

**LAPPEENRANNAN TEKNILLINEN YLIOPISTO**  
Teknillinen tiedekunta  
Sähkötekniikan koulutusohjelma

Jouni Vanhanen

**PINNANKARHEUDEN MITTAUS KOLMIAALTOLASERILLA**

Työn tarkastajat:           Professori   Pertti Silventoinen  
                                  Professori   Juha Pyrhönen

Työn ohjaaja:                Dosentti   Erik Vartiainen

## **TIIVISTELMÄ**

Lappeenrannan teknillinen yliopisto

Teknillinen tiedekunta

Sähkötekniikan koulutusohjelma

Jouni Vanhanen

### **Pinnankarheuden mittaus kolmiaaltolaserilla**

Diplomityö

2010

41 sivua, 28 kuvaa, 4 taulukkoa ja 1 liite

Tarkastajat: Professori Pertti Silventoinen

Professori Juha Pyrhönen

Hakusanat: Laser, pinnankarheus

Työssä suunniteltiin ja rakennettiin kolmiaaltolaser pinnankarheuden mittaamiseen. Keskeisenä kysymyksenä oli mittausalueen laajentaminen verrattuna perinteisiin yksiaaltomittauksiin. Laitteen toimivuus todennettiin mittaamalla suhteellisia pinnankarheuksia useista eri tunnetuista paperinäytteistä.

## **ABSTRACT**

Lappeenranta University of Technology  
Faculty of Technology  
Electrical Engineering

Jouni Vanhanen

### **Surface roughness measuring with triple wave laser**

Master's thesis

2010

41 pages, 28 pictures, 4 tables and 1 appendix

Examiners: Professor Pertti Silventoinen  
Professor Juha Pyrhönen

Keywords: Laser, surface roughness

The target of the work was to design and build a triple wave laser for paper surface roughness measuring. The main target was to increase the measuring range in comparison to a traditional single wave measuring devices. The functionality of the measuring device was verified by measuring comparative surface roughnesses of several known paper samples.

# KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET

## Lyhenteet

He-Ne	Helium-Neon
IR	Infrapuna
Nd:YAG	Neodymium-doped yttrium aluminium garnet
TEM	Transverse Electromagnetic
SNR	Signaali-kohinasuhde
VIS	Näkyvän valon alue

## Muuttujat

$E$	Energia
$D$	Etäisyys
$d$	Korkeus resoluutio
$h$	Planckin vakio
$I$	Intensiteetti
$K$	Normeerausvakio
$L$	Pituus
$R_a$	Keskimääräinen pinnankarheus
$R_q$	RMS pinnankarheus
$S_n$	Optinen karheus
$\alpha$	Kulma $\alpha$
$\beta$	Kulma $\beta$
$\gamma$	Kulma $\gamma$
$\lambda$	Aallonpituus
$\nu$	Taajuus
$\theta$	Kulma $\theta$

KÄYTETYT MERKINNÄT JA LYHENTEET .....	4
1 JOHDANTO .....	6
2 LASERIT .....	7
2.1 Historia .....	7
2.2 Toiminta .....	7
2.2.1 Pumppu .....	8
2.2.2 Väliaine .....	9
2.2.3 Resonaattori .....	9
3 PINNANKARHEUS.....	10
3.1 Pinnan mekaaninen mittaaminen .....	11
3.2 Pinnan optinen mittaaminen.....	12
3.2.1 Optinen Interferometria.....	12
3.2.2 Pinnan optinen mittaaminen valon sirontaan perustuen.....	17
4 OPTISET TUNNISTIMET .....	20
4.1 Lämpöön perustuvat tunnistimet.....	20
4.2 Fotonin emissioon perustuvat ilmaisimet.....	21
4.3 Valokennot ja valosähköiset ilmaisimet.....	23
4.4 Optiset tunnistimet .....	23
5 MITTAUSLAITTEISTO .....	25
5.1 Kuuma- ja kylmäpeilit .....	26
5.2 Mittaustulokset.....	29
6 JOHTOPÄÄTÖKSET .....	39
LÄHDELUETTELO.....	40
LIITTEET	
Liite 1. Mittauspöytäkirjat	

# 1 JOHDANTO

Diplomityö on tehty Lappeenrannan teknillisen yliopiston fysiikan laitokselle. Työssä käsitellään pinnankarheutta ja sen mittaamista lähinnä optiikan keinoin. Työn kuluessa on suunniteltu ja koottu kolmiaaltolaseriin perustuva mittalaite, jonka avulla mitattiin paperinäytteiden suhteellisia pinnankarheuksia.

Pinnankarheuden mekaaninen mittaaminen on hidasta ja siitä jää aina jonkinlainen jälki mitattavaan kohteeseen. Myöskään nopeisiin mittauksiin, kuten paperin on-line mittaus paperitehtaassa, mekaaninen mittaus ei sovi, koska paperi repeytyisi nopeassa vauhdissa erittäin herkästi ja mittauksen mahdollisesti onnistuessa mittapäät kuluisivat nopeasti.

Nykyisin pinnankarheutta mitataan optisesti yleisesti vain yhdellä laserilla kerrallaan, jolloin mittausalue jää varsin kapeaksi. Yleisiin mittauksiin käytettävä lasertyyppi lienee näkyvän valon alueella oleva helium-neon laser (HE-NE laser), jonka aallonpituus on 633 nm. Tällöin paperin tulisi olla kohtalaisen sileää, koska karheilla pinnoilla näin lyhytaaltainen säteily siroaa voimakkaasti, ja mittaaminen on epätarkkaa ellei mahdotonta. Tässä työssä kapean mittausalueen ongelma on ratkaistu käyttämällä HE-NE laserin kanssa kahta IR-alueen laseria. IR-laserien aallonpituudet ovat selvästi näkyvän valon laseria pidemmät, mikä mahdollistaa jopa kolminkertaisen pinnankarheuden mittaamisen verrattuna näkyvän valon laseriin.

## **2 LASERIT**

Laser on yksi merkittävimmistä viimeisimmän 50 vuoden aikana kehitetyistä optisista laitteista. Laserin toiminta perustuu stimuloituun emissioon, jonka seurauksena vapautuu fotoneja. Laserin tuottama valo on koherenttia eli valolla on sama aallonpituus, valon säteet ovat samassa vaiheessa ja kaikki säteet ovat samansuuntaisia. Laserien kehitys on ollut erittäin nopeaa viimeisimmän parin vuosikymmenen aikana.

### **2.1 Historia**

Laserin teoreettisen periaatteen selitti Albert Einstein heinäkuussa 1916. Einstein tutki sähkömagneettisen säteilyn vuorovaikutusta aineeseen ja todisti kuinka aineen ja säteilyn välinen tasapainotila vaati aiemmin tuntemattoman prosessin nimeltään stimuloitu emissio. Einsteinin tutkimus jäi kuitenkin unohduksiin vuosikymmeniksi, kunnes vuonna 1954 C.H. Townes tutkimusryhmineen kehitti mikroaaltovahvistimen stimuloitun emission avulla. Vuonna 1958 Townes ja A. Schawlow muokkasivat periaatetta näkyvän valon alueella ja vuonna 1960 T.H. Maiman kehitti ensimmäisen toimivan laserin. Laser oli rubiinilaser, jossa oli resonaattorina Fabry-Pérot'n interferometri. Laser emittoi syvänpunaista valoa, jonka aallonpituus oli 694,3 nm. Ensimmäinen kaasulaser oli A. Javan tutkimusryhmän kehittämä helium-neon laser, joka emittoi sekä infrapuna-alueella, että näkyvän valon alueella. Tämän jälkeen lasereiden kehitys oli nopeaa, lasereita kehitettiin eri väliaineille ja lukuisille aallonpituuksille. /1/ Nykyään lasersovelluksia on lukemattomia, ja arvioidaan, että joka viikko keksitään uusia sovelluksia.

### **2.2 Toiminta**

Laserin voisi mieltää optiseksi oskillaattoriksi, joka emittoi intensiivistä, hyvin kollimoitua koherenttia valoa. Laserissa on kolme peruselementtiä: ulkoinen energian lähde tai niin kutsuttu pumppu, vahvistava/laservoiva väliaine ja optinen kaviteetti eli resonaattori. Teoreettinen toimintaperiaate pohjaa Einsteinin tutkimuksiin. Einsteinin

mukaan vuorovaikutus säteilyn ja aineen välillä voidaan selittää kolmella tapahtumalla, jotka ovat stimuloitu absorptio, spontaani emissio ja stimuloitu emissio. Stimuloidussa absorptiossa säteilyn sisältämä fotoni luovuttaa energiansa atomille, joka virittäytyy, eli nousee ylemmälle energiatasolle. Virittäytyminen tapahtuu, kun fotonin energia on

$$h\nu = E_1 - E_0, \quad (1)$$

jossa  $h$  on Planckin vakio,  $\nu$  on fotonin taajuus,  $E_0$  on atomin perusenergia ja  $E_1$  virittäytyneen atomin energia. Spontaanissa emissiossa virittynyt atomi putoaa ylemmältä energiatasolta alemmalle, jolloin energia vapautuu fotonina. Stimuloidussa emissiossa ohimenevä fotoni vapauttaa viritetyn atomin ylemmältä energiatasolta. Emittoitunut fotoni saa saman energian, suunnan, vaiheen ja polarisaation kuin sen ohittanut fotoni. Tuloksena on kaksi täysin identtistä fotonia yhden sijasta. Juuri stimuloitu emissio mahdollistaa valon vahvistuksen lasereissa. /1/

### 2.2.1 Pumppu

Pumppu on ulkoinen energian lähde, joka tuottaa käänteismiehitetyksen väliaineessa, eli virittää väliaineen atomit. Pumppu voi olla optinen, sähköinen, kemiallinen tai lämpöpumppu, kunhan se vain tuottaa tarvittavan energian atomien virittämiseen. Esimerkiksi kaasulasereissa yleisesti on käytössä sähköinen pumppu, joka synnyttää sähköpurkauksia. Tärkeitä parametreja ovat elektronin virityssiippauspinta ja jokaisen energiatason elinaika. Joissakin kaasulasereissa vapaat elektronit luovuttavat viritykseen tarvittavan energian suoraan törmäyksen välityksellä. Viritys voi tapahtua myös kimmottomissa atomi-atomi- tai molekyyli-molekyyli-törmäyksissä. Jälkimmäisellä tavalla toimii juuri yleinen He-Ne laser. He-Ne laserissa helium vastaanottaa vapaan elektronin energian törmäyksessä ja luovuttaa sen törmäyksessä neonille. Neonin atomit virittäytyvät ja mahdollistavat stimuloitun emission. Ensimmäisessä toimivassa laserissa, jonka T. Mainman kehitti, pumppu oli toteutettu optisesti. Rubiinitankoa ympäröi kierteinen xenontäytteen salamavallo, joka viritti Cr<sup>+3</sup> epäpuhtausionit. Tämä kyseinen tapa tunnetaan optisena pumppaamisena ja se on ainut käytännöllinen tapa, jota voidaan käyttää nesteen tai kiinteän väliaineen virittämiseen. /1/

### **2.2.2 Väliaine**

Vahvistava väliaine on tärkeä osa laseria, usein laserit nimetään juuri väliaineen mukaan. Tyypillisiä väliaineita ja siten lasereiden nimiä ovat helium-neon-, hiilidioksiidi-, ja Nd:YAG eli Neodymiun-doped yttrium aluminium garnet-laser. Väliaine voi olla kaasua, nestettä tai kiinteää. Väliaine määrää laserin aallonpituuden, nykyiset laserit ulottuvat ultraviolettialueelta infrapuna-alueelle. Usein väliaine koostuu kahdesta aineesta, niinkutsutusta isäntäväliaineesta ja laserväliaineesta. Esimerkiksi isäntäväliaineena Nd:YAG laserissa toimii yttrium-alumiini-granaatti kide ja laser väliaineena toimivat neodyymi-ionit. Kaasulasereissa joissa väliaine on kahden tai useamman kaasun sekoitus, ei yleensä erotella isäntä- ja laserväliaineita. Väliaineen tärkein tehtävä optisena vahvistimena on mahdollistaa käänteismiehitys kahden eri energiatason välillä./1/

### **2.2.3 Resonaattori**

Resonaattori on optinen onkalo, joka heijastaa fotonit edestakaisin väliaineen läpi. Resonaattori koostuu kahdesta kaarevasta peilistä, jotka on asetettu laserlaitteen optiselle akselille. Toinen peileistä valitaan mahdollisimman heijastavaksi, yleensä heijastavuus on lähellä 100 prosenttia. Toisen peilin heijastavuus on hieman alle 100 prosenttia, sallien näin osan säteestä läpäisevän sen ja toimivan näin säteen ulostuloreittinä. Peilien muoto ja etäisyys määräävät sähkömagneettisen kentän ominaisuudet resonaattorin sisällä. Monet poikittaiset säteilyvoimakkuuden kuviot, niin kutsutut TEM-moodit esiintyvät yleensä lasersäteen lähdössä. Vaimentamalla säteen reunoilla esiintyvien ylempien moodien vahvistusta voidaan laser saada toimimaan perusmoodissa niin kutsutussa TEM<sub>00</sub> moodissa./1/

### 3 PINNANKARHEUS

Pinnankarheutta mitataan yleisesti keskimääräisellä karheudella  $R_a$  ja rms-karheudella  $R_q$ . Keskimääräinen pinnankarheus määritellään seuraavasti:

$$R_a = L^{-1} \int_0^L |y(x)| dx, \quad (2)$$

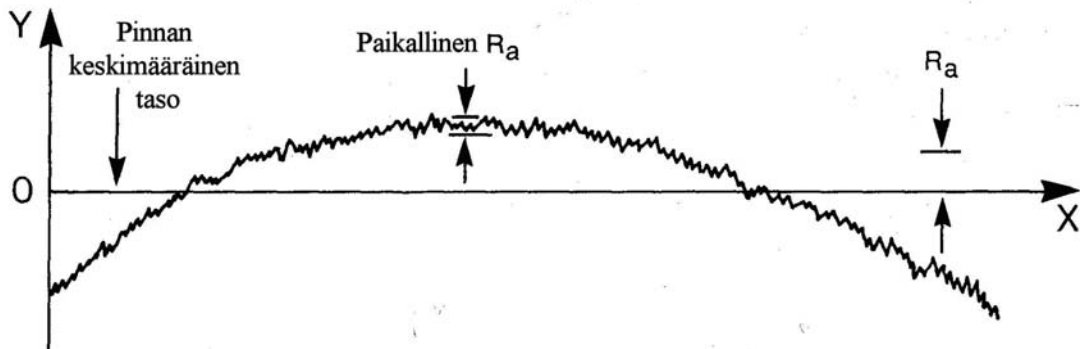
jossa  $L$  on näytteistyspituus. Vastaavasti rms-karheus määritellään seuraavasti:

$$R_q = \sqrt{L^{-1} \int_0^L y^2(x) dx} \quad (3)$$

On kuitenkin otettava huomioon, että kaavat on kehitetty suoran pinnan mittaamiseen. Jos pinta on kaareva tai kallellaan, käytetään yleisesti paikallista karheutta keskimääräisen karheuden sijaan. Mittauslaitteistolla paikallinen karheus saadaan AC-suodatuksella. Näissä tilanteissa keskimääräinen karheus tuottaisi huomattavasti liian suuren tuloksen. Asiaa selventää kuva 2.



*Kuva 1. Suoran kappaleen pinnankarheus profiili. Kuvaan merkitty keskimääräinen - ja rms-karheus. /2/*



Kuva 2. Pinnankarheus käyrä kuperalla kappaleella. /2/

Pinnankarheutta voidaan mitata kahdella fysikaalisesti erilaisella tavalla. Voidaan käyttää niin kutsuttua stylus-tyyppistä konetta, jossa ohut neulan tapainen kärki kulkee mitattavan kappaleen pinnan päällä, ja pinnankarheus tallentuu neulan liikkeestä. Ongelmana on pehmeiden ja helposti naarmuuntuvien pintojen mittaus, sillä neula saattaa jättää selvän jäljen, tai naarmun mitattavaan pintaan. Myös värinä saattaa aiheuttaa virheitä mittaukseen, joten tapa ei ole sovelias niin kutsuttuun on-line mittaukseen.

Toinen tapa on optinen mittaus, jossa pinnasta sironneesta valosta voidaan laskea karheus. Mitattaessa pinnankarheutta optisesti on otettava huomioon, että valon aallonpituus pitää sovitaa mitattavan pinnankarheuteen. Käytännössä aallonpituuden pitäisi olla noin kymmenkertainen mitattavaan karheuteen nähden, jotta tulosta voidaan pitää luotettavana. Optisen mittauksen etuna on mitattavan kappaleen säilyminen alkuperäisessä kunnossa, koska mitattavaan kappaleeseen ei tarvitse koskea. /2/

### 3.1 Pinnan mekaaninen mittaaminen

Mekaaninen pinnankarheuden mittaaminen perustuu terävän kärjen vetämiseen pitkin mitattavaa pintaa, jolloin kärjen pystysuorasta liikkeestä voidaan laskea pinnankarheus. Yleisesti kärkenä käytetään timanttia, jonka kärjen säde on tyypillisesti noin muutaman mikrometrin luokkaa. Kärkeä vedetään hitaasti pitkin mitattavaa pintaa, ja pystysuora liike tallentuu sähkömekaaniseen anturiin. Mittauksesta jää lähes aina pieni ura kärjen kulkureitille, joten sitä ei voi käyttää herkillä materiaaleilla, eikä nopeasti liikkuvilla

pinoilla. Mittaustarkkuuden määrittää lähes täysin kärjen säde, yhden mikrometrin säteinen kärki tuottaa lateraaliseksi resoluutioksi 0,1 mikrometrin luokkaa. Sähkömekaanisen anturin aiheuttama kohina aiheuttaa tuloksiin virhettä vain nanometriä murto-osia. Parhaiten tällainen hidas mittaustapa soveltuu käytettäväksi laboratorio-oloissa, joissa ei ilmene tärinää tai vaadita nopeaa mittausta. /2/

## **3.2 Pinnan optinen mittaaminen**

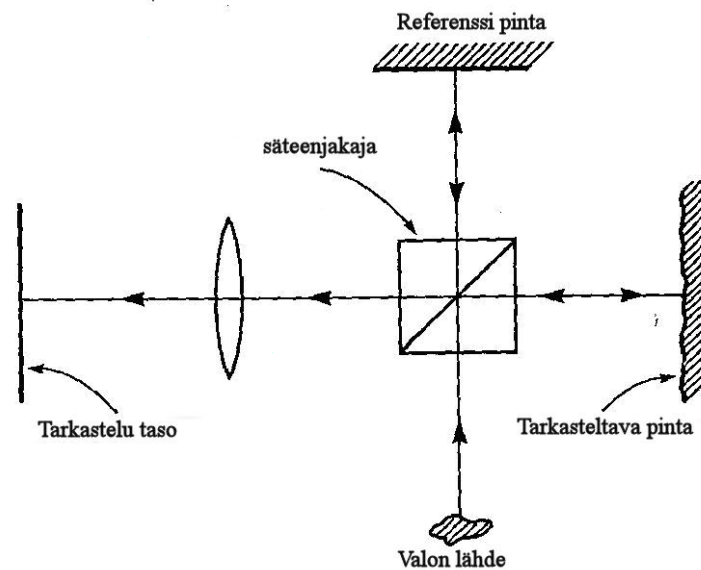
Pinnan optinen tarkastelu voidaan jakaa kahteen eri alueeseen. Niihin jotka liittyvät kohteen muotoon, kuten pinnankarheuden mittaaminen tai hahmon tunnistus eli asioihin, joita myös ihminen pystyy silmin arvioimaan ja hahmottamaan. Toisen alueen muodostavat taas seikat, joita ihminen ei pysty havainnoimaan, kuten ylikuumentuneiden koneiden osien havaitseminen termografiaa hyödyntäen tai paineen ja lämpötilan mittaaminen valokuiduista tehdyillä sensoreilla. Optinen tekniikka mahdollistaa mittaukset ahtaissa paikoissa ja äärimmäisissä olosuhteissa. Esimerkkinä voidaan mainita mittaukset lähellä kaarihitsauksen hitsauspäästä tai kuumavalssaimella käyttäen optisia kuitukimppuja. /2/

Tavallisimmin optiset mittalaitteet perustuvat sironneen valon tai geometrisen optiikan hyödyntämiseen. Vähemmän yleisiä mittalaitteita ovat esimerkiksi interferenssiin perustuvat järjestelmät. Interferenssiin perustuvia laitteita on yleisesti kehitetty sileiden pintojen mittaamiseen ja tarkistukseen, erityisesti optisten komponenttien kuten peilien ja linssien tarkistamiseen. Interferenssiin perustuvat laitteet ovat pääosin vain laboratoriokäyttöön, koska ne ovat herkkiä häiriöille kuten tärinälle. /2/

### **3.2.1 Optinen Interferometria**

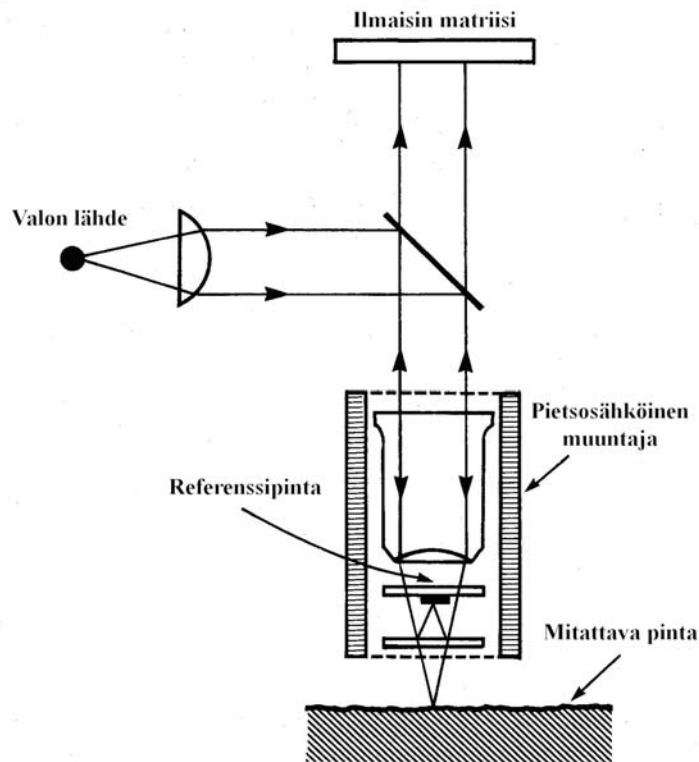
Erilaisia optisia interferometrejä on jo kauan käytetty sileiden pintojen tarkastukseen. Kuva 3 esittää klassisen interferometrisysteemin, jolla voidaan tarkastaa suoria pintoja. Tarkastettava pinta ja referenssipinta sijoitetaan lähes suoraan kulmaan toisiinsa verrattuna, säteenjakajan vierekkäisille sivuille. Molemmat pinnat heijastavat valon tarkasteltavalle pinnalle säteenjakajan kautta, aiheuttaen interferenssikuvion. Jos pintojen etäisyydet on lähes samat ja pinnat ovat hiukan kallellaan, voidaan nähdä joukko yhdensuuntaisia viivoja. Pinnan korkeuserot eli karheus näkyvät viivakuvion

epäsäännöllisyytenä. Epämuodostumat kuviossa voidaan yhdistää mitattavan pinnan mikrostruktuuriin. Mikro-interferometrejä käytetään lähitarkasteluun pienille alueille. Kaareville pinnoille mittaus onnistuu käyttämällä referenssikappaleena täysin samanlaista kaarevaa pintaa kuin mittauksen kohteena oleva kappale. Tällaisesta järjestelystä on rajallinen hyöty muiden kuin optisten kohteiden tarkasteluun.



*Kuva 3. Klassiseen interferometriin perustuva mittausasetelma. /2/*

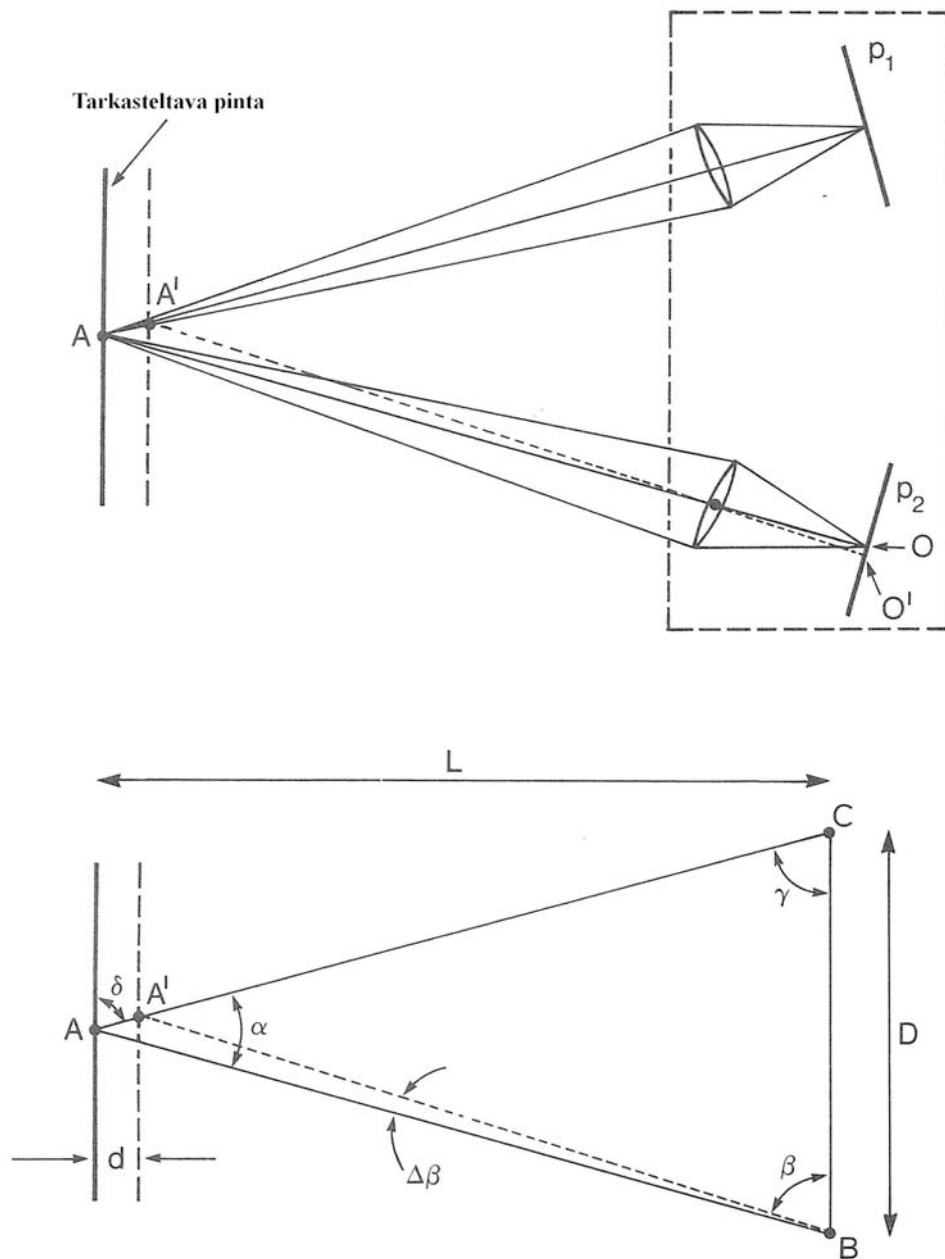
Parhaimmillaan optisella interferometrillä päästään samaan tarkkuuteen, kuin mekaanisilla profilometreillä. Verrattuna mekaaniseen profilometriin, on optinen interferometri kuitenkin selvästi nopeampi. Näköön perustuvassa tarkastelussa resoluutio on suunnilleen aallonpituuden neljännesosan luokkaa. Mittausalueen laajuus on yleisesti muutamia aallonpituuksia. Interferometreja on muunneltu myös tarkempaan mittaukseen. Eräs esimerkki tästä on Miraun interferometri. Yksinkertaisen rakenteen vuoksi se sietää enemmän tärinää kuin kaksihaarainen interferometri. Kuvassa 4 on esitetty Miraun interferometri.



Kuva 4. Miraun interferometrin periaatekuva. /2/

Valon lähde on useaa aallonpituutta lähettävä valaisin, eli valkoisen valon lähde. Valo ohjataan kahden ohuen levyn kautta näytteeseen, josta se heijastuu valoilmaisimeen. Toinen levyistä on referenssipinta, josta heijastuneen valon kanssa näytteestä tuleva valo interferoivat valoilmaisimella. Koko järjestelmää ohjaa pietsosähköinen muuntaja, joka muuttaa linssin korkeutta ja samalla mittaussmatkan pituutta. Mittauksessa tarkastellaan interferenssikuvion kontrastia, kun kontrasti on suurin, mitataan linssin paikka. Korkeusresoluutio laitteessa on 0,1 nm ja sivuttaisresoluutio muutamia mikrometrejä. Mittausalue on korkeussuunnassa maksimissaan 5 mikrometriä ja sivuttaissuunnassa 1,3 mm, kun pinnankaltevuus on korkeintaan 6,4°. /2/

Geometriseen optiikkaan perustuva pinnankarheuden mittaus perustuu kolmiomittaukseen, jota on käytetty maanmittauksessa ja navigoinnissa jo pitkään. Kolmiomittauksen perusidea on esitetty kuvassa 5.



Kuva 5. Kolmiomittauksen perusidea. /2/

Piste  $A$  sijaitsee mitattavalla pinnalla heijastuen kuvatasoille  $p_1$  ja  $p_2$ . Kuvatasot on pysyvästi asennettu samaan laitteeseen. Kuvataso  $p_1$  saattaa sisältää erittäin pienen reiän, joka toimii valonlähteenä tai laserdiodin valon ulostulotasona. Kuvatasolla voi olla myös reikä esimerkiksi passiiviselle etäisyysmittarille. Kuvataso  $p_2$  voi olla kuvataso kameralle tai hiusristiaukko. Kun kuvan paikka muuttuu pitkittäisesti, muuttuu kuvapiste  $A$  pisteeseen  $A'$ . Tällöin kuvatasolla  $p_2$  kuva muuttuu kuvapiste pisteestä  $O$

pisteeseen  $O'$ . Seuraamalla kuvapisteen paikkaa voidaan määrittellä kuvan paikka akselien suhteen. Jos tarkasteltava pinta liikkuu sivuttain suhteessa tarkastelemaan laitteeseen tai päinvastoin, voidaan pinnan profiilia tarkastella rajatussa suunnassa. Kuvan 5 alempi osa näyttää geometrisen periaatteen kolmiomittauksesta. Pisteet  $B$  ja  $C$  ovat objektin solmukohtia kaksilinssisysteemissä. Etäisyys  $D$  näiden pisteiden välillä tiedetään, samoin kulma  $\gamma$  tiedetään. Kulma  $\beta$  mitataan ja tästä voidaan laskea pinnan sijainti. Etäisyys  $AC$  voidaan laskea kaavalla 4.

$$AC = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{D \sin \beta}{\sin(\pi - \beta - \alpha)} \quad (4)$$

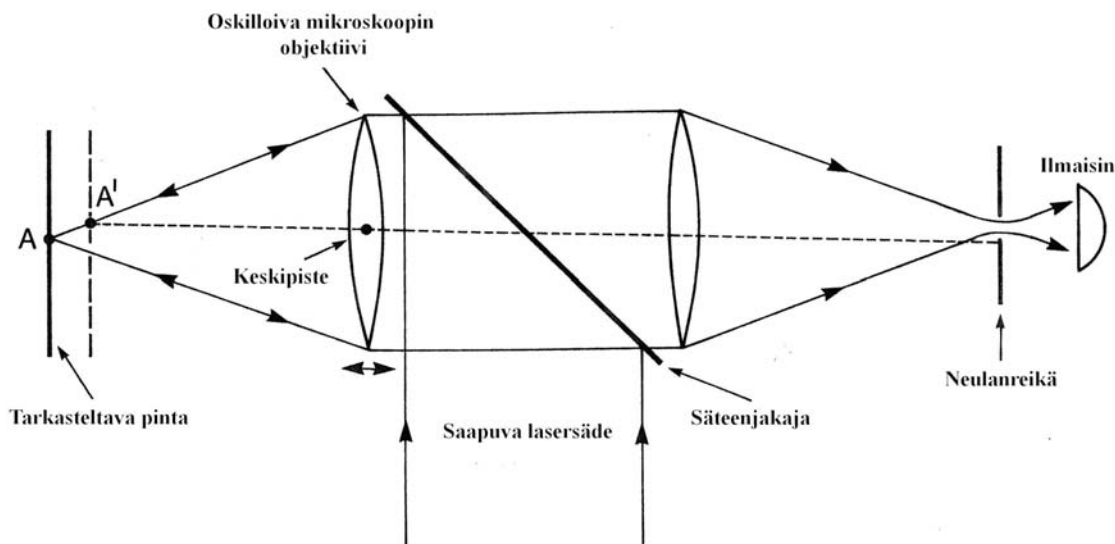
Minimi pinnan liike, joka voidaan havaita laitteistolla riippuu minimi kulmasta  $\Delta\beta$ , joka voidaan ratkaista linssejä tarkastelemalla. Yleisesti etäisyys  $D \ll L$  ja  $L \gg d$ , joten voidaan kirjoittaa kaava 5 olettaen että  $\sin \beta \approx 1$  ja  $BC \approx L$ .

$$d \approx \frac{D}{\alpha^2} \Delta\beta \approx \frac{L}{\alpha} \Delta\beta \quad (5)$$

jossa  $\alpha$  on radiaaneissa. Kaavasta 5 saadaan laskettua tarkkuus kolmiomittaukselle. Esimerkiksi jos  $D = 10$  cm,  $\alpha = 0,1$  radiaania ja kulmaresoluutio on  $\Delta\beta = 0,001$  radiaania, niin korkeusresoluutioksi saadaan  $d \approx 1$  mm ja toimintaetäisyydeksi  $L \approx 1$  m. Tarkimmillaan mikroskooppisella asetelmalla, jossa  $D \approx L \approx 1$  mm ja  $\alpha \approx 1$  radiaania on päästy jopa  $d \approx 0,1 \mu\text{m}$  tarkkuuksiin. Tällaisissa menetelmissä käytetään mikroskooppiin asennettua kameraa tarkastelemaan heijastunutta kaistaletta kulmassa, mitattaessa pinnankarheutta. Kolmiomittausjärjestelmää muuttamalla voidaan päästä edelleen tarkempiin mittaustuloksiin. Kuvassa 6 on optinen mittaustuloksesta, jota on käytetty pinnankarheudenmittaamiseen alle yhden mikrometrin karheuksista useiden kymmenien mikrometrien karheuksiin asti. Lasersäde on kohdistettu tarkasteltavaan pintaan mikroskooppisen linssin kautta, jonka numeerinen aukko on 0.85. Heijastunut säde fokusoidaan pieneen reikään toisen linssin kautta. Reikään saapuvaa säteen intensiteettiä mittaa anturi. Kun pinnankorkeus muuttuu, niin myös säteen fokusointipiste muuttuu, tällöin intensiteetti anturilla laskee. Pitkittäisellä vaihtelulla mikroskoopin objektiivi voi

tarkastella pintaa 100  $\mu\text{m}$  etäisyydeltä, 100 Hz:n pietsokeraamisella muuntajalla ja seuraamalla ilmaisimen maksimiarvoa voidaan pinnankorkeus arvioida 0,1 $\mu\text{m}$  tarkkuudella yli 100  $\mu\text{m}$  etäisyydeltä. Vaakatasossa resoluutio on rajoittunut noin 1  $\mu\text{m}$  säteeltä fokusointipisteestä, mutta johtui tässä tapauksessa näytteistysaskeleesta, joka oli 10  $\mu\text{m}$ .

Jos vertailemme kuvia 5 ja 6, havaitsemme että linssin fokusointi on pohjimmiltaan kolmiomittausmenetelmä, joka erottaa lähellä akselia siroutuvan säteen valonsäteestä, joka siroaa ääripisteestä kuten  $A'$ , joka ei ole fokusointipisteessä. Suurin ero näillä kahdella mittausasetelmalla on että kuvassa 5 otetaan vain pääsäde huomioon mittauksessa, kun taas kuvassa 6 otetaan huomioon kaikki heijastuneet säteet.



Kuva 6. Kolmiomittauksesta edelleen kehitetty pinnankorkeuden mittauksen perusidea /2/

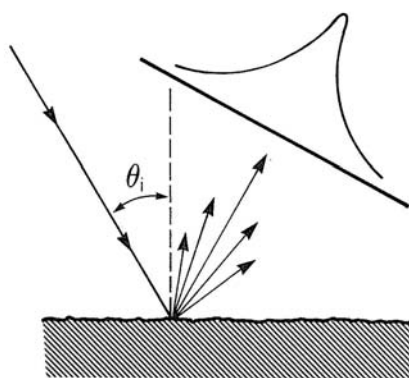
### 3.2.2 Pinnan optinen mittaaminen valon sirontaan perustuen

Edellä kuvatut mekaaniset ja optiset menetelmät ovat tarkoitettut lähinnä laboratorio-olosuhteisiin. Mekaanisissa menetelmissä, kuten neulan vetämisessä pintaa pitkin on hyvä herkkyys, ja mittaus on suoritettavissa laajalla alueella. Ongelmana mekaanisessa mittaamisessa on sen tarve kontaktiin mitattavan pinnan kanssa, järjestelmän haavoittuvuus ja hidas mittausvauhti. Interferometrien ongelmana on mittausalueen rajoitteisuus suhteellisen sileille pinnoille, herkkyys ympäristön tärinöille ja niiden tarve

olla lähellä mitattavaa pintaa. Geometriseen optiikkaan perustuvat mittalaitteet taas toimivat vain karheille pinnoille, mikrometrin karheuksista ylöspäin.

Pinnankarheuden optinen mittaaminen sirontaan perustuen on kuitenkin käyttökelpoisempi laboratorion ulkopuolella. Sirontaan perustuva mittaus on herkkä, mittauslaitteen ei tarvitse olla kovinkaan lähellä mitattavaa pintaa, ja ympäristön tärinä ei juuri vaikuta mittauksiin. Sirontaan perustuva mittaus myös tarjoaa välittömästi pinnankarheuden keskiarvon tarkasteltavalta alueelta. Tilastollisesti merkittävää dataa voidaan tallentaa huomattavasti nopeammin verrattuna viiva-profilometreihin. Rajoituksina sirontaan perustuvilla tekniikoilla on, etteivät ne pysty tarjoamaan tarkkaa pinnan profiilia ja mitatut parametrit ovat vaikeita ilmaista perinteisinä pinnankarheuden tilastollisina parametreina.

Sironneen valon kulmaspektri on eräs tapa käyttää valoa pinnankarheuden mittaukseen. Vuorovaikutus valon ja pinnasta heijastavien karheiden materiaalien välillä on laajalti tutkittu alue. Kun kollimoitu valonsäde osuu karhealle pinnalle, sirontakuvion maksimi saavutetaan spekulaarikulmassa. Kuvassa 7 on esitetty valon sironta karhealta pinnalta.



*Kuva 7. Valon sironta karhealta pinnalta.*

Spektrin muotoon vaikuttaa suuresti pinnan topografia, yksiselitteistä käännoästä kulmaspektrin parametreista tilastollisiin karheusparametreihin ei ole. Tämä johtuu siitä että pinnasta sironneeseen valon spektriin vaikuttavat useat eri tilastolliset parametrit ja pinnan ominaisuudet. Pinnan ominaisuuksista esimerkiksi pinnan vinous ja huipukkuus ovat tällaisia parametreja, joita ei voida klassisten pinnankarheusparametrein ilmaista.

Esimerkiksi paperinäytteiden mittauksissa myös kuitujen suuntautuminen vaikuttaa mitattuun sirontaspektriin. Mittausten tulkinta pitää tehdä tapauskohtaisesti ja useasti käytetään hyväksi empiiristä tietoa mittausten tulkinnoissa.

Pinnankarheuden ollessa pieni puhutaan useasti mikrokarheudesta. Valon sirontateoria ja käytäntö vastaavat toisiaan parhaiten suhteellisen tasaisilla materiaaleilla joilla pinnankarheus  $R_q \ll \lambda$ . Tässä tapauksessa terävä spekulaari komponentti on erottuva heijastuneesta kulmasironta spektristä, interferoiden selvästi heikomman ja laajalla sironneen valojakauman kanssa. Tämän spekulaarikulmaan sironneen valon spektrin avulla on kehitetty useita kokeellisia tapoja laskea pinnan keskimääräistä karheutta.

## 4 OPTISET TUNNISTIMET

Valon tunnistaminen on yksi ratkaiseva osa optista tarkastelua. Optisten tunnistimien suorituskykyä voivat rajoittaa myös järjestelmän muiden osien rajoitteet kuten linssien tai mittausikkunoiden erilaiset spektrin läpäisy tai sähköisen vahvistinosan nopeus-, tai tarkkuusrajoitteet. Optiset tunnistimet jaetaan useasti kahteen ryhmään toimintaperiaatteen mukaan, lämpöilmiön havaitsemiseen ja fotonin havaitsemiseen perustuvat tunnistimet. Fotonin havaitsemiseen perustuvat tunnistimet ovat selvästi yleisempiä käytössä. Havaitseminen perustuu monesti fotonin aiheuttamien emission, johtavuuden ja galvaanisten ilmiöiden mittaamiseen. Vähemmän käytettyjä tapoja ovat fotonin sieppaus, ftoni-sähkömagneettinen, ftoni-parametri ja kvantti-vahvistin tavat.

/2/

### 4.1 Lämpöön perustuvat tunnistimet

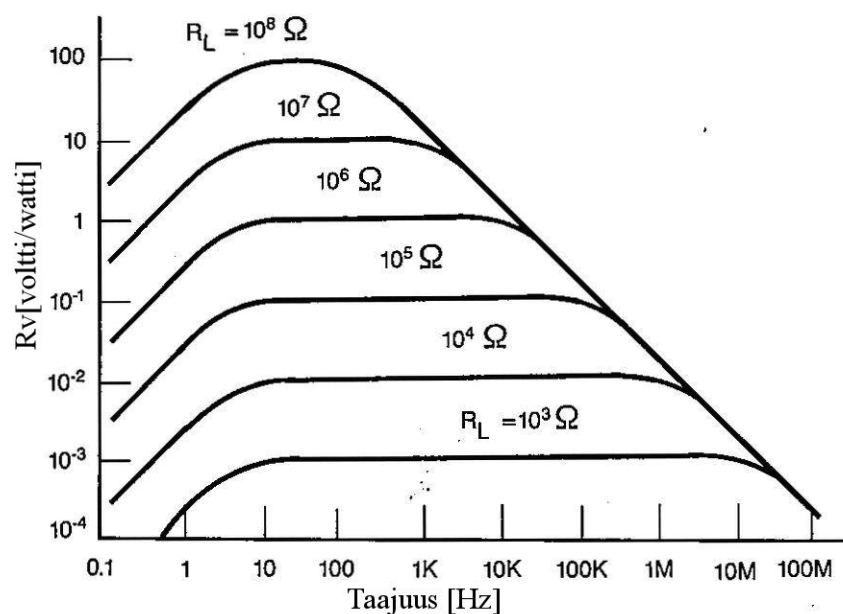
Lämpöön perustuvat tunnistimet ovat herkkiä säteilyn voimakkuuden vaihtelun aiheuttamille lämpötilan muutoksille. Transduktio prosessi sisältää bolometrisen, lämpögalvaanisen, lämpöpneumaattisen ja pyrosähköisen ilmiön.

Bolometriset tunnistimet perustuvat sähköisen johtavuuden muutoksiin ilmaisimissa, kun ne lämpiävät optisen säteilyn absorboituessa niihin. Metallinen termistori tai puolijohdetermistori ovat yleisesti kytkettyjä herkissä siltapiireissä. Tyypilliset herkkyydet  $10^2-10^3$  V/W signaalin taajuuden ollessa 1 Hz -1 KHz on valittu pitäen silmällä kaupallisia laitteita.

Lämpögalvaaninen tunnistin on kyseessä, kun aistiva osa on lämpöparin liitos tai sarja lämpöpareja, jotka säteilyn lämmittäessä ilmaisinta muodostavat sähköisen signaalin. Vaste on suunnilleen luokkaa 10 V/W, joka yleisesti saavutetaan aikavakion ollessa luokkaa 10 ms, joka vastaa termalista etenemisaikaa säteilyn absorboituessa ilmaisimen materiaaliin.

Lämpöpneumaattiset ilmaisimet kuten Golay-kenno aistivat kalvon liikkeitä, joka aiheutuu ilman lämpiämisestä säteilylle altistetussa kammiossa. Vaste  $10^4$  V/W on saavutettu, mutta näillä laitteilla on rajoitettu käyttöalue ja lisäksi ne ovat hyvin herkkiä tärinälle. /2/

Pyrosähköiset ilmaisimet on valmistettu materiaaleista kuten bariumtitanaatti, joilla on pysyvä sähköinen polarisaatio joka muuttuu vahvasti lämpötilan funktiona. Hetkellinen lämmittäminen aiheuttaa vaihtelua pinnan jännitteissä, joka indusoi virran ilmaisupiiriin. Vasteen voimakkuus ja taajuuskaista riippuu tällaisissa laitteissa vahvasti kuormavastuksesta. Kuvassa 8 on esitetty erilaiset vasteet ja taajuuskaistat eri kuormavastuksen arvoilla. /2/

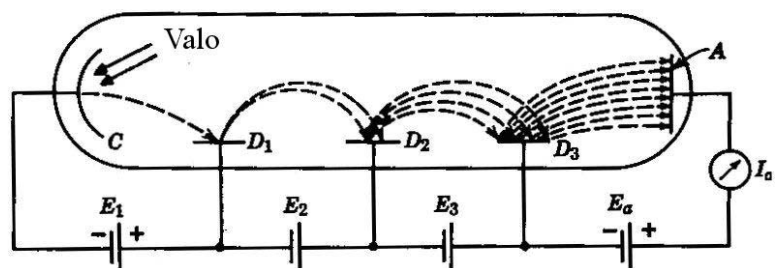


Kuva 8. Vasteen voimakkuudet ja taajuuskaistat erilaisilla kuormavastuksilla. /2/

## 4.2 Fotonin emissioon perustuvat ilmaisimet

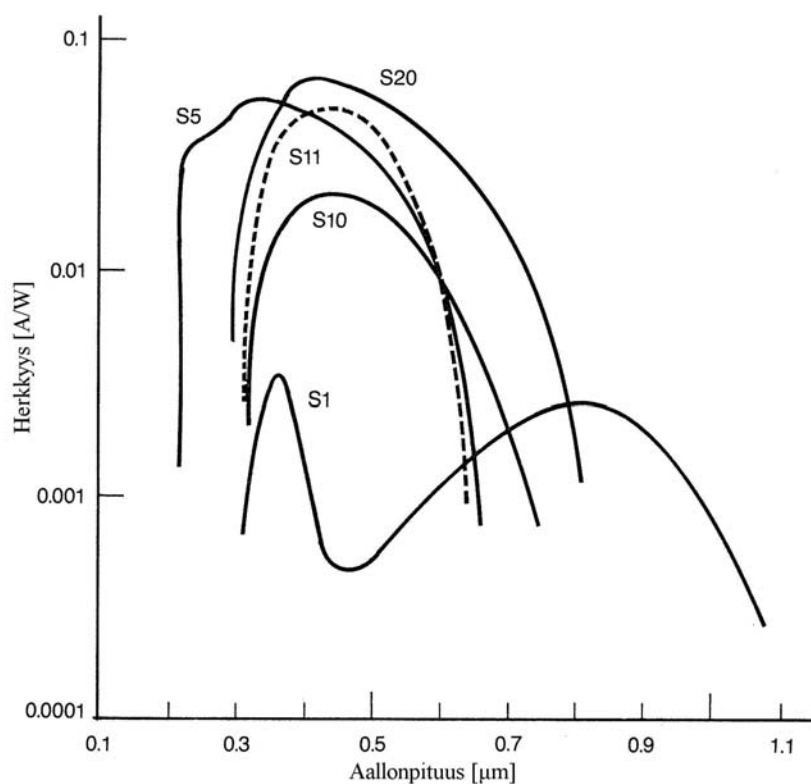
Fotoemissioon perustuvissa laitteissa sähkövirta synnytetään valosähköisen ilmiön avulla, kun katodi altistetaan optiselle säteilylle. Fotonimonistimissa elektronit kiihdytetään ja monistetaan sekundäärinen emissio kautta sarjassa olevien välianodien kautta, kuva 9. Tyypilliset vahvistukset kymmenportaisilla kaupallisilla laitteilla ovat  $10^5 - 10^7$ . Fotonimonistimia käytetään yleisesti heikkojen valotehojen (kuten

mikrowattiluokkaa tai sen alle) olevien tehojen havaitsemiseen. Suuremmat valotehot saattavat rikkoa laitteen viimeisimmät vahvistusportaavat eli väliannotit.



Kuva 9. Fotomonistimen piirikaavio. C: katodi; A: anodi; D: välianodi. /2/

Ilmaisimen herkkyden eri aallonpituuksille määrää valokatodin vastekäyrä. Kuvassa 10 on esitetty tyypillisiä herkkyyskäyriä.



Kuva 10. Eri ilmaisimien herkkyyskäyriä aallonpituuden funktiona.

Herkkyyssäikäyrä rajoittuu infrapuna-alueelle kohtaan, jossa fotonin aallonpituus kasvaa liian suureksi, jolloin sillä ei ole vaadittavaa energiaa irrottaa elektronia. Ilmaisimen aikavakio on tyypillisesti 10 ns. Lineaarinen lähtö kolmen prosentin marginaalilla saavutetaan yleisesti dynaamisella alueella 60 dB. Laitteilla on helppo saada virheellisiä

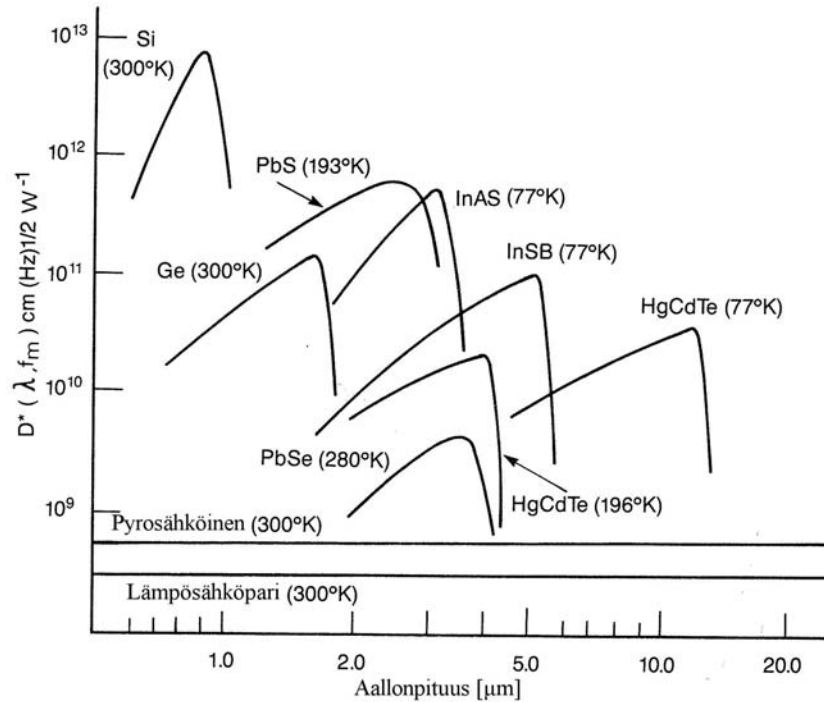
tuloksia, jos niitä ei käytetä ohjeiden mukaisesti. Absoluuttisiin mittausravoihin ei pitäisi luottaa, ennen kuin laite on kunnolla lämminnyt. Suojaavan lasin käyttö katodin edessä on suotavaa, kun mitataan jäsentynyttä valoa ja halutaan välttää katodin aukon muodon vaikutus mittaukseen./2/

### **4.3 Valokennot ja valosähköiset ilmaisimet**

Kiinteät elektroniset ilmaisimet ovat erittäin suosittuja, koska ne ovat kestäviä, kompakteja, nopeita ja luotettavia. Puolijohdesensorit generoivat elektroniaukkoja, kun fotonit osuvat niihin. Valokennoissa vapautuneet elektronit lisäävät kohteen sähkönjohtavuutta ja aiheuttavat vaihtelua polarisoivaan virtaan. Valosähköiset ilmaisimet toimivat kuten valodiodin p-n liitos, joka erottaa fotonin generoiman elektroniaukon ilman tarvetta polarisoivalle jännitteelle. Takaisinkytketty esijännite vähentää puolijohteen irrotusaikaa ja siksi lisää ilmaisimen vastenopeutta.

### **4.4 Optiset tunnistimet**

Jos takaisinkytketty esijännite on noussut useisiin satoihin voltteihin, puolijohteen kiihtyvyys tulee tarpeeksi suureksi, että se pystyy tuottamaan sekundääriseen emission hilalla. Avalanche valodiodit käyttävät kyseistä tekniikkaa ja saavuttavat kertaluokkaa 100 olevia monistuksia. Elektroninen monistaminen on kätevää, kun signaali-kohina suhde (SNR) tai signaalin kaistanleveys ovat vahvistinrajoitteisia. Hybridi-ilmaisimet joissa on sensori ja vahvistin samassa paketissa ovat välttävän herkkiä samalla, kun ovat selvästi kestävämpiä ja luotettavampia kuin avalanche-valodiodit. Kuva 11 esittää yleisempien aineiden spektrisen ilmaisukyvyn.



Kuva 11. Yleisempien aineiden spektrinen ilmaisukyky aallonpituuden funktiona. /2/

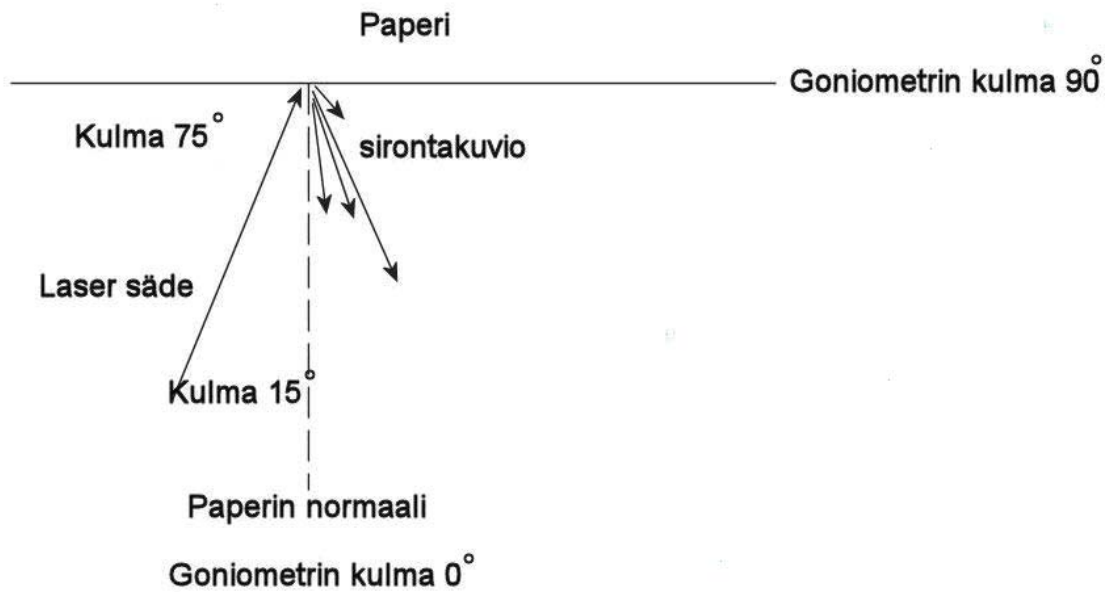
Puolijohdeilmaisimet luokitellaan suurimman aallonpituusrajan mukaan. Aallonpituusraja vastaa kielletyn energiakuilun leveyttä. Pidempien aallonpituuksien ilmaisimet pitää normaalisti jäähdyttää alhaisiin lämpötiloihin, jotta estettäisiin energiatasojen ehtyminen epäpuhtauksien lämpöliikkeiden takia tai laitteen tuottamasta omasta lämmöstä. Tällaiset ilmaisimet on yleensä asennettu Dewarin tyhjiöpulloihin, jotka on täytetty nestemäisellä vedyllä, jonka lämpötila on 77 K. Joule-Thompson jäähdytysmenetelmä käyttää korkeapaineista kaasua jäähdytykseen, mutta laitteisto vaatii monimutkaisen kaasun syötön. Lämpösähköinen jäähdytysmenetelmä on käytännöllisempi, mutta laitteistolla päästään vain yli 190 K asteen lämpötiloihin. Lämpöilmaisimilla on tasainen vaste eivätkä ne tarvitse jäähdytystä, mutta niiden ilmaisukyky on huomattavasti heikompi. Infrapunatunnistimien aikavakio voi olla niinkin pieni kuin  $10^{-11}$  s erittäin nopeilla piistä tehdyillä tunnistimilla tai olla useiden millisekuntien pituinen PbS tunnistimilla. /2/

## 5 MITTAUSLAITTEISTO

Mittauslaitteiston lasermoduuli koostuu kolmesta eri aallonpituudella toimivasta laserista ja kahdesta dielektrisestä peilistä. Lasereista kaksi toimii IR-alueella ja yksi on näkyvän valon alueen laser. IR-alueen lasereiden aallonpituudet ovat 1312nm ja 1543nm. Näkyvän valon laser on yleinen He-Ne laser, jonka aallonpituus on 632.8nm. Peileinä käytetään kuuma- ja kylmäpeiliä. Mittauksissa käytettiin goniometriä, joka oli varustettu askelmoottorilla. Askelmoottori mahdollisti erittäin tarkat kulman muutokset mittauksissa.

Mittauksien ajaksi laboratorio pimennettiin, mutta verhojen väleistä pääsi vuotamaan hieman valoa. Valon määrä oli kuitenkin niin vähäinen, ettei ilmaisin sitä pystynyt rekisteröimään, joten vaikutus itse mittaukseen voidaan olettaa mitättömäksi.

Mittaukset suoritettiin goniometrissä, johon oli asennettu intensiteettimittari, jota pystyi liikuttamaan asteen tarkkuudella. Lasermoduuli oli kiinnitetty kiinteästi goniometriin siten, että se ei päässyt liikkumaan. Lasermoduulin kiinnittämisen jälkeen goniometrin optiselle akselille kiinnitettiin peili. Suuntaamalla peilistä heijastunut lasersäde takaisin laserin aukkoon varmistettiin, että näytteenpidin oli kohtisuorassa laseria vasten. Paperinäyte kiinnitettiin metallipalaan, johon oli mittauskohdalle porattu pyöreä reikä ja metallipala oli maalattu mattamustaksi. Näin estettiin mittausta häiritsevää heijastumista taustasta tai itse metallipalasta. Paperin kiinnittämiseen käytettiin pehmustettuja puristimia, ettei paperinäyte vaurioituisi. Paperinäyte asetettiin siten että paperin normaali oli goniometrin ilmaisimeen nähden kulmassa  $0^\circ$ . Laser asetettiin tulemaan 15 asteen kulmassa paperin normaaliin nähden. Paperista heijastuneen lasersäteiden intensiteetti mitattiin kulman funktiona asteen välein. Kuvassa 12 on esitetty mittauksen periaatekuva.



Kuva 12. Mittausperiaatekuva.

Mittauksiin vaikuttaa vahvasti mitattavan pinnan karheus. Täysin sileältä pinnalta lasersäde heijastuu samassa kulmassa kuin siihen tuli. Karhealta pinnalta osa valosta siroaa spekularikulmasta poikkeavaan suuntaan. Jos lasersäteen tulokulma on riittävän pieni, saadaan maksimi-intensiteetti mitattua spekularisuunnassa. Mitatun spektrin muoto riippuu vahvasti pinnan karheudesta, mitä karheampi pinta on, sitä leveämpi on spektri. /2/

Mitatusta sirontaspektristä ei voida suoraan laskea näytteen pinnankarheutta, mutta niin sanottu optinen karheus  $S_N$  voidaan laskea seuraavalla kaavalla:

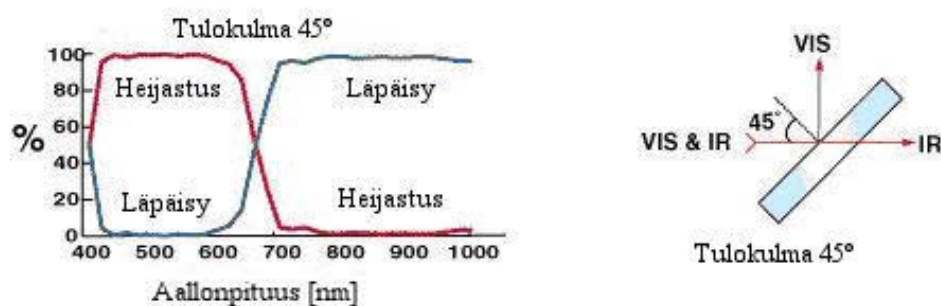
$$S_N = K \sum (\theta_n - \theta_M)^2 (I_N / I_M), \quad (6)$$

jossa  $K$  on normeerausvakio,  $I_N$  spektrin korkeus kulman arvolla  $\theta_N$ , ja  $\theta_M$  on spektrin maksimia  $I_M$  vastaava kulma. /4/

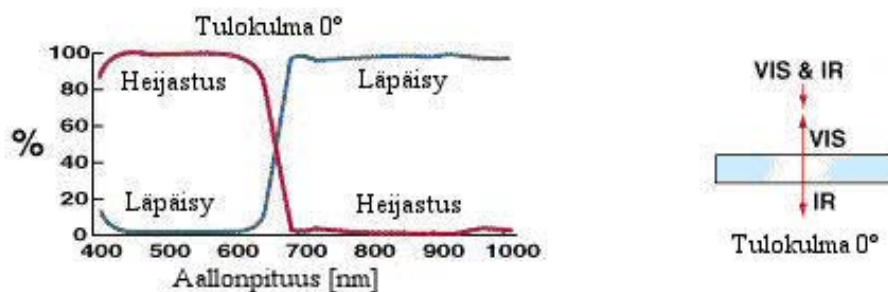
## 5.1 Kuuma- ja kylmäpeilit

Kylmäpeili on dielektrinen, puoliläpäisevä suodatin, joka heijastaa näkyvää valoa ja päästää infrapuna-alueen säteilyn lävitse. Kuumapeili vastaavasti päästää näkyvän valon

lävitseen ja heijastaa IR-alueen valoa. Peilejä valmistetaan useilla eri läpäisykulmilla, läpäisykulmat vaihtelevat 0–45 asteen välissä. Kuuma- ja kylmäpeilejä käytetään yleisesti di-kromaattisina säteenjakajina, säteitten yhdistäjänä ja suodattimina. Kylmäpeili heijastaa karkeasti 400–700 nm aallonpituudet ja päästää lävitseen 800–1200 nm aallonpituudet.

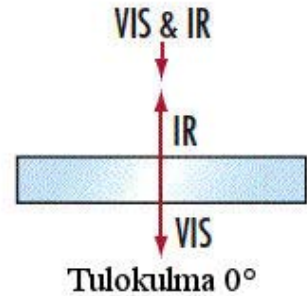
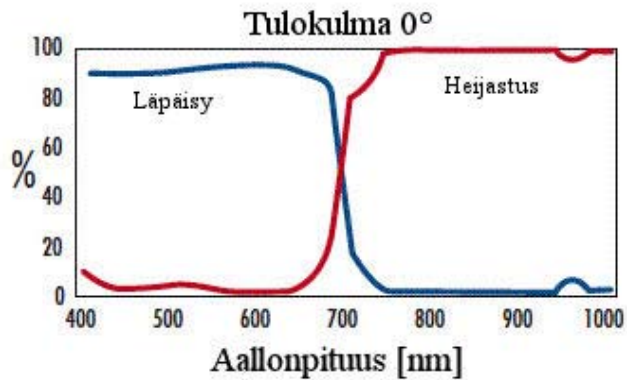


Kuva 13. Kylmänpeilin läpäisykaavio aallonpituuden funktiona, kulman ollessa 45° /3/

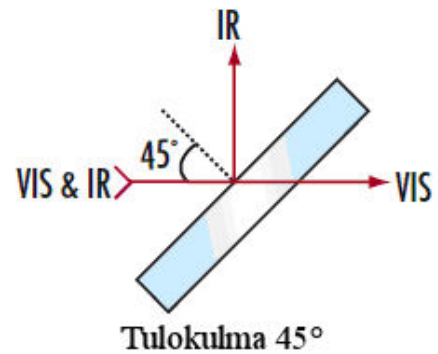
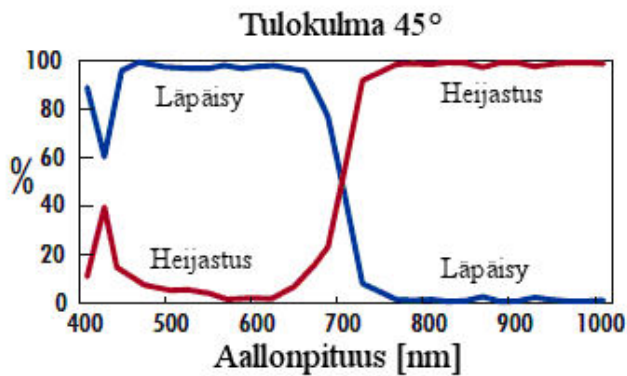


Kuva 14. Kylmänpeilin läpäisykaavio aallonpituuden funktiona, kulman ollessa 0°. /3/

Vastaavasti kuumapeili heijastaa nimensä mukaisesti lämpösäteilyä. Karkeasti ottaen aallonpituudet 750–1150nm heijastuvat ja aallonpituudet 425–675nm läpäisevät kuumapeilin. Kuumapeiliä käytetään useimmiten estämään lämpösäteilyn kulkeutuminen valolähteestä mitattavaan kohteeseen, jolloin lämpösäteily ei häiritse mittausta eikä riko mittauslaitteistoa



Kuva 15. Kuumanpeilin läpäisykaavio aallonpituuden funktiona, kulman ollessa  $0^\circ$ . /3/



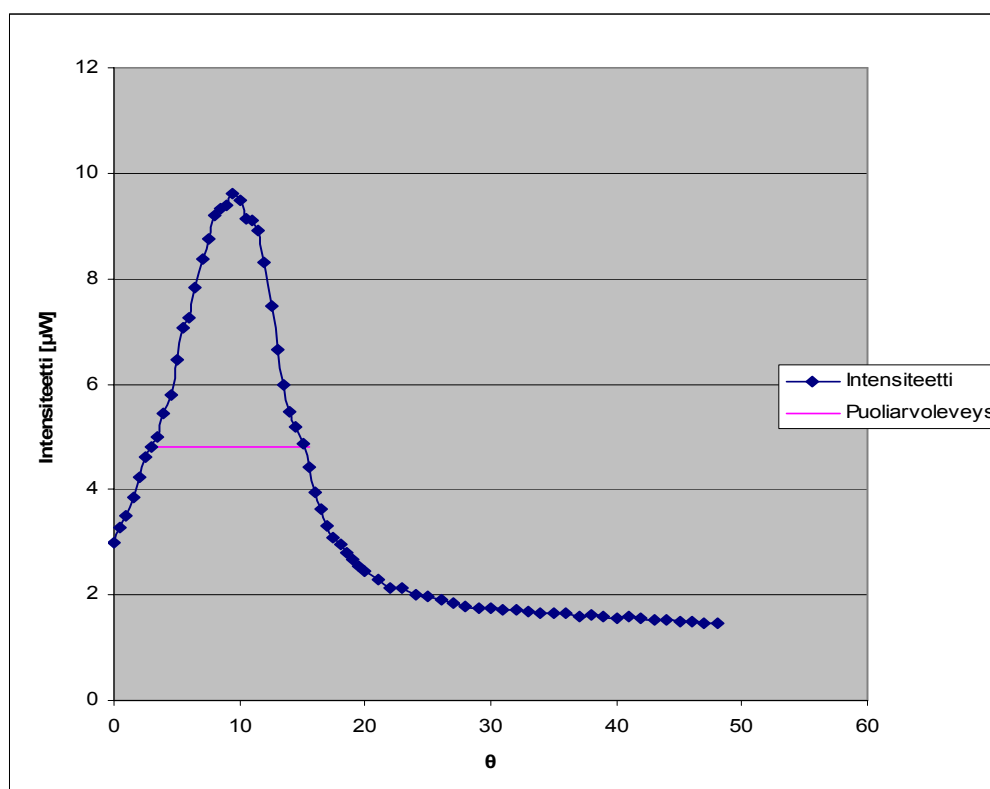
Kuva 16. Kuumanpeilin läpäisykaavio aallonpituuden funktiona, kulman ollessa  $45^\circ$ . /3/

Kuumapeiliä käytetään yhdistämään IR-alueen laserit siten, että 1312 nm laser laitetaan menemään  $45^\circ$  kulmassa olevan peilin läpi ja 1543nm laser tulee peiliin  $45^\circ$  kulmassa ja heijastuu peilistä. Tämän jälkeen IR-lasereiden samansuuntaiset säteet menevät  $45^\circ$  kulmassa olevaan kylmäpeiliin ja läpäisevät tämän. Kylmäpeiliin tulee myös näkyvän valon lasersäde  $45^\circ$  kulmassa, joka heijastuu samaan suuntaan kuin läpi menneet IR-laserit. Lopputuloksena saadaan kolmen eri laserin säteet yhdistettyä. Laitteiston ideana on pystyä mittaamaan pinnankarheutta laajalla alueella, joka mahdollistaa lasereiden eri aallonpituudet. IR-lasereiden aallonpituuden avulla päästään mittaamaan selvästi karkeampia pintoja kuin pelkällä näkyvän valon laserilla. Nyrkkisääntönä voitaisiin

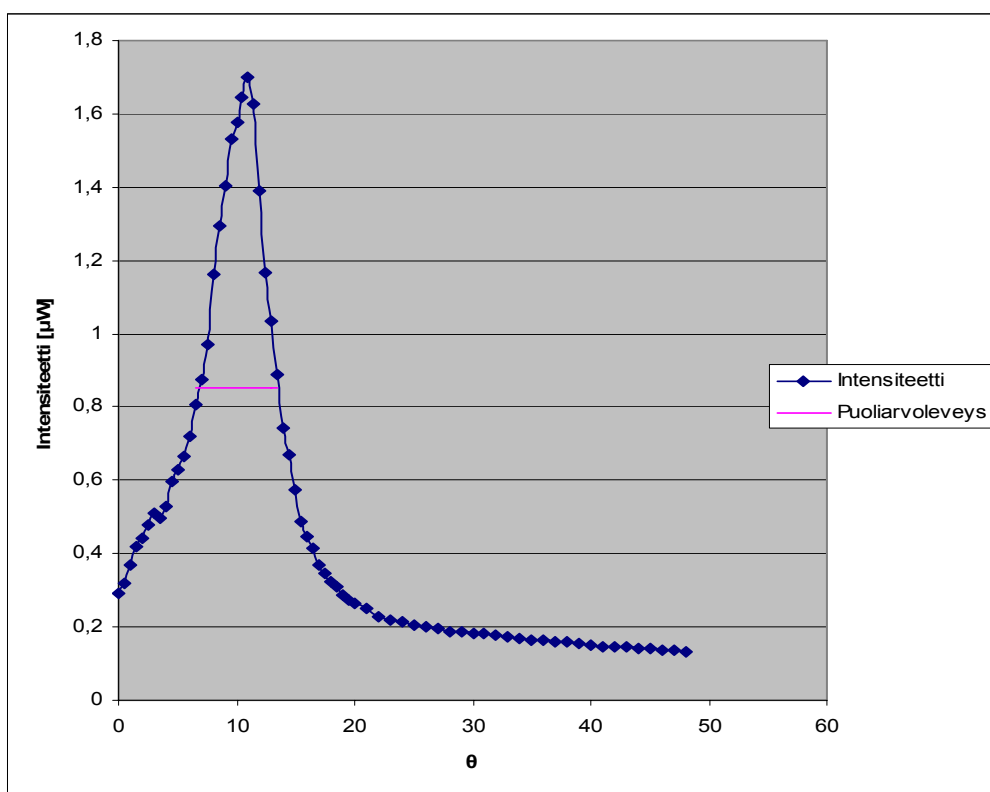
sanoa että aallonpituus pitäisi olla vähintään 10-kertainen verrattuna mitattavaan pinnankarheuteen.

## 5.2 Mittaustulokset

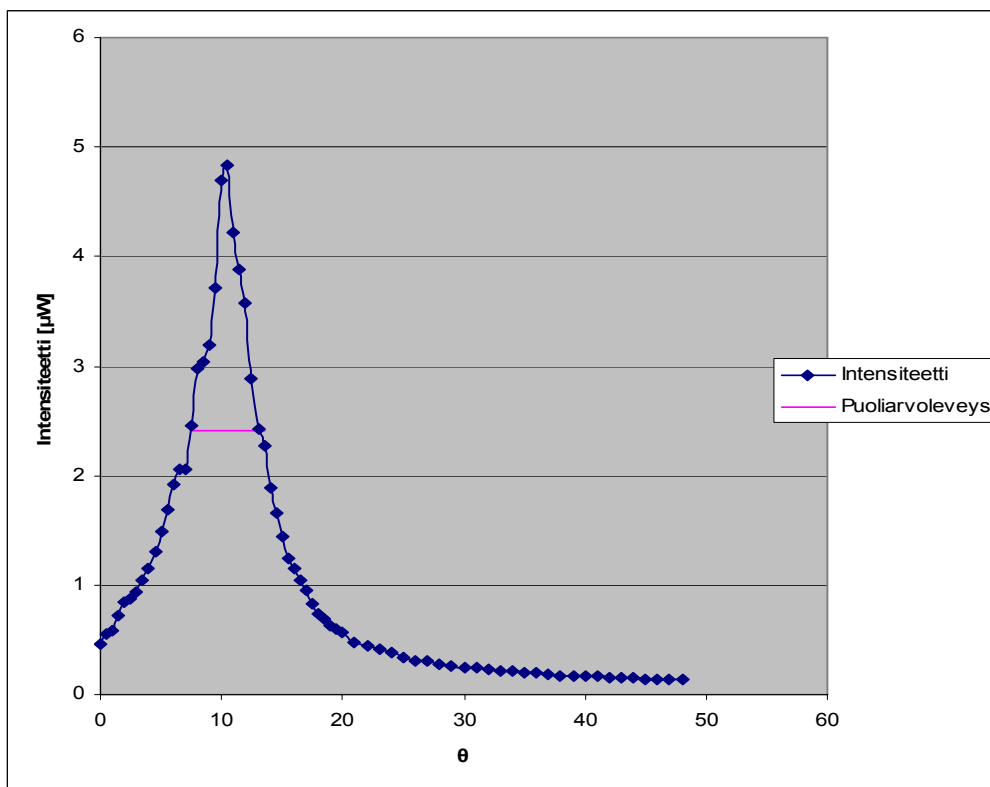
Seuraavissa kuvissa on esitetty useista paperinäytteistä mitattu sirontaspektri kolmella erilaisella laserin aallonpituudella. Kuvat on piirretty siten että sirontaspektrin huippu tulisi sijoittua spekularikulmaan. Tässä tapauksessa spekularikulma pitäisi olla 15 astetta, mutta johtuen mittauksen epäideaalisuuksista, sirontahuipun kohta vaihtelee hieman. Paperinäytteen kuitujen suuntautuneisuus vaikuttaa spekularikulman paikkaan, jos valon polarisaatiotaso ei ole kohtisuoraan kuituja vastaan se nähdään juuri spekularikulman siirtymisenä. Kuvista huomataan, että laserin aallonpituuden kasvaessa sirontaspektri kapenee ja puoliarvoveveys pienenee. Kun laserin aallonpituus on liian pieni tai pinnankarheus liian suuri, sirontaspektri leviää, ja mittauksesta tulee epätarkka.



Kuva 17. Näytteen Ref pinnan sirontaspektri ja piikin puoliarvoveveys 633 nm laserilla.



Kuva 18. Näytteen Ref sirontaspektri ja piikin puoliarvoveveys 1310 nm laserilla.



Kuva 19. Näytteen Ref sirontaspektri ja piikin puoliarvoveveys 1550 nm laserilla.

Näytteestä Ref mitatut sirontaspektrit näyttäisivät kaikki olevan hyvälaatuisia, ja näistä voidaan määrittää suhteellinen optinen karheus. Näyte on kohtalaisen sileä, koska spekularikulmassa nähdään voimakas maksimi-intensiteetti kaikilla laserin aallonpituuksilla. Puoliarvoveyttä vastaavat kulmat on laskettu spekularikulman maksimista ja pyöristetty puolen asteen tarkkuudella. Puoliarvoveydestä saadaan laskettua näytteen optinen karheus korottamalla se toiseen potenssiin.

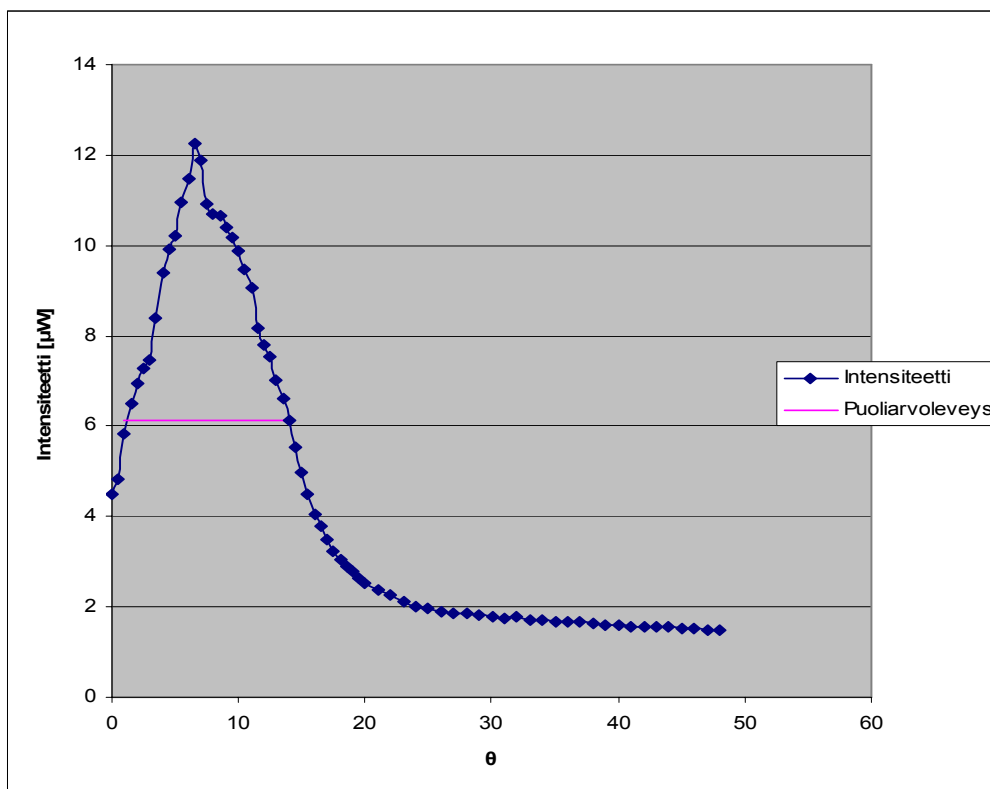
Puoliarvoveveys määritellään kahden sellaisen pisteen etäisyydeksi, jotka sijaitsevat maksimiarvon molemmiin puolin kohdassa, jossa käyrän arvo on puolet maksimiarvosta. Puoliarvoveyttä käytetään laajasti mm. optisessa tietoliikenteessä ja spektrometrien resoluutiona

Puoliarvoveydestä voidaan päätellä näytteen karheusluokka, mitä kapeampi on puoliarvoveveys sitä sileämpi on ollut mitattava näyte. Vastaavasti suuresta puoliarvoveydestä voidaan päätellä näytteen olleen kohtuullisen karhea. Kapeassa puoliarvoveydessä valon heijastus on ollut siis hallitsevaa ja valon sironta vähäistä.

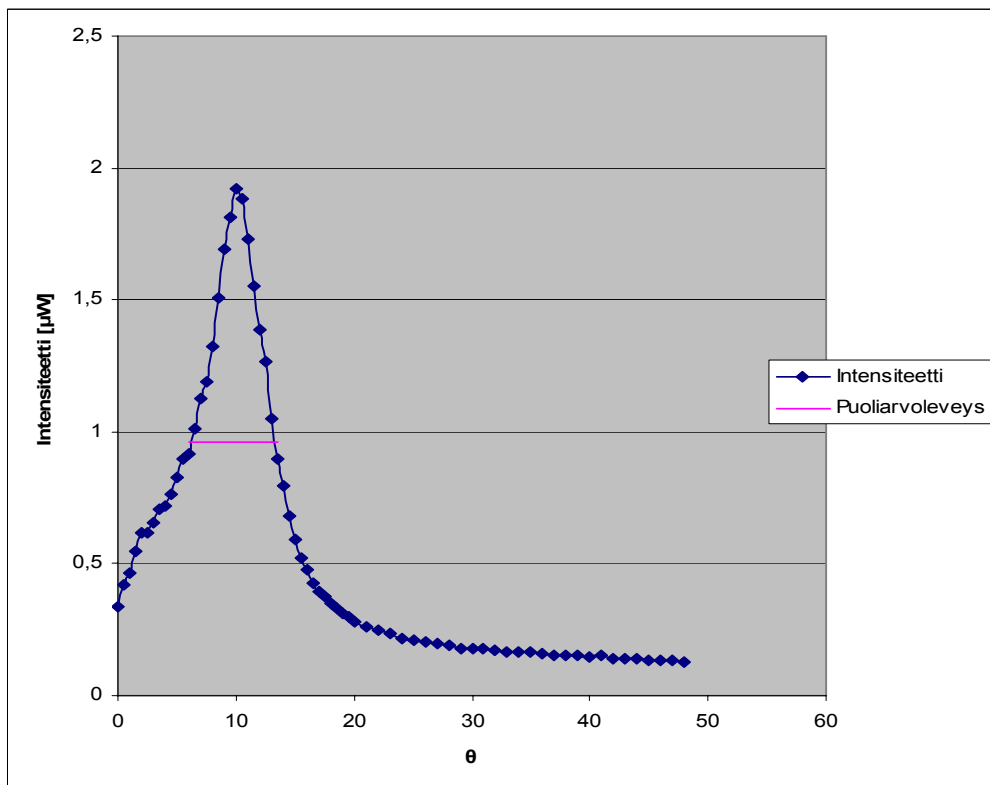
Taulukko 1. Näytteen Ref Tulokset, kulma1 ja kulma2 ovat puoliarvoveyttä vastaavat rajakulmat. Puoliarvoveveys asettuu näiden kulmien välille.

<b>Näyte: Ref</b>				
<b>Aallonpituus [nm]</b>	<b>Kulma1 [°]</b>	<b>Kulma2 [°]</b>	<b>Puoliarvoveveys [°]</b>	<b>Optinen karheus [°<sup>2</sup>]</b>
633	3	15	12	144
1310	6,5	13,5	7	49
1550	7,5	13	5,5	30,25

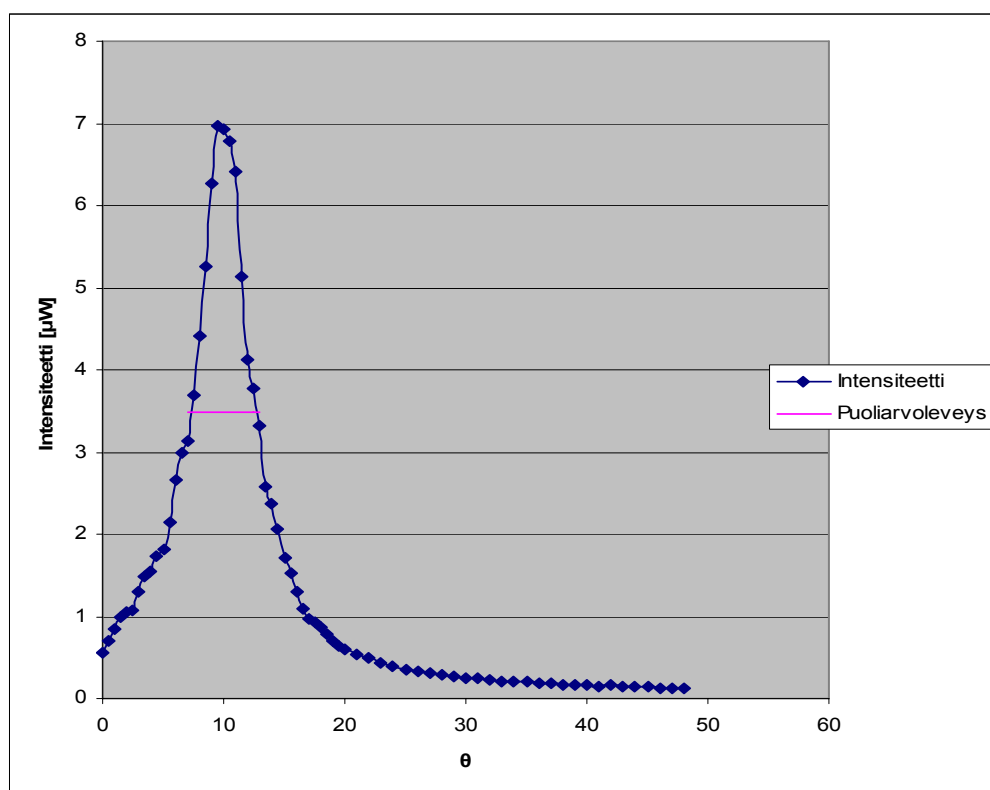
Optinen karheus ilmaisee paperin karheuden suhteutettuna mittauksissa käytettyyn laserin aallonpituuteen.



Kuva 20. Näytteen 39 sirontaspektri ja piikin puoliarvoveveys 633 nm laserilla.



Kuva 21. Näytteen 39 sirontaspektri ja piikin puoliarvoveveys 1310 nm laserilla.

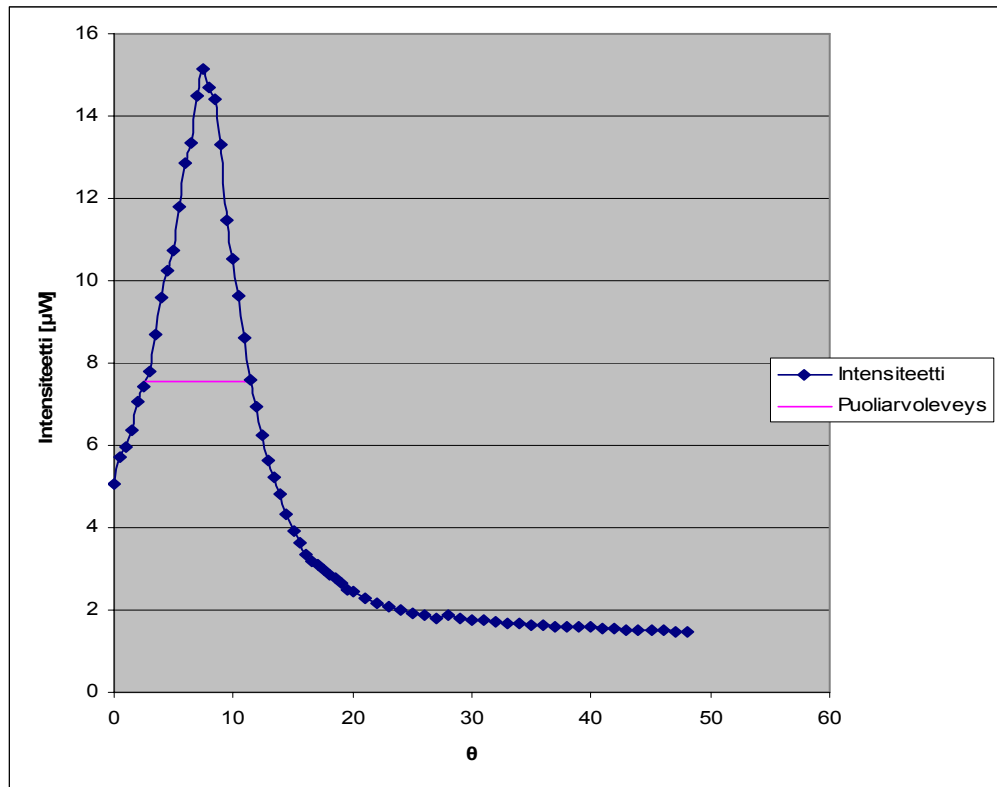


Kuva 22. Näytteen 39 sirontaspektri ja piikin puoliarvoveveys 1550 nm laserilla.

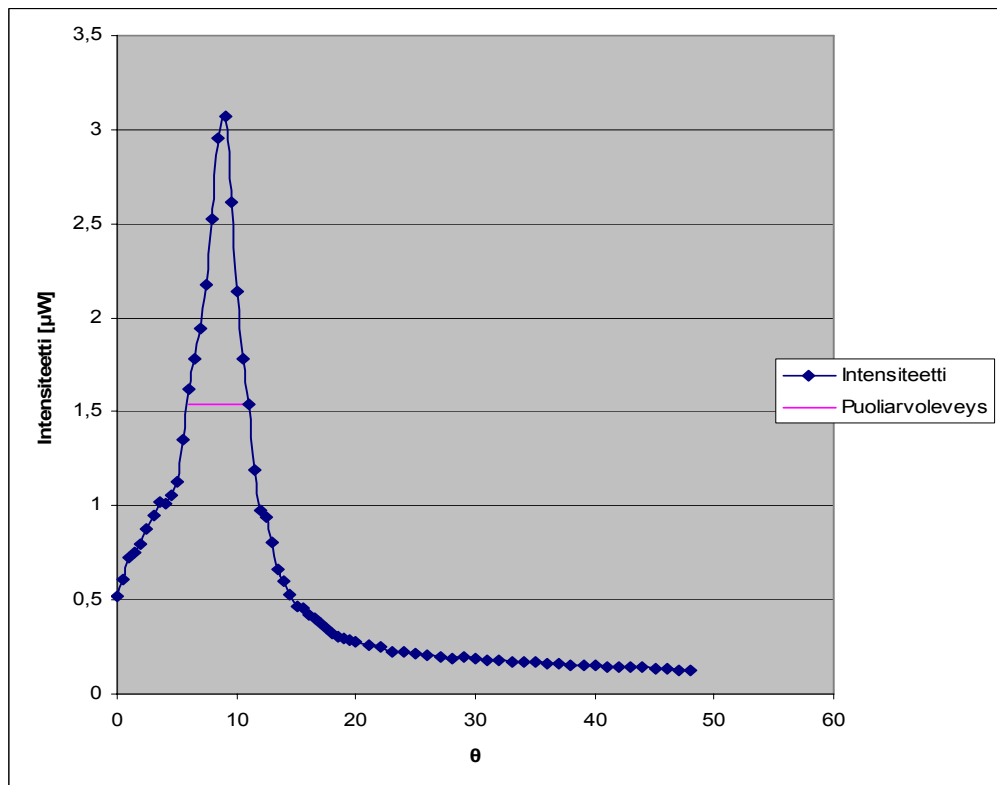
Näytteen 39 sirontaspektrit ovat myös erittäin hyviä. Sirontaspektrin korkea ja kapea muoto viittaavat näytteen olevan kohtuullisen sileä. Spekuarikulma on hienoisesti siirtynyt, mutta pohjakohinaa ei ole. Lasketut optiset karheudet ovat lähes täysin samat, kuin näytteen Ref tapauksessa, joten on hyvin mahdollista että molemmat näytteet ovat peräisin samasta paperista.

Taulukko 2. Näytteen 39 Tulokset, kulma1 ja kulma2 ovat puoliarvoveyttä vastaavat kulmat.

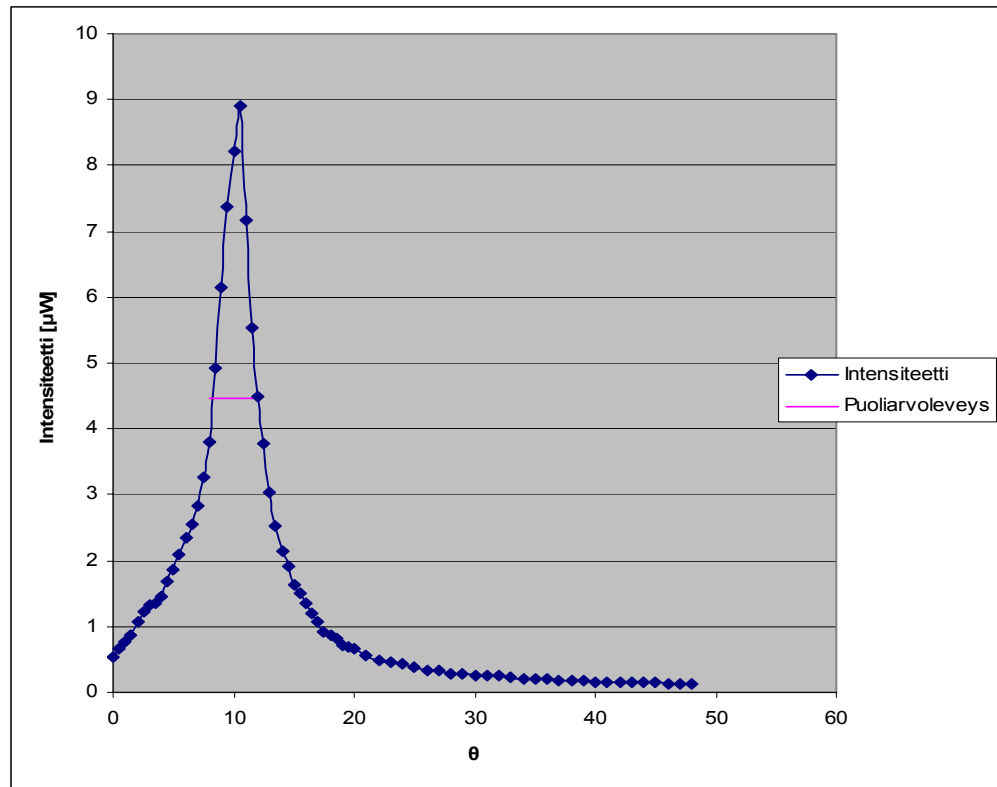
Näyte: 39				
Aallonpituus [nm]	Kulma1 [°]	Kulma2 [°]	Puoliarvoveveys [°]	Optinen karheus [° <sup>2</sup> ]
633	1,5	14	12,5	156
1310	6,5	13,5	7	49
1550	7,5	13	5,5	30



Kuva 23. Näytteen 30 sirontaspektri ja piikin puoliarvoveveys 633 nm laserilla.



Kuva 24. Näytteen 30 sirontaspektri ja piikin puoliarvoveveys 1310 nm laserilla.

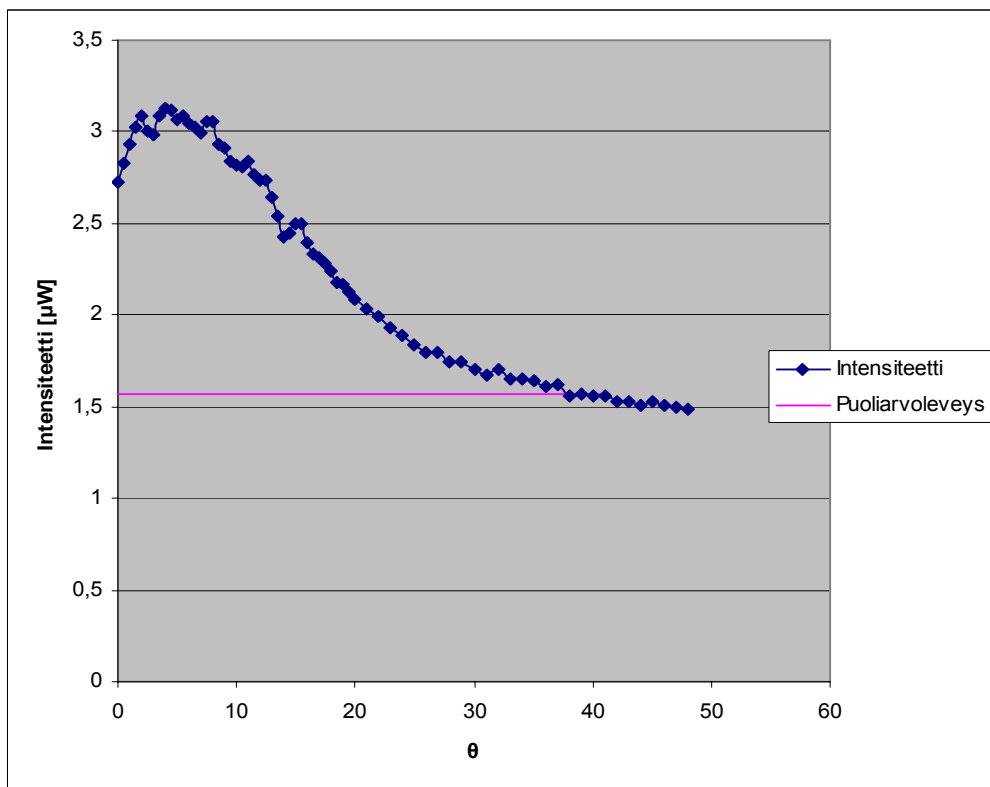


Kuva 25. Näytteen 30 sirontaspektri ja piikin puoliarvoveveys 1550 nm laserilla.

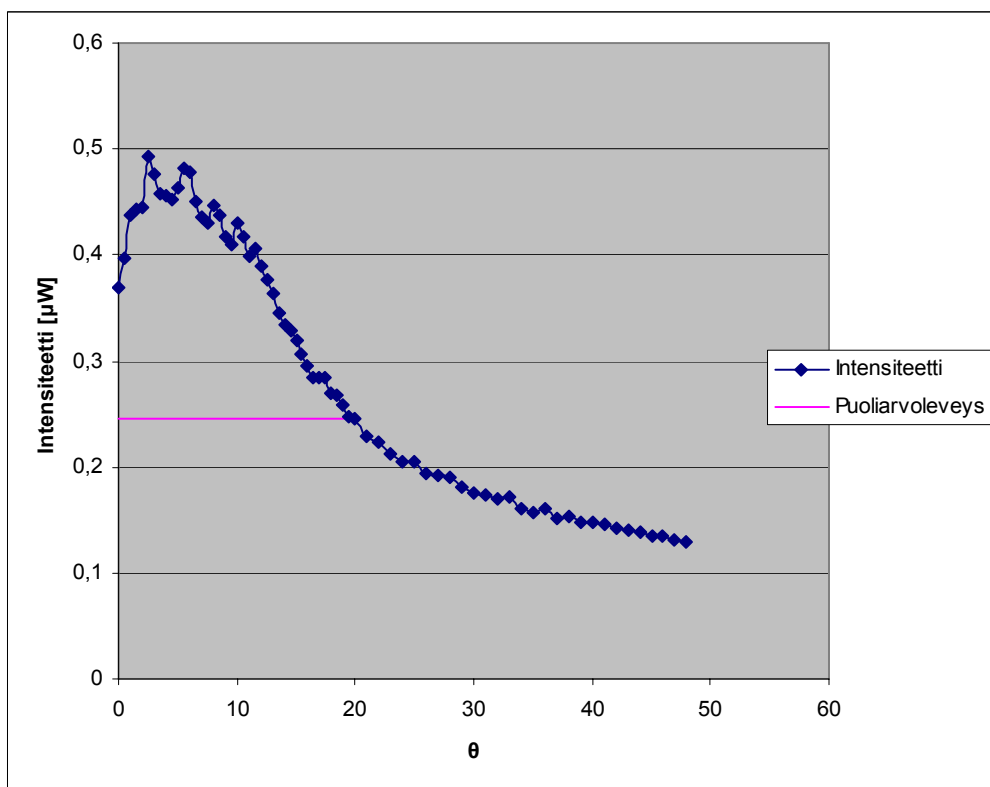
Näytteestä 30 mitatut sirontaspektrit näyttäisivät kaikki olevan hyvälaatuisia ja näistä voidaan määrittää helposti suhteellinen optinen karheus. Näyte on hyvin sileä, koska spekularikulmassa nähdään hyvin voimakas maksimi-intensiteetti kaikilla laserin aallonpituuksilla. Varsinkin suurimmalla laserin aallonpituudella 1550 nm, sirontaspektri on hyvin kapea ja korkea. Näyte on mittausten perusteella koko näytesarjan silein.

Taulukko 3. Näytteen 30 tulokset, kulma1 ja kulma2 ovat puoliarvoveyttä vastaavat kulmat.

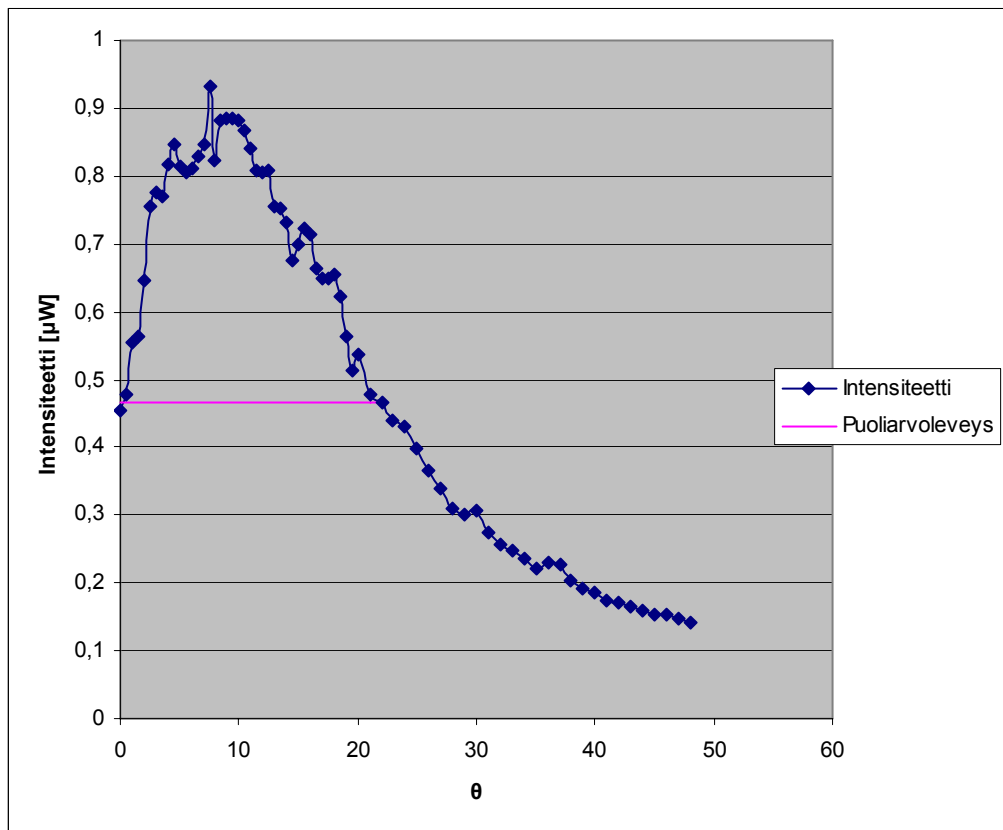
<b>Näyte: 30</b>				
<b>Aallonpituus [nm]</b>	<b>Kulma1 [°]</b>	<b>Kulma2 [°]</b>	<b>Puoliarvoveveys [°]</b>	<b>Optinen karheus [°<sup>2</sup>]</b>
633	2,5	11,5	9	81
1310	6	11	5	25
1550	8	12	4	16



Kuva 26. Näytteen 16kp1,7 sirontaspektri ja piikin puoliarvoveveys 633 nm laserilla.



Kuva 27. Näytteen 16 kp1,7 sirontaspektri ja piikin puoliarvoveveys 1310 nm laserilla.



Kuva 28. Näytteen 16kp1,7 sirontaspektri ja piikin puoliarvoveveys 1550 nm laserilla.

Näytteen 16kp1,7 sirontaspektrit ovat selvästi enemmän hajaantuneet ja spekularihuippu on leveämpi. Tässä tapauksessa paperin pinta on jo niin karhea, että valo siroaa voimakkaasti ja mittauksen tarkkuus on jo kyseenalainen. Tilanne on hieman parempi mitä pidempi aallonpituus on. Tämä havainto tukee teoriaa, jonka mukaan karheammille pinnoille pitää käyttää pidempää aallonpituutta mittauksessa. Taulukossa 4. on esitetty tulokset mittauksista. Puoliarvoveydet kahdelle ensimmäisellä laserille on jouduttu laskemaan vain puolikkaasta käyrästä johtuen sironnan voimakkaasta hajonnasta. Arvo on saatu puoliarvoveyttä vastaavasta kulma2 vähentämällä maksimia vastaava kulma. Lopullinen puoliarvoveveys on saatu kertomalla saatu tulos kahdella.

Taulukko 4. Näytteen 16kp1,7 Tulokset, kulma1 ja kulma2 ovat puoliarvovevyyttä vastaavat kulmat.

<b>Näyte: 16kp1,7</b>				
<b>Aallonpituus [nm]</b>	<b>Kulma1 [°]</b>	<b>Kulma2 [°]</b>	<b>Puoliarvoveveys [°]</b>	<b>Optinen karheus [°<sup>2</sup>]</b>
633	-	41	18,25	333
1310	-	20	8,75	77
1550	0	22	22	484

## 6 JOHTOPÄÄTÖKSET

Työn tarkoituksena oli tutkia laserin aallonpituuden vaikutusta paperin pinnankarheuden mittaukseen. Ensimmäiseksi suunniteltiin ja koottiin laite mittauksia varten. Laitteessa yhdistettiin kolmen eri laserin säteet kylmä- ja kuumapeilin avulla. Työssä mitattiin kulmaerotteinen sirontaspektri, josta saatiin määritettyä paperin optinen karheus.

Kulmaerotteiseen sirontaspektriin perustuva mittaus kolmiaaltolaserilla antaa tietoa pinnankarheudesta ja on sovellettavissa selvästi laajemmalle karheusalueelle kuin perinteinen yhtä aallonpituutta hyödyntävä mittaus. Suuremmilla laserin aallonpituuksilla päästään mittaamaan tarkemmin karheampia pintoja. Mittauksen etuja on laitteiston ja mittauksen yksinkertaisuus. Mittaus olisi myös erittäin nopea, jos ilmaisimella korvattaisiin esimerkiksi kameralla tai rivi-ilmaisimella.

Jatkossa mittauksissa kannattaisi käyttää muutamia karheudeltaan tunnettuja näytteitä, joiden avulla voitaisiin laskea optisen karheuden ja Ra-karheuden muuntokerroin. Jos ilmaisimella korvataan kameralla tai rivi-ilmaisimella on syytä huolehtia että kamera tai rivi-ilmaisin toimii näkyvän alueen lisäksi myös IR-alueella, eikä niissä ole mittausta estäviä suotimia.

## LÄHDELUETTELO

/1/ Frank L. Pedrotti, Leno M. Pedrotti, Leno S. Pedrotti. Introduction to optics. Third edition. ISBN 0-13-197133-6

/2/ Cielo, Paolo G. Optical techniques for industrial inspection. ISBN 0-12-174655-0

/3/ Edmund optics verkkosivut, saatavilla

<http://www.edmundoptics.com/onlinecatalog/displayproduct.cfm?productID=1900>

Viitattu 1.2.2010

/4/ Huokoisen Aineen optiset ominaisuudet, Loppuraportti. Antti Luukko, Juha Parviainen, Pertti Silfstein, Erik Vartiainen.

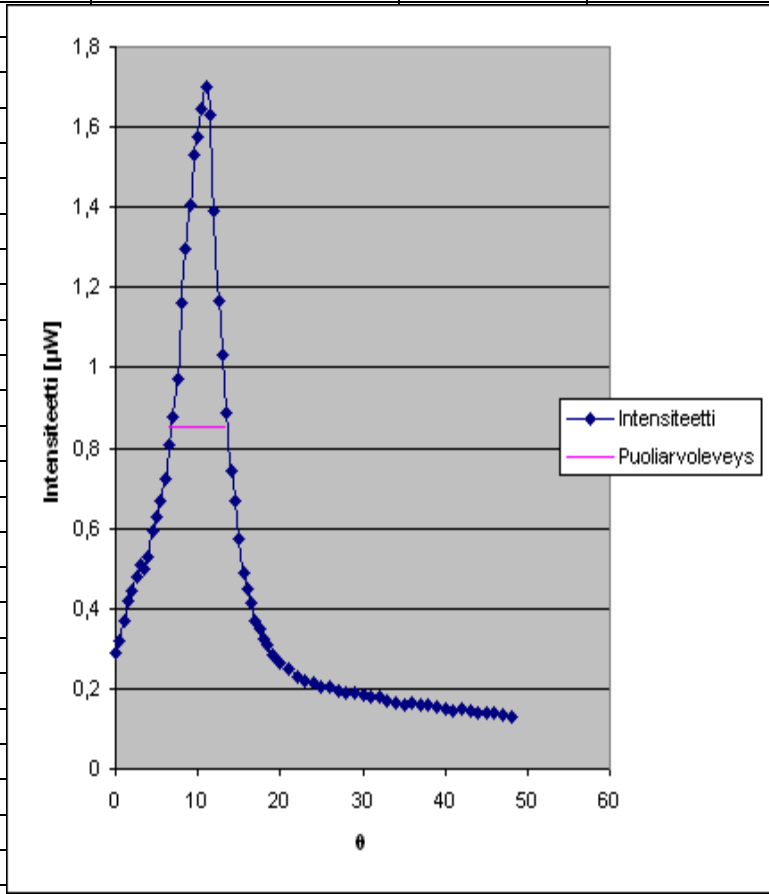
# LIITTEET

## Liite 1. Mittauspöytäkirjat

Laserin tulokulma	15				
Näyte	ref				
Intensiteetti pimeässä	0				
Laserin aallonpituus	633				
Kulma (ilmais)	Intensiteetti [ $\mu\text{W}$ ]	Maksimi	Puoliarvoveyden intensiteetti	Vastaava kulma 1	Vastaava kulma 2
		9,614	4,807	3	15
0	2,999				
0,5	3,274				
1	3,51				
1,5	3,845				
2	4,22				
2,5	4,623				
3	4,795				
3,5	4,998				
4	5,453				
4,5	5,809				
5	6,458				
5,5	7,076				
6	7,262				
6,5	7,836				
7	8,366				
7,5	8,755				
8	9,207				
8,5	9,339				
9	9,385				
9,5	9,614				
10	9,48				
10,5	9,124				
11	9,11				
11,5	8,905				
12	8,301				
12,5	7,468				
13	6,661				
13,5	5,974				
14	5,489				
14,5	5,187				
15	4,869				
15,5	4,411				
16	3,956				
16,5	3,63				

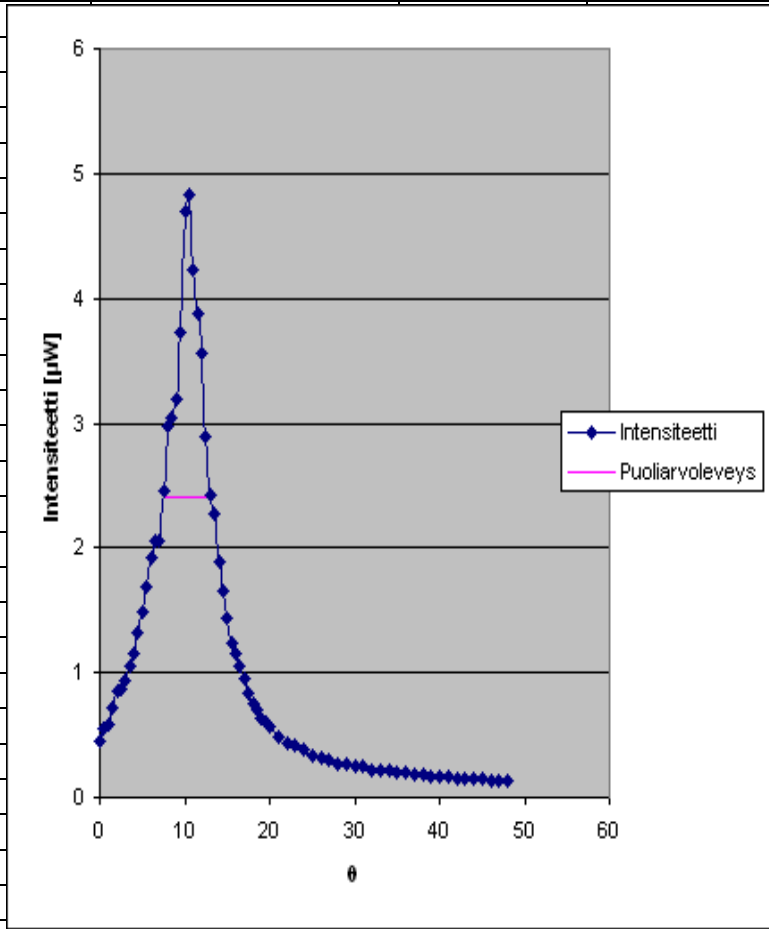
17	3,325			
17,5	3,077			
18	2,95			
18,5	2,801			
19	2,676			
19,5	2,543			
20	2,45			
21	2,281			
22	2,144			
23	2,121			
24	2,017			
25	1,976			
26	1,896			
27	1,849			
28	1,796			
29	1,762			
30	1,751			
31	1,73			
32	1,72			
33	1,685			
34	1,667			
35	1,652			
36	1,642			
37	1,603			
38	1,61			
39	1,588			
40	1,567			
41	1,577			
42	1,559			
43	1,536			
44	1,528			
45	1,511			
46	1,491			
47	1,471			
48	1,454			

Laserin tulokulma	15				
Näyte	ref				
Intensiteetti pimeässä	0				
Laserin aallonpituus	1310				
Kulma (ilmais)	Intensiteetti [ $\mu\text{W}$ ]	Maksimi	Puoliarvoveyden intensiteetti	Vastaava kulma 1	Vastaava kulma 2
		1,702	0,851	6,5	13,5
0	0,29				
0,5	0,32				
1	0,371				
1,5	0,42				
2	0,444				
2,5	0,48				
3	0,509				
3,5	0,497				
4	0,53				
4,5	0,595				
5	0,628				
5,5	0,666				
6	0,722				
6,5	0,807				
7	0,877				
7,5	0,972				
8	1,163				
8,5	1,294				
9	1,404				
9,5	1,53				
10	1,576				
10,5	1,647				
11	1,702				
11,5	1,628				
12	1,391				
12,5	1,166				
13	1,033				
13,5	0,89				
14	0,742				
14,5	0,67				
15	0,572				
15,5	0,489				
16	0,448				
16,5	0,416				
17	0,37				
17,5	0,347				
18	0,322				
18,5	0,308				
19	0,285				



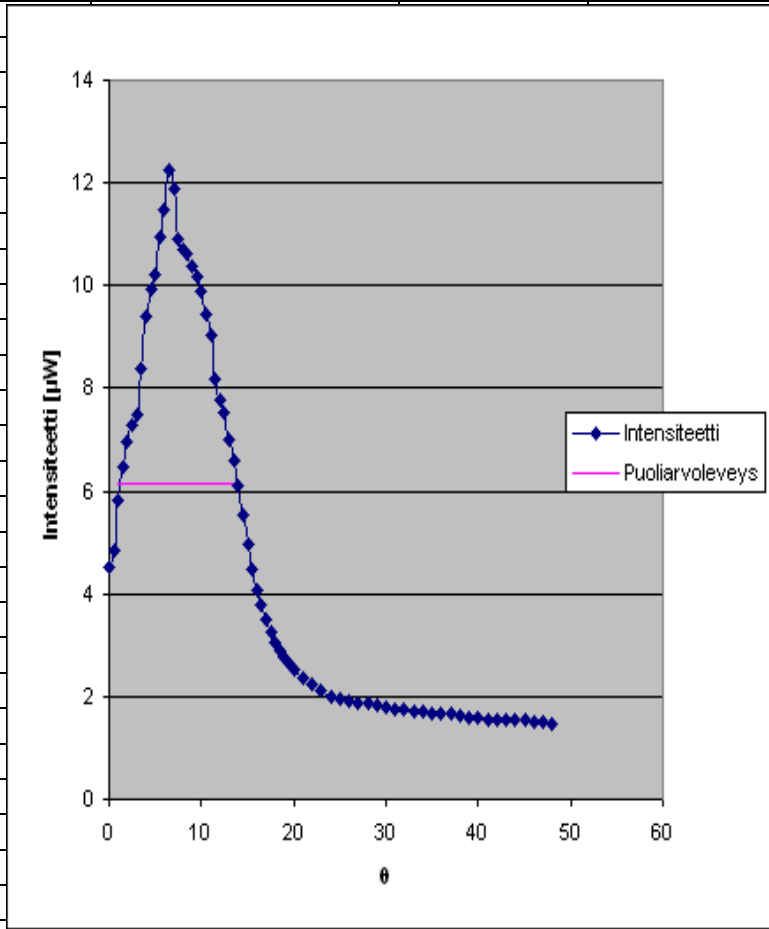
19,5	0,272			
20	0,264			
21	0,251			
22	0,23			
23	0,22			
24	0,213			
25	0,204			
26	0,202			
27	0,195			
28	0,189			
29	0,189			
30	0,182			
31	0,181			
32	0,179			
33	0,172			
34	0,167			
35	0,162			
36	0,163			
37	0,16			
38	0,159			
39	0,156			
40	0,151			
41	0,144			
42	0,148			
43	0,146			
44	0,14			
45	0,142			
46	0,138			
47	0,136			
48	0,131			

Laserin tulokulma	15				
Näyte	ref				
Intensiteetti pimeässä	0				
Laserin aallonpituus	1550				
Kulma (ilmais)	Intensiteetti [ $\mu$ W]	Maksimi	Puoliarvoveyden intensiteetti	Vastaava kulma 1	Vastaava kulma 2
0	0,455				
0,5	0,548				
1	0,59				
1,5	0,715				
2	0,848				
2,5	0,873				
3	0,935				
3,5	1,05				
4	1,157				
4,5	1,312				
5	1,494				
5,5	1,684				
6	1,916				
6,5	2,052				
7	2,05				
7,5	2,454				
8	2,973				
8,5	3,044				
9	3,189				
9,5	3,72				
10	4,69				
10,5	4,829				
11	4,224				
11,5	3,877				
12	3,568				
12,5	2,892				
13	2,425				
13,5	2,272				
14	1,882				
14,5	1,655				
15	1,438				
15,5	1,245				
16	1,145				
16,5	1,051				
17	0,951				
17,5	0,83				
18	0,744				
18,5	0,694				
19	0,632				



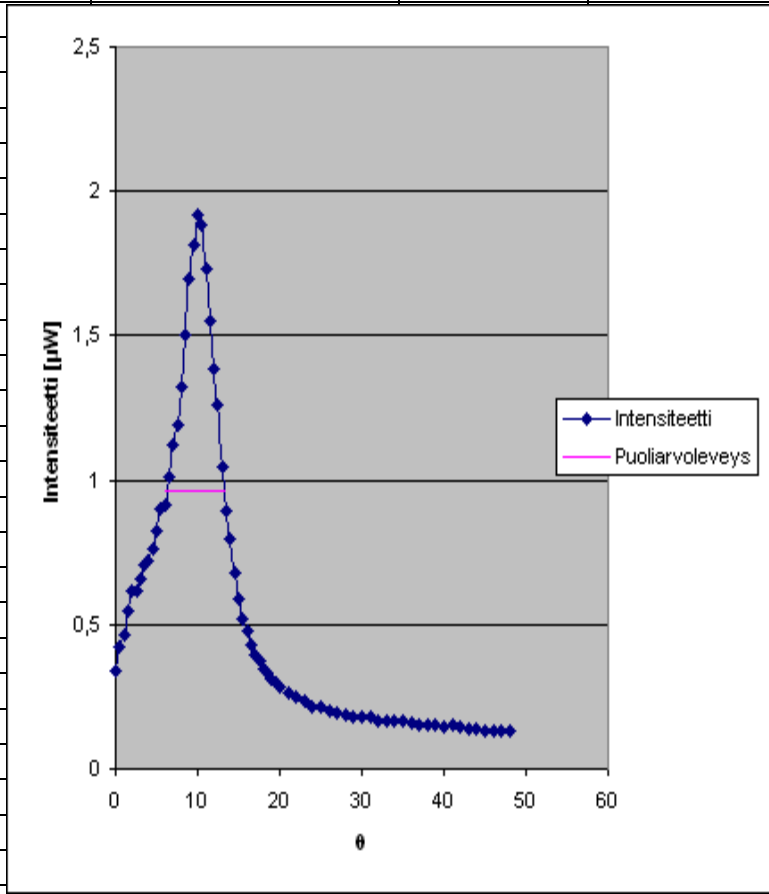
19,5	0,598			
20	0,571			
21	0,483			
22	0,438			
23	0,415			
24	0,381			
25	0,334			
26	0,311			
27	0,3			
28	0,272			
29	0,263			
30	0,251			
31	0,244			
32	0,223			
33	0,217			
34	0,21			
35	0,2			
36	0,199			
37	0,185			
38	0,176			
39	0,171			
40	0,163			
41	0,163			
42	0,157			
43	0,153			
44	0,147			
45	0,143			
46	0,139			
47	0,136			
48	0,136			

Laserin tulokulma	15				
Näyte	39				
Intensiteetti pimeässä	0				
Laserin aallonpituus	633				
Kulma (ilmais)	Intensiteetti [ $\mu\text{W}$ ]	Maksimi	Puoliarvoveyden intensiteetti	Vastaava kulma 1	Vastaava kulma 2
0	4,508				
0,5	4,823				
1	5,818				
1,5	6,483				
2	6,944				
2,5	7,275				
3	7,475				
3,5	8,39				
4	9,412				
4,5	9,922				
5	10,229				
5,5	10,937				
6	11,478				
6,5	12,254				
7	11,879				
7,5	10,92				
8	10,69				
8,5	10,64				
9	10,39				
9,5	10,18				
10	9,893				
10,5	9,458				
11	9,053				
11,5	8,17				
12	7,792				
12,5	7,54				
13	7,007				
13,5	6,605				
14	6,116				
14,5	5,527				
15	4,981				
15,5	4,476				
16	4,051				
16,5	3,771				
17	3,497				
17,5	3,245				
18	3,056				
18,5	2,903				
19	2,77				



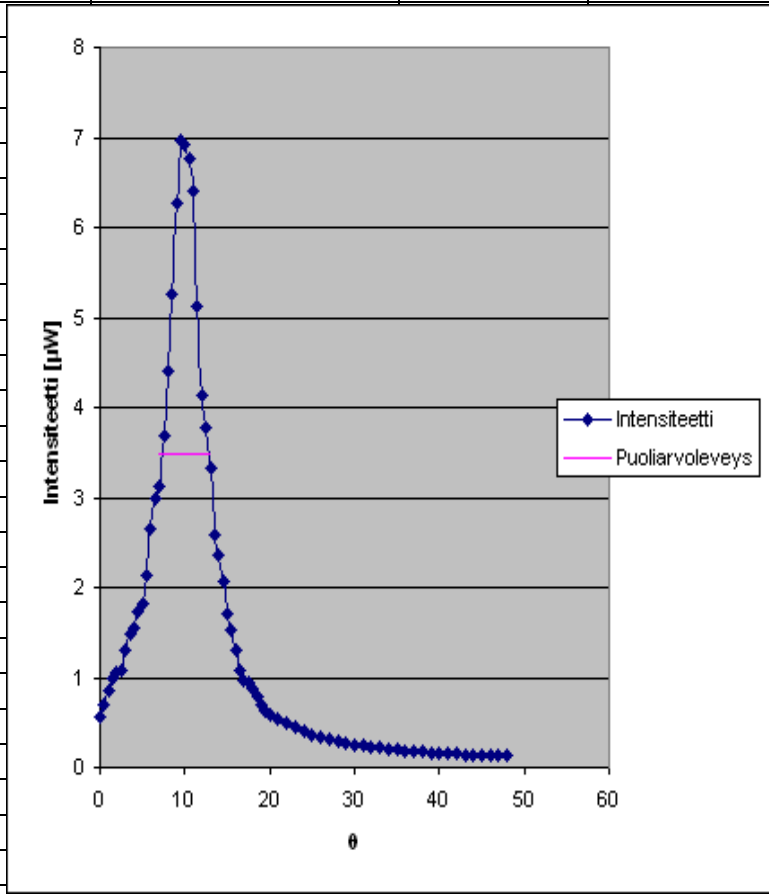
19,5	2,654			
20	2,542			
21	2,363			
22	2,248			
23	2,113			
24	2,012			
25	1,96			
26	1,899			
27	1,87			
28	1,864			
29	1,823			
30	1,792			
31	1,731			
32	1,764			
33	1,719			
34	1,707			
35	1,684			
36	1,674			
37	1,678			
38	1,644			
39	1,604			
40	1,603			
41	1,554			
42	1,542			
43	1,559			
44	1,544			
45	1,538			
46	1,513			
47	1,496			
48	1,483			

Laserin tulokulma	15				
Näyte	39				
Intensiteetti pimeässä	0				
Laserin aallonpituus	1310				
Kulma (ilmais)	Intensiteetti [ $\mu\text{W}$ ]	Maksimi	Puoliarvoveyden intensiteetti	Vastaava kulma 1	Vastaava kulma 2
		1,921	0,9605	6,5	13,5
0	0,337				
0,5	0,419				
1	0,463				
1,5	0,549				
2	0,616				
2,5	0,616				
3	0,657				
3,5	0,709				
4	0,719				
4,5	0,761				
5	0,825				
5,5	0,9				
6	0,915				
6,5	1,011				
7	1,123				
7,5	1,19				
8	1,321				
8,5	1,505				
9	1,695				
9,5	1,815				
10	1,921				
10,5	1,881				
11	1,733				
11,5	1,549				
12	1,384				
12,5	1,263				
13	1,048				
13,5	0,895				
14	0,793				
14,5	0,682				
15	0,589				
15,5	0,522				
16	0,478				
16,5	0,426				
17	0,393				
17,5	0,375				
18	0,348				
18,5	0,331				
19	0,311				



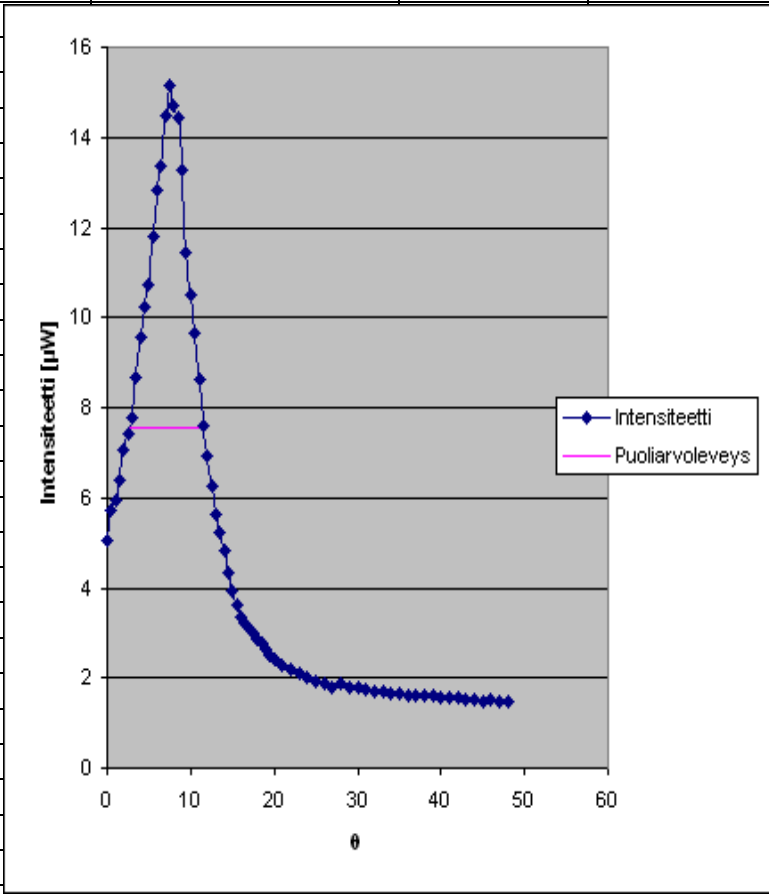
19,5	0,298			
20	0,281			
21	0,263			
22	0,247			
23	0,233			
24	0,217			
25	0,212			
26	0,203			
27	0,197			
28	0,19			
29	0,181			
30	0,18			
31	0,178			
32	0,169			
33	0,166			
34	0,167			
35	0,163			
36	0,157			
37	0,152			
38	0,151			
39	0,15			
40	0,147			
41	0,151			
42	0,142			
43	0,139			
44	0,139			
45	0,135			
46	0,134			
47	0,132			
48	0,129			

Laserin tulokulma	15				
Näyte	39				
Intensiteetti pimeässä	0				
Laserin aallonpituus	1550				
Kulma (ilmais)	Intensiteetti [ $\mu$ W]	Maksimi	Puoliarvoveyden intensiteetti	Vastaava kulma 1	Vastaava kulma 2
		6,966	3,483	7,5	13
0	0,551				
0,5	0,699				
1	0,855				
1,5	0,998				
2	1,049				
2,5	1,069				
3	1,304				
3,5	1,491				
4	1,548				
4,5	1,726				
5	1,818				
5,5	2,141				
6	2,657				
6,5	2,99				
7	3,125				
7,5	3,696				
8	4,404				
8,5	5,267				
9	6,275				
9,5	6,966				
10	6,93				
10,5	6,775				
11	6,407				
11,5	5,134				
12	4,13				
12,5	3,782				
13	3,315				
13,5	2,581				
14	2,369				
14,5	2,064				
15	1,707				
15,5	1,517				
16	1,303				
16,5	1,084				
17	0,966				
17,5	0,935				
18	0,87				
18,5	0,79				
19	0,693				



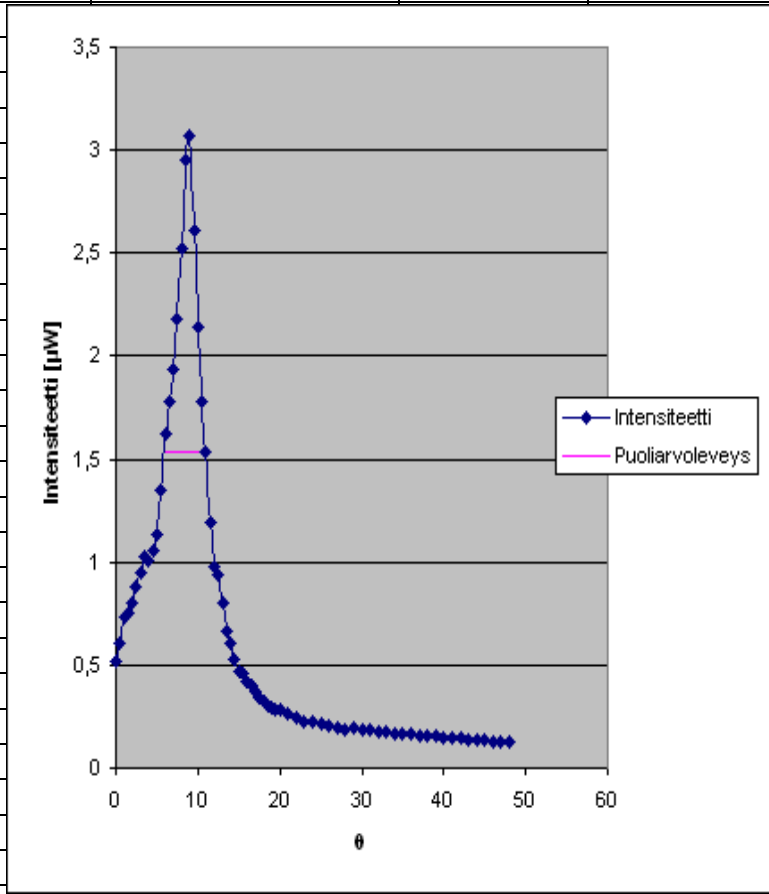
19,5	0,631			
20	0,589			
21	0,53			
22	0,495			
23	0,443			
24	0,4			
25	0,359			
26	0,34			
27	0,313			
28	0,292			
29	0,267			
30	0,243			
31	0,242			
32	0,226			
33	0,215			
34	0,203			
35	0,198			
36	0,18			
37	0,18			
38	0,172			
39	0,168			
40	0,16			
41	0,152			
42	0,155			
43	0,141			
44	0,141			
45	0,137			
46	0,134			
47	0,13			
48	0,126			

Laserin tulokulma	15				
Näyte	30				
Intensiteetti pimeässä	0				
Laserin aallonpituus	633				
Kulma (ilmais)	Intensiteetti [ $\mu\text{W}$ ]	Maksimi	Puoliarvoveyden intensiteetti	Vastaava kulma 1	Vastaava kulma 2
		15,14	7,57	2,5	11,5
0	5,057				
0,5	5,713				
1	5,957				
1,5	6,37				
2	7,045				
2,5	7,436				
3	7,778				
3,5	8,68				
4	9,58				
4,5	10,25				
5	10,738				
5,5	11,807				
6	12,839				
6,5	13,361				
7	14,5				
7,5	15,14				
8	14,682				
8,5	14,414				
9	13,292				
9,5	11,449				
10	10,523				
10,5	9,635				
11	8,625				
11,5	7,599				
12	6,927				
12,5	6,26				
13	5,64				
13,5	5,244				
14	4,829				
14,5	4,318				
15	3,929				
15,5	3,624				
16	3,347				
16,5	3,202				
17	3,085				
17,5	2,982				
18	2,858				
18,5	2,759				
19	2,633				



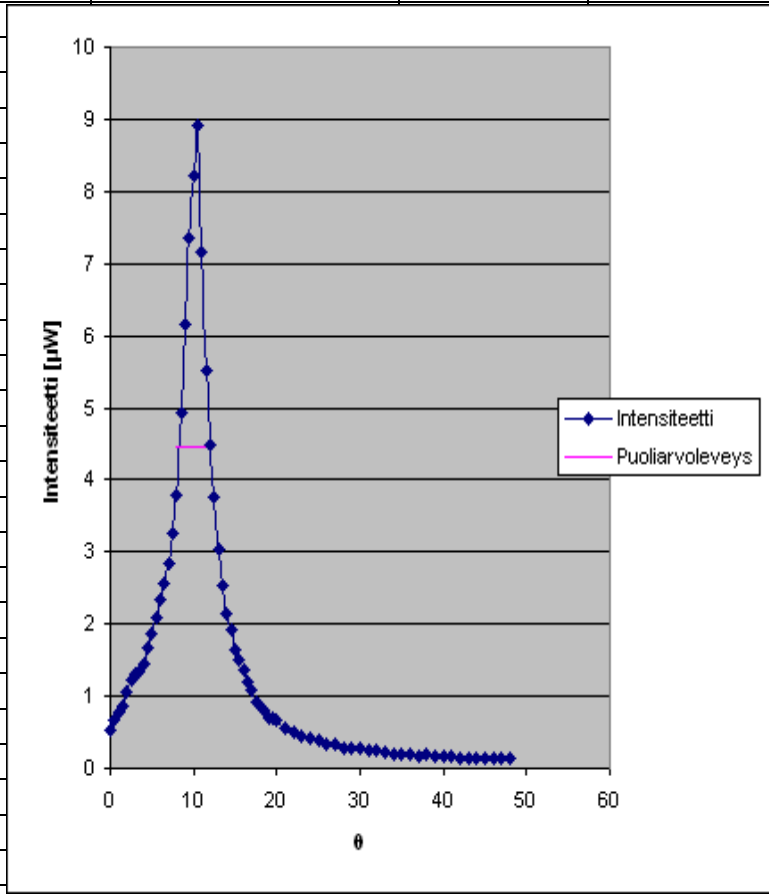
19,5	2,509			
20	2,429			
21	2,291			
22	2,179			
23	2,093			
24	2,009			
25	1,925			
26	1,876			
27	1,802			
28	1,865			
29	1,783			
30	1,766			
31	1,74			
32	1,713			
33	1,679			
34	1,668			
35	1,634			
36	1,617			
37	1,607			
38	1,597			
39	1,587			
40	1,574			
41	1,543			
42	1,542			
43	1,526			
44	1,511			
45	1,493			
46	1,5			
47	1,478			
48	1,471			

Laserin tulokulma	15				
Näyte	30				
Intensiteetti pimeässä	0				
Laserin aallonpituus	1310				
Kulma (ilmais)	Intensiteetti [ $\mu$ W]	Maksimi	Puoliarvovleyden intensiteetti	Vastaava kulma 1	Vastaava kulma 2
		3,074	1,537	6	11
0	0,52				
0,5	0,61				
1	0,729				
1,5	0,754				
2	0,799				
2,5	0,88				
3	0,951				
3,5	1,022				
4	1,011				
4,5	1,057				
5	1,132				
5,5	1,351				
6	1,62				
6,5	1,778				
7	1,94				
7,5	2,179				
8	2,523				
8,5	2,951				
9	3,074				
9,5	2,613				
10	2,139				
10,5	1,784				
11	1,538				
11,5	1,19				
12	0,98				
12,5	0,942				
13	0,804				
13,5	0,666				
14	0,604				
14,5	0,53				
15	0,469				
15,5	0,457				
16	0,424				
16,5	0,4				
17	0,375				
17,5	0,346				
18	0,323				
18,5	0,307				
19	0,297				



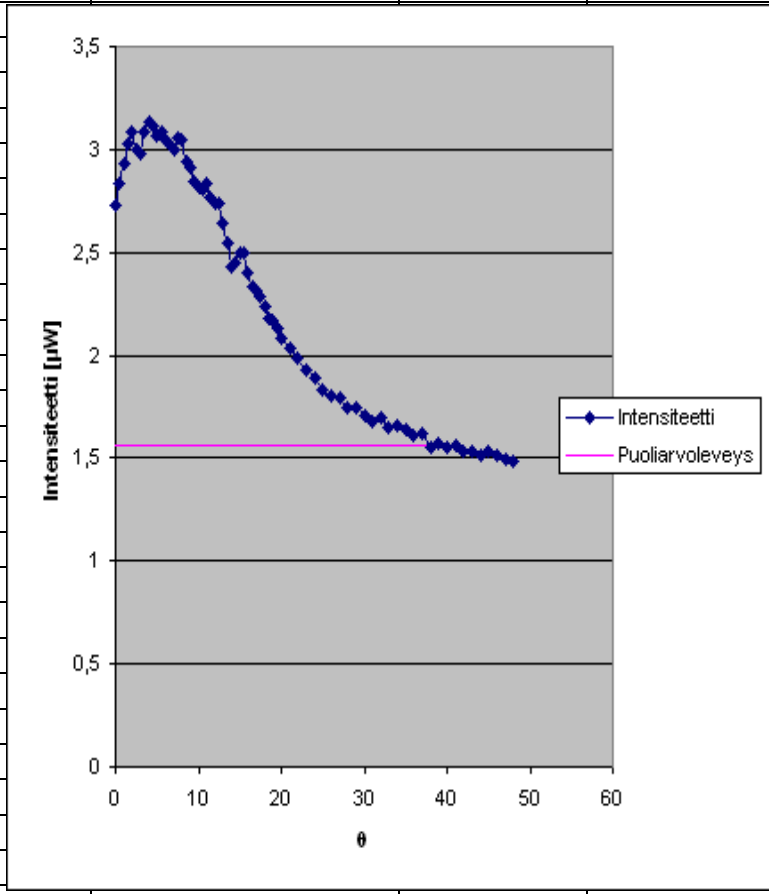
19,5	0,286			
20	0,28			
21	0,261			
22	0,247			
23	0,227			
24	0,225			
25	0,211			
26	0,208			
27	0,198			
28	0,189			
29	0,193			
30	0,188			
31	0,182			
32	0,175			
33	0,174			
34	0,169			
35	0,167			
36	0,162			
37	0,159			
38	0,156			
39	0,1551			
40	0,149			
41	0,146			
42	0,146			
43	0,139			
44	0,139			
45	0,136			
46	0,131			
47	0,128			
48	0,129			

Laserin tulokulma	15				
Näyte	30				
Intensiteetti pimeässä	0				
Laserin aallonpituus	1550				
Kulma (ilmais)	Intensiteetti [μW]	Maksimi	Puoliarvoveyden intensiteetti	Vastaava kulma 1	Vastaava kulma 2
		8,912	4,456	8	12
0	0,527				
0,5	0,669				
1	0,769				
1,5	0,877				
2	1,07				
2,5	1,222				
3	1,318				
3,5	1,346				
4	1,443				
4,5	1,671				
5	1,853				
5,5	2,093				
6	2,348				
6,5	2,563				
7	2,842				
7,5	3,253				
8	3,8				
8,5	4,918				
9	6,16				
9,5	7,36				
10	8,22				
10,5	8,912				
11	7,172				
11,5	5,527				
12	4,483				
12,5	3,767				
13	3,045				
13,5	2,532				
14	2,138				
14,5	1,911				
15	1,633				
15,5	1,51				
16	1,356				
16,5	1,203				
17	1,083				
17,5	0,916				
18	0,864				
18,5	0,821				
19	0,71				



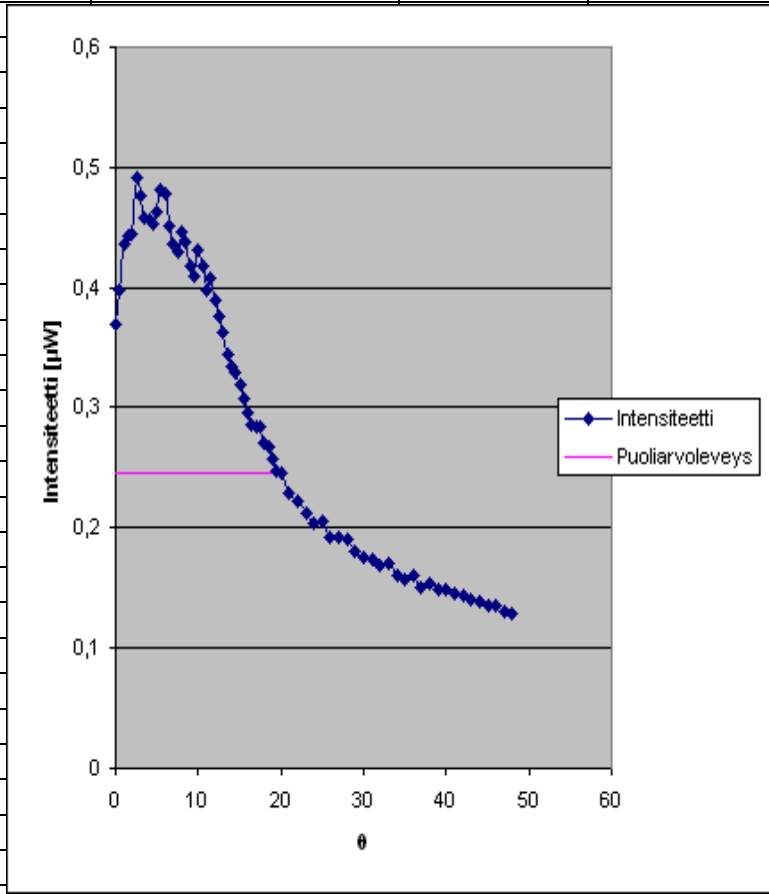
19,5	0,693				
20	0,665				
21	0,567				
22	0,488				
23	0,455				
24	0,426				
25	0,377				
26	0,342				
27	0,341				
28	0,292				
29	0,283				
30	0,267				
31	0,243				
32	0,243				
33	0,22				
34	0,203				
35	0,205				
36	0,196				
37	0,179				
38	0,182				
39	0,169				
40	0,163				
41	0,163				
42	0,153				
43	0,148				
44	0,146				
45	0,142				
46	0,139				
47	0,129				
48	0,13				

Laserin tulokulma	15				
Näyte	16 kp 1,7				
Intensiteetti pimeässä	0				
Laserin aallonpituus	633				
Kulma (ilmais)	Intensiteetti [μW]	Maksimi	Puoliarvoveyden intensiteetti	Vastaava kulma 1	Vastaava kulma 2
		3,129	1,5645	-	41
0	2,728				
0,5	2,832				
1	2,93				
1,5	3,028				
2	3,086				
2,5	3				
3	2,98				
3,5	3,088				
4	3,129				
4,5	3,113				
5	3,069				
5,5	3,085				
6	3,047				
6,5	3,026				
7	2,995				
7,5	3,053				
8	3,051				
8,5	2,936				
9	2,908				
9,5	2,843				
10	2,818				
10,5	2,809				
11	2,838				
11,5	2,765				
12	2,74				
12,5	2,741				
13	2,644				
13,5	2,543				
14	2,427				
14,5	2,45				
15	2,501				
15,5	2,494				
16	2,397				
16,5	2,338				
17	2,314				
17,5	2,282				
18	2,238				
18,5	2,175				
19	2,169				



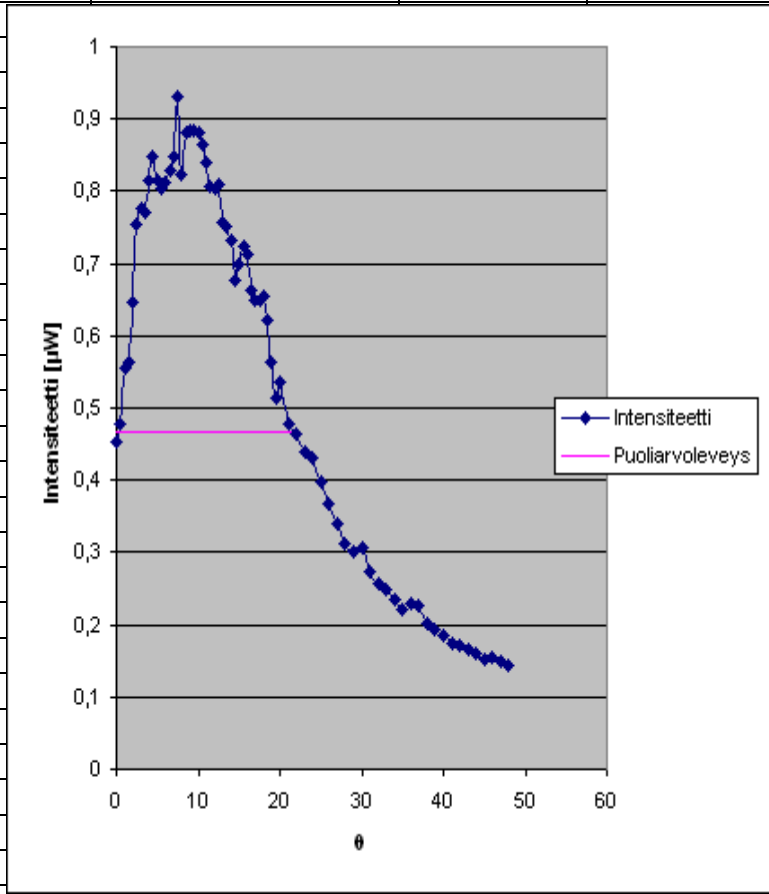
19,5	2,128			
20	2,081			
21	2,03			
22	1,989			
23	1,929			
24	1,889			
25	1,833			
26	1,8			
27	1,795			
28	1,744			
29	1,742			
30	1,702			
31	1,675			
32	1,699			
33	1,653			
34	1,654			
35	1,641			
36	1,614			
37	1,616			
38	1,557			
39	1,569			
40	1,554			
41	1,558			
42	1,532			
43	1,533			
44	1,51			
45	1,532			
46	1,51			
47	1,495			
48	1,483			

Laserin tulokulma	15				
Näyte	16 kp 1,7				
Intensiteetti pimeässä	0				
Laserin aallonpituus	1310				
Kulma (ilmais)	Intensiteetti [ $\mu\text{W}$ ]	Maksimi	Puoliarvoveyden intensiteetti	Vastaava kulma 1	Vastaava kulma 2
		0,492	0,246	-	20
0	0,37				
0,5	0,397				
1	0,437				
1,5	0,443				
2	0,445				
2,5	0,492				
3	0,476				
3,5	0,458				
4	0,456				
4,5	0,453				
5	0,463				
5,5	0,482				
6	0,478				
6,5	0,451				
7	0,436				
7,5	0,43				
8	0,446				
8,5	0,438				
9	0,418				
9,5	0,41				
10	0,431				
10,5	0,418				
11	0,398				
11,5	0,407				
12	0,389				
12,5	0,376				
13	0,363				
13,5	0,345				
14	0,334				
14,5	0,329				
15	0,32				
15,5	0,307				
16	0,295				
16,5	0,285				
17	0,284				
17,5	0,284				
18	0,27				
18,5	0,268				
19	0,258				



19,5	0,248			
20	0,245			
21	0,229			
22	0,223			
23	0,213			
24	0,204			
25	0,205			
26	0,193			
27	0,192			
28	0,19			
29	0,18			
30	0,176			
31	0,174			
32	0,169			
33	0,171			
34	0,161			
35	0,157			
36	0,161			
37	0,151			
38	0,153			
39	0,148			
40	0,148			
41	0,145			
42	0,143			
43	0,14			
44	0,138			
45	0,135			
46	0,135			
47	0,131			
48	0,129			

Laserin tulokulma	15				
Näyte	16 kp 1,7				
Intensiteetti pimeässä	0				
Laserin aallonpituus	1550				
Kulma (ilmais)	Intensiteetti [μW]	Maksimi	Puoliarvoveyden intensiteetti	Vastaava kulma 1	Vastaava kulma 2
		0,931	0,4655	0	22
0	0,454				
0,5	0,479				
1	0,556				
1,5	0,564				
2	0,646				
2,5	0,755				
3	0,775				
3,5	0,771				
4	0,816				
4,5	0,847				
5	0,815				
5,5	0,804				
6	0,812				
6,5	0,828				
7	0,848				
7,5	0,931				
8	0,822				
8,5	0,882				
9	0,885				
9,5	0,884				
10	0,881				
10,5	0,866				
11	0,841				
11,5	0,808				
12	0,804				
12,5	0,809				
13	0,756				
13,5	0,751				
14	0,733				
14,5	0,676				
15	0,699				
15,5	0,723				
16	0,713				
16,5	0,664				
17	0,648				
17,5	0,649				
18	0,655				
18,5	0,622				
19	0,563				



19,5	0,513			
20	0,537			
21	0,477			
22	0,465			
23	0,44			
24	0,432			
25	0,399			
26	0,367			
27	0,339			
28	0,311			
29	0,302			
30	0,307			
31	0,274			
32	0,258			
33	0,249			
34	0,236			
35	0,222			
36	0,23			
37	0,226			
38	0,203			
39	0,193			
40	0,186			
41	0,175			
42	0,172			
43	0,166			
44	0,159			
45	0,153			
46	0,1534			
47	0,148			
48	0,143			