



# Optisen kuidun testaussovittimen kehittämistutkimus

Timo Hyvönen

Opinnäytetyö  
Toukokuu 2022  
Tekniikan ala  
Sähkö- ja automaatiotekniikka

Hyvönen, Timo

## Optisen kuidun testaussovittimen kehittämistutkimus

Jyväskylä: Jyväskylän ammattikorkeakoulu. toukokuu, 2022, 35 sivua.

Tekniikan ala. Sähkö- ja automaatiotekniikan tutkinto-ohjelma. Opinnäytetyö AMK.

Julkaisun kieli: suomi

Verkkojulkaisulupa myönnetty: kyllä

### Tiivistelmä

Teollisuudessa monesti joudutaan käyttämään optisia mittalaitteita, sillä perinteiset sähkötoimiset mittalaitteet eivät kestä erikoisrankoissa olosuhteissa, kuten kuumuudessa ja kosteudessa. Tämänkaltaisissa ympäristöissä voidaan turvautua mittalaitteisiin, jotka tunnistavat esimerkiksi pinnan tai rajatiedon valon avustuksella. Ja samoin, kuin perinteiset sähköiset mittalaitteet, niin myös optisen mittalaitteen komponentit, kuten valokuitu täytyy todentaa laadukkaaksi, jotta mittatietoon voidaan luottaa.

Toimeksiantaja testaa sekä toimittaa optisenmittalaitteen valokuitukimppuja, ja heillä oli tarve kehittää kuitumittausta laadukkaammaksi mittaamiseksi. Tavoitteena oli kehittää mittausjärjestelmän kuitusovitin osaa, niin että mittaus täyttäisi laadukkaan mittauksen kriteerit, kuten toistettavuus sekä uusittavuus. Työssä tietoperustaa rakennettiin niin, että työn käsitteistä sekä työssä käytetyistä toimintatavoista syntyi selvä kuva. Tietoperustan rakentamiseen käytettiin ammattikirjallisuutta sekä alan ammattilaisosaa- mista. Tutkimus toteutettiin kehittämistutkimus muotoisena, sillä kyseisessä tutkimusmuodossa on syklinen kehittämistyö, joka sopii mainiosti työhän, jossa syntyy tuote.

Tehtävänä oli aluksi selvittää alkuperäisen kuitujen mittausmenetelmän tuloksia. Tähän kuului mittausjärjestelmän selvittäminen, mittausprosessin selvittäminen sekä mittauksessa syntyvien mittauspoikkeamien selvittäminen, jotta uutta sovitinta analysoidessa olisi vertailukohde. Tämän jälkeen alettiin suunnittelemaan, millaista mittaus tyyliä uudessa sovittimessa käytetään, jotta mittausvirheiden määrä pienenesi mahdollisimman paljon. Kun tyyli oli selvitetty, alettiin suunnittelemaan uuden mittasovittimen rakennetta, joka sitten tulostetaan 3D-tulostimen avulla.

Työn tuloksena syntyi uusi mittasovitin, jota käytettäessä syntyy huomattavasti vähemmän mittausvirheitä. Tutkimuksen ohella onnistuttiin myös parantamaan koko mittajärjestelmän luotettavuutta, etenkin mittauksessa käytettävän valokuituvahvistimen luotettavuutta. Sillä todettiin tämän vahvistimen olevan todella epästabiili, ympäristön lämpötilan vaihdellessa. Työn tuloksena syntyneellä prototyypillä onnistuttiin parantamaan mittausjärjestelmän luotettavuutta. Järjestelmän käyttöönotto vaatii kuitenkin vielä jatkokehittämistä, jotta järjestelmä täyttäisi kaikki laadukkaan mittauksen kriteerit.

### Avainsanat (asiasanat)

Optiset kuidut, metrologia, 3D-tulostaminen, Kuitukimppu,

### Muut tiedot (salassa pidettävät liitteet)

-

**Hyvönen, Timo**

### **Research development of the test adapter for measuring optical fibers**

Jyväskylä: JAMK University of Applied Sciences, September 2020, 35 pages.

Engineering and technology. Degree Programme in Energy and Environmental Technology. Bachelor's thesis.

Permission for web publication: Yes

Language of publication: Finnish

### **Abstract**

It is often necessary to use optical measuring devices in the industry since traditional electric measuring devices are not durable enough in hot and humid conditions. In such environments one can use, measuring devices that use light to identify surface or boundary. And just like traditional electronic measuring devices, the components of an optical measuring device, such as optical fiber, must be verified. This will enable the measurement data to be reliable.

The client provides the optical fiber bundles for the optical measurement device, and they had a need for improving the fiber measurement system. the aim was to develop the fiber adapter so that it would meet the requirements of high-quality measurements, such as repeatability and reproducibility. A knowledge base was created to establish a clear image of the work concepts and methods that were used in the work. The knowledge base was build using professional literature and professional expertise. The research was done as a development study since that style has a cyclical development style, ideal for the work in which the product is created.

In order to understand the original fiber measurement method, it was necessary to find results of the old style. This included the research of the measurement system, -process, -deviations. This was done so that it would be possible to compare the new test adapter to the old. This was followed by developing the new test adapter so that the measuring deviations and -errors would be as low as possible. Once the style was clarified, work began by modelling the new test adapter. After the new test adapter was modelled, it was printed using 3D printer

As a result of the work, a new measuring adapter was created, which causes significantly less measuring deviation. In addition to the study, we were able to improve the reliability of the entire measuring system, especially the reliability of the optical fiber amplifier used in the measurement. It was found that this amplifier was indeed unstable, which was caused by varying ambient temperatures. As a result, the measuring system was improved in terms of its reliability. However, further development of the system is needed to ensure that it meets all the quality measurement criteria.

### **Keywords/tags (subjects)**

Optical fibers, metrology, 3D printing, fiber bundles

### **Miscellaneous (Confidential information)**

-

## Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b> .....	<b>3</b>
1.1	Tutkimuksen tausta ja tarpeellisuus .....	3
1.2	Tutkimuksen rajaus ja tavoite .....	3
<b>2</b>	<b>Tutkimusasetelma</b> .....	<b>4</b>
2.1	Tutkimusmenetelmät .....	4
2.2	Kehittämistutkimus .....	5
2.3	Eettisyys ja tietoperusta .....	6
<b>3</b>	<b>Laadukas mittaaminen</b> .....	<b>7</b>
3.1	Metrologia .....	7
3.2	Laadukkaan mittauksen käsitteitä .....	7
<b>4</b>	<b>Optiset kuidut</b> .....	<b>9</b>
4.1	Valokuitu .....	10
4.2	Kuitukimppu .....	11
<b>5</b>	<b>Materiaalia lisäävä valmistus</b> .....	<b>13</b>
5.1	3D tulostuksen periaate .....	13
5.2	Tulostus tekniikat .....	14
5.3	3D tulostuksen edut ja haitat .....	16
<b>6</b>	<b>Kehittämistyö</b> .....	<b>17</b>
6.1	Alkuperäinen mittausmenetelmä .....	17
6.2	Kehittämisidea.....	18
6.3	Kehittämistyön kulku .....	19
6.3.1	Kuitusovittimen suunnittelu .....	20
6.3.2	Kuitusovittimen valmistaminen.....	21
6.3.3	Vaihtoehtoinen testaustyyli.....	22
6.4	Kehittämistyön haasteet .....	22
<b>7</b>	<b>Tulokset</b> .....	<b>24</b>
<b>8</b>	<b>Pohdinta</b> .....	<b>28</b>
	<b>Lähteet</b> .....	<b>31</b>
	<b>Liitteet</b> .....	<b>33</b>
	Liite 1. Tulokset osa 1/2 .....	33
	Liite 2. Tulokset osa 2/2 .....	34
	Liite 3. Vahvistimen lämpötesti.....	35

## Kuviot

kuvio 1. Kehittämistutkimuksen syklisen rakenteen havainnollistaminen. (pohjautuu Pernaan artikkelin kuvaan 3.).....	6
kuvio 2. Kokonaispoikkeama (laadukkaan mittaamisen perusteet 2011. 15).....	8
kuvio 3. Mittauksen tarkkuus ja todenmukaisuus (laadukkaan mittaamisen perusteet 2011. 19)9	
kuvio 4. Valokuidun rakenne (Paschotta N.d a).....	10
kuvio 5. Valokuidun taitoshäviöt (Margaret 2021).....	10
kuvio 6. Vasemmalla poikkileikkaus kimpun keskeltä, oikealla kuitukimpun yhteen sulatetun pään poikkileikkaus. (Paschotta n.d. c).....	12
kuvio 7. Y-haaroitettu kuitukimppu (Bifurcated Fiber Bundles: 2 Fibers. N.d.) .....	12
Kuvio 8. FDM-tekniikan 3D-tulostin, sen geometrian ja akseleiden selvennys( Samantha Van Rijs 2017.) .....	15
Kuvio 9. SLA tulostustekniikan toimintaperiaate (What is SLA 3D printing n.d.) .....	16
kuvio 10. Vanhan kuitusovittimen malli .....	18
kuvio 11 Cyan-valosuodatin (BP505 cyan bandpass filter n.d).....	20
kuvio 12. Testisovittimen proto_2 ja proto_4 .....	21
kuvio 13. Kuva kuitukimpun päädyistä .....	23
kuvio 14. Miitavahvistimen lämpeneminen .....	24
kuvio 15. Uusi testisovitin. ....	26
kuvio 16. REF-Vahvistimen lämpöstabiilisuus. Keltaisella lämpötila, sisellä mA-mitta-arvo ...	28

## Taulukot

Taulukko 1. Uuden- ja vanhan mittastekniikan ero, valkoisella pohjalla vanha tekniikka, sinisellä pohjalla uusi. ....	25
Taulukko 2. Vanhan mittaustekniikan vaihtelu .....	27
Taulukko 3. Uuden mittastekniikna vaihtelu .....	27

# 1 Johdanto

Tämä opinnäytetyö käsittelee kehittämistutkimusta, jonka tarkoituksena oli parantaa optisen mittakuitukimpun testaamismittausta laadukkaammaksi. Teollisuuden prosesseissa on useasti äärimmäisiä ja rajuja olosuhteita, joihin on mahdoton sijoittaa perinteistä sähkökäyttöistä mittalaitetta. Tämänkaltaisia olosuhteita sijaitsee esimerkiksi paperikoneessa, joissa on liikaa kuumuutta ja kosteutta, joita sähköiset mittalaitteet eivät kestä. Tämänkaltaisissa tilanteissa voidaan hyödyntää optisia mittalaitteita, joissa mittalaitteen sähköinen osa voidaan sijoittaa prosessin ulkopuolella, ja mittatieto saadaan valokuitukimpun pitkin. Jotta mittaustieto olisi mahdollisimman luotettavaa, niin täytyy kuitukimpun olla laadukkaasti ja luotettavasti testattu.

## 1.1 Tutkimuksen tausta ja tarpeellisuus

Tutkimuksen tarve tuli toimeksiantajalta, joka testaa ja toimittaa optisen mittalaitteen kuitukimpuja. Tähän asti toimeksiantajalla kuitujen testaaminen on tapahtunut niin, että henkilö mittaa kuidun käsin käyttäen testisovitinta. Tästä johtuen kuitujen testaamisvaiheessa kuitu on altistunut monelle ulkopuoliselle häiriölle, eikä kuidun testaaminen ole ollut laadukasta, eikä myöskään testitulokset olleet verrattavissa kuidun todelliseen laatuun.

Kuidun laadunepävarmuudella on useita negatiivisia vaikutuksia toimeksiantajalle, minkä takia kuitujen testausjärjestelyjä haluttiin parantaa. Laadun epävarmuus vaikutti muun muassa vikaantuneiden kuitujen vikojen paikannukseen, koska oli vaikea päätellä, että tuleeko vika itse kuidusta vai kuituvahvistimesta. Myöskään uusien kuitujen joukosta ei voitu paikantaa huonolaatuisia kuituja, ja tämä saattoi johtaa kuitujen asiakaspalautuksiin.

## 1.2 Tutkimuksen rajaus ja tavoite

Jotta kehittämistutkimuksesta saa parhaimman mahdollisen tuloksen, niin sen rajaaminen sekä tutkimuskysymysten asettaminen on ehdottoman tärkeää. Tässä Opinnäytetyössä tutkimus rajattiin optisen valokuitukimpun testausjärjestelmän yhteen osaan, eli testaussovittimeen ja sen kehittämiseen. Pienen rajauksen perusteena on toimeksiantajan antama rajaus, ja pienellä rajauksella kuitusovitinta voitiin kehittää tehokkaammin.

Työssä tutkimuskysymykset asetettiin seuraavasti: Kuinka voidaan parantaa kuidun testausta, mittauksen toistettavuuden ja uusittavuuden näkökulmista? Tutkimuksen apukysymyksiä olivat: mitä on laadukas mittaaminen? Mikä on optimi tyyli asettaa kuidun mittapäähän? Millaisia häiriöitä kuitujen testauksessa on?

Tutkimuksen tavoitteena oli siis parantaa mittausjärjestelmän kuitusovitinta, niin että mittausvirhe olisi mahdollisimman pieni ja mittaus olisi laadukasta. Työssä tutkittiin, mikä olisi optimaalinen tyyli asettaa kuidut tulevaan testisovittimeen, mikä jälkeen testisovitin valmistettiin. Tämän jälkeen tarkasteltiin uudella sovittimella otettuja mittaustuloksia ja niitä vertailtiin vanhalla sovittimella otettuihin testituloksiin.

## 2 Tutkimusasetelma

### 2.1 Tutkimusmenetelmät

Kvantitatiivinen- eli määrällinen tutkimus menetelmä on tutkimustyyli, jossa asiat esitetään numeerisesti. Määrällistä tutkimusta voidaan hyödyntää parhaiten esimerkiksi tutkimuksissa, joiden kohteeseen liittyy paljon mittaustuloksia, joita täytyy vertailla. Määrällisen tutkimuksen tavoitteena on selittää, uudistaa, vahvistaa tai purkaa teoriaa. Erilaisia menetelmiä tähän voivat olla esimerkiksi kausaalisuhde, selittäminen ja tai hypoteesi. (Vilkkä 2007)

Kausaalisuhteella tarkoitetaan syy-seuraus-suhdetta, eli jokin syy aiheuttaa oletetun seurauksen. Selittämisellä tarkoitetaan sitä, kun tutkimuksen lukujen avulla selitetään jotain tiettyä ilmiötä. Kuitenkin yleisin kehittämistutkimuksessa käytetty määrällisen tuloksen esittämismuoto on hypoteesi. Tällä tarkoitetaan sitä, että aiempien tutkimustulosten tai teorian perusteella tehdään jokin syyseuraus oletus. Tähän oletukseen on tarkoitus etsiä syy-seuraus-suhde tutkittavista tuloksista. (Vilkkä 2007)

Kvalitatiivinen- eli laadullinen tutkimusmenetelmä on toinen yleinen ja monesti rinnastettu määrälliseen tutkimukseen. Laadullisessa tutkimuksessa tutkittavaa aihetta pyritään ymmärtämään teoriapohjaisesti. Mutta, koska laadullinen tutkimus perustuu ihmisen tekemään tarkasteluun ja

subjektiiviseen kokemukseen, niin se myös herättää keskustelua tutkimuksen luotettavuudesta ja uskottavuudesta. (Laadullisen tutkimuksen näkökulmat ja menetelmät. 2020.)

## 2.2 Kehittämistutkimus

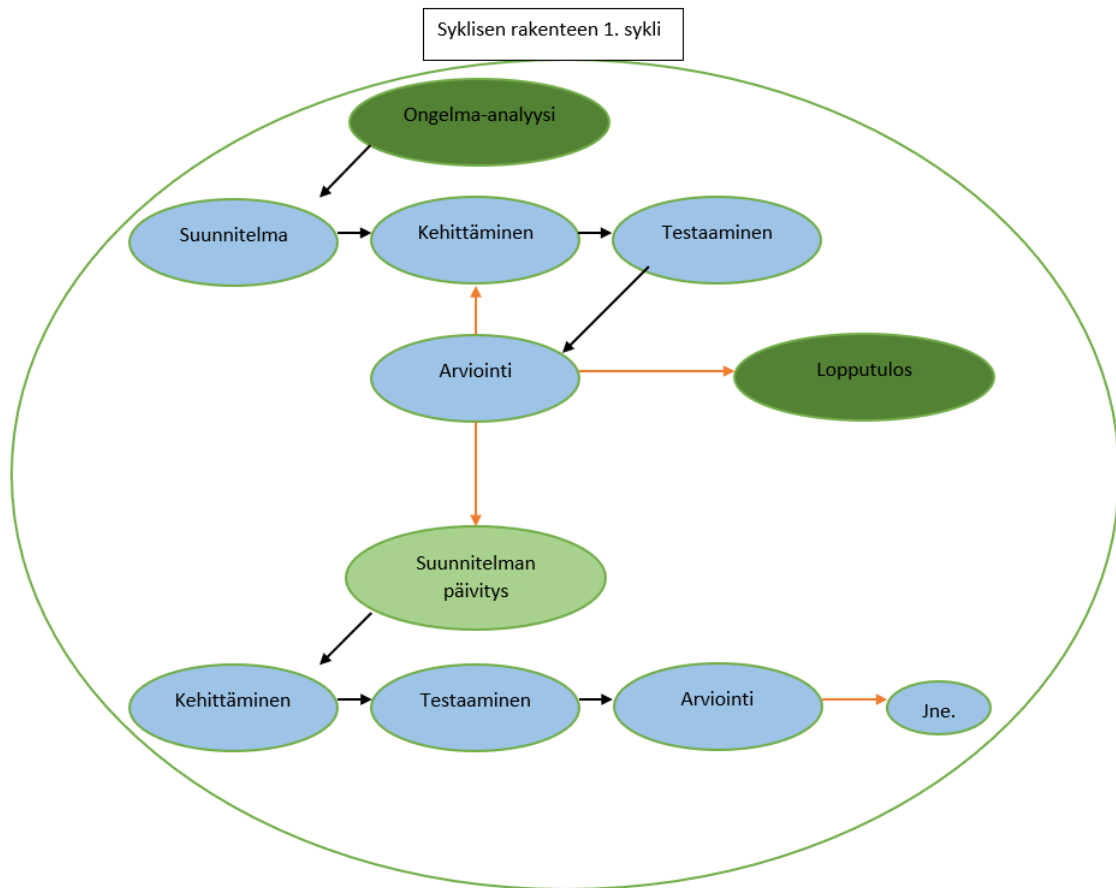
Vaikkakin kehittämistutkimus on jokseenkin tuore tutkimusmuoto, jonka historia alkoi vuonna 1992, niin on sen käyttö yleistynyt todella paljon. Esimerkiksi vuodesta 2005 vuoteen 2010 kehittämistutkimusten määrä on kaksinkertaistunut noin 400 kappaleeseen. (Pernaa 2013, 1–2.)

Alasuutari (2011, 26) kirjoittaa, että vaikka kvantitatiivinen ja kvalitatiivinen tutkimus menetelmät eroavat toisistaan, niin niitä käytetään useasti rinnakkain yhtä aikaa saman tutkimuksen analysointiin. Kehittämistutkimus on täydellinen esimerkki tämmöisestä, koska tässä tutkimusmuodossa yhdistetään määrällisen ja laadullisen tutkimuksen piirteitä. Tällöin tutkimuksesta voidaan myös käyttää nimeä monimenetelmällinen tutkimus. (pernaa 2013, 8.)

Syy miksi tämä opinnäytetyö toteutetaan kehittämistutkimuksena, on että kehittämistutkimuksessa tutkittavaa asiaa tarkastellaan todellisissa olosuhteissa käyttäen tutkittavaa kohdetta, sen kehittämisprosessissa, myös sen syklisestä rakenteesta on hyötyä tässä tutkimuksessa. Kehittämistutkimuksen rakenne perustuu sykliseen rakenteeseen, joka alkaa ongelma analyysillä. Ongelma-analyysin tarkoitus on kartoittaa kehittämisen haasteet, tarpeet sekä mahdollisuudet. Tämän jälkeen kehitetään tutkimussuunnitelma, jonka tarkoitus on pitää kehittämistoiminta systemaattisena. (pernaa 2013, 6.)

Kehittämistutkimuksen syklinen rakenne tässä opinnäytetyössä tulee olemaan kuvion 1 (ks. Kuvio 1) kaltainen. Kuten jo edellä mainittiin, Kehittämis-sykli alkaa aina ongelma-analyysillä. Työn toinen vaihe on kehittämissuunnitelman rakennus, johon sisältyy työn teoreettinen osa. Tämän jälkeen alkaa työn kehittämisosuus, jossa kohdetta kehitetään suunnitelman mukaan. Kehittämisvaiheen jälkeen alkaa testaus osuus. Tämän jälkeen siirrytään arviointiin, jossa arvioidaan kehitetty osuus, ja tämän arvioinnin perusteella siirrytään, joko takaisin kehittämiseen, suunnitelman päivittämiseen, toiseen sykliin tai työn lopetukseen.





kuvio 1. Kehittämistutkimuksen syklisen rakenteen havainnollistaminen. (pohjautuu Pernaan artikkelin kuvaan 3.)

### 2.3 Eettisyys ja tietoperusta

Jotta Tutkimusta voidaan pitää luotettavana ja hyväksyttävänä tutkimuksena, täytyy sitä tehdessä noudattaa hyviä tieteellisiä käytänteitä, eli hyvää tutkimusetikkaa. Tutkimus etiikan rajat tulevat lainsäädännöstä, mutta tutkijayhteisöt, kuten yliopistot laativat itse tutkimusetikkan säännöt, jotka sovelletaan kullekin yhteisölle sopiviksi. Hyvää tutkimus etikkaa noudattaminen on muun muassa lähteiden, tutkimukseen valittavien laitteiden oikeaoppinen valitseminen, sopimuksien laatiminen ja noudattaminen ja tutkimus aineiston oikeaoppinen käsitteleminen. (Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitteleminen Suomessa 2013, 6–7)

Ja jotta kehittämistutkimuksellisesta opinnäytetyöstä tulisi mahdollisimman luotettava sekä eettinen, niin täytyy sen tietoperusta rakentaa ja suunnitella huolella. Tutkimukseen tietoperustaa ra-

kennetaan testauslaitteen osien kohdalla pääasiassa internetlähteistä, sekä valmistajien dokumenttien perusteella. Tutkimuksen teoriaosan tietoperustaa rakennetaan ammattikirjallisuudesta, internet lähteistä sekä haastattelemalla alan ammattilaisia.

### 3 Laadukas mittaaminen

#### 3.1 Metrologia

Jotta voidaan ymmärtää, mitä laadukas mittaaminen tarkoittaa ja mitä kaikkea kuuluu laadukkaaseen mittaukseen, niin on hyvä tietää mitä tarkoittaa metrologia. Metrologia on tieteenala, joka käsittelee mittauksia ja jolla on kolme pääaluetta. Metrologian pääosa-alueet ovat ”kansainvälistesti hyväksytyjen mittayksikköjen määritelmä”, ”mittayksikköjen toteuttaminen tieteellisin keinoin” ja ” jäljitettävyysetjun muodostaminen mittauksen tarkkuuden dokumentointia varten. Metrologia on myös luokiteltu kolmeen osaan, jotka ovat: tieteellinen metrologia, teollisuusmetrologia ja lakisääteinen metrologia. (Metrologiasta lyhyesti 2008, 9–10.)

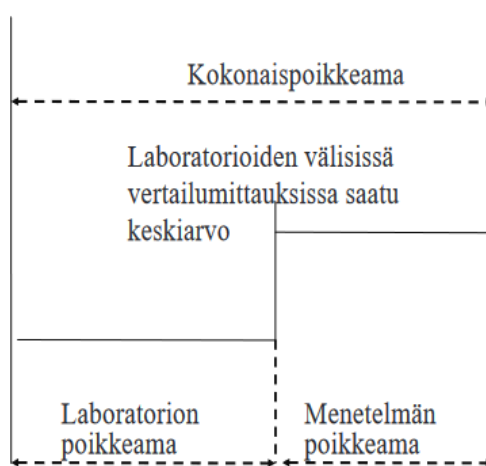
Teollisuusmetrologia nimensä mukaan keskittyy teollisuuteen. Tämän osa-alue on kehitelty, jotta teollisuuden tuotannossa ja tuotekehityksessä käytettävät mittalaitteet voidaan todentaa päteviksi kuhunkin mittaukseen. Työskenneltäessä teollisuusmetrologian parissa, kuten laadunvalvonnassa, on mittauksen jäljitettävyyden nousemassa tärkeämmäksi kuin itse mittaus. (Mts. 10–11.)

Metrologisella jäljitettävyydellä tarkoitetaan, että mittatuloksesta on dokumentointi, josta selviää kaikki mittauksen vaiheet, jotka voivat aiheuttaa mittausepävarmuutta. Jäljitettävyysetjun tarkoitus on myös mahdollistaa mittauksen yhdistäminen referenssin. Referenssin on tarkoitus olla korkealaatuinen ja tarkka mittaus, josta voidaan määrittää mittauksille normaali taso. (laadukkaan mittaamisen perusteet 2011,28.)

#### 3.2 Laadukkaan mittauksen käsitteitä

**Harhalla** tarkoitetaan mittauksen virhettä, kuten systemaattista virhettä. Systemaattinen mittavirhe tarkoittaa virhettä, joka pysyy vakiona tai vaihtelee ennustettavasti mittauksesta toiseen.

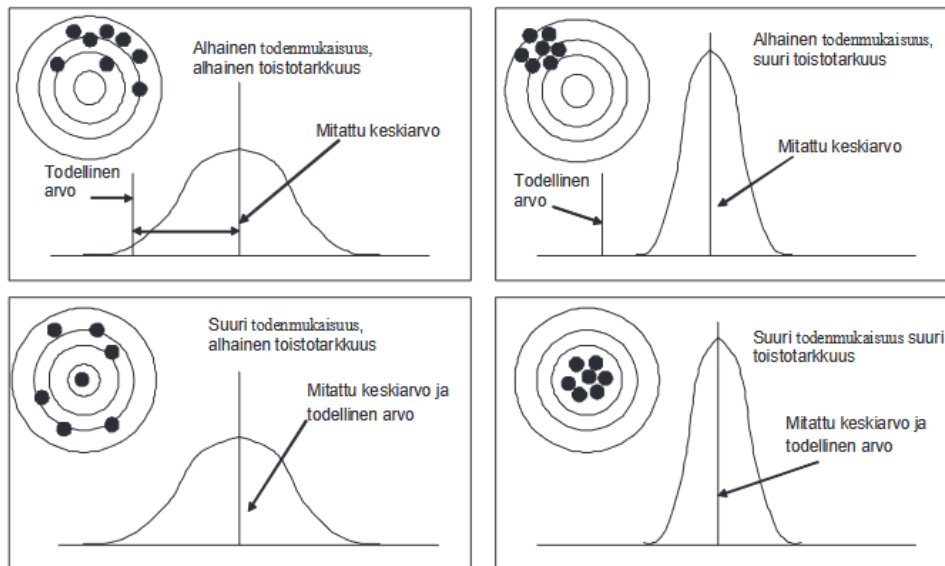
Syitä systemaattiseen virheeseen voivat olla esimerkiksi mittalaitteen väärinkäyttö tai mittalaitteen huonokunto. Laadukkaassa mittauksessa on tärkeä tietää myös mittauksen kaikkien virheiden summa, jota kutsutaan **kokonaispoikkeamaksi**. Tällä tarkoitetaan mittatuloksen ja teoreettisen mittatuloksen erotusta. Kokonaispoikkeamaan vaikuttaa esimerkiksi kuvion 2 (ks. Kuvio 2) mukaiset seikat. (laadukkaan mittaamisen perusteet 2011,14)



kuvio 2. Kokonaispoikkeama (laadukkaan mittaamisen perusteet 2011. 15)

**Häiriökestävyys** kuvaa testausmenetelmän herkkyyttä ulkopuolisille häiriöille. Tämän kaltaisia häiriöitä voivat olla esimerkiksi testauksen suorittaja ja ympäristön vaihtelut, kuten lämpötilan-, ilman kosteuden-, pölymäärän- ja ulkopuolisenvälön vaihtelu. (Mts. 16–17.)

Mittauksen **tarkkuus** on mittatuloksen mitatun ja tuloksen todellisen arvon yhtäpitävyys (ks. Kuvio 3). Tarkkuudella pyritään arvioimaan mittauksen systemaattisia sekä satunnaisia virheitä, ja tarkkuutta tarkastellaan tutkimalla todenmukaisuutta. Mittauksen **todenmukaisuus** selvitetään esimerkiksi vertaamalla testituloksia referenssimittatulokseen. Referenssi mittatuloksena käytetään Sertifioituja mittatuloksia, mutta mikäli sertifioitua tulosta ei ole saatavilla, niin referenssi mittatuloksen voi tehdä itse. (Mts. 18–19.)



kuvio 3. Mittauksen tarkkuus ja todenmukaisuus (laadukkaan mittaamisen perusteet 2011. 19)

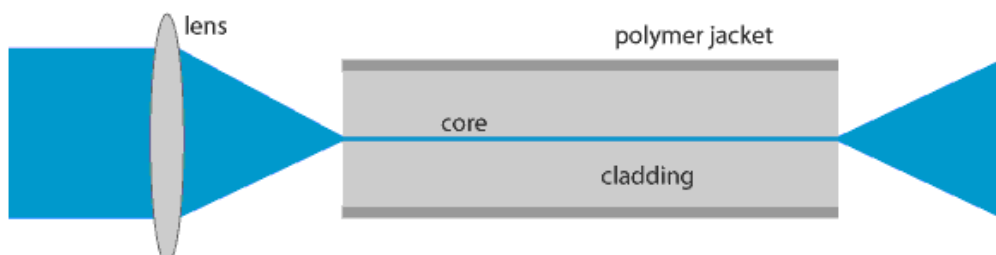
Testauksen **toistettavuus** tarkoittaa, että kyseisen testin tehnyt toistaa testin käyttäen samoja laitteita samoissa olosuhteissa lyhyellä aikavälillä. Toistettavuus todetaan tekemällä useampia testejä samankaltaisesta näytteestä, joiden välillä voi olla vain pientä vaihtelua. Toistettavuus eroaa Testauksen uusittavuudesta hyvinkin paljon. **Uusittavuudella** tarkoitetaan kykyä tehdä sama testaus samasta testikappaleesta eri laboratorioissa käyttäen vastaavaa laitetta. Ja testi voidaan todeta uusittavaksi, kun samasta näytteestä saadaan vastaava testituloks. Uusittavuutta tutkitaan esimerkiksi, kun kehitetään uutta testausmenetelmää. (Mts. 19–20.)

## 4 Optiset kuidut

Valokuitu on hyvin ohut lasivalmisteinen johdin, joka on yleensä osa tiedonsiirtojärjestelmää. Dataliikenne käytössä olevissa valokuiduissa, data kulkee samoin, kun perinteisissä johtimissa, eli binääritietona. Binääritiedolla tarkoitetaan, että johtimeen johdetaan pulssitettua signaalia, eli tässä tapauksessa valon arvo on 1 tai 0, eli valoa kulkee tai ei kulje. Valokuituja pitkin voidaan myös tuoda analogiasignaalia, jolloin tieto kulkee valomääränä. Optisessa mittaamisessa voidaan myös tuoda kuvaa valokuitukimppua pitkin. (Paschotta n.d a.)

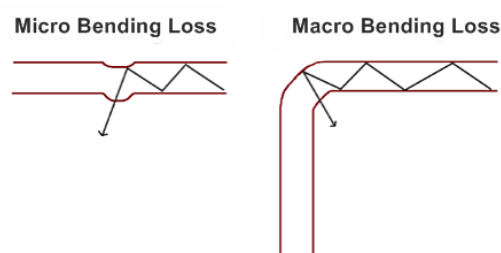
## 4.1 Valokuitu

Valokuitu koostuu päätylinssistä, ytimestä, päällysteestä ja suoja-kuoresta. Kuidun linssin tarkoitus on ohjata valo kuituun ja kuidusta pois. Valokuidun tärkein osa eli ydin koostuu useasti erikoislasista tai muovista, kuten kvartsilasista tai akryylista, ytimen halkaisija on yleensä noin 9  $\mu\text{m}$ . Kuidun ytimen ympärillä on päällyste, jonka tehtävä on pitää heijasteleva valo ytimessä, tämän päällyste kerroksen halkaisija on yleensä 125  $\mu\text{m}$ . Uloin kerros valokuiduissa on yleensä muovinen päällyste, joka estää kuitua vaurioitumasta. Näitä suojaavia kerroksia on monesti useampi kappale, riippuen kuidun käyttösijainnista (ks. Kuvio 4). (Paschotta n.d a.)



kuvio 4. Valokuidun rakenne (Paschotta N.d a)

Kuten myös perinteisissä metallivalmisteisissä johtimissa, niin myös valokuiduissa syntyy häviöitä. Valokuiduissa syntyviä häviöitä ovat esimerkiksi valon hajonta, taitoshäviöt ja häviöt kuidun päissä. Valon hajonnalla tarkoitetaan, kun valo osuu kuidun sisällä olevaan epäpuhtauteen, joita voi syntyä kuitua valmistaessa. hajonta kohdassa valo osuu epäpuhtauteen ja pirstaloituu kuituun. Taitoshäviöllä tarkoitetaan, kun valokuitua taitetaan liikaa, jolloin valon ei enää kimpoa kuidussa eteenpäin (ks. Kuvio 5) (Margaret 2021.)



kuvio 5. Valokuidun taitoshäviöt (Margaret 2021)

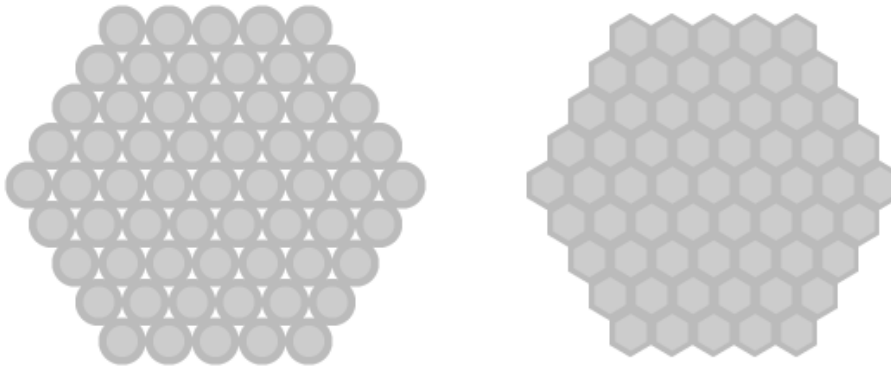
Valokuitujen käyttö on yleistynyt viime vuosikymmeninä monilla eri aloilla ja jopa kotitalouksissa. Perinteisesti digitaalisen datan siirto tapahtuu metallisia johtimia pitkin, joissa syntyy häviöitä ja häiriöitä enemmän, kuin valokuiduissa, ja tämän vuoksi perinteiset johtimet korvataan valokuiduilla. Korvaus tehdään pääasiassa pituudesta johtuvien häviöiden minimoimiseksi, muita etuja ovat hinta ja tiedonsiirron nopeus. (Paschotta n.d. a)

Valokuituja käytetään pääasiassa digitaalidatan tiedonsiirrossa, kuten kotitalouksien internet ja kaapeli televisio datan. Teollisuudessa valokuitujakuituja käytetään suurimmalta osin digitaalidatan siirtoon. Teollisuudessa toinen käyttökohte valokuiduille on optiset mittalaitteet, joita ovat esimerkiksi rajakytkin tyyppiset anturit. (Paschotta n.d. a)

## 4.2 Kuitukimppu

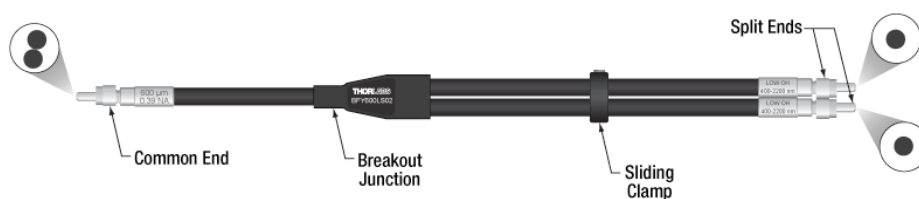
Valokuitukimppujen rakenne on ulkoisesti hyvin samankaltainen, kuin yksittäisen kuidun rakenne. Kuitukimppun rakenne eroaa tavallisesta yksi ytimisestä kuidusta pääosin päätylinssien ytimien ja päällysteiden osalta. Suurin ero on ytimen rakenteessa, koska kuitukimppussa valokuituja on kymmenistä satoihin. Suurella kuitujen lukumäärällä on monia hyötyjä, esimerkiksi kuitukimppu kestää taivutuksia enemmän kuin yksittäinen kuitu sekä tietäntyyppisestä kuitukimppusta voi hajota yksittäisiä kuituja ilman merkittäviä seurauksia. (Paschotta n.d. c)

Kuitukimppun päädyssä kuidut niputetaan yhteen, ja tähän on monta erilaista tekniikkaa. Kuidut voidaan joko jättää yhteen ilman väliainetta, jolloin kuitujen väliin jää rakoja. Tämä johtaa kimpun hyötysuhteen huononemiseen, koska osa tulevasta valosta joutuu kuitujen väliin. Tämän voi välttää joko liimaamalla kuidut yhteen, tai vaihtoehtoisesti sulattaa kuidut yhteen. Kuitujen yhteen sulatus tapahtuu kuitukimppun rakennusvaiheessa, jolloin kuidut puristetaan tiiviisti yhteen, kun ne ovat vielä kuumia. Kuitujen sulatus on hyötysuhteen kannalta kaikkein paras ratkaisu (ks. Kuvio 6). (Paschotta n.d. c)



kuvio 6. Vasemmalla poikkileikkaus kimpun keskeltä, oikealla kuitukimpuun yhteen sulatetun pään poikkileikkaus. (Paschotta n.d. c)

Valokuitukimppujen päädyt useasti profiloidaan ja haaroitetaan oikeaksi kuhunkin sovellukseen sopiviksi. Päädyn profilointi kuidun laitepäässä kuten, valokuituvahvistimen päässä on esimerkiksi pyöreä, jotta se olisi helppo liittää laitteistoon, ja jotta valo kulkeutuisi hyvin kuituun. Kuidun mitaavassa päässä päädyn profilointi voi olla hyvinkin erilainen, kuten esimerkiksi viivamainen, jolloin yksittäiset kuidut ovat rinnakkain. Valokuitukimppuja voidaan myös haaroittaa useampaan kuitukimppuhaaraan. Kuitukimpuun haaroitus tyyliä on myös useita, kuhunkin sovellukseen sopivia. Kuitukimppuja voidaan haaroittaa esimerkiksi niin, että samassa kuitukimpuksa on kaksi erillistä valokuitukimppua, kuten lähettävä ja vastaanottava kimppu. Toinen esimerkillinen tyyli on Y-haarainen, joka tarkoittaa, että yhdestä kuitukimpuksa haaroitetaan useampaan pienempään kuitukimppuun tai yksittäisiin kuituihin (ks. Kuvio 7) (Paschotta n.d. c)



kuvio 7. Y-haaroitettu kuitukimppu (Bifurcated Fiber Bundles: 2 Fibers. N.d.)

Valokuitukimppuja käytetään useissa eri kohteissa ja eri käyttötarkoituksissa, kuten valaistuksessa, kuvan siirtämisessä sekä teollisuuden antureissa. Kuluttajaympäristöissä kuitukimppuja käytetään pääasiassa vain valaistuksen luomiseen, jolloin kyseessä on Y-haarainen kuitukimppu. Toinen esi-

merkillinen käyttötarkoitus on kuvan siirtäminen kuitukimppua pitkin. Tämänkaltaisia kuituja käytetään, kun kuvattava kohde on hyvin pieni ja paikassa, jonne ei voida kameraa viedä, kuten esimerkiksi sairaalaympäristöissä. Kuvattaessa kuitukimppun toiminta perustuu siihen, että kimpun yksi kuitu vastaa kameran yhtä pikseliä. Tämänlaisissa kuitukimpuissa kuituja on jopa 100 000 pientä kuituja, joiden koko on alle 10 mikrometriä. (Paschotta n.d. c)

Teollisuus käytössä kuitukimppuja käytetään antureissa, jotka ovat pääperiaatteeltaan analogisia. Tämänkaltaisia antureita käytetään esimerkiksi reunanseurannassa tai materiaali analyysissä. Reunanseurannassa käytetään esimerkiksi suoraa lähetystapaa, jolloin kaksi viivatyylistä kuitupäätä ovat vastakkain, ja kun mitattava reuna peittää mittapäidenväliin syntyvää valoverhoa, niin muuttuu myös mitattavan valon määrä, josta saadaan analogisignaali. Toinen esimerkillinen käyttökohde kuitukimpuille on materiaalianalyysi, jolloin käytetään esimerkiksi V-heijastukseen tai suoraan heijastukseen perustuvaa mittausta. V-heijastuksella tarkoitetaan, että kuitukimppun lähettävä ja vastaanottava mittapää ovat rinnakkain. Lähettävä ja vastaanottava mittapää ovat kulmassa, jolloin valo heijastuu mitattavasta kohteesta vastaanottavaan mittapähän. Tässä mittatyylissä mitattava materiaali vaikuttaa kuinka paljon valoa heijastuu takaisin, josta taas saadaan valomäärän perusteella analogisignaali. Kun taas suoraan heijastukseen perustuvassa mittauksessa kuitukimppuja on vain yksi, jolloin lähetetty- ja vastaanotettu valo kulkee samassa kuitukimppussa. (Lauttamus 2022.)

## **5 Materiaalia lisäävä valmistus**

### **5.1 3D tulostuksen periaate**

Materiaalia lisäävä valmistaminen eli AM-tekniikka tunnetaan nykyisin paremmin nimellä 3D-tulostaminen. Kyseinen tekniikka on lisääntynyt todella paljon viimeisten 20 vuoden aikana teollisuudessa sekä myös kotitalouksissa. Pääasiassa 3D-tulostamalla voidaan tehdä kappaleita useasta eri muovivalmisteesta sekä useista metalleista. (Gurr, M. Ligon, S. Liska, R. Mülhaupt, R. & Stampfl, J. 2017, 10213.)

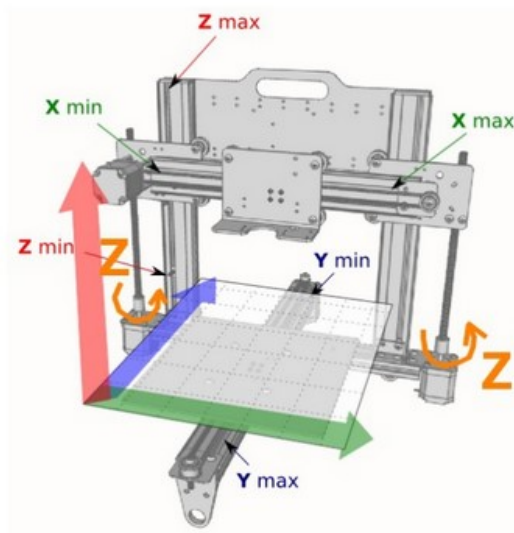


Kuin myös eri materiaali vaihtoehtoja, niin on myös paljon erilaisia tulostimia. On olemassa niin sanottuja pientulostimia, joita käytetään enemmän kuluttaja- ja toimistoympäristöissä. Pientulostimilla tehdään yleensä prototyyppejä ja yksittäisiä pienosia. Toinen tulostin kokoluokka on teollisuus tulostimet, joita käytetään esimerkiksi teollisessa tuotannossa sekä lääketieteessä, mutta myös kuluttajilla. (Ohjeita turvalliseen 3D-tulostukseen. 2016.)

Myös tulostustekniikoita on useita erilaisia, koska erilaisilla tekniikoilla on toisistaan eroavia ominaisuuksia, kuten tulostusnopeus ja -tarkkuus. Kaksi yleisintä tulostustekniikkaa ovat materiaalin pursotus ja nesteen fotopolymeerisointi. Mutta vaikka menetelmiä on useita niin kaikkia näitä yhdistää se, kuinka kappaleen valmistaminen tapahtuu. 3D-tulostettaessa kappale suunnitellaan 3D-piirto-ohjelmien avulla, jonka jälkeen se tuodaan slicer-sovellukseen. Slicer-sovellus jakaa 3D-mallin tulostuskerroksiksi ja laskee tulostimen liikeradat. Kyseisessä sovelluksessa pystyy määrittämään muun muassa halutun kerrospaksuuden, sekä tulostusresoluution. (Gurr ym. 2017, 10213–10214.)

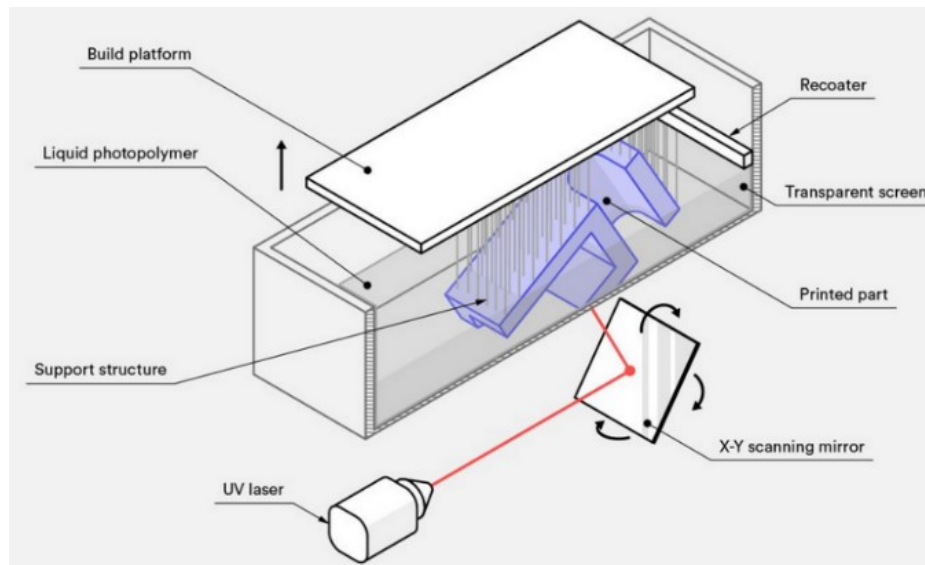
## 5.2 Tulostus tekniikat

Yleisin tulostustekniikka on FDM, joka tulee sanoista Fused Deposition Modeling, eli materiaalin pursottaminen. Tekniikka perustuu siihen, että kiinteä tulostettava materiaali pursotetaan riittävän kuumalla suuttimella lävitse, jolloin se sulaa ja pehmenee. Suutin pursottaa sulan materiaalin tulostustasolle kerroksittain, joiden paksuus on yleensä noin 0.1–0.3 mm. FDM-tekniikan tarkkuus eli tulostusresoluutio on keskimäärin noin 0.1–0.15 mm. (Gurr ym. 2017, 10247–10250.) FDM tulostimen tarkkuus tulee tulostustekniikasta. Kuten Savonia-ammattikorkeakoulun tietopankissa on kerrottu, useat FDM tekniikkaa käyttävien tulostimien X-, Y- ja Z-akselit liikkuvat servomootoreilla. Se kuinka liikeradat ovat toteutettu riippuu täysin tulostimen valmistajasta. (Materiaalin pursotus n.d.) Esimerkiksi tulostintaso liikkuu vain Y-akselilla ja tulostinpää liikkuu X- ja Z- akselilla (ks. Kuvio 8).



Kuvio 8. FDM-tekniikan 3D-tulostin, sen geometrian ja akselien selvennys( Samantha Van Rijs 2017.)

Stereolitografia eli nesteen kovettaminen altaassa, josta käytetään myös lyhennettä SLA tai SL (nesteen fotopolymerisointi n.d). SLA-on toiseksi yleisin tulostintekniikka kuluttajapuolella heti FDM-tekniikan jälkeen. Gurrn ja muiden (2017) artikkelissa kerrotaan SLA-tekniikasta hyvinkin paljon. Mutta lyhyesti Tekniikka perustuu siihen, että nestemäistä fotopolymeeriä kovetetaan UV-laseria käyttäen. Toisin kuin yleisimmissä FDM-tulostimissa, SLA-tulostimen peti liikkuu vain Z-akselilla, ja X- ja Y-akselin liikkeen hoitaa peili (ks. kuvio 9). Peilin tehtävä on ohjata laservalo haluttuun pisteeseen, josta neste halutaan kovettaa. SLA-tulostimilla myös päästään huomattavasti parempaan pinnanlaatuun sekä tarkkuuteen, FDM-tekniikkaan verrattuna. SLA-Tulostimissa tarkkuus on keskimäärin noin 0,05–0,1 mm (Gurr ym. 2017, 10217–10220)



Kuvio 9. SLA tulostustekniikan toimintaperiaate (What is SLA 3D printing n.d.)

### 5.3 3D tulostuksen edut ja haitat

3D-Tulostaminen mullistaa valmistustekniikkaa tuomalla monia hyviä puolia, kuten pienikokoinen, helppokäyttöinen, sekä nopeaan kokeiluun ideaali. Mutta vaikka 3D-tulostimissa on paljon hyvää, niin on myös tärkeä tiedostaa niiden haittapuolet.

Yksi suurimpia käyttökohteita 3D-tulostimille on prototyypit ja pienvaraosat. AIPworksin sivustolla kerrotaan, että 3D-tulostaminen sopii moneen, kuten prototyyppien, muottien, apuvälineiden sekä lopputuotteiden valmistamiseen. Sivustolla kerrotaan myös se sopivan moneen erilaiseen ympäristöön kuten oppilaitoksiin, messuille sekä lääketieteeseen. (3D-tulostuksen sovelluskohdeet. N.d.) Myöskin Gurrn ja muiden artikkelissa nousevat nämä samat asiat esille.

Edellä mainittuihin soveltuvuuskohteisiin, etenkin prototyyppien valmistamiseen 3D-tulostimet ovat ideaali valinta useastakin syystä. Esimerkiksi hukkamateriaalin vähentäminen on todella suuressa asemassa, ja kun valmistaminen tapahtuu 3D-tulostimella, niin siihen ei tarvitse rakentaa minkäänlaisia muotteja eikä muita sovittimia. 3D-tulostimella voidaan myös valmistaa geometrisesti monimutkaisia kappaleita, joihin perinteiset valmistustekniikat eivät kykene. Muita etuuksia ovat esimerkiksi nopeat valmistusajat, joka edesauttaa optimointia sekä testailua. (3D-tulostuksen sovelluskohdeet. N.d.)

Työterveyslaitos on selvittänyt AM-tekniikan terveydellisiä riskejä. Esimerkiksi FDM-tekniikassa, kun kiinteää tulostusmateriaalia sulatetaan, niin silloin materiaalista irtoaa pienhiukkasia ympäristöön. Tämä sama vaikutus on SLA-tekniikassa, jossa nestemäinen materiaali on altaassa, jolloin sitä voi vaihtua ympäristöön. Tämän vuoksi on tärkeä huolehtia tilaan, jossa tulostin sijaistaa tarpeeksi tehokas tuuletus, myös tulostimen koteloiminen on tehokas tapa hallita tätä terveysriskiä. Mutta SLA-tekniikassa on terveysriskinä myös itse tulostus materiaali, eli nestemäinen fotopolymeeri. Tämän materiaalin terveys riskit liittyvät nesteen läikkymiseen, eli jos nestettä pääsee läikkymään iholle, niin tästä voi syntyä voimakkaita allergisia reaktioita. (Ohjeita turvalliseen 3D-tulostukseen 2016.)

## 6 Kehittämistyö

### 6.1 Alkuperäinen mittausmenetelmä

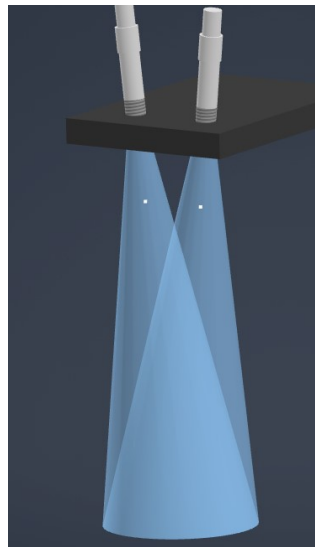
Alkuperäinen valokuitukimppujen testauslaitteisto koostuu virtalähteestä, valokuituvahvistimesta, yleismittalaitteesta sekä testaussovittimesta. Testauksessa käytetään virtalähdettä syöttämään kuituvahvistinta 24 voltin jännitteellä, kuituvahvistimen analogi lähtökanavasta mitataan 3.5–22.5 mA virtaviesti. Alkuperäisessä testaus menetelmässä valokuitujen mittaaminen perustui V-heijastus mittausmenetelmään.

Kuitukimppujen alkuperäinen testausmenetelmä oli epäluotettava, johtuen testaussovittimesta aiheutuvasta mittausepätarkkuudesta. Alkuperäisessä testausmenetelmässä kuitukimppujen mittapääät asetettiin käsin Kuvan mukaisesti (ks. Kuvio 10). Koska mittaussovitin on vain 20 mm paksu ja reiät ovat liian suuret, niin kuitupää pääsi heilumaan sovittimessa, joka johtaa valokeilojen liikumiseen. Koska testaussovitin on 150 mm korkeudella, niin vain 5 asteen liike mittapäässä aiheuttaa 13 mm liikkeen heijastuspinnassa.

$$\tan(\alpha) = \frac{a}{b} \rightarrow \tan(\alpha) * b = a$$

## 6.2 Kehittämisidea

Testaussovittimen kehittämiseen oli kaksi erilaista mittaustyyli ideaa, joita alettiin vertailemaan. Ensimmäinen mittaustyyli oli V-heijastukseen perustuva mittausta, jota myös käytettiin alkuperäisessä testaussovittimessa. Syy miksi ensimmäiseksi kehittämiskohteeksi valittiin V-heijastus, oli että se on käytössä alkuperäisessä testausjärjestelmässä, mutta myös V-heijastus on hyvin lähellä sovellusta, joihin kyseisiä valokuitukimppuja käytetään. Kyseisessä mittaustyyliä valokuitukimppun lähettävä- sekä vastaanottavapää ovat rinnakkain pienessä kulmassa, jolloin kuitujen valokeilat ovat päällekkäin (ks. Kuva 10). Mittaus perustuu siihen, että lähettävästä kuitupäästä tuleva valo heijastuu vastaanottavaan kuituun.



kuvio 10. Vanhan kuitusovittimen malli

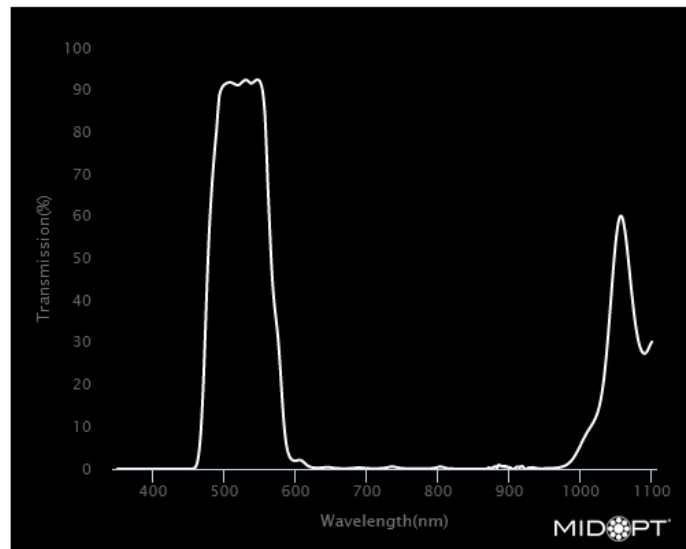
Toinen kehittämisidea, joka valittiin vertailuun, oli suoramittaustyyli. Suorassa mittaustyyliä kuitukimppun lähettävä- ja vastaanottavapää ovat vastakkain lähellä toisiaan. Suoramittaustyyliä yleisin valokuitujen mittaustekniikka sekä valokuiduilla että valokuitukimpuilla. Suora mittaustyyli valittiin toiseksi vertailukohteeksi, koska tämän antama mitta-arvo perustuu pääasiassa vain valokuidun valonjohtamiskykyyn. Myös haastattelussa Ilonen (2022) kertoi, että jos valokuidunpäät laittaa vastakkain, sekä lähekkäin, niin tämä voisi pienentää kuitupäiden heilumisesta johtuvaa mittavirhettä.

### 6.3 Kehittämistyön kulku

Ensimmäinen työvaihe oli kerätä mittadataa vanhasta mittaustekniikasta, eli V-heijastukseen perustuvasta tekniikasta. Valokuituvahvistin mittaa valomäärää, joka muunnetaan vahvistimessa analogisignaalksi. Mittadatan keräämiseen käytettiin viittä eri kuitukimppua, joiden laatu sekä pituus vaihtelevat. Mutta tässä tutkimuksessa se ei vaikuttanut koska työn tavoitteena oli saada toistuva mittaus.

Mittauksien alussa valokuituvahvistin kytketään päälle ja annetaan lämmitä 2 tunnin aja. Siltanen (2022) kertoi, että Vahvistin joudutaan lämmittämään, jotta se saavuttaa todellisen mitta-arvon, johtuen vahvistimen rakenteesta sekä vahvistimessa käytetyistä komponenteista kuten transistorivahvistimista (Siltanen 2022). Vahvistimen lämpenemisen jälkeen jokainen kuitukimppu mitattiin 10 kertaa niin, että kuitupäät pidettiin käsin oikeassa asennossa sekä niin, että kuitupäät olivat vapaana. Mittauksen tarkoitus oli selvittää mittatuloksenvaihtelun suuruus, sekä kerättyä dataa voitaisiin käyttää kehitystyön tuloksen vertailuun. Samalla Kaikkien kuitukimppujen kuitupäiden halkaisijat mitattiin, ja selvitettiin toleranssi rajat, jotta kuitupään mallintaminen olisi mahdollista.

Ensimmäiseksi kehittämiskohteeksi valikoitui suoramittaustyyli, koska suoran mittaustyylin suurimpana etuutena on kuitupäiden kohdistuksentarkkuus. Ideana oli asemoida kuitupäät vastakkain, niin että päiden väliin jää vain pieni rako. Ongelmaksi tässä tyylissä tuli ylivalotus, koska kuitupäät ovat normaalisti noin 150 mm korkeudella V-heijastus asennossa, jolloin kuituvahvistin on säädetty tälle matkalle sopivaksi. Tästä johtuen kuitupäiden väliin jouduttiin sijoittamaan sopiva valosuodatin, jolla valoteho saataisiin pudotettua, takasin aktiiviselle mitta-alueelle. Suodattimen valinnassa kokeiltiin ensin vaimentavaa harmaasävy-suodatinta, mutta testauksen yhteydessä todettiin, että kyseinen suodatin ei toiminut. Tämä johtui siitä, että vahvistimen syöttämä valoteho oli liian suuri pienelle etäisyydelle, ja vahvistimen syöttämä infrapunavalon pääse täysin suodattimen lävitse. Jotta mittasovitin saataisiin pidettyä kompaktin kokoisena ja valokuitukimppujen päät saadaan pidettyä lähekkäin, niin sopivan suodattimen löytäminen oli ehdotonta. Sopiva valosuodatinta etsittiin suodatin katalogin- ja kokeilun perusteella. Suodattimeksi valikoitui Cyan band-pass-suodatin (ks. Kuvio 11). Tämä oli erikoinen valinta, sillä valovahvistimen lähettämä valo on infrapunavaloa, jonka taajuus on noin 870 nm.



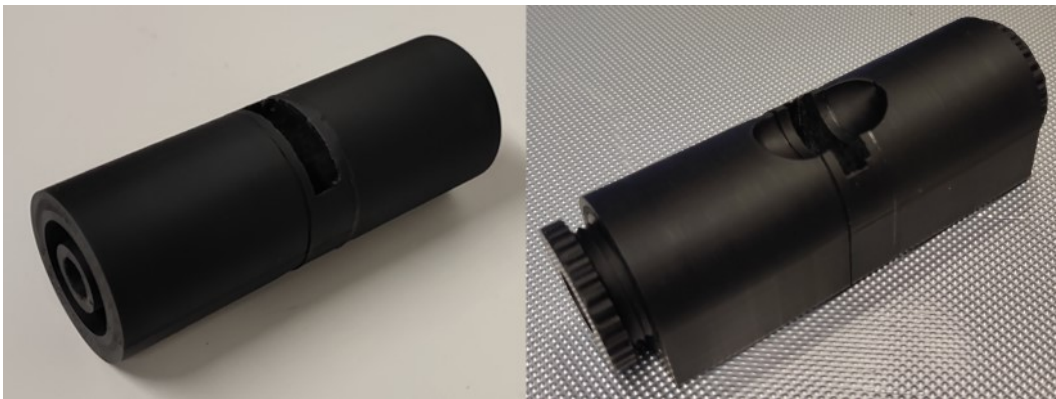
kuvio 11 Cyan-valosuodatin (BP505 cyan bandpass filter n.d)

### 6.3.1 Kuitusovittimen suunnittelu

Kun edellä mainittuihin haasteisiin oli saatu kehiteltyä suunnitelmat, jolla ne voitaisiin ratkaista, niin seuraava työvaihe oli suunnitella kuitusovitin. Kuitusovittimen suunnittelemiseen ja mallintamiseen käytettiin Autodeskin 3D-mallinnus työkalua Inventoria, Cura Slicer-sovellusta, sekä FDM-tyylistä 3D-tulostinta. Suunnitellessa otettiin huomioon mahdolliset häiriöitä aiheuttavat tekijät kuten ulkopuolistenhäiriöiden vaikutus mittaukseen, Kuitupäiden heiluminen mittauksen aikana sekä kuitupään asemointi sovittimessa. Ulkopuolistenhäiriöiden, kuten pölyn, valon tai muiden vaikutus mittaukseen pyrittiin eliminoimaan suunnittelemalla sovitin niin, että sovittimen rakenne estää häiriöiden vaikutuksen mittaukseen (ks. kuvio 12). Kuitupäiden heilumisesta aiheutuvia häiriöitä eliminoitiin niin että kuitusovittimesta suunniteltiin riittävän suuri, jotta kuitupää on kokonaan sovittimen sisällä. Mutta myös niin, että sovittimesta pyrittiin suunnittelemaan juuri oikean kokoinen, jotta kuitupää ei voi heilua sovittimessa. Kolmanneksi suurin haaste eli kuidun asemointi sovittimeen ratkaistiin toteamalla kuitukimpun suojakuoressa olevan magneettista materiaalia. Tämän ansiosta kuitusovittimeen suunniteltiin magneetti, joka vetää kuitupään sovittimen perälle, sekä pitää ne paikalla.

### 6.3.2 Kuitusovittimen valmistaminen

suunnittelu sekä mallinnus vaiheen aikana uudesta sovittimesta 3D-tulostettiin useita kappaleita, jolloin sovittimesta myös syntyi usea prototyyppi. Kehittämistutkimuksen tavoin mallinnettu kappale testattiin ja arvioitiin, jonka jälkeen kappaleesta suunniteltiin uusi prototyyppi. Kaiken kaikkiaan prototyyppinä syntyi neljä kappaletta (ks. kuvio 12). Mutta vaikka prototyyppinä syntyi neljä kappaletta, jouduttiin kutakin prototyyppiä tulostamaan useaan kertaan, johtuen 3D-tulostukseen oikeiden tulostusparametrien etsimisestä.



kuvio 12. Testisovittimen proto\_2 ja proto\_4

Ensimmäisellä prototyypillä oli tarkoitus todeta kuitupään asemointi riittävän tiiviiksi, sekä vahvistaa oikean valosuodattimen valinta. Kuitusovittimen proto\_1 testattiin käyttäen edellä mainittuja testauskomponentteja niin, että heiluttaessa kuitukimppua sovittimesta saatu mA-viestin vaihtelu olisi maksimissaan 1 % mitta-alueesta. Valosuodattimen valinnassa pyrittiin siihen, että vahvistimen antaman mA-viesti olisi mitta-alueen puolivälissä.

$$22.5 - 3.5mA = 19mA * 0.01\% \Rightarrow 0.19mA$$

Prototyyppeihin kaksi lisättiin magneetti, jolla kuitupään oikea asemointi pyrittiin varmistamaan. Ja prototyypissä kolme pyrittiin optimoimaan kuitusovittimen geometriset toleranssit. Tämä jouduttiin tekemään usealla eri prototyypin alaversiolla, koska tulostettaessa kappaleen geometriset mitat saattavat vaihdella jopa 0.5 mm, riippuen tulostusparametreista. Vaikuttavia tulostusparametreja ovat esimerkiksi kerroksen paksuus, materiaalin pursotusmäärä, tulostuksen nopeus, tulostustason tasoitus sekä materiaali ja sitä kautta tulostuslämpötilat.



Kaikki aikaisemmat versiot tulostettiin PLA-muovista, koska tämä on edullista, kohtalaisen pehmeää eli helposti jälkikäsiteltävää sekä helppoa tulostaa, niin se sopii parhaiten prototyyppien valmistamiseen (FDM 3D printing materials compared n.d.). PET-muovin etuuksia ovat esimerkiksi kestävyys kemikaaleja sekä kulutusta vastaan (Mt.). Neljäs eli viimeisin prototyyppi haluttiin valmistaa PET-muovista, sillä kappaleen pitää kestää kulutusta, jota syntyy, kun kuitupäät asetetaan sovittimeen.

### **6.3.3 Vaihtoehtoinen testaustyyli**

Vaihtoehtoinen kuitusovittimen malli, jota oli tarkoitus vertailla prototyypin tavoin, olisi ollut V-heijastukseen perustuva mittaus. Tämän tekniikan vertailu jäi vain teoriatasolle. V-heijastukseen perustuva mittaus olisi ollut lähempänä loppusovellusta, johon kyseisiä kuituja käytetään, jolloin myös testaustekniikka olisi ollut käytännön läheisempi. Mutta tällä tekniikalla toteutettu mittasovitin olisi ollut huomattavasti suuremman kokoinen. Ja myös herkempi ulkopuolisille häiriöille, ellei sovittimesta olisi suunniteltu suljettua, kuten suorasta-sovittimesta. Suljetun rakenteen toteuttaminen olisi taas lisännyt kappaleen kokoa, sekä materiaali kulutusta. V-heijastukseen perustuvassa mittauksessa, myös kuitupäiden asemointi olisi jouduttu toteuttamaan tarkemmin, koska kuitupään ja heijastusmateriaalin väliin olisi pitänyt jättää noin 150 mm etäisyys. Koska ensimmäisen mittaustekniikan mallin rakentamiseen, mallin geometristen toleranssien- sekä tulostusparametrien säätämiseen kului huomattavan paljon enemmän aikaa, kun alun perin oli suunniteltu, niin vaihtoehtoisen mallin vertaileminen jäi vain teoreettiselle tasolle.

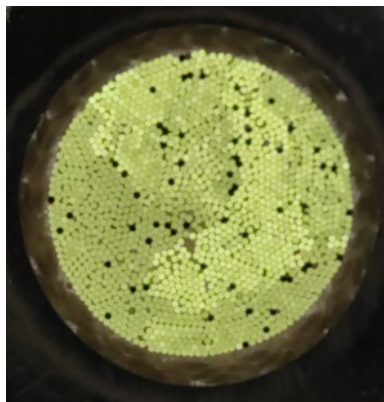
## **6.4 Kehittämistyön haasteet**

Työn tavoitteena mittasovittimesta oli tarkoitus saada mittausteknisesti laadukas. Kuten teoriaosuudessa on kerrottu laadukkaanmittauksen vaikuttavia tekijöitä ovat esimerkiksi, mittauksen toistettavuus ja uusittavuus. Etenkin toistettavuuden saavuttaminen oli tässä työssä suurimmassa asemassa.

Koska mittauksesta pyritään saamaan toistettava ja uusittava, niin yksi suurimmista tekijäistä, joka näihin vaikuttaa on kokonaispoikkeama. Tässä työssä kokonaispoikkeamaan vaikuttavia tekijäitä

olivat testin toteuttajan huolellisuus, kuitukimpun asemointi, valofiltterin puhtaus sekä ympäristön lämpötila. Suunnitellessa sovitinta pyrittiin eliminoimaan mahdollisimman monta virheen aiheuttajaa, eli tässä tapauksessa kuidun asemointi. Aikaisemmassa testaustekniikassa testaajan vaikutus kuidun asemointiin oli todella suuri, koska kuidun asemoinnista saatu maksimi vaihtelu oli jopa 14 % mitta-alueesta (ks. Liite 2). Ja kuten aikaisemmassa osiossa on maininta, niin kuidun asemointiin pyrittiin vaikuttamaan niin, että kuidun voi laittaa sovittimeen vain yhdellä tavalla.

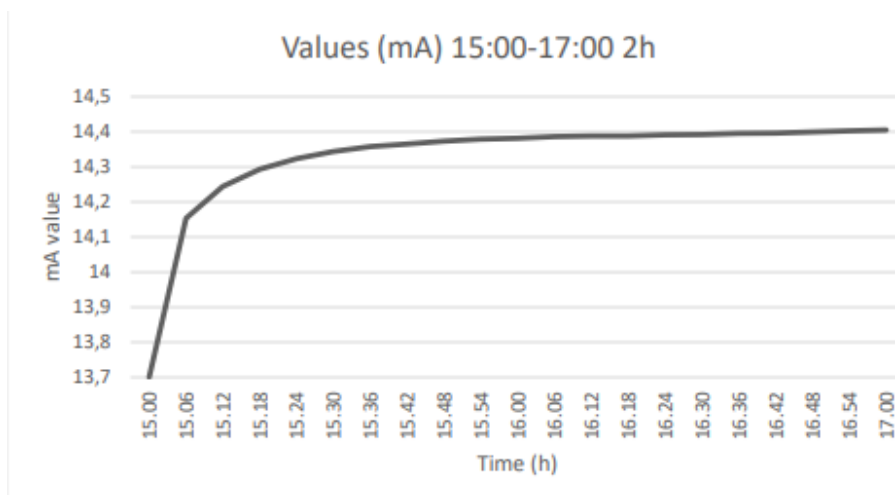
Mutta vaikka kuitu voidaan laittaa vain yhdellä tavalla sovittimeen, niin kuidun orientaatioon eli pyörimiseen ei voitu vaikuttaa, koska kuitukimpun pää on rakenteeltaan pyöreä. Orientaation vaikutuksen määrä on noin 1 % (ks. Liite 2). Kun aihetta alettiin tutkimaan enemmän, niin todettiin orientaation vaikutuksen syntyvän kuitukimpun rakenteellisista syistä (ks. kuvio 13). Kuvassa käy ilmi, että kuitukimpun valotasapainossa on vaihtelua, jolloin kuitua pyörittäessä, vastaanottavan ja lähettävän kuidun ”hyvät” kuidut ovat erikohdissa. Kuva onnistuttiin ottamaan puhelimen macro-kameralla. Kuvaa ei alettu analysoida konenäkösovelluksilla, sillä hyvien kuvien ottamiseen olisi kulunut huomattavan paljon aikaa. Joten konenäkö osuus siirtyi jatkokehityskohteeksi.



kuvio 13. Kuva kuitukimpun päädystä

Tutkimusta tehdessä todettiin myös, että eripäivinä saatiin erilaisia testituloksia samasta kuidusta. Tätä asiaa alettiin tutkimaan, jolloin todettiin myös valosuodattimen orientaation vaikuttavan mitta-arvoon. Tarkemman tarkastelun jälkeen, huomattiin valosuodattimen olevan likainen. ennen puhdistamista valosuodattimesta aiheutui noin 0.1 mA virhe eli noin 0.5 % mitta-alueesta. suodattimen puhdistamisen jälkeen virhe oli noin 0.05 mA, joka tarkoittaa noin 0.25 % mitta-alueesta.

Päivien vaihtelulla myös todettiin olevan toinen mitta-arvoon vaikuttava tekijä, eli ympäristön lämpötila. Jo aikaisemmin tiedettiin, että valokuituvahvistinta joudutaan ”lämmittämään” noin kahden tunnin ajan, jotta vahvistimen mitta-arvo tasoittuu (ks. kuvio 14). Mutta tutkimuksessa myös todettiin ympäristönlämpötilan vaikutus mitta-arvoon. Ja jotta mittauksesta saadaan uusittava, niin täytyi ympäristön lämpötilanvaikutus selvittää.



kuvio 14. Miitavahvistimen lämpeneminen

## 7 Tulokset

Tämän Tutkimustyön tuloksena oli tarkoitus syntyä mittausmenetelmä, ja mahdollisesti tuote. Tässä onnistuttiin osittain, sillä mittausmenetelmää saatiin parannettua. Mutta kuten monet R&D eli research and development, eli tutkimus ja kehittämisprojektit, niin myös tässä saatiin mittaus-tekniikkaa kehitettyä, ja myös löydettiin monia lisätutkimuksia vaativia osioita, jotka käydään paremmin raportin loppuosassa. Tulokseksi siis syntyi konkreettinen kappale, eli suoraan mittaukseen perustuva testisovittimen neljäs prototyyppi, sekä paljon testaustuloksia, kuituvahvistimen ominaisuuksien selvennyksiä sekä paljon lisäkysymyksiä.

Suorastamittaustekniikasta, jossa lähettävä- ja vastaanottavakuidut ovat vastakkain, saatiin paljon testi dataa, joista selviää hyviä sekä kehittämistä vaativia puolia kyseisestä tekniikasta. Suoranmit-

taustyylin etuuksiin kuuluu esimerkiksi tulos, joka syntyy vain kuitukimpunlaadusta. Tämä tarkoittaa, että ulkoisia tekijöitä on minimoitu. Heijastustekniikassa virhetekijöitä olivat esimerkiksi pinnan kunnonlaatu, josta heijastus tapahtuu sekä kuitujen asemoinnista syntyvä virhe. Koska suorassa mittauksessa voidaan kuitupäät asemoida lähekkäin, niin kuitujen heilumisesta syntyvä virhe on suhteessa pienempää.

Mutta myös tämä tutkimus jättää lisäkysymyksiä. Esimerkiksi lisäkysymyksiä ovat: kuinka valosuodatin vaikuttaa mittaukseen, sekä näkykö kuitukimpun valokeilan aukeaman laatu testaustuloksessa. Kuten kyseisessä taulukossa (ks. taulukko 1) näkyy vaihtelua vanhan- ja uudenmittaustekniikan tuloksissa, Joissain kuiduissa uusi tekniikka antaa huonomman tuloksen. Taulukon tulokset ovat mA-viesti, ja prosenttiluku kertoo suhteen referenssituloksen ja mitatun tuloksen välillä. Koska kuitu on testattu kehityksessä olevalla tekniikalla, niin ei voida sanoa onko kyseinen poikkeama uuden tekniikan tarkempaa laatua, vaan vastaus pitää odottaa tuotteen käyttäjiltä, jossa voi kestää kuukausia. Mutta tuloksesta kuidun 0194 kohdalla voidaan tehdä päätelmä, eli koska testaustekniikka perustuu valomääränmittaukseen, niin uudemmassa tekniikassa valomäärää tulee suhteessa vähemmän, kuin vanhassa, joka voisi tarkoittaa tekniikan herkkyyden parannusta.

Taulukko 1. Uuden- ja vanhan mittastekniikan ero, valkoisella pohjalla vanha tekniikka, sinisellä pohjalla uusi.

AFRY		Device
PTC ref2 33	13,87	New
PTC ref2 33	10,75	Old
ID	AFRY	AFRY%
0193	10,32	96,0%
0193	11,80	85,1%
0194	9,93	92,4%
0194	11,36	81,9%
0195	9,97	92,7%
0195	11,15	80,4%
0196	10,64	99,0%
0196	11,94	86,1%
0197	10,82	100,7%
0197	13,06	94,2%
0198	10,73	99,8%
0198	13,16	94,9%
0199	11,35	105,6%
0199	13,60	98,1%
0200	11,32	105,3%
0200	14,38	103,7%
0201	11,46	106,6%
0201	14,06	101,4%
0202	11,30	105,1%
0202	13,23	95,4%
REFF no. 33	10,65	99,1%
REFF no. 33	13,89	100,1%

Työn tavoitteellinen tulos eli mittasovittimen kehittäminen onnistui, niin kuin oli suunniteltu. Tuloksen toteaminen tehtiin niin, että vanhan- ja uudentestisovittimen tuloksia analysoitiin tuloksen toistettavuuden osalta, nämä ovat nähtävissä liitteessä (ks. Liite 1 ja 2). Vanhasta mittaustyylistä otettiin viidestä kuidusta 10 mittausta, mittaukset otettiin niin kuin luvussa 6.1 kerrottu on kerrottu. Uuden testisovittimen testauksessa käytettiin samoja valokuitukimppuja sekä samaa testi laitteistoa. Tämä sovittimen testasi kolme eri henkilöä, ja testaaminen tapahtui seuraavasti. Kuituvahvistin kytketään päälle ja annetaan lämmetä kahden tunnin ajan. Tämän jälkeen testattava kuitu kytketään kuituvahvistimeen (ks. kuvio 15), jonka jälkeen kuitupäät asetetaan kuitusovittimeen ja varmistetaan kuidun oikea asemointi painamalla kuidut sovittimeen. Tämän jälkeen luetaan vahvistimen antama mitta-arvo mA-mittarista. Testaus toistetaan 10 kertaa, niin että testauskertojen välissä kuitupäät vaihdetaan päikseen.



kuvio 15. Uusi testisovitin.

Vanhan testisovittimen tulokset ovat nähtävillä taulukossa (ks. taulukko 2). Taulukossa ”tulos” tarkoittaa kuinka monta prosenttia saatu mA-vaihtelu on mitta-alueesta eli 19 mA:sta. ”Vaihtelu” on 10 mittauskerran maksimi- ja minimituloksen ero. Vapaan ja painetun ero on selitetty luvussa 6.3.

Taulukko 2. Vanhan mittaustekniikan vaihtelu

Kuitu	Vaihtelu		Tulos	Tulos	Aiheutettu vaihtelu			Tulos
	Vapaa	Painettuna			MIN	MAX	Vaihtelu	
REF no.33	0,56	0,3	2,9 %	1,6 %	14,25	16,38	2,13	11,2 %
no.25	0,98	0,42	5,2 %	2,2 %	10,83	12,2	1,37	7,2 %
15000 11	1,22	0,39	6,4 %	2,1 %	14,8	17,25	2,45	12,9 %
12000 no.1	2,01	0,52	10,6 %	2,7 %	16,57	18,95	2,38	12,5 %
12000 no.2	2,65	1,38	13,9 %	7,3 %	16	18,7	2,7	14,2 %

Uuden testisovittimen tulokset ovat taulukossa (ks. Taulukko 3). Testin tulokset analysoitiin samalla tavalla kuin vanhan mittasovittimen tulokset, eli 10 mittakerrasta lasketaan minimi- ja maksimituloksen vaihtelu. Taulukon "AVG vaihtelu" on kolmen mittauskerran vaihteluiden keskiarvo, ja tulos on vaihtelun määrä kokonaismitta-alueesta eli 19mA:sta. Taulukon "Pyörittämällä" osio kertoo, kuinka paljon uudessa kuitusovittimessa tapahtuu tuloksen vaihtelua, kun kuitupäitä pyöritetään sovittimessa.

Taulukko 3. Uuden mittastekniikna vaihtelu

Testaaja	AVG vaihtelu		Tulos	Pyörittämällä			Tulos
	MIN	MAX		Vaihtelu			
REF no.33	0,22	1,2 %	14,28	14,45	0,17	0,9 %	
no.25	0,11	0,6 %	11,13	11,28	0,15	0,8 %	
15000 11	0,21	1,1 %	14,35	14,45	0,1	0,5 %	
12000 no.1	0,16	0,8 %	15,79	15,94	0,15	0,8 %	
12000 no.2	0,21	1,1 %	13,61	13,81	0,2	1,1 %	

Tuloksia analysoidessa todettiin huomattavaa vaihtelua kolmen eri mittaus kerran välillä, tämän vaihtelun suuruus oli noin 0,15–0,35 mA. Tämä tarkoittaa, että kuitujen testituloksien uusittavuudessa on vaihtelua noin 1,5 prosenttia. Koska testaukset tapahtuivat eri päivinä, jolloin myös testauksen ympäristönlämpötila oli muuttunut. Tästä johtuen mittavahvistimelle tehtiin lämmönstabiilisuustestaus. Testi suoritettiin sijoittamalla mittavahvistin suljettuun tilaan, jonka lämpötila oli hallittavissa ja luettavissa. Tilaan asetettiin noin 24 asteen lämpötila, jota nostettiin noin tunnin välein 2 asteella (ks. Liite 3). Testistä tulokseksi saatiin, että mittauksessa käytetty referenssi vahvistimen lämpöstabiilisuus on todella huono verrattuna uuteen vahvistimeen. REF-vahvistimessa 4

asteen lämpötilanmuutos aiheutti noin 0,15 mA eron (ks. Kuvio 16), kun taas uudella vahvistimella 3 asteen lämpötilanmuutos aiheutti vain 0,02 mA poikkeaman. Tästä voidaan päätellä, että noin 5 asteen lämpötilanmuutos aiheuttaa noin 1 prosentin mittavirheen testauksen uusittavuudelle.



kuvio 16. REF-Vahvistimen lämpöstabiilisuus. Keltaisella lämpötila, sisisellä mA-mitta-arvo

Työn lopullinen tulos uudella mittasovittimella on, että mittauksen toistettavuudessa mittasovittimesta sekä valosuodattimesta aiheutuu noin 1,61 prosentin poikkeama. Ja mittauksen uusittavuuden osalta, mikäli käytetään REF-vahvistinta, niin poikkeaman suuruus on noin 1 prosentin verran. Tuloksia verratessa vanhaan mittaustekniikkaan, jolla toistettavuuden poikkeaman suuruus oli noin 14,2 prosenttia, voidaan sanoa mittasovittimen kehittämistyön kulkeneen oikeaan suuntaan.

## 8 Pohdinta

Työn tavoitteena oli kehittää valokuitukimppujen tarkastusmittaukseen tarkoitettua laitteistoa luotettavammaksi. Alkuperäinen laitteisto, jolla valokuitukimppuja testattiin, aiheutti vaihtelevia tuloksia, ja tämän vuoksi laitteistoa haluttiin kehittää. Työssä pääkehittämiskohteeksi valikoitui mittasovittimen kehittäminen, koska aikaisemmin oli todettu alkuperäisen mittasovittimen aiheuttavan järjestelmän suurin mittauspoikkeama. Työn alkuperäiseksi tavoitteeksi asetettiin uuden

mittasovittimen suunnitteleminen ja prototyypin testaaminen. Tämän lisäksi oli tarkoitus analysoida, löydetäänkö kuidun päädyistä otetusta kuvasta, konenäön avulla yhtäläisyys kuitukimppujen laatuun.

Tutkimuksen alussa suunniteltiin työn tietoperusta, jonka tarkoitus on lisätä ymmärrystä työn edessä, sekä antaa lukijalle ymmärrys työn käsitteistä. Tietoperustan sekä työssä käytettyjen tutkimustietojen luotettavuutta sekä eettisyyttä pyrittiin kunnioittamaan. Luotettavuuden osalla työssä analysoituja tietoja pyrittiin tarkastelemaan useammalta eri näkökulmalta. Eettisyyden kannalta työssä käytettyä tietoa kunnioitetaan esimerkiksi tuomalla lähdetiedot hyvin esille. Sekä työssä avustaneiden henkilöiden, kuten toistettavuus mittauksien tekijöiden suostumus kysyttiin.

Työn lopullinen tavoite hieman poikkeaa työn suunnitellusta tavoitteesta. Tutkimuksen aikana työn konenäköanalyysi osuus vaihtui mittauksessa käytetyn valokuituvahvistimen luotettavuusanalyysiin. Tämän vaihdoksen tekeminen tutkimustuloksen kannalta oli tärkeää, sillä tuloksen uusittavuuden kannalta REF-vahvistimesta syntyi huomattava poikkeama. Tämän toteamuksen johdosta mittauksen luotettavuutta onnistuttiin parantamaan, sekä lisäämään ymmärrystä, kuinka valokuituvahvistin käyttäytyy. Työn alkuperäisenä tavoitteena oli myös analysoida kahden erilaisen mittaustyylin eroja. Mutta työn resurssien vuoksi, onnistuttiin valmistamaan vain yhteen tyyliin perustuvaa prototyyppiä, eli suoraan-mittaukseen perustuva. Jotta valmistetun prototyypin kaikki mahdolliset poikkeaman aiheuttajat voitiin tulkita ja selvittää luotettavasti, niin työssä keskityttiin vain tähän yhteen mittaustyyliin. Tässä tapauksessa toisen prototyypin valmistaminen sekä vertaileminen ei olisi tuonut yhtä paljon uutta tietoa.

Tutkimuksen aikana muutamia vastaan tulleisiin haasteisiin onnistuttiin kehittämään sopivat ratkaisut. Suurimpana haasteena työssä oli prototyypin valmistuksessa 3D-tulostimen tulostusparametrien sekä kappaleen geometristentoleranssien löytäminen. Tämä myös vei huomattavasti aikaa, sillä kesken prototyypin tulostuksen, tulostettava kappale saattoi irrota tulostustasosta. Kyseinen ongelma ratkaistiin muokkaamalla tulostusparametrejä, kuten tulostimen suuttimen korkeutta. Tämä myös aiheuttaa vaihtelua kappaleen geometrisiinmittoihin, jolloin kappaleessa olleet reiät saattoivat kutistua. Jolloin prototyyppiä jouduttiin tulostamaan useaan kertaan, jotta tulostettu kappale oli täydellinen.



Tutkimuksessa päästiin tavoitteeseen eli onnistuttiin kehittämään prototyyppi, jolla mittaus voidaan toteuttaa luotettavammin. Uudempaa testisovitinta ei otettu suoraan käyttöön, sillä tämän testisovittimen luotettavuus kuidunlaadun suhteen pitää varmistaa. Testisovittimen luotettavuuden varmistaminen tapahtuu ottamalla uusista kuiduista tulokset vanhalla ja uudella sovittimella, sekä keräämällä tuloksia asiakkailta. Jolloin tuloksia vertailemalla voidaan todistaa uuden testisovittimen luotettavuus. Työn tuloksien avulla myös tutkimustyötä on helppoa lähteä jatkamaan, ja työnaikana syntyi hyviä suuntia, joihin jatkokehittämistä on mahdollista erikoistaa. Esimerkiksi testisovittimen jatkokehittäminen julkaisuversioon sekä konenäkökameran hyödyntämistä kuidun laadun analysoimiseen. Testisovittimen kehittämisellä julkaisuversioon tarkoitetaan pieniä hienosäätöjä, kuten sovittimen mittojen optimointia. Nämä selviävät, kun sovittinta aletaan käyttää enemmän. Konenäköosuuden kehittäminen työn tuloksien avulla on helppoa, sillä kuitusovitin pitää kuidun paikallaan ja sovittimeen tarvitsee suunnitella vain uusi kappale, johon kameran kiinnitetään.

## Lähteet

Alasuutari, P. 2011. Laadullinen tutkimus 2.0. Tampere: Vastapaino. Viitattu 3.2.2022. <https://janet.finna.fi> , Ellibslibrary.

Bifurcated Fiber Bundles: 2 Fibers. N.d. Tuotekuvaus Thornlabs-internetsivustolla. Viitattu 17.4.2022. [https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup\\_id=7510](https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7510)

BP505 cyan bandpass filter. N.d. Tuote Midoptn internetsivustolla. Viitattu 30.3.2022. <https://midopt.com/filters/bp505/>

FDM 3D printing materials compared. N.d. Artikkel Hubs sivustolla. viitattu. 7.4.2022. <https://www.hubs.com/knowledge-base/fdm-3d-printing-materials-compared/>

Gurr, M. Ligon, S. Liska, R. Mülhaupt, R. & Stampfl, J. 2017. Polymers for 3D Printing and Customized Additive Manufacturing. Verkkojulkaisu ACS publications sivustolla. Viitattu 29.3.2022. <https://doi.org/10.1021/acs.chemrev.7b00074>

Hyvä tieteellinen käytäntö ja sen loukkausepäilyjen käsitteleminen Suomessa. 2013. Helsinki: Tutkimuseettinen neuvottelukunta. Viitattu 17.2.2022. [https://tenk.fi/sites/tenk.fi/files/HTK\\_ohje\\_2012.pdf](https://tenk.fi/sites/tenk.fi/files/HTK_ohje_2012.pdf)

Ilonen, J. 2022. Konenäköasiantuntija. AFRY Finland Oy. haastattelu 8.2.2022

3D-tulostuksen sovelluskohteet. N.d. Julkaisu AIPworksin internetsivustolla. viitattu 29.3.2022 Sivusto <https://aipworks.fi/3d-tulostus/sovelluskohteet/>

Laadukkaan mittaamisen perusteet. 2011. Espoo: MIKES. Viitattu 11.2.2022. <https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/MIKES/2011-J4.pdf>

Laadullisen tutkimuksen näkökulmat ja menetelmät. 2020. Gaudeamus. Viitattu 3.2.2022. <https://janet.finna.fi> , Ellibslibrary.

Lauttamus, M. 2022. Konenäköasiantuntija. AFRY Finland Oy. haastattelu. 28.3.2022

Materiaalin pursotus. N.d. Tietopankki artikkeli Savonian 3D-tulostus sivustolla. Viitattu 31.3.2022. <https://3dtulostus.savonia.fi/fi/tietopankki/metodit/materiaalin-pursotus>

Margaret. 2021. How to reduce various types of losses in optical fiber? blogi. julkaistu 22.12.2021. Viitattu 17.4.2022. <https://community.fs.com/blog/understanding-loss-in-fiber-optic.html>

Metrologiasta lyhyesti. 2008. Neljäs, suomennettu painos. Espoo: MIKES. Viitattu 11.2.2022. [https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/MIKES/metrologiasta\\_lyhyesti\\_nettiin.pdf](https://www.vttresearch.com/sites/default/files/pdf/MIKES/metrologiasta_lyhyesti_nettiin.pdf)

Nesteen fotopolymerisointi. N.d. Tietopankki artikkeli Savonian 3D-tulostus sivustolla. Viitattu 31.3.2022. <https://3dtulostus.savonia.fi/fi/tietopankki/metodit/nesteen-fotopolymerisointi>

Ohjeita turvalliseen 3D-tulostukseen. 2016. Verkkajulkaisu. Työterveyslaitos. Viitattu 29.3.2022. <https://mb.cision.com/Public/5751/2134887/9a757e45b19de65c.pdf>

Paschotta, R. N.d a. Sanakirja. Hakusana: Fibers. Viitattu 21.2.2022. <https://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>

Paschotta, R. N.d b. Sanakirja. Hakusana: Fiber-optic sensors. Viitattu 21.2.2022. <https://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>

Paschotta, R. N.d c. Sanakirja. Hakusana: Fiber bundles . Viitattu 21.2.2022. <https://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>

Paschotta, R. N.d d. Sanakirja. Hakusanat: bend losses, depolarization loss, insertion loss, propagation losses . Viitattu 17.4.2022. <https://www.rp-photonics.com/encyclopedia.html>

Pernaa, J. 2013. Kehittämistutkimus tutkimusmenetelmänä. Helsingin yliopiston verkkajulkaisu. Viitattu 6.2.2022. [https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/317958/2013\\_Pernaa\\_KT\\_tutkimusmenetelmana\\_KT\\_kirja.pdf?sequence=1](https://helda.helsinki.fi/bitstream/handle/10138/317958/2013_Pernaa_KT_tutkimusmenetelmana_KT_kirja.pdf?sequence=1)

Samantha Van Rijs. 2017. 3D printing for teens (5): Building you own 3d printer, FDM printer in – depth blogi. Julkaistu 1.12.2017. viitattu 3.4.2022. <http://samanthavanrijs.nl/2017/12/01/3d-printing-teens-5-building-3d-printer-fdm-printer-depth/>

Siltanen, J. 2022. Konenäköasiantuntija. AFRY Finland Oy. haastattelu. 4.4.2022

Vilka, H. 2007 Tutki ja mittaa: Määrällisen tutkimuksen perusteet. Tampere: Tampereen yliopisto. Viitattu 28.1.2022. <https://urn.fi/URN:ISBN:978-952-03-0099-9>

What is SLA 3D printing. N.d. Artikkelit Hubs sivustolla. viitattu. 3.4.2022. <https://www.hubs.com/knowledge-base/what-is-sla-3d-printing/>



## Liite 2. Tulokset osa 2/2

Kuitu	Vaihtelu		Tulos	Tulos
	Vapaa	Painettuna		
REF no.33	0,56	0,3	2,9 %	1,6 %
no.25	0,98	0,42	5,2 %	2,2 %
15000 11	1,22	0,39	6,4 %	2,1 %
12000 no.1	2,01	0,52	10,6 %	2,7 %
12000 no.2	2,65	1,38	13,9 %	7,3 %

MIN	Aihvuetettu vaihtelu		Tulos
	MAX	Vaihtelu	
14,25	16,38	2,13	11,2 %
10,83	12,2	1,37	7,2 %
14,8	17,25	2,45	12,9 %
16,57	18,95	2,38	12,5 %
16	18,7	2,7	14,2 %

Kuitu	AVG
REF no.33	14,571
no.25	11,13
15000 11	14,559
12000 no.1	15,926
12000 no.2	13,726

Vaihtelu		Tulos
	0,21	1,1 %
	0,07	0,4 %
	0,18	0,9 %
	0,18	0,9 %
	0,31	1,6 %

AVG DIF
0,34
0,16
0,39
0,26
0,33

AVG vaihtelu	Tulos
0,22	1,2 %
0,11	0,6 %
0,21	1,1 %
0,16	0,8 %
0,21	1,1 %

MIN	Pvorttamalla		Tulos
	MAX	Vaihtelu	
14,28	14,45	0,17	0,9 %
11,13	11,28	0,15	0,8 %
14,35	14,45	0,1	0,5 %
15,79	15,94	0,15	0,8 %
13,61	13,81	0,2	1,1 %

Kuitu	AVG
REF no.33	14,838
no.25	11,178
15000 11	14,487
12000 no.1	15,939
12000 no.2	13,845

Vaihtelu		Tulos
	0,31	1,6 %
	0,12	0,6 %
	0,22	1,2 %
	0,11	0,6 %
	0,2	1,1 %

Uusi mittasovitin			
Mittausalue	3,50	22,50	19,00
Valiointtien virhe			
Ulkinen	0,01	Tulos	Tulos
Puhdistettu	0,05	0,26 %	0,01 %
Sovittimen toistettavuuden virhe			
0,4% - 1,6%			

Testisovittimen uusittavuuden virhe	
	1 %

Kuitu	AVG
REF no.33	14,499
no.25	11,018
15000 11	14,169
12000 no.1	15,675
12000 no.2	13,515

Vaihtelu		Tulos
	0,14	0,7 %
	0,14	0,7 %
	0,24	1,3 %
	0,19	1,0 %
	0,13	0,7 %

### Liite 3. Vahvistimen lämpötesti

