa mukaan aurinkosimulaattorin kartoitukseen.

Sähköpostikeskustelun perusteella yrityksen tulisi tehdä valaisinlaitteiston standardien vaatimusten varmistamiseksi testauksia, jotta saadaan luotettava tieto standardin AM1.5G toteutumisesta kyseisellä valonlähderatkaisulla. (Norris 2024b).

Tämä testaus tulisi viemään yritykseltä ennalta määrittelemättömän ajan. UV-Technikin tekemää tarjousta ja laitteiston teknisiä tietoja ei ehditty saamaan mukaan tähän opinnäytetyöhön, joten heidän esittämänsä ratkaisua ei tässä opinnäytetyössä voida esitellä. Todella aktiivisen sähköpostikeskustelun johtopäätöksenä voidaan kuitenkin arvioida UV-Technikin olevan potentiaalinen laitetoimittaja Centria-ammattikorkeakoulun tarpeet huomioon ottaen.

### 3.3.5 Wavelabs

Wavelabsin päätoimipiste sijaitsee Saksassa Leipzigin kaupungissa. Yritys on perustettu vuonna 2011 ja on jatkanut kasvuaan siitä asti. Wavelabs valmistaa LED tekniikalla toteutettuja aurinkosimulaattoreita, jotka antavat lisäarvoa aurinkokennojen kehitykseen, tuotantoon ja sertifiointiin. Simulaattorit antavat myös lisäarvoa aurinkosähkötutkimukseen niiden varhaisessa vaiheessa. (Wavelabs 2024.) Yrityksen simulaattorivalikoimaan kuuluu valmiita tuotteita sekä asiakastarvelähtöisesti räätälöitävissä olevia simulointiratkaisuja. Yrityksen internetsivut synnyttävät ulkoasullaan luotettavan mielikuvan.

Wavelabsiin otettiin yhteyttä 24.4.2024 yrityksen internetsivuilta löytyvän yhteydenottolomakkeen avulla. Wavelabs reagoi yhteydenottoon sähköpostitse seuraavana päivänä ehdottaen Teams-palaveria, jossa simulointilaitteistolle asetettuja vaatimuksia ja sen tulevaa asennuspaikkaa voitaisiin tutkia hieman tarkemmin. Teams-palaveri pidettiin Wavelabsin edustajan kanssa 26.4.2024.

Palaverissa käytiin läpi Centria-ammattikorkeakoulun vaatimukset tulevan testauslaitteiston suhteen. Palaverissa tutustuttiin sähkövoimatekniikan laboratorion pohjakuvaan, nykyisen laitteiston sijaintiin ja vaihtoehtoisen simulointilaitteiston asennuspaikkaan. Palaverissa syntyi käsitys siitä, että Wavelabsilla on tarjota ratkaisu ammattikorkeakoulun tarpeet silmällä pitäen.

Myöhemmin 29.4.2024 käydyn sähköpostikeskustelun yhteydessä ilmeni mahdollinen ongelma aurinkopaneelien kallistukseen liittyvissä testauksissa. Vaikka yrityksen tuottama laitteisto sijoitettaisiin kuvassa 4 olevalle punaisella rajatulle alueelle ja hyödyksi voitaisiin käyttää koko olemassa oleva alue pisimmän sivun mukaisesti, ei voitaisi olla varmoja säteilyintensiteetin luonnonvalon mukaisesta

spektrin jakautumisesta ja sen suorasta vaikutuksesta aurinkopaneelin tuottaman tehon suhteen, jolloin se tulisi mahdollisesti vääristämään ulkoilmassa todellisuudessa mitattua aurinkopaneelin tehontuottoa kallistettaessa aurinkopaneelia horisontaalisesti pois päin suorasta auringon valosta. (Mocachen 2024.) Asian kerrottiin olevan suhteellisen pieni ongelma, sillä paneelien kallistukseen liittyvien testausten ei välttämättä tarvitse simuloida täysin luonnollista tilannetta suoraan auringon paisteeseen nähden, vaan asia voitaisiin hyväksyä opiskelijoiden havainnollistamistarkoituksessa tehtyihin testauksiin nojaten.

Wavelabsin edustajan kanssa käyty sähköpostikeskustelu päättyi osaltaan tähän, eikä yritykseltä ehditty saamaan lopullista ratkaisuehdotusta eikä teknistä dataa mahdollisesta laitteistosta ennen tämän opinnäytetyön valmistumista. Edellä mainitusta syystä Wavelabsin auringonvalon simuloimiseen sopivaa laitteistoa ei voitu tässä opinnäytetyössä esitellä. Yritys toimii vastuullisesti eikä tarjoa laitteistoa simulointitarkoituksiin ennen kuin on itse kyennyt varmistumaan sen vaatimusten täyttymisestä.

### **3.4 Testilaitteiston aurinkopaneelit**

Kuten on tämän opinnäytetyön teoriaosuudessa ja kuviossa 9 esitetty, paras mahdollinen spektraalinen vaste on aurinkopaneeleilla, jotka ovat rakenteeltaan yksikiteisiä piikkenoja. Kyseisellä tekniikalla valmistettujen aurinkokennojen tehontuotto on paras koko aallonpituusalueella välillä 350 – 1200 nm. Yksiselitteinen valinta tulevan aurinkopaneelisimulaattorin aurinkokennotyypiksi on yksikiteinen piikkeno, mikäli tavoitellaan suurinta mahdollista tehontuottoa. Suomen markkinoilla olevat aurinkopaneelit ovat pääsääntöisesti ja lähes poikkeuksetta yksikiteisiä piikkenoja niiden paremman spektraalisen vasteen, tehontuoton ja tässä opinnäytetyössä esitettyjen ominaisuuksiensa vuoksi.

## 4 JOHTOPÄÄTÖKSET

Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella ja etsiä Centria-ammattikorkeakoulun käyttöön soveltuvaa aurinkopaneelien testaukseen soveltuvaa laitteistoa. Testauslaitteisto tulisi tulevaisuudessa korvaamaan jo olemassa olevan Centria-ammattikorkeakoulun Ylivieskan kampuksella sijaitsevan opiskelijoiden pääasiallisessa käytössä olevan testilaitteiston, joka ei täytä nykypäivän aurinkosimulaattoreille asetettuja standardien määrittämiä vaatimuksia. Opinnäytetyön edetessä kävi ilmi, että kyseisiä vaatimukset täyttäviä laitetoimittajia ja valmiita ratkaisuja on maailmanlaajuisesti olemassa todella vähän. Tämä asetti haasteita opinnäytetyön käytännöllisemmän osuuden suorittamiselle. Huomionarvoista on myös, että valaistustekniikkaan ja erityisesti LED-valaistustekniikkaan liittyvää kirjallisuutta on olemassa suomenkielisenä yllättävän suppeasti, joten sopivien lähteiden etsimiseen piti käyttää huomattava määrä aikaa. Kokonaisuudessaan opinnäytetyöni aihe ja sen teoreettisen osuuden sisäistäminen vaati huomattavan määrän perehtymistä. Työn suorittamista helpotti tieto nykyisellä laitteistolla suoritettavista testauksista, jolloin tulevankin laitteiston vaatimuksia oli helpompi rajata.

Opinnäytetyötä aloittaessani kuvittelin alkuperäisen hankkeelle suunnitellun budjetin olevan ruhtinaallinen ja antavan lähes rajattomat mahdollisuudet soveltuvan testilaitteiston kartoittamiseen, suunnitteluun ja hankintaan. Hyvin pian kävi ilmi, että todellisuudessa budjetti ei tule riittämään standardin AM1.5G mukaisen testilaitteiston hankintaan, mikäli on tarkoitus pystyä testaamaan yhtä tai kahta nykymarkkinoilta löytyvää yksikiteistä piikennopaneelia samanaikaisesti. Kyseisten laitteistojen kysyntä on pientä ja harvat alalla olevat valmistajat tietävät markkina-arvonsa. Potentiaalisia vaihtoehtoja kuitenkin on, kuten on tässä opinnäytetyössä esitetty.

Harmittavaa oli, että kaikilta potentiaalisilta laitetoimittajilta ei saatu teknistä dataa eikä suoraa tarjousta vaatimukset täyttävästä laitteistosta tämän opinnäytetyön aikarajan puitteissa. Laitteiston vaatimukseksi oli asetettu standardin AM1.5G täytyminen, jonka otin tässä työssä tinkimättömäksi tavoitteekseni, sillä nykyistä laitteistoa ei ole välttämättä järkevää korvata vastaavantyyppisellä testilaitteistolla, joka ei päivityksen jälkeenkään täytä standardien vaatimuksia aurinkokennojen testilaitteiston suhteen. Standardien vaatimusten täytyminen avaisi uusia mahdollisuuksia ja loisi uskottavuutta Centria-ammattikorkeakoulun toimintaa kohtaan, sillä kyseiset vaatimukset täyttäviä testilaitteistoja on todella harvassa. Tämä avaisi mahdollisuuden testata erityyppisiä aurinkokennoja ja testitulokset olisivat

tällöin vertailukelpoisia maailmanlaajuisesti. Mielestäni tämä on tavoittelemisen arvoista. Tässä opinäytetyössä eräs suppeasti esitelty potentiaalinen laitetoimittaja on tuomassa markkinoille laitekokoisuuden, johon on syytä kiinnittää erityistä huomiota.

Kaiken tässä opinäytetyössä syntyneen tiedon valossa on syytä harkita budjetin uudelleenjärjestelyä, mikäli tarkoituksena on saada hankituksi testilaitteisto, joka täyttää standardien vaatimukset ja on ominaisuuksiltaan uskottava.

Opinäytetyössäni pääsin edustamaan Centria-ammattikorkeakoulua parhaan osaamiseni mukaan. Sain toimia koulun kasvoina ja yhteyshenkilönä kartoittaessani koulun tarpeisiin sopivaa aurinkopaneelien testaukseen soveltuvaa laitteistoa. Kaikki yhteydenpito ulkomaisten laitetoimittajien kanssa pystyttiin hoitamaan englannin kielellä, mikä osaltaan helpotti työn suorittamista. Opinäytetyöni seurauksena syntyi kontakteja, joiden avulla lopullinen tulevan testilaitteiston hankinta on helpompaa, kun laitetoimittajilla on jo valmiiksi tiedossa koulun tarpeet testilaitteiston suhteen. Yllättävä ja samalla positiivinen havainto oli, että laitetoimittajat reagoivat nopeasti ja olivat valmiita esittelemään ja keskustelemaan tarjoamistaan vaihtoehtoista ja teknisistä ratkaisuistaan erittäin asiallisesti ja sujuvasti, vaikka tarjouksien pyytäjänä toimikin Centria-ammattikorkeakoulun opiskelija. Tämä kertoo Centria-ammattikorkeakoulun maailmalla vallitsevasta positiivisesta mielikuvasta tai allekirjoittaneen sosiaalisista taidoista. Olen saanut opinäytetyötä tehdessäni kunniatehtävän edistää Centria-ammattikorkeakoulun tunnettavuutta maailmalla, ja mielestäni onnistuin tässä tehtävässä kiitettävästi.

Opinäytetyöni vaati huomattavasti enemmän perehtymistä ja itseohjautumista kuin alun perin osasin kuvitella. Työn kokonaisuus hahmottui lopullisesti vasta työn suorittamisen yhteydessä. Yhteydenpito ja palaverit laitetoimittajien kanssa vaativat välillä hieman tavanomaisesta poikkeavaakin aikataulutusta esimerkiksi G2V Opticsin kanssa, jonka päätoimipiste sijaitsee Kanadassa ja aikaero Suomeen on huomattava. Lähtökohtaisesti olin päättänyt hoitaa opinäytetyöni kunnialla ja parhaan tietotaitoni mukaan, joten priorisoin ja järjestin asiat mahdollistaakseni mahdollisimman sujuvan asioiden etene-  
misen ja luodakseni laitetoimittajille positiivisen mielikuvan Centria-ammattikorkeakoulusta.

Kokonaisuudessaan opinäytetyö oli innostava ja sisällöltään hyvin paljon allekirjoittaneen alkuperäisistä odotuksista poikkeava. Opinäytetyö antoi syväluotaavan katsauksen valaistustekniseen teoriaan ja teroitti mieleen englannin kielellä käytävät bisnesluonteiset sähköpostikäytännöt. Onnistuin luomaan järkeviä ja potentiaalisia kontakteja tulevan aurinkopaneelitestauslaitteiston hankintaa varten. Kaikilta



laitetoimittajilta tarjouksia ei ehditty saamaan, mutta hyvät suhteet ovat olemassa jo valmiiksi, joka tulee helpottamaan tulevan testilaitteiston hankintaa.

## LÄHTEET

Ahoranta, J. 2011. *Sähköasennustekniikka*. Helsinki: Sanoma Pro Oy.

Alternative-energy. *Connecting solar panels together in series*. Saatavissa: <https://www.alternative-energy-tutorials.com/solar-power/connecting-solar-panels-together.html>. Viitattu 11.4.2024.

DS New Energy. *An Introduction To Perovskites And Perovskite Solar Cells*. Saatavissa: <https://www.dsnew.com/info/an-introduction-to-perovskites-and-perovskite-35149539.html>. Viitattu 2.5.2024.

Eternalsun. 2024. *Steady State LED solar simulator*. Saatavissa: <https://www.eternalsun.com/product/class-aaa-steady-state-led-based-solar-simulator/>. Viitattu 30.4.2024.

Eternalsun. 2024. *We are Eternal Sun*. Saatavissa: <https://www.eternalsun.com/>. Viitattu 30.4.2024.

G2Voptics. *Light sources*. Saatavissa: <https://g2voptics.com/solar-simulation/>. Viitattu 20.4.2024.

G2Voptics. *What is the AM0 Spectrum*. Saatavissa: <https://g2voptics.com/air-mass-solar-intensity/#>. Viitattu 12.4.2024.

Halocell. 2023a. *Halocell Energy*. Saatavissa: <https://halocell.energy/>. Viitattu 2.5.2024.

Halocell. 2023b. *HYPERION Solar Simulator*. Saatavissa: <https://halocell.energy/hyperion>. Viitattu 2.5.2024.

Halonen, L. & Lehtovaara, J. 1992. *Valaistustekniikka*. Jyväskylä: Otatieto Oy.

Hietalahti, L. 2013. *Sähkövoimatekniikan perusteet*. Tampere: Amk-Kustannus Oy Tammertekniikka.

IEC-60904-9. 2020. *Classification of solar simulator characteristics*. Saatavissa: <https://cdn.standards.iteh.ai/samples/22246/3f3a2edfed5a48678baaf60bebfdd273/IEC-60904-9-2020.pdf>. Viitattu 19.4.2024.

Lehto, I., Liuksiala, L., Lähde, P., Olenius, M., Orrberg, M. & Ylinen, M. 2017. ST-Käsikirja 40. *Aurinkosähköjärjestelmien suunnittelu ja toteutus*. Espoo: Sähköinfo Oy.

Miliou, E. 2024. Centria university of applied sciences Other. Yksityinen sähköposti. 25.4.2024. Viestin saaja Sami Hanhikorpi.

Mocachen, E. 2024. LEDS talk SINUses!. Yksityinen sähköposti. 29.4.2024. Viestin saaja Sami Hanhikorpi.

Norris, L. 2024a. Solar simulator. Yksityinen sähköposti. 25.4.2024. Viestin saaja Sami Hanhikorpi.

Norris, L. 2024b. Solar simulator. Yksityinen sähköposti. 30.4.2024. Viestin saaja Sami Hanhikorpi.

O’Kane, M. *The AM1.5 Spectrum*. Saatavissa: <https://www.ossila.com/pages/standard-solar-spectrum>. Viitattu 12.4.2024.

Pveducation. *Standard Solar Spectra*. Saatavissa: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/appendices/standard-solar-spectra>. Viitattu 17.4.2024.

Pveducation. *Shading*. Saatavissa: <https://www.pveducation.org/pvcdrom/modules-and-arrays/shading>. Viitattu 25.4.2024.

PVPMC. *Spectral Response*. Saatavissa: <https://pvpmc.sandia.gov/modeling-guide/2-dc-module-iv/effective-irradiance/spectral-response/>. Viitattu 18.4.2024.

Silvonen, K. 2003. *Sähkötekniikka ja elektroniikka*. Helsinki: Otatieto Oy.

Sorbello, L. 2024. Greatcell Energy – New Form Contact. Yksityinen sähköposti. 23.4.2024. Viestin saaja Sami Hanhikorpi.

Wavelabs. 2024. *Flash your way to PV success*. Saatavissa: <https://wavelabs.de/>. Viitattu 2.5.2024.