

Juuso Alanen

## **Spektrisen irradianssin mittauksen virhelähteitä**

**Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta**

Diplomityö, joka on jätetty opinnäytteenä tarkastettavaksi  
diplomi-insinöörin tutkintoa varten Espoossa 03.05.2010.

**Työn valvoja:**

Prof. Petri Kärhä

**Työn ohjaajat:**

TkL Maija Ojanen



**Aalto-yliopisto**  
Teknillinen korkeakoulu

Tekijä:	Juuso Alanen
Työn nimi:	Spektrisen irradianssin mittausten virhelähteitä
Kieli:	Suomi
Päivämäärä:	03.05.2010 Sivumäärä: 33
Elektroniikan, tietoliikenteen ja automaation tiedekunta	
Signaalinkäsittelyn ja akustiikan laitos	
Professori: Mittaustekniikka	Koodi: S-108
Valvoja:	Prof. Petri Kärhä
Ohjaajat:	TkL Maija Ojanen
<p>Spektrinen irradianssi on radiometrinen suure, joka kuvaa kuinka paljon säteilytehoa tulee tietyllä pinta-alalle tietyllä aallonpituudella. MIKES-Aalto Mittaustekniikka suorittaa spektrisen irradianssin kalibrointimittauksia. Mittaukset tehdään suodatinradiometrillä, joka koostuu loukkuilmaisimesta, tarkkuusapertuurista, 14 interferenssisuodattimesta ja <math>V(\lambda)</math>-suodattimesta. Suodatinradiometri muuntaa havaitsemansa säteilyn virraksi. Lähteen spektrinen irradianssi määritetään suodatinradiometrillä mitattujen virtojen avulla.</p> <p>Mittauksissa on havaittu, että tietyillä suodattimilla mitatuissa pisteissä on systemaattimen poikkeama. Lisäksi vertailututkimuksissa muiden kansallisten mittanormaalilaboratorioiden kanssa on havaittu, että MIKES-Aalto Mittaustekniikan irradianssiskaala on koholla muihin verrattuna UV-alueella. Näin ollen on ollut tarve selvittää, mistä kyseiset poikkeamat johtuvat.</p> <p>Tässä työssä tutkittiin kolmea mahdollista virhelähdettä, joista havaitut poikkeamat voisivat johtua. Tutkitut lähteet olivat suodatinradiometrin loukkuilmaisimen ja suodattimen välisen etäisyyden muutos, suodattimen kulmavaste ja suodattimen spatiaalivaste.</p> <p>Etäisyyden muutoksen vaikutusta tutkittiin mittaamalla loukkuilmaisimen antamaa virtaa, kun suodattimen ja loukkuilmaisimen välistä etäisyyttä muutettiin. Kulmavastetta tutkittiin mittaamalla interferenssisuodattimien transmianssi erilaisilla tulokulmilla. Spatiaalivastetta tutkittiin liikuttamalla suodatinta sivusuunnassa ja mittaamalla transmianssi.</p> <p>Etäisyyden muutoksen ja kulmavasteen vaikutuksen havaittiin olevan merkittävä etenkin UV-alueen suodattimille. Tyypilliset arvot olivat väliltä 2-5 %. Spatiaalivasteen vaikutus jäi pääosin vähäiseksi, mutta oli merkittävin näkyvän valon- ja lähi-infrapuna-alueen suodattimille. Tyypilliset arvot olivat 1-2 %.</p>	
Avainsanat: spektrinen irradianssi, suodatinradiometri, loukkuilmaisin, virhelähde, interferenssisuodatin	

Author:	Juuso Alanen		
Title:	Error sources in spectral irradiance measurements		
Language:	Finnish		
Date:	03.05.2010	Number of Pages: 33	
Faculty of Electronics, Communications and Automation			
Department of Signal Processing and Acoustics			
Professorship: Measurement Science and Technology			Code: S-108
Supervisor:	Prof. Petri Kärhä		
Instructors:	Lic.Sc (Tech.) Maija Ojanen		
<p>Spectral irradiance is a radiometric quantity that describes the amount of radiant flux coming on a certain area at a certain wavelength. Metrology Research Institute of Aalto University carries out calibration measurements for spectral irradiance. The measurements are carried out with a filter radiometer that consists of a trap detector, precision aperture, 14 interference filters and a <math>V(\lambda)</math>-filter. The filter radiometer converts the detected radiation into electrical current. The spectral irradiance of the source is determined with the help of the currents measured with the filter radiometer.</p> <p>It has been noted that there is a systematic anomaly in the values measured with certain filters. It has also been noted in intercomparisons with other National Metrology Institutes, that the irradiance scale of Metrology Research institute of Aalto University is raised compared to the others in the UV-range. Therefore there has been a need to find out the reason for such anomalies.</p> <p>In this thesis three different error sources that could cause the perceived anomalies were studied. The studied sources were the change of the distance between the trap detector and the interference filter, and the angular and spatial responses of the interference filters.</p> <p>The effect caused by the distance change was studied by measuring the output current of the trap detector while varying the distance between the trap detector and the interference filter. Angular response was studied by measuring the transmittance of the filter at different incident angles. Spatial response was studied by shifting the filter sideways and measuring its transmittance.</p> <p>The effects caused by the distance change and the angular response were observed to be remarkable especially in the UV-range. Typical values were from 2 % to 5 % The effect of spatial response was mainly minimal, but was most notable in the visual- and NIR-ranges, with typical values from 1 % to 2 %.</p>			
Keywords: spectral irradiance, filter radiometer, trap detector, error source, interference filter			

## **Alkulause**

Tämä työ tehtiin MIKES Aalto Mittaustekniikan tiloissa Espoossa. Työtä tehdessä kohdattiin erinäisiä ongelmakohtia, joiden selvittämiseen kului välillä suuriakin määriä aikaa ja vaivaa. Usko työn valmistumisesta oli myös välillä koetuksella. Näin ollen katsoisin aiheelliseksi kiittää henkilöitä, jotka ovat omalla panoksellaan edesauttaneet tämän työn valmistumista.

Aivan ensimmäiseksi haluan kiittää ohjaajaani Maija Ojasta. Maijan neuvojen, ohjeiden, opastuksen ja kärsivällisyyden merkitystä tämän työn valmistumiselle ei voi yliarvioida. Toiseksi kiittäisin professori Petri Kärhää tilaisuudesta tehdä tämä diplomityö. Kiittäisin myös Farshid Manoocheria ja Maksim Shpakia Lambda 900 – spektrometrin käytössä ilmenneiden käytännön ongelmien kanssa auttamisesta.

Kaikille saman toimiston kanssani jakaneille esittäisin kiitokset hyödyllisestä ja viihdyttävästä juttuseurasta taukojeni aikana.

Lopuksi suuri kiitos kavereilleni, vanhemmilleni ja sukulaisilleni tuesta, kannustuksesta ja kärsivällisyydestä tämän työn aikana. Erityisesti kiitos kuuluu isälleni, äidilleni, Pasille, Reimalle, Miialle ja Widerholmin Jussille. Todennäköisesti työ ei olisi valmistunut ilman tukeanne ja vapaa-ajan seuraanne.

Espoossa 3. toukokuuta 2010

Juuso Alanen

## Sisällysluettelo

Alkulause .....	4
Sisällysluettelo .....	5
Symboli- ja lyhenneluettelo .....	6
1 Johdanto .....	9
2 Interferenssisuodattimet .....	11
3 Spektrisen irradianssin mittaaminen MIKES-Aalto Mittaustekniikassa.....	14
4 Tutkittavat suodattimet.....	18
5 Tutkimusmenetelmät ja tulokset .....	20
5.1 Suodattimen ja loukkuilmäisimen välinen etäisyys .....	20
5.2 Kulmavaste.....	24
5.3 Spatiaalivaste .....	28
6 Johtopäätökset.....	30
7 Viiteluettelo.....	32

## Symboli- ja lyhenneluettelo

$A$	apertuurin pinta-ala
$a$	valon tulokulma
ANSI	American National Standards Institute
$b_1$	vakio
$b_2$	vakio
$B$	apumuuttuja
$b_i$	polynomin kerroin
$C_a$	integroidun vasteen tulokulmalla $a$ suhde integroituun vasteeseen tulokulmalla 0
$C_d$	loukkuilmaisimen antovirran suhde etäisyydellä $X$ antovirtaan etäisyydellä 0
$C_s$	integroidun vasteen sivuttaissiirtymällä $s$ suhde integroituun vasteeseen sivuttaissiirtymällä 0
$c_1$	CIE:n standardoima vakio = $3,7418 \times 10^{-16} \text{ Jm}^{-3}\text{s}^{-1}$
$c_2$	CIE:n standardoima vakio = $1,4388 \times 10^{-2} \text{ mK}$
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage
$d$	tarkkuusapertuurin halkaisija
$D$	loukkuilmaisimen apertuurin etäisyys FEL-lampusta
$E_c(\lambda)$	laskettu spektrinen irradianssi
$E_c(\lambda_{eff})$	efektiivisellä aallonpituudella laskettu spektrinen irradianssi
$E_m(\lambda_{eff})$	efektiivisellä aallonpituudella mitattu spektrinen irradianssi
FEL	ANSI-koodi tietyille lampputyypille
$i$	indeksi

$i_{c,k}$	laskettu virta
$i_{m,k}$	mitattu virta
$k$	käytössä oleva suodatin
$L$	FEL-lampun etäisyys hajavalosuojasta
MIKES	Mittatekniikan keskus
$N$	polynomin asteluku
NIR	lähi-infrapuna
NIST	National Institute of Standards and Technology, Yhdysvallat
NMC	National Metrology Centre, Singapore
NPL	National Physical Laboratory, Yhdistynyt Kuningaskunta
$P$	suodattimien lukumäärä
PTB	Physikalisch-Technische Bundesanstalt, Saksa
$R$	hajavalosuodan sulkijallisen apertuurin halkaisija sulkijan ollessa auki
$R(\lambda)$	loukkuilmaisimen spektrinen vaste
$s$	sivuttaissiirtymän matka
$S_{0,a}$	integroitu vaste tulokulman ollessa 0
$S_{0,t}$	integroitu vaste, kun suodatinta ei ole siirretty sivusuunnassa
$S_a$	integroitu vaste tulokulman ollessa $a$
$S_s$	integroitu vaste, kun suodatinta on siirretty sivusuunnassa matkan $s$ verran
$T$	lämpötila
UV	ultravioletti
$V(\lambda)$	absorptiosuodatintyyppi, jonka vaste on sama kuin ihmisen silmän
$X$	suodatinpidikkeen ja ilmaisimen apertuurin välinen etäisyys

$\Delta$	erofunktio
$\varepsilon'(\lambda)$	efektiivinen spektrinen emissiivisyys
$\lambda$	aallonpituus
$\lambda_{eff}$	efektiivinen aallonpituus
$\tau_k(\lambda)$	spektrinen transmittanssi



# 1 Johdanto

Optinen säteily on sähkömagneettista aaltoliikettä aallonpituusvälillä 100-1000 nm. Sen osa-alueita ovat ultraviolettisäteily, näkyvä valo ja infrapunasäteily. Osa-alueiden aallonpituusalueet ovat vastaavasti 100-400 nm, 400-780 nm ja 780-1000 nm. Alueiden väliset rajat eivät ole täysin vakiintuneita.

Optisen säteilyn mittaukset ovat keskeinen osa radiometriaa. Radiometria on tieteenala, joka käsittelee optisen säteilyn energian siirtymistä säteilymittarin eli radiometrin tuloaukkoon ja sieltä optisten komponenttien välityksellä ilmaisimelle, joka muuntaa säteilyenergian sähköiseksi signaaliksi.[1] Spektrinen irradianssi on radiometrinen suure, joka kuvaa sitä, kuinka paljon säteilytehoa kohdistuu tietylle pinta-alalle tietyllä aallonpituudella.

MIKES Aalto Mittaustekniikka suorittaa spektrisen irradianssin kalibrointimittauksia käyttäen suodatinradiometriä, johon kuuluu Si-loukkuilmaisimien, tarkkuusapertuuri, 14 kaistanpäästö-interferenssisuodatinta ja yksi  $V(\lambda)$ -absorptiosuodatin. MIKES-Aalto Mittaustekniikan suorittamissa spektrisen irradianssin mittauksissa on ollut ongelmana, että vaikka radiometrin vaste on tarkkaan määritetty, yksittäisissä mittauspisteissä on havaittu poikkeamia etenkin ultraviolettialueella. Poikkeamat ovat suurimmillaan noin kahden prosentin luokkaa, ja tyypillisesti saman suuruisia mitatusta lähteestä riippumatta. Mahdollinen syy poikkeamiin on, että suodattimien ja ilmaisimen kalibrointijärjestelyt eivät ole täysin vastaavia kuin mittaustilanteessa käytetyt. Ilmaisimen karakterisoidaan osissa: loukkuilmaisimen vaste, suodattimien transmittanssit, ja apertuurin pinta-ala mitataan erikseen. Koko ilmaisimen vaste saadaan kertomalla nämä edellä mainitut tekijät keskenään. Karakterisoinnissa käytettävät mittausteoriat eivät myöskään täysin vastaa mittaustilanteen geometriaa. Tämän vuoksi on ilmennyt tarve selvittää, miten erilaisista kalibrointijärjestelyistä aiheutuvat poikkeamat vasteissa vaikuttavat lopulliseen mittaustulokseen.

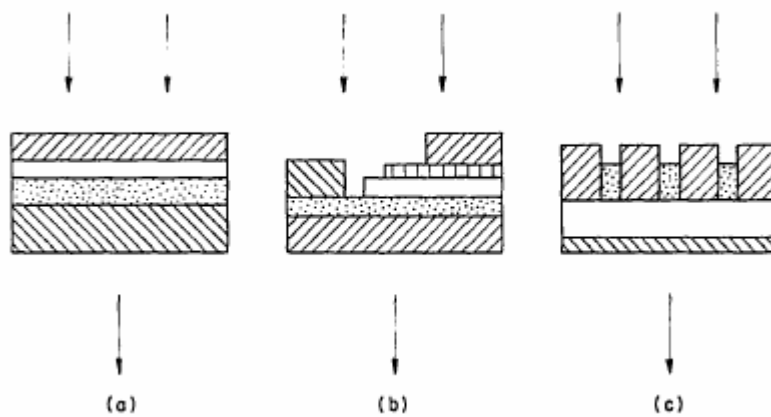
Tässä työssä tutkittiin eräiden mahdollisten virhelähteiden vaikutusta spektrisen irradianssin mittaukseen. Tutkittuja virhelähteitä olivat interferenssisuodattimen ja

loukkuilmmaisimen välisen etäisyyden muutos, suodattimen kulman muutos suhteessa tulevaan valonsäteeseen sekä suodattimen paikan muutos sivusuunnassa.

Luvussa 2 kerrotaan interferenssisuodattimien rakenteesta ja käytöstä yleisesti. Luvussa 3 kerrotaan spektrisen irradianssin mittauksesta MIKES-Aalto Mittaustekniikassa, ja esitellään tutkimusongelma tarkemmin. Luvussa 4 esitellään tutkittavat suodattimet sekä niiden valintaperusteet. Luvussa 5 käydään läpi tutkimusmenetelmät ja niistä saadut tulokset virhelähteittäin eroteltuna. Lopuksi luvussa 6 esitetään johtopäätökset.

## 2 Interferenssisuodattimet

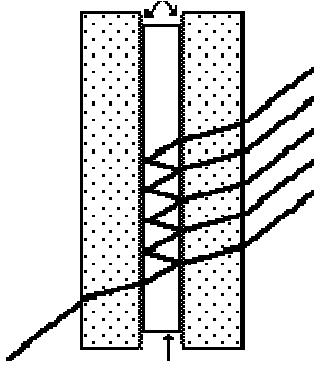
Monissa optisissa laitteistoissa täytyy säädellä tarkasti sisääntulevan tai ulosmenevän säteilyn spektristä vastetta tai tehotiheyttä. Tähän tarkoitukseen on perinteisesti käytetty erilaisia lasisia absorptiosuodattimia. Tällaisten suodattimien etuna on, että niiden spektrinen transmittanssi ei riipu juurikaan sisääntulevan säteilyn tulokulmasta. Lasisuodattimet ovat tyypillisesti hyvin aikastabiileja. Ne soveltuvat hyvin lyhyiden aallonpituuksien katkaisuun ja laajojen aallonpituusalueiden hallintaan, mikäli tarvittu vaihtelu spektrisessä transmittanssissa on asteittaista ja monotonista, eli spektrinen transmittanssi muuttuu hitaasti ja yhdensuuntaisesti. Ongelmana kuitenkin on, että saatavilla olevissa laseissa transmittanssin muutos on pääasiassa asteittaista, jolloin teräviä transmittanssi-*piirteitä* omaavien suodattimien suunnittelu niitä käyttäen on hankalaa. Tämän takia on usein pakollista laittaa useita suodattimia sarjaan, kuten kuvan 1 (a)-kohdassa, jotta saataisiin tyydyttävä lopputulos. Kuitenkin tilanteissa, joissa tarvitaan useampi kuin yksi transmittanssihuippu, tällainen ratkaisu ei ole mahdollinen. Tällaisissa tilanteissa voidaan käyttää toisenlaisia ratkaisuja suodattimen rakenteessa: kerroksia ei kasata pelkästään sarjaan, vaan myös rinnakkain, kuten kuvan 1 (b)-kohdassa. Ongelmaksi tulee kuitenkin se, että tällöin suodattimesta tulee hyvin riippuvainen yhdenmuotoisesta valaistuksesta, ja sekä suodattimen että mittausjärjestelyn suunnittelu tulee huomattavasti monimutkaisemmaksi. Yhdenmukaisuusvaatimuksia voidaan vähentää käyttämällä mosaiikkirakennetta [Kuva 1(c)], jossa eri kerrokset muodostavat päältä katsottuna ruudukko- tai raitakuvion. Tällöin kuitenkin itse suodattimen mekaaninen monimutkaisuus kasvaa merkittävästi.[2]



*Kuva 1 Absorptiosuodattimien rakenne: (a) sarjarakenne, (b) sarjarinnakkaisrakenne ja (c) mosaiikkirakenne [2].*

Interferenssisuodattimet eivät yleensä sovellu laajojen aallonpituusalueiden hallintaan, mutta niiden transmittanssikäyrissä voi olla hyvinkin teräviä piirteitä. Kuvassa 2 on nähtävissä tyypillisen interferenssisuodattimen rakenne. Kuten kuvasta nähdään, suodatin muodostuu yksinkertaisimmillaan kahdesta puoliheijastavasta kalvosta, joiden välissä on läpinäkyvää täyteainetta. Interferenssisuodattimien toiminta perustuu destruktiiviseen interferenssiin, joka syntyy puoliheijastavista pinnoista tapahtuvien heijastusten välillä. [3] Destruktiivinen interferenssi tarkoittaa kahden eri vaiheessa olevan aallon yhdistymistä siten, että molemmat aallot vaimenentuvat.

Puoliläpäisevät  
kalvot



Puolen aallonpituuden  
paksuudelta läpinäkyvää  
täyteainetta

*Kuva 2 Interferenssisuodattimen rakenne [3].*

### 3 Spektrisen irradianssin mittaaminen MIKES-Aalto Mittaustekniikassa

Spektrisen irradianssin skaalan realisointi MIKES-Aalto Mittaustekniikassa on kuvattu lähteissä [4,5]. Se perustuu suodatinradiometrin ja volframihehkulankaisten FEL<sup>1</sup>-tyyppisten halogeenilamppujen käyttöön. Käytettävä suodatinradiometri koostuu loukkuilmaisimesta, jossa on kolme Si-fotodiodia, tarkkuusapertuurista, neljästätoista vaihdettavasta kapeakaistaisesta interferenssisuodattimesta sekä yhdestä laajakaistaisesta  $V(\lambda)$ -absorptiosuodattimesta. Suodattimet on lämpötilastabiloitu 25°C:een. Suodatinradiometrin eri osat karakterisoidaan erikseen [4]. Loukkuilmaisimen vaste mitataan kryogeenisen radiometrin avulla, ja tarkkuusapertuurin pinta-ala optisella koordinaatinmittauslaitteella [6]. Suodattimien transmittanssit mitataan Perkin-Elmer Lambda 900 UV/VIS/NIR –spektrometrillä, joka kalibroidaan referenssispektrometrin avulla [7].

Mittausjärjestelyssä suodatinradiometri ja lamppu asennetaan magneetikiskolle, ja kohdistetaan kaksisäteisen kohdistuslaserin avulla optiselle akselille. Mittausetäisyyttä mitataan magneetikiskoon kytketyn etäisyysmittausyksikön avulla. Fotodiodien antama sähkövirta mitataan jokaiselle suodattimelle erikseen. Virta muunnetaan jännitteeksi virta-jännitemuuntimen avulla, ja tämä jännite mitataan digitaalisella yleismittarilla. Jännitteen arvo tallennetaan tietokoneelle.

Mittauksessa käytettyjen lamppujen hehkulanka on volframia, jonka säteilyspektri on lähellä Planckin säteilijän spektriä. Tällöin hehkulangan spektrinen irradianssi voidaan esittää kaavalla

$$E_c(\lambda) = \frac{Bc_1 \varepsilon'(\lambda)}{\lambda^5 \left[ \exp\left(\frac{c_2}{\lambda T}\right) - 1 \right]}, \quad (1)$$

---

<sup>1</sup> FEL on lampun ANSI-koodi

jossa  $\lambda$  on aallonpituus,  $B$  on apumuuttuja, joka riippuu mittauksen geometriasta,  $\varepsilon'(\lambda)$  on lampun efektiivinen emissiivisyys ja  $T$  on hehkulangan absoluuttinen lämpötila. Symbolit  $c_1$  ja  $c_2$  merkitsevät CIE:n standardoimia vakioita, joiden arvot ovat  $c_1=2\pi c^2 h=3,7418 \times 10^{-16} \text{ Jm}^{-3}\text{s}^{-1}$  ja  $c_2=1,4388 \times 10^{-2} \text{ mK}$ .

Efektiivinen emissiivisyys  $\varepsilon'(\lambda)$  ottaa huomioon wolframin emissiivisyyden sekä lamppuun liittyvät muut epäideaalisuudet, kuten lasipinnan transmittanssin, lampun täytekaasun absorptioon sekä hehkulangan muodon. Tätä voidaan mallintaa  $N$ -asteisella polynomilla

$$\varepsilon'(\lambda) = \sum_{i=0}^N b_i \lambda^i, \quad (2)$$

jossa kertoimet  $b_i$  sovitusmuuttujia ja  $N$  on kokonaisluku, joka valitaan väliltä 3-7.  $N$ :n arvon tulee olla ainakin kolmea pienempi kuin käytettyjen suodattimien määrä, jotta vältetään polynomin odottamaton käytös sovituspisteiden välillä.

Suodatinradiometrin tuottamaa virtaa merkitään symbolilla  $i_{m,k}$ . Kulloinkin käytössä olevaa suodatinta merkitään alaindeksillä  $k$ . Teoreettinen suodatinradiometrin antama virta  $i_{c,k}$  voidaan laskea kaavalla

$$i_{c,k} = A \int E_c(\lambda) R(\lambda) \tau_k(\lambda) d\lambda, \quad (3)$$

jossa  $A$  on apertuurin pinta-ala,  $R(\lambda)$  loukkuilmmaisimen spektrinen vaste ja  $\tau_k(\lambda)$  on suodattimen spektrinen transmittanssi.

Jokaiselle mitatulle virralle  $i_{m,k}$  voidaan laskea sitä vastaava spektrinen irradianssi

$$E_m(\lambda_{eff}) = \left( \frac{i_{m,k}}{i_{c,k}} \right) E_c(\lambda_{eff}), \quad (4)$$

jossa  $i_{c,k}$  on kaavalla (3) laskettu virta, ja  $E_c(\lambda_{eff})$  on kaavalla (1) laskettu spektrinen irradianssi efektiivisellä aallonpituudella. Efektiivinen aallonpituus  $\lambda_{eff}$  lasketaan kaavalla

$$\lambda_{eff} = \frac{\int \lambda E_c(\lambda) R(\lambda) \tau_k(\lambda) d\lambda}{\int E_c(\lambda) R(\lambda) \tau_k(\lambda) d\lambda}. \quad (5)$$

Kaavojen (1)-(5) ratkaiseminen aloitetaan asettamalla efektiiviselle emissiivisyydelle  $\varepsilon'(\lambda)$  alkuarvot, joina käytetään de Vosin [8] volframille määrittämiä arvoja. Tämän jälkeen minimoidaan erofunktiota

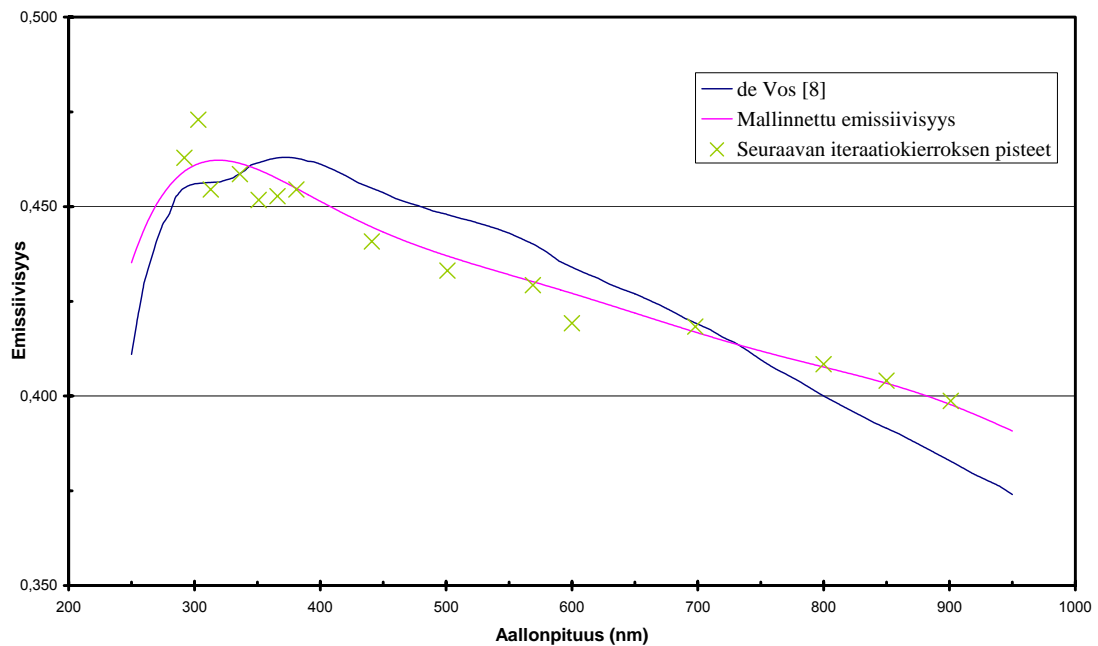
$$\Delta = \sum_{k=1}^P \left[ \frac{E_m(\lambda)}{E_c(\lambda)} - 1 \right]^2, \quad (6)$$

kaavan (1) muuttujia  $B$  ja  $T$  muuttamalla.  $P$  on käytettyjen suodattimien määrä. Käyttämällä lineaarista regressiota saadaan kaavan (2) kertoimille  $b_i$  arvot, joiden avulla lasketaan emissiivisyys.

Emissiivisyyttä iteroidaan uudestaan minimoimalla taas erofunktiota (6) ja sen jälkeen antamalla kertoimille  $b_i$  uudet arvot, joiden avulla lasketaan taas uusi emissiivisyys. Iterointia jatketaan, kunnes erofunktion arvo ei enää muutu. Lopputuloksena saadaan jatkuva spektrinen irradianssi kaavan (1) avulla, diskreetit spektrisen irradianssin arvot efektiivisille aallonpituuksille kaavan (4) mukaisesti sekä jatkuva efektiivinen emissiivisyys kaavan (2) mukaisesti.

Ongelmana spektrisen irradianssin mittauksissa MIKES-Aalto Mittaustekniikalla on ollut, että mittauksissa saadut vasteet eivät vastaa teoreettisia arvoja, etenkin ultravioletialueella. Tämä on nähtävissä kuvasta 3, jossa sininen käyrä on de Vosin mittauksiin perustuva volframilangan emissiivisyys, punainen käyrä kaavalla (2) laskettu mallinnettu emissiivisyys ja ristit ovat mittaustulosten avulla seuraavaa iterointikierrosta varten laskettuja pisteitä. Kuten kuvasta nähdään, poikkeavat mitatut arvot laskennallisista merkittävästi UV-aallonpituuksilla, kuten esimerkiksi 313 nm, 350 nm ja 366 nm kohdilla. Havaitut poikkeamat ovat olleet hyvin systemaattisia, eivätkä ole riippuneet mitatusta lampusta tai mittauksissa tehdyistä karkeista virheistä.





*Kuva 3 Lampun mallinnettu emissiivisyys. Seuraavan iteraatiokierroksen arvot on laskettu kertomalla mallinnettua emissiivisyyttä lasketun ja mitatun virran suhteella.*

Useissa spektrisen irradianssin vertailumittauksissa, esimerkiksi NIST:n (USA), NMC:n (Singapore) ja NPL:n (UK) kanssa, on havaittu, että MIKES-Aalto Mittaustekniikan skaala on koholla etenkin UV-alueella [9, 10, 11]. Irradianssimittauksissa käytettyä suodatinradiometriä on sovellettu myös säteilylämpötilamittauksissa. MIKES:n ja Saksan PTB:n välisessä säteilylämpötilasteikkojen vertailussa [12], havaittiin, että vaihdettavilla interferenssisuodattimilla tehtyjen mittausten tulokset poikkesivat muista.

## 4 Tutkittavat suodattimet

Tutkitut interferenssisuodattimet olivat keskiaallonpituuksiltaan 313 nm, 350 nm, 366 nm, 500 nm, 600 nm ja 900 nm. Lisäksi tutkittiin myös  $V(\lambda)$ -suodatinta, jonka vaste on sama kuin ihmisen silmän vaste hyvin valaistussa ympäristössä, ja joka ei ole interferenssisuodatin, vaan absorptiosuodatin. Taulukossa 1 on lueteltu tutkitut suodattimet sekä eräitä niiden ominaisuuksia kuvaavia arvoja.

*Taulukko 1 Tutkitut suodattimet ja niiden ominaisuudet.*

Suodatin	Keskiaallonpituus	Efektiiivinen aallonpituus	Kaistanleveys
313B	313 nm	312,80 nm	8,15 nm
350C	350 nm	350,39 nm	9,40 nm
366B	366 nm	366,15 nm	9,52 nm
500df10a	500 nm	500,57 nm	10,07 nm
600	600 nm	599,41 nm	21,63 nm
900D	900 nm	901,32 nm	10,08 nm
$V(\lambda)95-2$	555 nm	555,62 nm	107,39 nm

Neljäs hyödyllinen parametri suodatinten ominaisuuksien vertailussa on integroitu vaste, joka lasketaan kaavalla

$$S = \int_0^{\infty} S(\lambda) E_c(\lambda) d\lambda, \quad (7)$$

missä koko ilmaisimen spektrinen vaste

$$S(\lambda) = AR(\lambda)\tau_k(\lambda), \quad (8)$$

jossa  $A$  on apertuurin pinta-ala,  $R(\lambda)$  on loukkuilmalaisimen vaste ja  $\tau_k(\lambda)$  on suodattimen transmittanssi.

Tutkittavat suodattimet valittiin luvussa 3 kuvattujen ongelmien perusteella. Näin ollen suodattimet 313B, 350C ja 366B olivat luontevia valintoja UV-alueella huomattujen poikkeamien tutkimiseksi. 900D:n avulla voitiin tutkia säteilylämpötilaskaalan osaa. Suodattimella 500df10a on myös havaittu poikkeamia. Suodatin 600:n tiedettiin olevan sameutunut ja huonokuntoinen, joten se valittiin tutkittavien joukkoon siksi, että nähtäisiin, vaikuttaisivatko kyseiset viat tässä työssä mitattuihin tuloksiin.  $V(\lambda)95-2$  -suodatinta tutkittiin, jotta saataisiin selville,

muuttuvatko tässä työssä mitatut arvot, mikäli mitataankin interferenssisuodattimen sijaan absorptiosuodatinta.

Kuvassa 4 on valokuva tutkimuksessa käytetyistä suodattimista. Suodattimet on asennettu sylinterimäisiin suodatinholkkeihin, jotka helpottavat suodattimien käsittelyä, ja varmistavat, että suodattimet asetetaan suodatinpidikkeeseensä aina samalla tavalla. Kuvassa on myös nähtävissä suodattimen 600 pinnalla olevat samentumat ja tahrat, sekä se seikka, että  $V(\lambda)95-2$  -suodattimen tuloaukko on huomattavasti pienempi kuin muilla suodattimilla.



*Kuva 4 Mittauksissa käytetyt suodattimet ylävasemmalta alkaen: 900D, 600, 500df10a,  $V(\lambda)95-2$ , 366B, 350C ja 313B.*

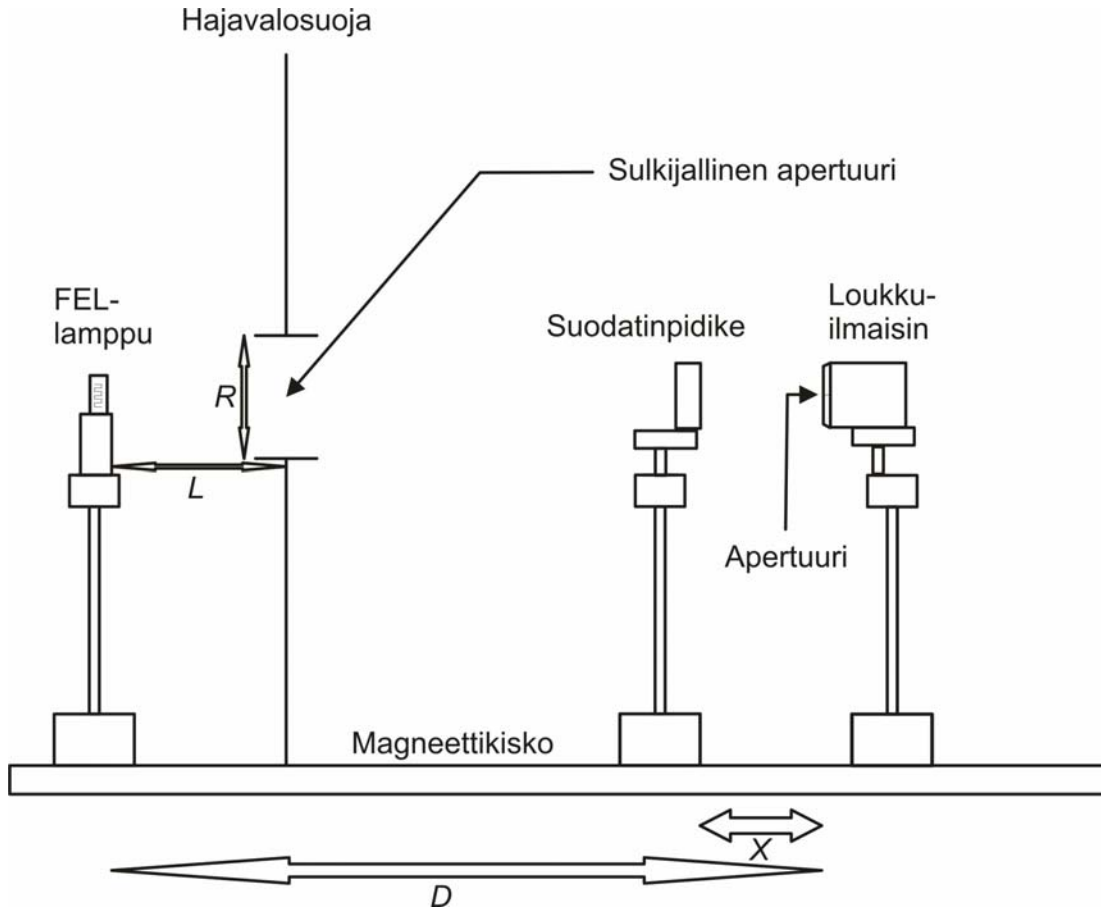
## 5 Tutkimusmenetelmät ja tulokset

Tässä luvussa esitellään tutkimusmenetelmät ja saadut tulokset virhelähteittäin jaoteltuna. Alaluvussa 5.1 käsitellään suodattimen ja loukkuilmaisimen välisen etäisyyden vaikutusta, alaluvussa 5.2 kulmavastetta ja alaluvussa 5.3 spatiaalivastetta.

### 5.1 Suodattimen ja loukkuilmaisimen välinen etäisyys

Mittaustilanteessa suodatin on kiinni ilmaisimessa, mutta kalibrointijärjestelyssä noin 20 cm päässä ilmaisimesta. Tämän vuoksi haluttiin tutkia suodattimen ja loukkuilmaisimen välisen etäisyyden muutoksen vaikutusta ilmaisimen vasteeseen. Tätä tutkittaessa tuli huolehtia tarkasti siitä, ettei suodattimen sivuilta tai ohi tuleva hajavallo pääse häiritsemään signaalia.

Etäisyyden muutoksen aiheuttamaa vaikutusta mitattiin samankaltaisella mittaussjärjestelyllä kuin spektrisen irradianssin mittauksissa yleensä käytetään, sillä erotuksella, että apertuuri oli asennettu loukkuilmaisimen kanssa kiinteälle jalustalle, ja suodatinpidike omalle jalustalleen, joka oli siirrettävällä kelkalla. Näin suodatinta voitiin siirtää kauemmaksi apertuurista ja loukkuilmaisimesta, eli lähemmäs valonlähdettä. Loukkuilmaisimesta saatu virta mitattiin eri etäisyyksillä kaikilla tutkittavilla suodattimilla, sekä hajavalosuojassa olevan sulkijan ollessa kiinni, että auki. Etäisyysriippuvuusmittaukset tehtiin vertailun vuoksi myös peitetyllä suodattimella ja tyhjällä suodatinholkillä. Kuvassa 5 on mittaussjärjestelyä vastaava kaavakuva. Etäisyydet kuvassa ovat suurudeltaan seuraavat:  $R=3,0$  cm,  $L=18,8$  cm,  $D=70,0$  cm ja  $X$  vaihtelee välillä 0-200 mm. Nämä arvot on kaikki mitattu rullamitalla, paitsi arvo  $R$ , joka mitattiin työntömitalla, ja arvo  $X$ , joka mitattiin magneetikiskon ja siihen liitetyn etäisyysnäytön avulla. Etäisyydet  $X$ , joilla mittaus tehtiin olivat 0 mm, 5 mm, 10 mm, 15 mm, 20 mm, 25 mm, 30 mm, 35 mm, 40 mm, 45 mm, 50 mm, 70 mm, 100 mm, 150 mm ja 200 mm. Apertuurin halkaisija on  $d=3,0$  mm.



*Kuva 5 Kaavakuva etäisyysmittausjärjestelystä.  $R$  on sulkijallisen apertuurin halkaisija auki-asennossa,  $L$  FEL-lampun etäisyys hajavalosuojasta,  $D$  loukkuilmaisimen apertuurin etäisyys FEL-lampusta ja  $X$  suodattimen ja ilmaisimen apertuurin välinen etäisyys.*

Valokuva etäisyysmittausjärjestelystä on nähtävissä kuvassa 6. Vasemmanpuoleisella jalustalla on loukkuilmaisim tarkkuuspertuureineen. Oikeanpuoleisella jalustalla on lämpötilastabiloitu suodattimenpidike. Kuvan oikeassa laidassa oleva musta seinämä on hajavalosuojaja, ja alareunassa näkyvä hopeinen kisko magneettinen mittauskisko. Lähteenä käytetty lamppu sijaitsee hajavalosuojan toisella puolella, muttei näy kuvassa. Mittaustilanteessa koko mittaussjärjestely on suljettavan luukun takana.



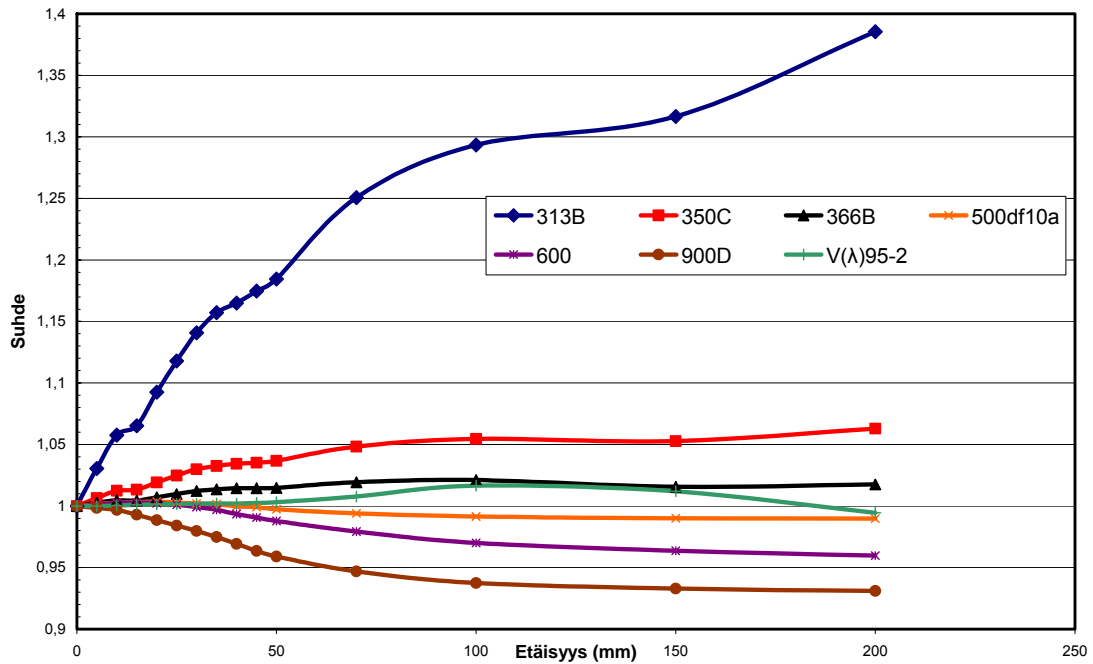
*Kuva 6 Valokuva etäisyysmittausjärjestelmästä.*

Kuvassa 7 on esitetty etäisyysvastemittauksien tulokset. Kuvan eriväriset käyrät vastaavat kutakin tutkittua suodatinta. Vaaka-akseli kertoo etäisyyden, jonka verran suodatinpidikettä on siirretty tarkkuusapertuurista pois päin. Pystyakselilla on kyseisessä tilanteessa mitatun virran ja nollaetäisyydellä mitatun virran suhde. Nollaetäisyys on etäisyys, jolla suodatin ja apertuuri ovat mahdollisimman lähellä toisiaan, eli suodatinpidikkeen takareuna on kiinni apertuurin etureunassa. Mitatuista virroista on myös vähennetty virta, joka mitattiin kussakin mittauspisteessä sulkijan ollessa kiinni, jotta saataisiin taustasäteilyn ja diodien pimeän virran vaikutus minimoitua. Suhde  $C_d$  on laskettu kaavalla

$$C_d = \frac{i_{s,x} - i_{d,x}}{i_{s,0} - i_{d,0}}, \quad (9)$$

jossa  $i_{s,x}$  on virta, joka on mitattu suodatinpidikkeen ollessa etäisyydellä  $x$  apertuurista sulkijan ollessa auki, ja  $i_{d,x}$  on mitattu virta, kun sulkija on kiinni

suodatinpidikkeen ollessa etäisyydellä  $x$ .  $i_{s,0}$  ja  $i_{d,0}$  ovat vastaavat arvot kun etäisyys suodatinpidikkeen ja apertuurin välillä on nolla.



Kuva 7 Etäisyysmittauksen tulokset.

Kuvasta 7 havaitaan, että suodattimen ja apertuurin välinen etäisyys vaikuttaa mittausravoihin, ja että useimmilla suodattimilla vaikutus jää alle 5%. Poikkeuksina tästä ovat suodattimet 313B ja 350C, sekä suodatin 900D. Suodattimella 313B mitatun virran suhde nollaetäisyydellä mitattuun virtaan kasvaa merkittävästi etäisyyden kasvaessa, suurimmillaan jopa 1,38 -kertaiseksi. 350C:n tapauksessa taas kasvu jää pienemmäksi, mutta on kuitenkin noin 7 % 200mm:n etäisyydellä. Suodattimet 600 ja 900D puolestaan käyttäytyvät päinvastaisesti, sillä niiden tapauksessa suhde laskee 200mm:n etäisyydellä noin 4 % ja 7 % vastaavasti. Tutkittavista suodattimista loukkuilmäisimen ja suodattimen välisen etäisyyden muutos vaikuttaa vähiten suodattimeen 500df10a: suhteen muutos jää suurimmillaankin parin prosentin kokoluokkaan.  $V(\lambda)95-2$  -suodattimella saadut tulokset ovat merkillepantavia siksi, että siinä missä muilla suodattimilla virran suhde muuttuu monotonisesti joko suurempaan tai pienempään suuntaan, kasvaa se suodattimen  $V(\lambda)95-2$  tapauksessa noin 100 mm:n etäisyyteen asti, ja alkaa sitten

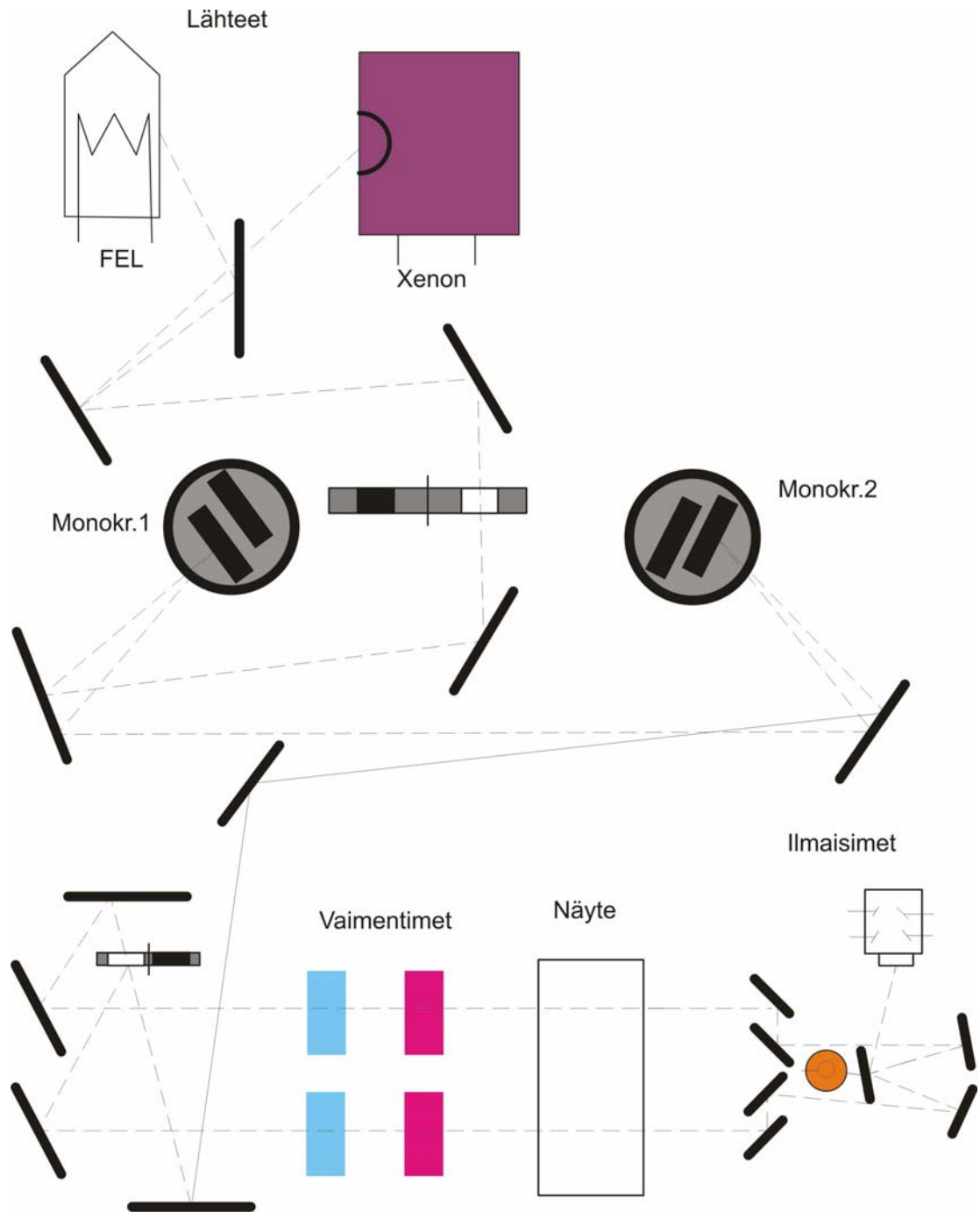
pienentyä. Kuitenkin muutokset pysyivät parin prosentin sisällä nollaetäisyyteen verrattuna.

## **5.2 Kulmavaste**

Tutkitut kulmat olivat +8:sta -8:aan asteeseen yhden asteen välein. Valon tulokulman muutoksen vaikutusta suodattimien transmittanssiin mitattiin Perkin-Elmer Lambda 900 UV/VIS/NIR –spektrometrillä, muuttaen suodattimen kulmaa suhteessa tulevaan valonsäteeseen. Kuvassa 8 esitetään käytetyn spektrometrin toimintaa havainnollistava kaavakuva.

Lambda 900 –spektrometrissä valonlähteinä käytetään vaihtoehtoisesti toista kahdesta lampusta, sen mukaan, mitä aallonpituusaluetta käsitellään. Toinen näistä lampuista on FEL-tyyppinen halogeenilamppu, ja toinen on xenon-lamppu. FEL- lamppu soveltuu lähi-infrapuna (NIR)- ja näkyvän valon mittauksiin, kun taas xenon-lamppu puolestaan sopii UV-alueen mittauksiin. Ensimmäisen peilin asento määrää sen, kumpaa lamppua käytetään lähteenä. Valonsäde ohjataan peileillä katkojan läpi kahdelle monokromaattoreille, joilla määrätään eteenpäin jatkavan valon aallonpituus. Edelleen valonsäde ohjataan säteenjakajalle, joka jakaa sen kahdelle eri polulle, jotka molemmat menevät läpi vaimentimista ja näyteosastosta. Toisen säteen reitille laitetaan tutkittava suodatin, siinä missä toisen säteen reitille ei laiteta mitään. Lopuksi molemmat säteet ohjataan joko valomonistinputkelle tai PbS-ilmaisimelle. Viimeisen peilin asento määrää, kummalle ilmaisimelle valonsäteet ohjataan. Näistä valomonistinputki soveltuu UV- ja näkyvän alueen mittauksiin, ja PbS-ilmaisimelle NIR-alueen mittauksiin. Mittaustilanteessa toista säteistä käytetään referenssisäteenä ja toista näytesäteenä, eli näytesädettä verrataan referenssisäteeseen transmittanssin mittausta tehtäessä.[13]





*Kuva 8 Perkin-Elmer Lambda 900 UV/VIS/NIR –spektrometrin kaavakuva. Mustat palkit esittävät peilejä, katkoviivat puolestaan valon kulkureittiä.*

Kulmavasteen mittauksissa suodatinpidike oli asennettu kierrettävälle alustalle, jossa oli kulma-asteikko. Tätä asteikkoa hyödyntäen muutettiin tutkittavan suodattimen kulmaa suhteessa valonsäteeseen.

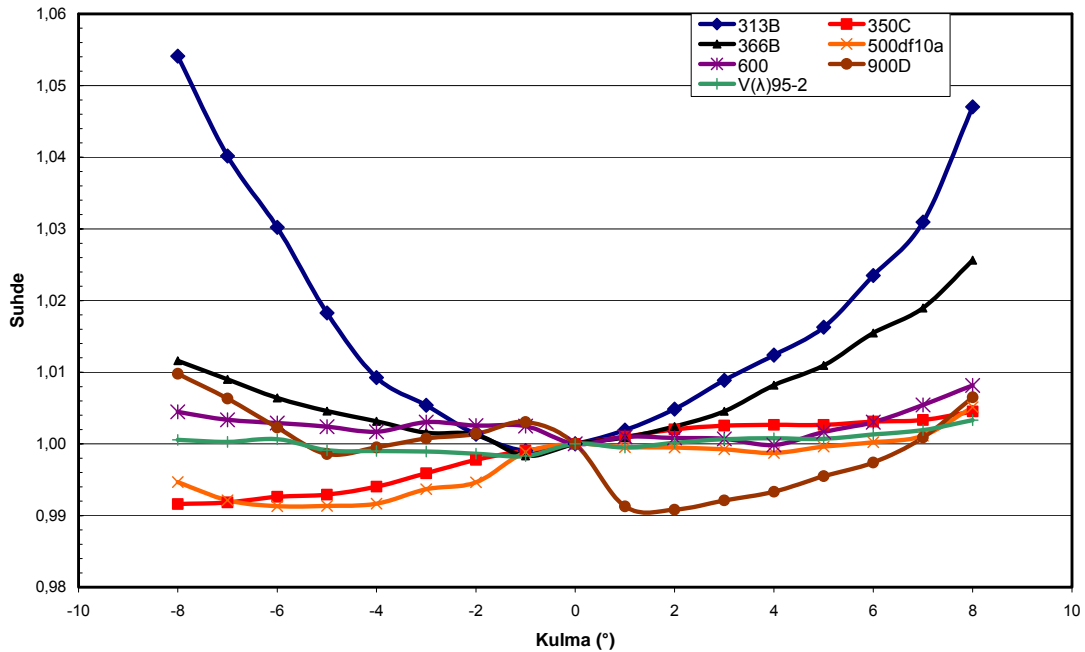


*Kuva 9 Lambda 900 –spektrometrin näyteosasto. Keskellä suodattimenpidike. Näyteosaston sivuseinämässä on nähtävissä reiät, joista valonsäteet kulkevat.*

Kulmavastemittausten tulokset on esitetty kuvassa 10. Kuvaajassa näkyvät eriväriset käyrät vastaavat kukin tiettyä tutkittua suodatinta. Pystyakselilla oleva luku kertoo, kuinka suuri kyseisessä asennossa laskettu integroitu vaste on suhteessa kääntämättömään suodattimeen, eli vaaka-akselin nollakohtaan. Integroitu vaste on laskettu kaavoilla (7) ja (8) kullekin mittauspisteelle erikseen, ja kuvasta 10 luettava suhde  $C_a$  on laskettu kaavalla

$$C_a = \frac{S_a}{S_{0,a}}, \quad (10)$$

jossa  $S_a$  on laskettu integroitu vaste, kun suodattimen transmittanssina on käytetty kulmalla  $a$  mitattua arvoa pitäen muut arvot samoina kuin nollakulmalla.  $S_{0,a}$  on integroitu vaste, kun transmittanssina on käytetty arvoa, joka on mitattu kulman ollessa nolla.



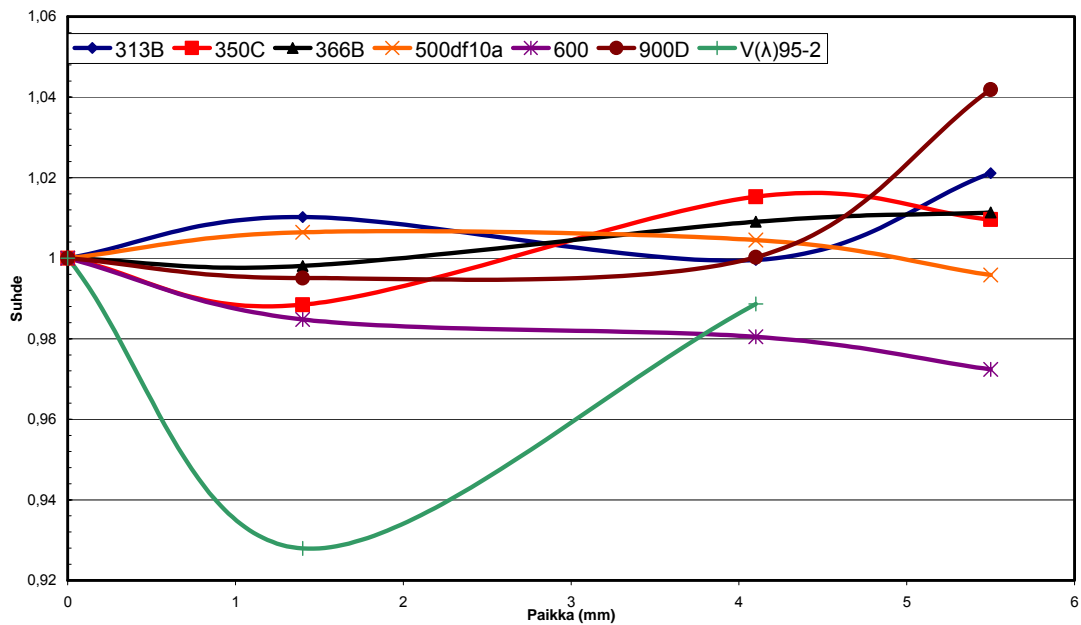
Kuva 10 Kulmavastemittausten tulokset.

Kuvasta 10 nähdään, että suodattimen kulmalla on pieni, mutta selkeä vaikutus laskettuun irradianssiin. Vaikutus on pahimmillaan noin 5 % luokkaa, vaikka useimmilla suodattimilla jääkin alle kahden prosentin. Vaikutus on suurin juuri niillä suodattimilla, joiden kohdalla alun perinkin oli ollut ongelmia mittauksissa, eli suodattimilla 313B ja 366B. Suodattimella 313B vaikutus on suurimmillaan noin 5,5 %, ja 366B:llä noin 2,5 %. Näiden suodattimien tapauksessa suhde myös näyttää noudattavan paraabelimaista käyrää. Muiden suodattimien tapauksessa vaikutus jää suurimmillaankin alle yhden prosentin, ja  $V(\lambda)95-2$  -suodattimen ollessa kyseessä se on lähes olematon. Tutkimuksessa huomattiin myös, että suodattimien efektiiviset aallonpituudet siirtyivät lyhyemmille aallonpituuksille tulokulman muuttuessa, riippumatta siitä, muuttuiko se negatiiviseen vai positiiviseen suuntaan nollakulmasta. Suurin efektiivisen aallonpituuden muutos oli 4nm, ja se havaittiin suodattimen 900D

tapauksessa. Muilla suodattimilla efektiivisen aallonpituuden muutos jäi noin 2nm:iin tai sitä pienemmäksi.

### 5.3 Spatiaalivaste

Spatiaalivasteen mittaukset tehtiin samalla laitteella kuin kulmavasteenkin, eli PerkinElmer Lambda 900 –spektrometrillä. Erona kulmavasteen mittauksiin oli se, että kierrettävän alustan sijaan suodatinpidikkeen jalusta oli asennettu tulevaan valonsäteeseen nähden kohtisuoralle kiskolle, jolla jalustaa, ja siten suodatinta, voitiin siirtää sivusuunnassa. Mitattava suodatin asennettiin näyteosastoon aluksi siten, että tuleva valonsäde oli silmämääräisesti mahdollisimman keskellä suodatinta. Tämän jälkeen mitattiin suodattimen spektrinen transmittanssi. Transmittanssi mitattiin myös, kun suodatinta oli siirretty 1,4 mm, 4,1 mm ja 5,5 mm tulevaan valonsäteeseen verrattuna oikealle. Nämä matkat mitattiin etäisyystulkkien avulla. Tulkkien leveydet mitattiin työntömitalla. Suunta, johon suodattimia siirrettiin, määräytyi siitä, ettei näyteosastossa ollut tilaa siirtää niitä toiseen suuntaan.



Kuva 11 Spatiaalivastemittausten tulokset

Spatiaalivastemittausten tulokset ovat nähtävissä kuvassa 11. Eriväriset käyrät vastaavat eri suodattimia. Vaaka-akselilta on luettavissa kuinka paljon suodatinta on siirretty millimetreinä, ja pystyakselilta laskettujen integroitujen vasteiden suhde  $C_s$

$$C_s = \frac{S_s}{S_{0,t}}, \quad (11)$$

jossa  $S_s$  on integroitu vaste, joka on laskettu paikassa  $s$  mitatun transmittanssin avulla, ja  $S_{0,t}$  on vastaava arvo, kun suodatinta ei ole siirretty nollakohdasta.

Mittauksissa havaittiin, että  $V(\lambda)95-2$  suodatinta siirrettäessä transmittanssimittauksissa käytetty valonsäde leikkaantui suodattimen pienen aukon vuoksi. Niin ollen tulokset kyseisessä tilanteessa eivät ole luotettavia. Samasta syystä  $V(\lambda)95-2$  -suodatinta ei ole mitattu tilanteessa, jossa sitä olisi siirretty 5,5 mm. Suurin vaikutus paikan muutoksella on suodattimen 900D tapauksessa: suurimmillaan noin 4 %. Kolmanneksi suurin vaikutus taas nähdään 600:lla, jolla vaikutus suurimmillaan on hieman alle 3 %. Tässä tapauksessa vaikuttajana on saattanut olla kyseisen suodattimen paikoittainen samentuminen ja tahriintuminen. Muilla suodattimilla vaikutus jäi suurimmillaan alle kahteen prosenttiin. Spatiaalivastemittauksissa ei havaittu efektiivisten aallonpituuksien muutoksia.

## 6 Johtopäätökset

Tässä työssä tutkittiin kolmea erilaista spektrisen irradianssin mittauksiin vaikuttavaa virhelähdettä. Nämä kolme erilaista mittaustilannetta vastasivat eroja kalibrointi- ja mittaustilanteiden välillä. Tutkittuja lähteitä olivat suodattimen ja loukkuilmaisimen välinen etäisyys, kulmavaste ja spatiaalivaste. Loukkuilmaisimen ja suodattimen välistä etäisyyttä tutkittiin, koska kalibrointitilanteessa suodatin ei ole kiinni loukkuilmaisimessa, kuten se on spektristä irradianssia mitattaessa. Kulmavastetta tutkittiin siksi, että avaruuskulma, jossa valo tulee suodattimelle, ei ole sama kalibrointi- ja mittaussjärjestelyissä. Spatiaalivastemittauksilla selvitettiin, vaikuttaako tarkka kohta, mihin valonsäde suodattimelle osuu, spektrisen irradianssin mittaukseen.

Loukkuilmaisimen ja suodattimen välisen etäisyyden vaikutusta tutkittaessa saatiin selville, että aiemmin ongelmallisina pidettyjen suodattimien 313B ja 350C tapauksessa vaikutus oli poikkeuksellisen suuri muihin suodattimiin verrattuna. Vaikutus mitattuun virtaan oli jopa 38 % 313B:n tapauksessa, ja 350C:n tapauksessa vastaavasti 7 %. 900D:n kohdalla vaikutus oli päinvastainen, eli tässä tapauksessa virran suhde laski suurimmillaan 7 %, siinä missä edellämainittujen kohdalla se nousi. Muilla suodattimilla vaikutus pysyi alle 4 %:ssa, mikä kuitenkin on jo merkittävä vaikutus itsessäänkin.

Kulmavastemittauksissa vaikutukset jäivät huomattavasti pienemmiksi kuin etäisyyden vaikutusta mitatessa. Suurimmat vaikutukset laskettuun irradianssiin havaittiin jälleen 313B-suodattimen tapauksessa, suurimmillaan vaikutus oli 5 %:n luokkaa. Seuraavaksi voimakkain vaikutus havaittiin 366B:n kanssa, jolla se maksimissaan oli noin 2,5 %:n suuruinen. Kaikilla muilla suodattimilla suoritetuissa tutkimuksissa tulokulman vaikutus laskettuun spektriseen irradianssiin jäi suurimmillaankin alle yhden prosentin.

Spatiaalivastetta tutkittaessa suurimmat muutokset havaittiin näkyvän valon- ja lähi-infrapuna-alueen suodattimilla, eli suodattimilla 600 ja 900D. Näille suodattimille

vaikutus oli likimain 3 % ja 4 %.  $V(\lambda)95-2$  –suodattimella saatuihin tuloksiin taas tulee suhtautua varauksellisesti näytesäteen leikkautumisen takia. Muille suodattimille vaikutus jäi alle kahden prosentin.

Kaiken kaikkiaan voidaan todeta sekä etäisyyden muutoksella että kulmavasteella olevan suurin merkitys juuri alun perin ongelmallisina pidettyihin suodattimiin, eli UV-alueen suodattimiin 313B, 350C ja 366B. Tästä voidaan päätellä, että kalibrointi- ja mittaustilanteiden välisillä eroilla on mahdollisesti merkitystä etenkin UV-alueen suodattimien tapauksessa.

## 7 Viiteluettelo

- [1] Jokela K: *Radiometrian perusteet ja optisen säteilyn mittaukset*, 2. korjattu painos, Picaset Oy, Helsinki (2003)
- [2] Dobrowolski J A: Optical interference filters for the adjustment of spectral response and spectral power distribution, *Appl. Opt.* **9**, 1396-1402 (1970)
- [3] <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/HBASE/phyopt/intfilt.html#c1> , viitattu 23.04.2010
- [4] Kärhä P, Toivanen P, Manoocheri F ja Ikonen E: Development of a detector-based absolute spectral irradiance scale in the 380-900nm spectral range, *Appl. Opt.* **36**, 8909-8918 (1997)
- [5] Kübarsepp T, Kärhä P, Manoocheri F, Nevas S, Ylianttila L ja Ikonen E: Spectral irradiance measurements of tungsten lamps with filter radiometers in the spectral range 290nm to 900nm, *Metrologia* **37**, 305-312 (2000)
- [6] Hemming B, Ikonen E ja Noorma M: Measurement of aperture diameters using an Optical Coordinate Measuring Machine, *Int. J. Optomechatronics* **1** , 297-311 (2007)
- [7] Manoocheri F ja Ikonen E: High-accuracy spectrometer for measurement of regular spectral transmittance, *Appl. Opt.* **34**, 3686-3692 (1995)
- [8] de Vos J C: A new determination of the emissivity of tungsten ribbon, *Physica* **20**, 690-714 (1954)
- [9] Liu Y J, Xu G, Ojanen M ja Ikonen E: Spectral irradiance comparison using a multi-wavelength filter radiometer, *Metrologia* **46**, S181-S185 (2009)
- [10] Kübarsepp T, Yoon H W, Nevas S, Kärhä P ja Ikonen E: Comparison of spectral irradiance scales between the NIST and the HUT, *Metrologia* **39**, S399-S402 (2002)



- [11] Ollikka L: *Spektrisen irradianssin mittauksen aallonpituusalueen laajentaminen*, Espoo (2007)
- [12] Ojanen M, Anhalt K, Hartmann J, Schiller S, Weckström T, Kärhä P, Heinonen M ja Ikonen E: Comparison of the radiation temperature scales between PTB and MIKES, *Measurement* **43**, 183-189 (2010)
- [13] Perkin-Elmer Corporation, *Lambda 900 UV/VIS/NIR Spectrometer and Reflectometry Systems*, Saksa (1995)