

Opinnäytetyö AMK

Elektroniikka

Tietoliikennejärjestelmät

2016

Mikko Mäkinen

# FOTOAKUSTISEN KAMMION LÄMPÖSYKLAUSLAITE

Mikko Mäkinen

## FOTOAKUSTISEN KAMMION LÄMPÖSYKLAUSLAITE

Tässä opinnäytetyössä rakennettiin lämpösykluslaite, jonka tarkoituksena on toimia Gasera Oy:n laatimien fotoakustisten kammioiden testauslaitteena. Uusi laitteisto korvasi yrityksen käytössä olleen vanhan työkalun. Lämpösykluslaite suunniteltiin ja rakennettiin itse, koska sen haluttiin palvelevan yrityksen teknologian omia lähtökohtia. Lisäksi näin laite saatiin yhteensopivaksi muiden Gaseran laatimien fotoakustisten kammioiden testausinstrumenttien kanssa.

Työn teoriaosuudessa tarkastellaan lämpösykluslausta yleisesti sekä fotoakustiikkaan perustuvan kaasunmittausteknologian peruseriaatetta. Lämpösykluslaitteen kokoonpanossa käytettyjä osakokonaisuuksia tutkitaan lähemmin. Tarkemmin työn rakennusvaiheita ja käytännön tilanteita havainnoidaan lähinnä erilaisten laitteiston kanssa toimimisen kautta ilmenneiden haasteiden ja korjausten ilmettyä.

Lämpösykluslaite suunniteltiin Gaseran toimesta. Ideana oli käyttää paljon erilaisia yrityksen omavalmisteisia mekaniikka- ja elektroniikkaosia. Lisäksi valmiin laitteiston toteuttamiseksi piti käyttää joitain ulkopuolisten valmistajien osia.

Lämpösykluslaitteen rakentamishankkeen aikana kerättyjen huolellisten muistiinpanojen avulla laadittiin ohje, jonka avulla on jälkeenpäin valmistettu useampia laitteistoja. Työn edetessä laitteessa huomattiin parannettavaa, ja muutosten myötä laitetta sekä ohjetta päivitettiin. Omiin tarpeisiin rakennettujen laitteistojen lisäksi lämpösykluslaitteita on toimitettu Gaseran instrumentteja valmistavalle alihankkijalle.

ASIASANAT:

Mikrosysteemit, lämpösyklus, fotoakustiikka, piiläppä

Mikko Mäkinen

## TEMPERATURE CYCLING DEVICE DESIGNED FOR PHOTOACOUSTIC MEASUREMENT CHAMBERS

This thesis discloses building of a temperature cycling device. It is intended to use as a testing device for photoacoustic measurement chambers designed by Gasera Ltd. The new system replaced the earlier tool used by the company. The temperature cycling device was designed and built completely independently, because the aim was to use the company's own internal technology. In addition, the device was made compatible with Gasera's other testing instruments for photoacoustic chambers.

The theory part in this thesis examines temperature cycling in general and the basic principle based on photoacoustic gas measurement technology. Subassemblies used in the temperature cycling device are examined more closely. Additionally, the building phases and practical situations are addressed more specifically. Mainly with a variety of arisen hardware related challenges and revisions encountered with the functionalities of the device.

The temperature cycling device is designed by Gasera. The idea was to use many different mechanical and electronic parts produced by the company itself. The finished device contains also some parts from outside manufacturers.

Careful notes collected during the building of the device were compiled to create an assembly guide. The instruction manual helps with constructing additional temperature cycling devices in the future. As work progressed, room for improvement was found in the device. For this reason, changes to the device and the assembly guide were updated. In

addition to building temperature cycling devices for the companys own requirements, instruments are also delivered to a subcontractor, which manufactures Gaseras gas measurement products.

**KEYWORDS:**

MEMS, temperature cycling, photoacoustic, silicon cantilever

# SISÄLTÖ

<b>1 JOHDANTO</b>	<b>1</b>
<b>2 LÄMPÖSYKLAUS</b>	<b>3</b>
<b>3 FOTOAKUSTINEN MITTALAITE</b>	<b>6</b>
3.1 Interferometrin rakenne	8
3.2 Fotoakustisen kammion rakenne	10
3.3 Fotoakustisen kammion lämpösyklus	11
<b>4 LÄMPÖSYKLAUSLAITE</b>	<b>14</b>
4.1 Laitteiston rakenne	15
4.1.1 Mekaniikka	17
4.1.2 Elektroniikka	17
4.2 Laitteen toiminta	22
4.2.1 Lämmitys	22
4.2.2 Jäähdytys	24
4.2.3 Laitteen ohjaus ja mittausdatan analysointi Labview-ohjelmalla	26
<b>5 MITTAUSTULOSTEN TARKASTELU</b>	<b>28</b>
<b>6 YHTEENVETO</b>	<b>32</b>
<b>LÄHTEET</b>	<b>33</b>

## KUVAT

- Kuva 1. Lohkokaavio lämpösykluslaitteesta.  
Kuva 2. Especin valmistama TCC-150W. Kuva otettu  
Kuva 3. Piiläppä.  
Kuva 4. Interferometri ja läppä.  
Kuva 5. Juovakuvio.  
Kuva 6. Juovakuvion FFT-muunnoksen amplitudi (valkoinen viiva) ja vaihe (punainen viiva).  
Kuva 7. Interferometrin poikkileikkaus.  
Kuva 8. Fotoakustinen kammio kuvattuna kahdesta suunnasta.  
Kuva 9. Kammio kiinnitettynä apulevyyn.  
Kuva 10. Kammio kiinnitettynä lämmönvaihtimeen apulevyn kanssa.  
Kuva 11. Lämpösykluslaite ilman kantta kuvattuna SolidWorks-mekaniikkasuunnitteluohjelmalla.  
Kuva 12. Lohkokaavio lämpösykluslaitteesta.  
Kuva 13. Lämpösykluslaite koottuna.  
Kuva 14. Lämpösykluslaite koottuna ilman kantta.  
Kuva 15. I<sup>2</sup>C-jakaja ja virtavahvistin.  
Kuva 16. Vahvistimen kytkentä.  
Kuva 17. Transistorin DS-resistanssi jännitteen funktiona.  
Kuva 18. Lämmönvaihdin tehovastusten kanssa ja radiaalituuletin kuvattuna pohjapuolelta.  
Kuva 19. Vesijäähdytys.  
Kuva 20. Lämpötilan muutos yhden lämpösyklin aikana.  
Kuva 21. Venttiilidiodin kytkentä ja tyyppi.  
Kuva 22. Labview-ohjainohjelmisto.  
Kuva 23. Juovakuvion syvyys ja muoto.  
Kuva 24. FFT-muunnoksesta saatu amplitudispektri juovakuvion 64 pikselin alueelta.  
Kuva 25. Vihreä on r, joka on juovakuvion FFT-muunnoksen piikin korkeus.  
Kuva 26. Lämpösyklien määrä kuvattuna sinisellä värillä.

## TAULUKOT

- Taulukko 1. Fotoakustisen kammion osat.  
Taulukko 2. Virtavahvistimen komponenttien arvot ja tyypit.

## KÄYTETYT LYHENTEET JA SYMBOLIT

CMOS-kenno	Digitaalikamerassa käytettävä kanavatransistoreihin perustuva valoherkkä kenno (Complementary Metal Oxide Semiconductor).
DSP	Digitaalinen signaaliprosessori (Digital Signal Processor).
FFT-muunnos	Algoritmi, jonka avulla aikatasoinen signaali muutetaan taajuustasoon (Fast Fourier Transform).
I <sup>2</sup> C-väylä	Kaksisuuntainen ohjaus- ja tiedonsiirtoväylä (Inter-Integrated Circuit).
LASER	Laite, joka tuottaa koherenttia valoa (Light Amplification By Stimulated Emission Of Radiation).
MOSFET	Eristehilatransistori (Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor).
P	Teho
PID-säädin	Säätötekniikan perussäädin (Proportional-Integral-Derivative Controller).
R	Resistanssi
U	Jännite
USB	Sarjaväyläarkkitehtuuri oheislaitteiden liittämiseksi tietokoneeseen (Universal Serial Bus).

# 1 JOHDANTO

Fotoakustisten kammioiden lämpösyklauksessa tarkistetaan, että kyseenomaisen toimenpiteen osalta lopputuote on valmis lähetettäväksi eteenpäin tuotantoprosessissa. Lämpötilaerot erilaisten rajapintojen välillä kammiossa, interferometrissä ja niiden välisissä rakenteissa vaikuttavat kappaleen ominaisuuksiin. Lämpötilaerojen aiheuttamat mekaaniset voimat saattavat muuttaa osien paikkaa toisiinsa nähden ja jopa särkeä niitä. Altistamalla fotoakustisia kammioita näille muutoksille useasti ennen toimitusta loppuasiakkaalle varmistetaan tuotteen olevan luotettava ja laadukas. Lisäksi varmistetaan, että ostokomponentit toimivat lämpötila-alueen yläpäässä sekä laite toimii toimintalämpötila-alueellansa.

Työn aikana rakennettiin yhteensä kolme lämpösyklaukslaitteistoa. Kokoonpanot aloitettiin keväällä 2015. Vuoden mittaan laitteisiin tehtiin erilaisia päivityksiä ja korjauksia. Lämpösyklaukslaitteita käyttävät aktiivisesti sekä Gasera että mittalaitteita valmistava alihankkija. Laite suunniteltiin erityisesti fotoakustisten mittakammioiden käyttöön.

Markkinoilla on erilaisia lämpösyklaukslaitteita [1, 2]. Suunnittelemalla ja valmistamalla laite itse uskotaan, että saadaan juuri omiin tarpeisiin räätälöity laite kustannustehokkaammin. Lisäksi laitteen muokkaamiskynnys ja sen toteuttamisen vaikeustaso saadaan pysymään pienenä. Kammioiden täsmällisestä käyttäytymisestä lämpösyklauksen aikana ei ole takeita, joten laitteeseen tehtävien muutosten uskotaan olevan todennäköisiä tulevaisuudessa. Laite rakennettiin kokeellisesti ja projektin edetessä haluttiin oppia lisää lämpösyklauksesta, sen tarpeista ja tarvittavasta laitteistosta.

Piiläppämikrofonian hyödyntäviä fotoakustisia mittalaitteita on käytetty erilaisissa sovelluksissa. Maria Järvi on tutkinut erikoistyössään muuntajaöljyihin liuenneiden kaasujen analysointia [3]. Sauli Sinisalo käsittelee Pro gradu -tutkielmassaan anestesiakaasupäästöjen mittaamista [4].

Lämpösyklaukseen liittyviä tutkimuksia ja sovelluksia löytyy runsaasti eri tieteenaloilta. Tiivisteinä ja eristeenä käytettävän nestemäisen silikonikumin ominaisuuksien muuttumista lämpösyklauksen vaikutuksesta on käsitelty Elsevier-kustantamon julkaisemassa artikkelissa [5]. Eutektisten juotosmetalliseosten mikrorakenteen muutosta

on tutkittu aiemmin mainitun yhtiön julkaisussa [6].

Kappaleessa 2 käsitellään lämpösyklusmenetelmän käyttöä tuotantolaitteissa yleisesti sekä erikseen fotoakustisten kammioiden tapauksessa. Fotoakustisten mittalaitteiden toimintaperiaatetta tutkitaan pääpiirteisesti kappaleessa 3. Lämpösykluslaitteen rakentamiseen ja sen ohella havaittuihin ilmiöihin liittyviä asioita tarkastellaan kappaleessa 4. Työn lopussa havainnoidaan lämpösyklusista kammiosta saatujen mittaustulosten informaation sisältöä.

## 2 LÄMPÖSYKLAUS

Lämpösyklauksella tarkoitetaan testiä, jossa tunnettua kappaletta tai laitetta altistetaan hallitussa ympäristössä lämpötilanvaihteluille kahden ääripään välillä. Tavallisesti korkeimman ja matalimman syklauslämpötilan määrittää testattavalle osalle suunniteltu käyttölämpötila-alue. Lämpösyklus voi tapahtua useammassa eri lämpötiloja käsittävässä tilassa. Tässä tapauksessa sykklattavaa kappaletta siirretään liikkuvaan alustaan kiinnitettynä eri tilojen välillä. Vaihtoehtoisesti testi voidaan suorittaa yhdessä kammiossa, jonka sisäistä lämpötilaa muutetaan lämpösyklusuksen aikana. Testin aikana lämpötilaa muutetaan siten, että sen muutokset kuvaavat lopullisen tuotantolaitteen käyttöä oikeassa tilanteessa. Lämpösyklausta ei pidä sekoittaa lämpösokkimenetelmään, jossa kappale kuumennetaan tai jäähdytetään erittäin lyhyessä ajassa lämpötilan ääripäiden välillä. [7]

Lämpösyklusuksen tavoitteena on selvittää testattavan kappaleen kykyä säilyttää halutut ominaisuudet lämpötilan muuttuessa käyttölämpötila-alueella. Näihin ominaisuuksiin lukeutuvat mekaanisten liitosten kestävyys ja komponenttien asetetut paikat toisiinsa nähden. Testin aiheuttamien rasitusten jälkeen laitteelta haluttujen sähköisten ja fyysisten ominaisuuksien tulee säilyä ennallaan. Muussa tapauksessa laitteeseen aiheutuneet viat pitää selvittää ja korjata ennen uutta lämpösyklausta.

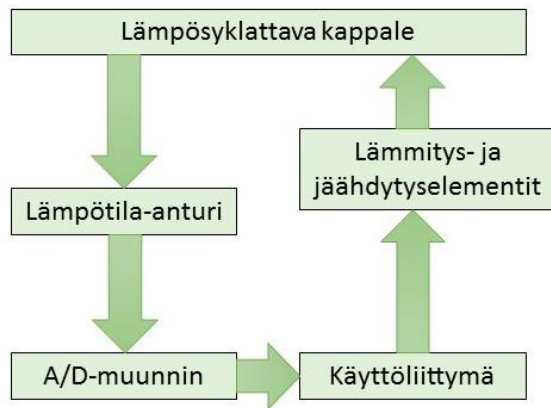
Lämpösyklusmenetelmässä voidaan ottaa huomioon lukuisia asioita riippuen halutun lopputuloksen toistettavuudesta ja laadusta. Testattavan kappaleen ja siinä olevien rajapintojen sekä lämpösykluslaitteiston lämpökuorma pitää ottaa huomioon jäähtymisen ja lämmityksen tehovaatimuksia selvittäessä. Lämpösyklattavan tilavuuden asiallinen eristäminen ulkopuolisilta häiriötekijöiltä vaikuttaa testin toistettavuuteen. Lämpösyklusien lukumäärä voidaan arvioida testattavan kappaleen halutun käyttöikänsä ja -olosuhteiden perusteella.

Fotoakustisten kammioiden lämpösykluslaitteella testattava kappale altistetaan useita kertoja vuorotellen käyttölämpötila-alueen kahden ääripään välillä. Fotoakustiset kammiot stabiloidaan käytössä tavallisesti 50 °C:n lämpötilaan, mutta lämpösyklus jatkuu aina 55 °C:seen asti mahdollisten lämmityksen alussa aiheutuvien korkeiden lämpötilojen takia. Lisäksi laitteen lämpösyklauksella katetaan varastoinnissa, kuljetuksessa ja

käyttämättömänä huoneenlämmössä vallitsevat lämpötilat.

Laitteen lämmitys toteutetaan tehovastusten kanssa. Jäähdytys saadaan aikaan lämmönvaihtimen läpi johdettavan kylmän veden avulla. Laitteeseen mahtuu kolme fotoakustista kammiota kerrallaan. Laitteistoa ohjataan Labview-ohjelman kanssa.

Pääperiaatteiltaan lämpösykluslaitte koostuu lämpötila-anturista, jonka analoginen signaali muutetaan digitaaliseksi sekä ohjainohjelmistosta, joka lukee lämpötiladataa ja ohjaa lämmitys- ja jäähdytys-elementtejä. Lisäksi käytännössä syklattavien lämpötilojen pitää johtua mahdollisimman tehokkaasti lämpösyklattavaan kappaleeseen (Kuva 1).



Kuva 1. Lohkokaavio lämpösykluslaitteesta.

Lämpösykluslaitteita voidaan hankkia valmiina erilaisia sovelluksia varten. Eräs laitteistoja valmistava yritys on japanilainen Espec Corporation [2]. Sen valikoimista löytyy monenlaisia lämpösykluslaitteita ja muita ympäristön muutosten vaikutuksia mallintavia testausjärjestelmiä, esimerkkinä TCC-150W (Kuva 2).



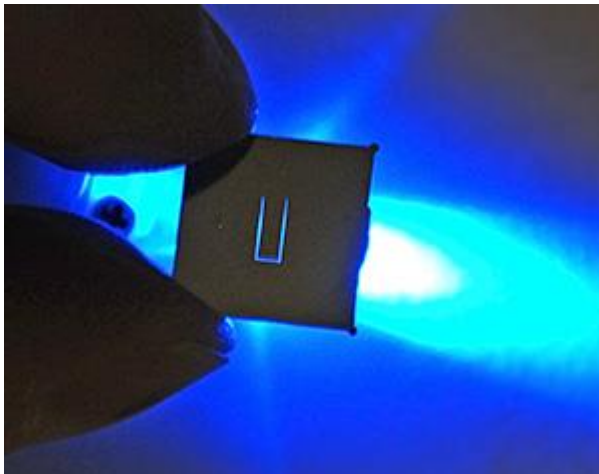
Kuva 2. Especin valmistama TCC-150W. Kuva otettu laitteen datalehdessä (8).

TCC-150W -laitetta kuvataan balansoituna lämpökontrollijärjestelmänä. Sitä markkinoidaan käytettäväksi muun muassa erilaisten piirilevykorttien lämpösyklauksessa. Järjestelmä on valmistettu teräksestä ja painaa 950 kg. Laitteen lämmityselementtinä käytetään nikkelikromisia kaistalevastuksia. Jäähdytys toteutetaan kierukkakompressorilla, jonka lauhdutin on vesijäähdytteinen. Laite vaatii toimiakseen käyttösähkön lisäksi ulkopuolisen vesioton lauhduttimen jäähdytystä varten. (8)

### 3 FOTOAKUSTINEN MITTALAITE

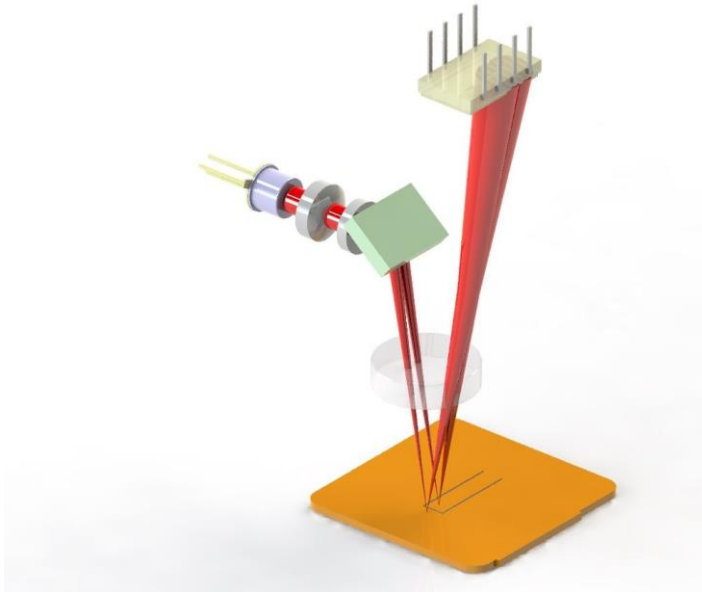
Fotoakustinen mittalaite mittaa eri molekyylien pitoisuuksia kaasussa. Mitattava näytekaasu pumpataan ja suljetaan kammioon, jonka jälkeen sen läpi syötetään valoa tietyllä aallonpituudella riippuen siitä, mitä näytekaasua halutaan mitata. Valon eri aallonpituudet aiheuttavat resonanssia eri molekyyleissä. Tällöin molekyyli muuttaa valonlähteestä saamansa energian liikkeeksi, ja liikkuvien molekyylien törmäillessä paine näytekammiossa kasvaa. [9]

Molekyylien energiatasojen muutoksesta johtuvaa painepulssia mitataan suljetussa kammiossa noin 8  $\mu\text{m}$ :n paksuisen, piistä valmistetun, läppämikrofonin avulla. Piiläppä on valmistettu isomman piiliuskan keskelle etsaamalla [10]. Siinä sen ympärille muodostuu kehys, joka pysyy paikallaan herkästi värähtelevän keskiosan suhteen (Kuva 3).



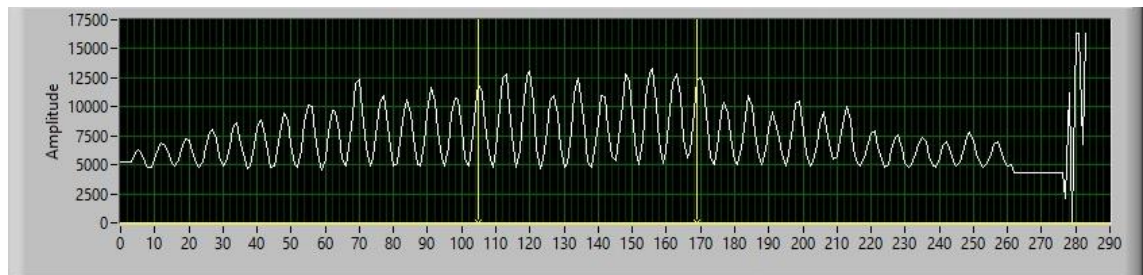
Kuva 3. Piiläppä. [13]

Läpän liikettä seurataan interferometrillä, jossa valonlähteen säde jaetaan peileillä siten, että yksi valonsäde osuu värähtelevään läppään ja toinen sen vieressä olevaan liikkumattomaan paikkaan (Kuva 4). Valonlähde on punaisen valon aallonpituuden diodilaser. Tulkitsemalla näiden säteiden välistä optista matkaeroa saadaan selvitettyä hyvin tarkasti läpän liikkeitä ja sitä kautta lopulta mitattavan kaasun värähtelyn aiheuttamaa painetta. [11, 12, 13]



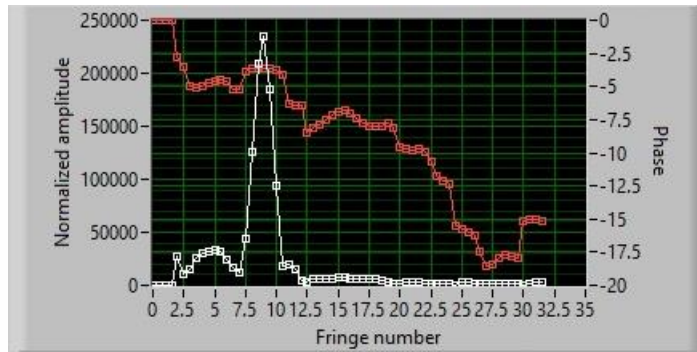
Kuva 4. Interferometri ja läppä. Kuvassa valonsäde jaetaan läpälle ja sen vieressä olevaan liikkumattomaan paikkaan. [13]

Kaksi eri reittejä kulkevaa valonsädettä muodostavat yksiriviselle lineaariselle CMOS-kuvakennolle [14] interferenssikuvion, josta luetaan juovakuvio (Kuva 5). Se ilmaisee valon intensiteettiä CMOS-kuvakennon eri pikseleillä. Tämän lisäksi sen liike kuvaa läpän liikettä.



Kuva 5. Juovakuvio. X-akseli kuvaa CMOS-kennon pikseleitä ja Y-akseli amplitudia.

Juovakuvion aikatasoinen signaali käännetään taajuustasoon FFT-muunnoksella. Tällä menetelmällä saadaan kuvattua spektri, josta seurataan korkeimman taajuuspiikin vaiheen muutoksia (Kuva 6). Tästä käytetään nimitystä fotoakustinen signaali. [15]

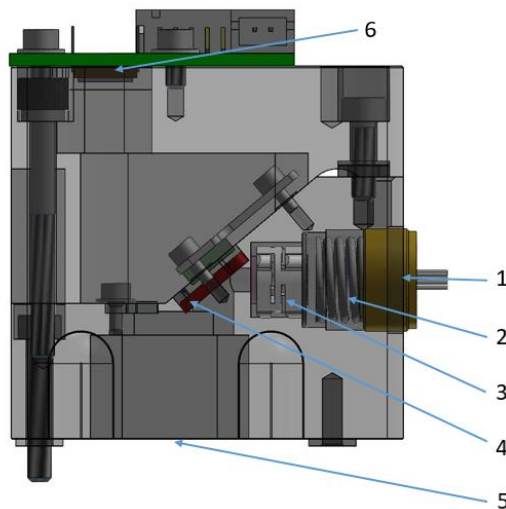


Kuva 6. Juovakuvion FFT-muunnoksen amplitudi (valkoinen viiva) ja vaihe (punainen viiva). Kuvassa piikin kohdalta luettu vaihe kuvaa läpän liikettä.

Piiläpältä luettavan juovakuvion tarkastelussa muun muassa radiotekniikassa käytetyn vaiheilmaisimen käyttö on hankalaa. Tämä johtuu siitä, että liikkuvan piiläpän vierestä, paikallaan pysyvistä kohdista heijastuvan valonsäteiden paikka ei ole täysin pysyvä. Siihen vaikuttaa muun muassa pienet lämpötilaerot ja optiikan ominaisuudet. Täten vaiheilmaisimen vaatimaa referenssitasoa on vaikeaa ottaa huomioon mahdollista vaiheilmaisinalgoritmia toteutettaessa.

### 3.1 Interferometrin rakenne

Interferometri koostuu pääpiirteittäin seuraavista osista: Runko, valonlähde, fokuoiva optiikka, säteenjakaja ja detektori (Kuva 7). Lisäksi interferometrin toiminnan kannalta oleellisena osana on kammioon kiinnitetty ikkuna, jonka takana on heijastavapintainen piistä valmistettu läppä.



Kuva 7. Interferometrini poikkileikkaus. Kohdat 1—6: 1 on laser, 2 on jousi, 3 on linssipakka pitimiseen, 4 on säteenjakaja, 5 on piiläpän paikka ikkunan takana ja 6 on CMOS-kemno.

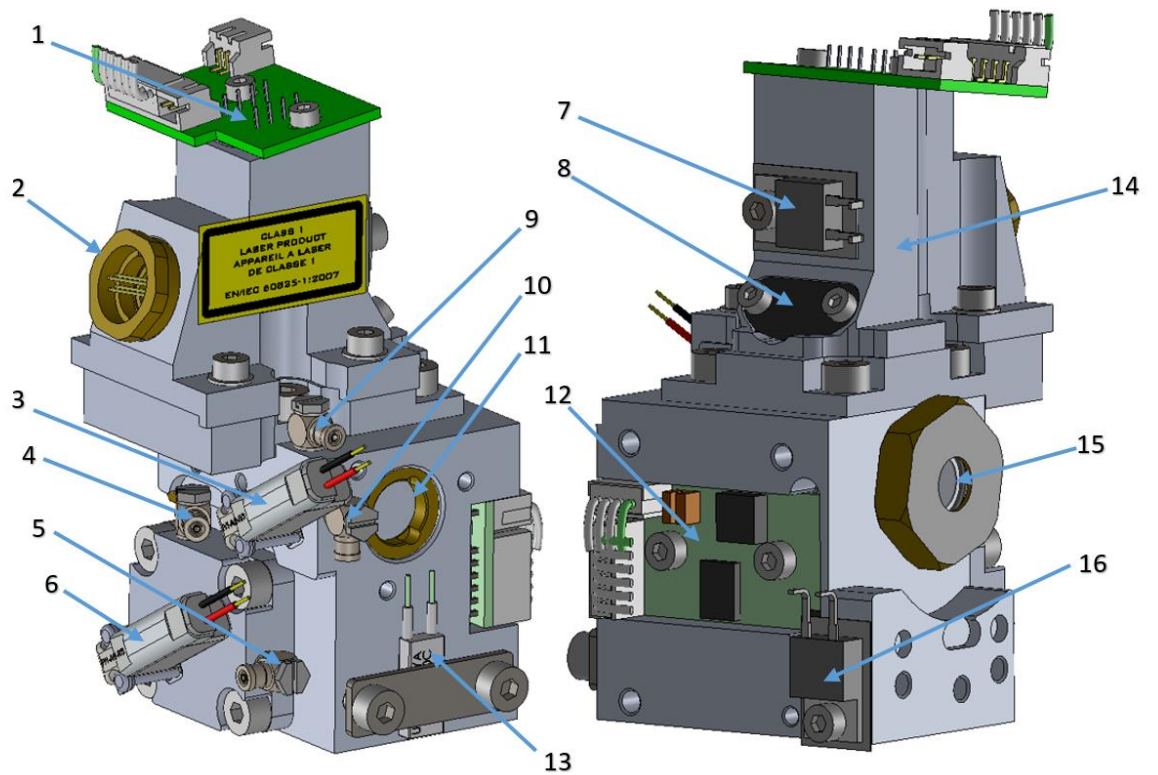
Interferometrini runko on valmistettu alumiinista. Valonlähteenä käytetään punaisen aallonpituusalueen diodilaseria. Fokusoiva optiikka koostuu pakasta akryylimuovisista linseistä. Linssien pidin on valmistettu 3d-tulostusmenetelmän avulla. Säteenjakajana kuvassa esitetyssä interferometrissä on kulmapeili (Kuva 7). Detektori perustuu yksiriviselle CMOS-kennolle, joka kuvaa kameran tavoin valonsäteiden tuottaman juovakuvion.

Laserin ja fokusoivan optiikkapakan välissä on jousi. Sen tehtävä on painaa ja pitää fokusoivan optiikan linssipakkaa paikallaan. Laserin kiinnitys tehdään kolmen kappaleen avulla. Niitä kiertämällä valonsäde saadaan myös fokusoitua. Se tapahtuu muuttamalla lasersäteen paikkaa säteenjakajan kautta piiläpän suhteen. Kappaleista uloin säätelee etäisyyttä Y-suunnassa. Kaksi sisempää ovat epäkeskoja ja muuttavat paikkaa X- ja Y-suunnassa. Jousi huolehtii siitä, että laser pysyy tiukasti paikallaan kierteiden suhteen.

Säteenjakajana toimivan optisen komponentin paikka ei saa muuttua merkittävästi lämpösyklin aikana. Sen pysyvä paikka ei ole interferometrini toiminnan kannalta kovin tarkka. Riittää, että se jakaa valonsäteen. Laserin X-, Y-, ja Z-suuntaiset säädöt optiikkapakan suhteen sekä itse interferometrini rungon paikka kammion suhteen määräävät laitteen toiminnan. Joissain tapauksissa, esimerkiksi käytettäessä säteenjakajana kulmapeiliä, täytyy huomioida tarkkaan sen paikka ja asento interferometrissä. [16]

### 3.2 Fotoakustisen kammion rakenne

Fotoakustinen kammio rakentuu tavallisesti seuraavista osista: Tilavuudesta ja kanavista, joihin kaasu pumpataan, sähköisistä kaasun virtausta hallitsevista sisään- ja ulostuloventtiileistä sekä interferometriläppämikrofonista (Kuva 8)(Taulukko 1).



Kuva 8. Fotoakustinen kammio kuvattuna kahdesta suunnasta. Osien nimet taulukoitu (Taulukko 1).

Taulukko 1. Fotoakustisen kammion osat.

1	CMOS-kortti	9	Kaasun sisääntulo
2	IFM-Laser	10	Kaasun sisääntulon ohivirtauskanava
3	Sisääntuloventtiili kaasulle (3-tie)	11	Tasopeili. Kammioissa, joihin syötetään hajavaloa. Koherentin valonlähteen tapauksessa ikkuna.
4	Sisääntulo kaasun ohivirtaukseen	12	Lämpötilanlukukortti, johon liitetään lämmitysvastukset.
5	Kaasun ohivirtaus/ulostulo	13	Lämpösulake. Katkaisee sähkölämmitykseltä, jos lämpötila nousee liikaa.
6	Ulostuloventtiili kaasulle (3-tie)	14	Interferometri
7	Lämmitysvastus	15	Kammion ikkuna, jonka läpi ohjataan hajanaista tai koherenttia valoa.
8	Säteenjakaaja	16	Lämpövastus

Kammiossa on oltava myös erilaisia kaasutiiviitä ikkunoita ja peilejä valon ohjaamiseksi optiselle polulle. Kammion elektroniikkaan kuuluu lisäksi CMOS-kenno, joka lukee interferenssikuvioita sekä lämmitin. Jälkimmäinen koostuu ohjauselektroniikasta ja lämmitysvastuksista. Mittausten aikana fotoakustisen mittalaitteen kammiota pidetään vakioidussa 50 °C:n lämpötilassa mahdollisen veden kondensoitumisen ehkäisemiseksi.

### 3.3 Fotoakustisen kammion lämpösyklus

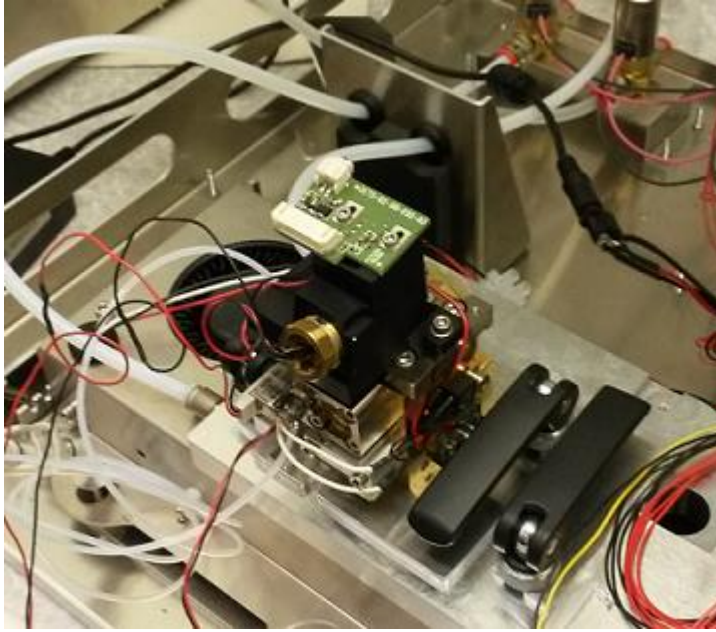
Lämpösyklusuksen aikana etenkin interferometrin sisäisen optiikan säädöt voivat muuttua herkästi. Sen sisältämät asferiset linssit saattavat liikkua vähän. Tämä voi aiheuttaa optisten kappaleiden rikkoutumisen tai naksahdamisen pois tarkasti säädetyiltä paikoiltaan. Joissain tapauksissa lämpösyklus voi aiheuttaa ongelmia laitteen tiiveyden kanssa lämpötilan muutosten aiheuttaman mekaanisen rasituksen takia.

Interferometrin CMOS-kennolta luetaan interferenssikuvion juovien määrää. Niiden lukumäärä ratkaisee, onko interferometrin laserin tarkennusetaisyys pysynyt oikeana. Juovakuvion perusteella voidaan laskennallisesti selvittää läpän liikkeitä. Laskennan

näytteenottotaajuus rajoittaa tietoa siitä, monesko kierros läpän vaiheessa on käynnissä. Interferometrin CMOS-kennolta saatu informaatio kertoo onko läppä toiminut oikein syklin aikana. Rikkoutuneesta läpystä ei voida lukea juovakuviota. CMOS-kennolta voidaan päätellä myös onko laserin intensiteetti ja optiikan rakenne pysyneet ennallaan.



Kuva 9. Kammio kiinnitettyä apulevyyn

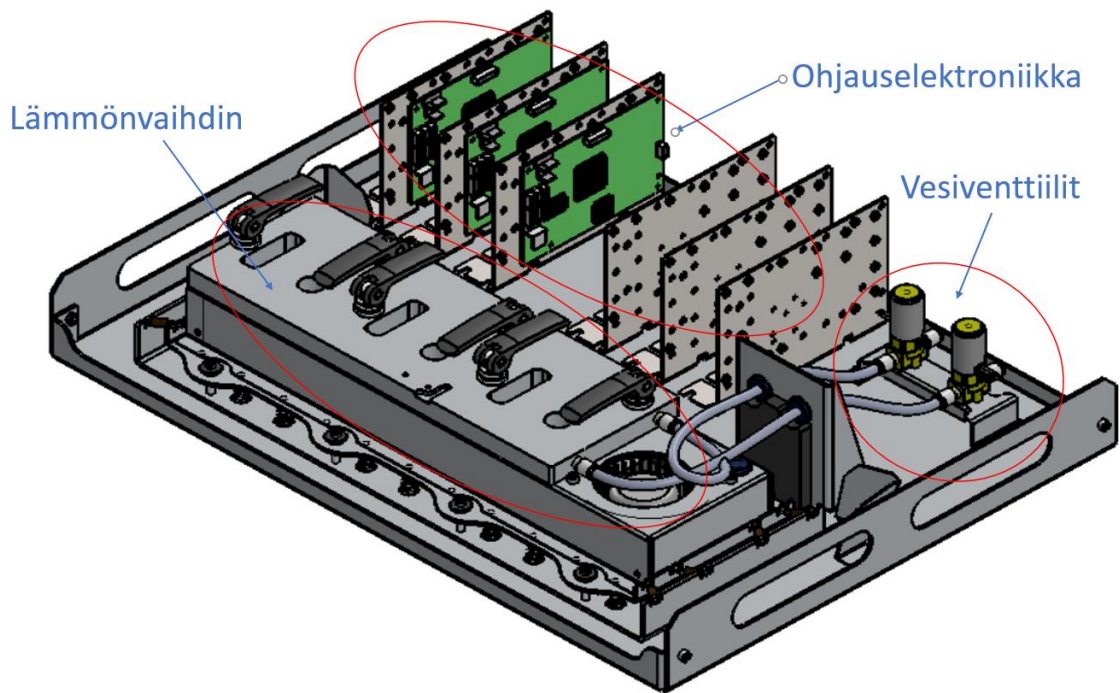


Kuva 10. Kammio kiinnitettyä lämmönvaihtimeen apulevyn kanssa.

Käytännössä lämpösyklauksen valmistelu fotoakustisille kammioille on yksinkertaista. Aluksi kammio yhdistetään kahdella ruuvilla alumiiniseen apulevyyn (Kuva 9), jonka avulla se myöhemmin kiinnitetään lämpösyklaukslaitteeseen pikakiinnityskahvojen avulla (Kuva 10). Avataan lämpösyklauksyksikön kansi, kiinnitetään kammiot lämmönvaihtimeen ja interferometrin CMOS-kennolta tuleva johto DSP-korttiin, jonka avulla ohjataan ja luetaan fotoakustisen kammion elektroniikkaa. Tämän jälkeen suljetaan kansi ja käynnistetään laite, ohjelmisto ja kylmän veden virtaus.

## 4 LÄMPÖSYKLAUSLAITE

Tässä opinnäytetyössä kuvatulla lämpösykluslaitteella korvataan aikaisemmin Gaseran käytössä ollut järjestelmä. Uusi systeemi rakennettiin, koska haluttiin valmiudet nopeammalle syklausajalle laajemmalla lämpötila-alueella. Laitteesta haluttiin myös helpommin liikuteltava pöytäversio (Kuva 11) aikaisemman lattialla pyörien varassa olleen suurehkon laatikon tilalle. Lisäksi vanha järjestelmä vaati toistuvasti huoltoa helposti epäkuntoon joutuneen peltier-elementeillä toteutetun jäähdytys- ja lämmitysjärjestelmän takia.

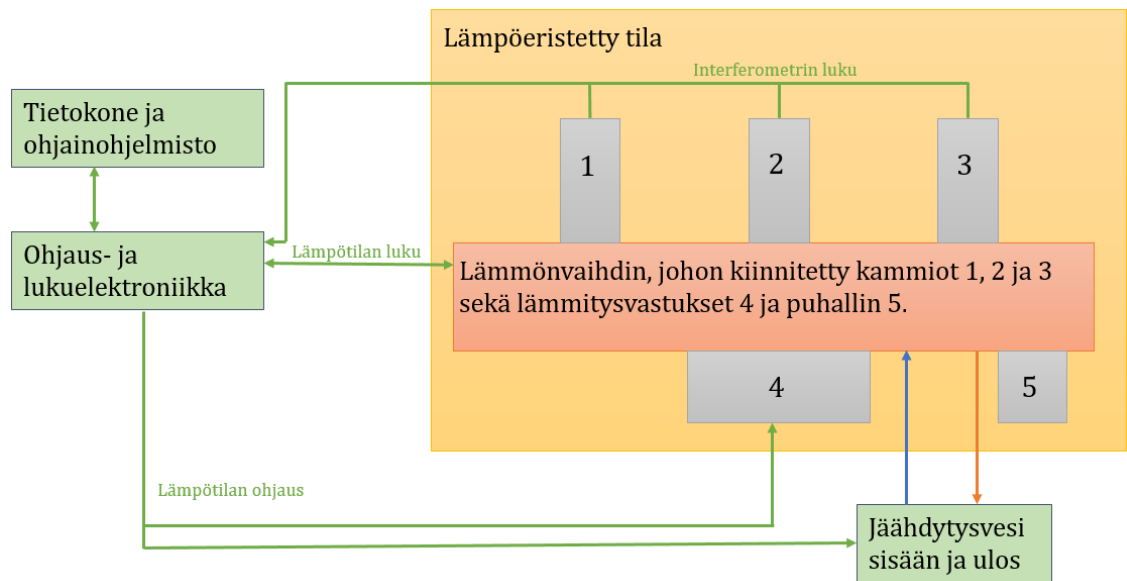


Kuva 11. Lämpösykluslaite ilman kantta kuvattuna SolidWorks-mekaniikkasuunnitteluohjelmalla

Fotoakustisia kammioita testataan riippumatta siitä, onko kyseessä tuotantolaitte, prototyyppi tai esimerkiksi laboratoriokäyttöön rakennettu tutkimusväline. Testeihin lukeutuu lämpösyklusuksen lisäksi muun muassa erilaisia tarkkuussäätöpenkkejä, tiiveystestejä ja mekaanisia rasiustestejä.

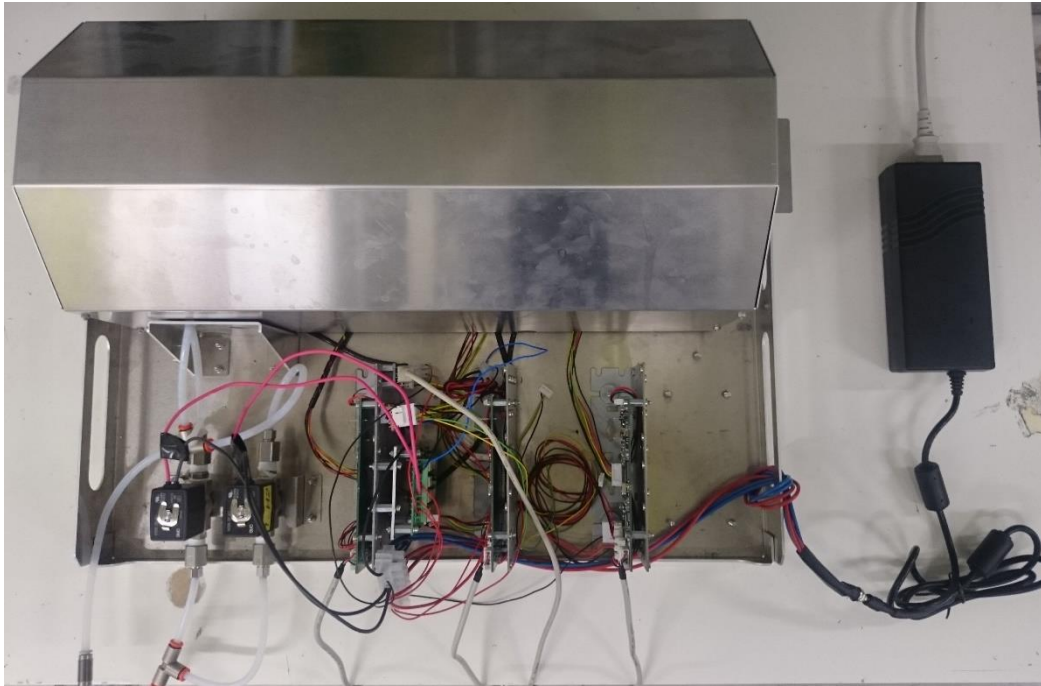
#### 4.1 Laitteiston rakenne

Lämpösyklauslaitte koostuu suorakaiteen muotoisesta alustasta, johon on kiinnitetty varsinainen lämpösyklausyksikkö sekä erilaisia asennustelineitä elektroniikalle ja muille kokoonpanossa esiintyville komponenteille. Laitteisto on suunniteltu pöydällä pidettäväksi ja helposti siirrettäväksi eikä vaadi kiinteää asennusta (Kuva 12).

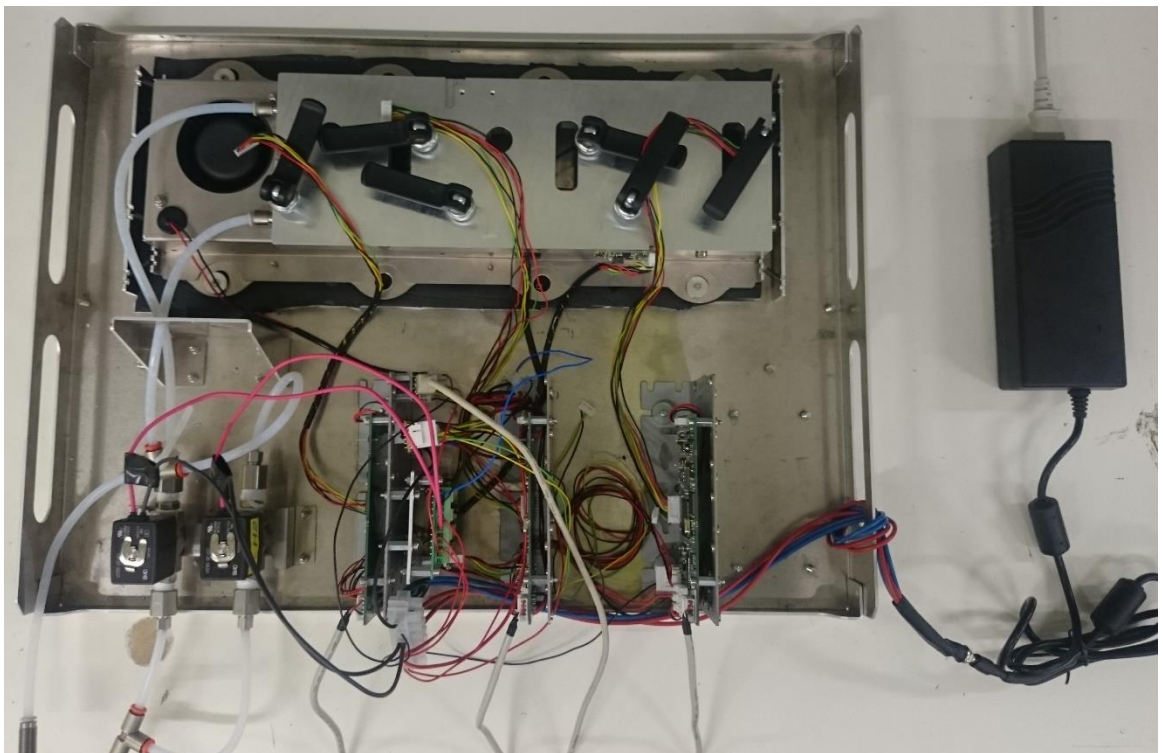


Kuva 12. Lohkokaavio lämpösyklauslaitteesta.

Toimiva laite koottuna on kuvattu kuvissa 13 ja 14. Jälkimmäisessä esitetään laitteisto ilman eristävää suojakantta niin, että lämmönvaihdin ja siihen liitetyt kiinnityskahvat ja puhallin ovat näkyvillä.



Kuva 13. Lämpösykluslaite koottuna.



Kuva 14. Lämpösykluslaite koottuna ilman kantta.

Mittausjärjestelyn toteuttamiseksi tarvitaan tietokone lämpösyklauksen ohjausohjelmistolla, verkkosähköliitäntä sekä kylmää juoksevaa vettä. Poistovesi lasketaan viemäriin. Laitteessa voidaan lämpösyklata yhdestä kolmeen kammiota samanaikaisesti.

#### 4.1.1 Mekaniikka

Mekaanisen rakenteen on suunnitellut Gasera. Se koostuu pääsääntöisesti alumiinista valmistetuista osista. Alumiini on helposti työstettävä ja kustannustehokas materiaali. Lisäksi se sopii hyvin mekaanisilta ja termodynaamisilta ominaisuuksiltaan lämpösykluslaitteeseen.

Lämmönvaihdin on koneistettu yhdestä alumiinikappaleesta. Sen sisälle on porattu kanavia jäähdytyksessä käytettävään vesikiertoon. Lämpösyklusyksikön kansi on eristetty sisäpuolelta umpisoluvaahtolevyillä.

#### 4.1.2 Elektroniikka

Fotoakustisen kammion lämpösykluslaitteen elektroniikka koostuu sekä Gaseran että ulkopuolisten valmistajien valmistamista erilaisista laitteista. Niihin lukeutuu erilaisia laskentaan, lämpötilanlukuun, releohjaukseen ja tietokoneen kanssa kommunikointiin liittyviä kortteja. Lisäksi elektroniikkaan kuuluu lämmönvaihtimen tehovastukset ja tuuletin, sähköiset vesiventtiilit, I<sup>2</sup>C-jakotukki sekä yksinkertainen virtavahvistin relettä varten.

#### **DSP**

Jokaista maksimissaan kolmea samanaikaisesti lämpösyklattavaa kammiota varten on varattu oma DSP-kortti. Se lukee yksiriviseltä CMOS-kennolta interferometrin juovakuviota ja muuntaa sen jännitesignaalksi.

DSP-kortti on Gaseran valmistama. Sitä käytetään yleisesti yrityksen laatimissa erilaisissa tuotanto- ja testilaitteissa. Kortti sisältää kaksi erilaista mikrokontrolleria, mutta vain toista, signaalin käsittelyyn tarkoitettua piiriä, käytetään tässä lämpösykluslaitteessa. DSP-kortti prosessoi dataa itsenäisesti, mutta se voidaan lisäksi yhdistää tietokoneen USB-liitäntään, jolloin sitä voidaan ohjata ja lukea.

DSP-kortin mikrokontrollerin käyttö käsittää optisen interferometriläppämikrofonin lähdestä saatavan datan lukemisen ja signaalin muuttamisen haluttuun muotoon jatkokäsittelyä varten.

Lämpösykluslaitteen kokoonpano- ja testausvaiheessa löydettiin ei-haluttu ominaisuus DSP-kortilta. Käynnistettäessä järjestelmää kortit menivät satunnaisesti ohjelmointitilaan, jonka aikana ne eivät toimineet oikein. Ongelman arveltiin liittyvän mikrokontrollerin virransyöttöön. Uskottiin, että vikatilanne tapahtui, koska mikrokontrolleri ottaa virtaa sekä tietokoneen USB-liitännästä että lämpösykluslaitteen teholahteesta. Ongelma päätettiin yrittää ratkaista katkaisemalla USB-liitännältä tulevan sähkön kulku mikrokontrollerille. Tämä korjasi ongelman.

### **Lämpötilanluku**

Lämpötilaa luetaan Gaseran valmistamalla Temperature Controller (TC) -kortilla. Lämpösykluslaitteessa sen tehtävä on lähettää reaaliaikaisesti lämpötiladataa ohjausohjelmistolle. Kortissa on myös valmius toimia PID-säädettävänä lämmittimenä, kun siihen on liitetty tehovastuksia.

### **Releenohjaus**

Robot Electronicsin valmistama RLY08-kortti sisältää kahdeksan I<sup>2</sup>C-tiedonsiirtoväylällä ohjattavaa sähköistä kontaktirelettä. Releet kestävät eri jännitteitä, mutta virrankesto on rajattu 1 A:iin relettä kohden. Releenohjauskorttiin liitettävät laitteet voidaan kiinnittää ruuviterminaaleihin, joiden oletustila on joko kiinni (normally closed) tai auki (normally open). Laitteiden maatasot kytketään common-nimiseen terminaaliin.

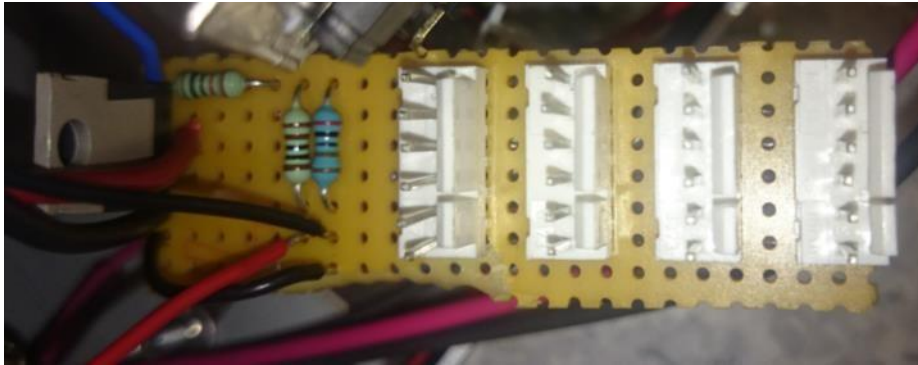
Releenohjauskortti sisältää myös erivärisiä led-valoja osoittamaan erilaisia releiden tiloja ja tiedonsiirtoväylän käyttöä. Lisäksi kortissa palaa valo, kun se on kytketty päälle.

### **USB-ISS**

Robot Electronicsin valmistama USB-ISS-moduuli [17] luo valmiin rajapinnan tietokoneen käyttämän sarjaliikenteen ja muiden erilaisten väylien välille. Lämpösykluslaitteen ohjaus suoritetaan pääsääntöisesti I<sup>2</sup>C-väylän kautta. Ohjain saa tarvitsemansa tehon tietokoneen USB-portin kautta.

## I<sup>2</sup>C-jakaja

I<sup>2</sup>C-väylän kautta ohjataan ja luetaan laitteita. Tiedonsiirtoon tarvitaan johto, jossa erilliset johtimet kello- ja datasiinaalille sekä käyttöjännitteen positiiviselle ja negatiiviselle potentiaalille. I<sup>2</sup>C-jakaja rakennettiin virtavahvistimen kanssa samalle nauhakuparoidulle reikäpiirilevyille (Kuva 15).



Kuva 15. I<sup>2</sup>C-jakaja ja virtavahvistin

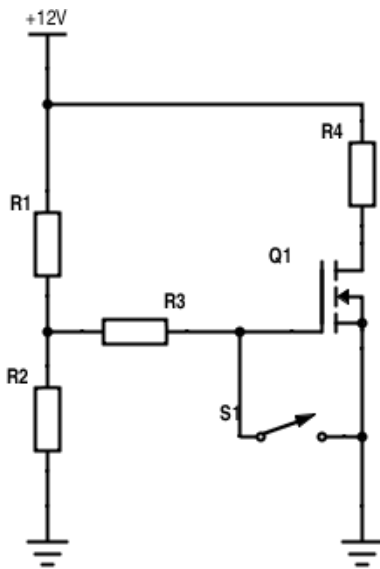
Rakenteeltaan se on yksinkertainen. Neljä erimerkkistä johdinta ovat toisiinsa nähden samassa potentiaalissa. Lämpösykluslaitteessa käytettiin kuusinapaisia Molex-merkkisiä liittimiä (Kuva 15) mahdollisten tulevaisuudessa ilmenevien laajentamistarpeiden varalta. Kaikille I<sup>2</sup>C-jakajaan liitetyille laitteille on nimetty omat osoitteensa, joita kutsumalla voidaan lukea dataa.

## Virtavahvistin

Lämpösykluslauksen lämmitysvaiheessa tehovastusten sähköjä ohjataan päälle ja pois releellä. RLY08-kortin yksittäisen releen virrankesto on yksi ampeeri. Tehovastukset tarvitsevat virtaa enemmän, joten päätettiin valmistaa yksinkertainen virtavahvistin (Kuva 16). Kahden ohmin kuorman tarvitsema virta ( $I$ ) 72 watin teholle ( $P$ ) 12 voltin jännitteellä ( $U$ ) voidaan laskea kaavalla:

$$I = \frac{P}{U}$$

$$\frac{72W}{12V} = 6A$$

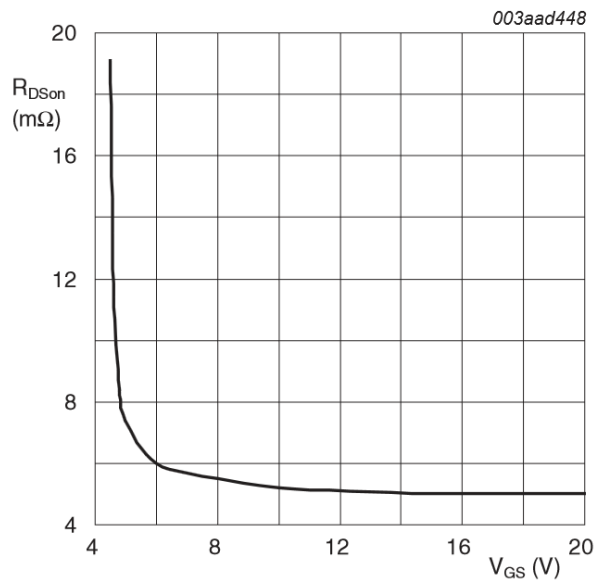


Kuva 16. Vahvistimen kytkentä

Vahvistin pohjautuu N-tyypin MOSFETiin. Se rakennettiin samalle nauhakuparoidulle reikäpiirilevyllä I<sup>2</sup>C-jakotukin kanssa (Kuva 15). Kytkentä on aktiivinen, kun rele S1 on auki. Tällöin virta kulkee tehovastusten kokonaisresistanssin R4 läpi ja lämmönvaihdin kuumenee. Vastuksen R3 suuri resistanssi pitää tyhjäkäyntitehonkulutuksen pienenä siten, että releen minimikontaktivirta pysyy datalehden määrittämän 10 μA yläpuolella [18]. Ensimmäinen versio lämpösykluslaitteesta suunniteltiin toimivaksi 24:llä voltilla. Vahvistimia rakennettiin ennen käyttöjännitteen muuttamista 12:sta volttiin. Tästä syystä vastukset R1 ja R2 muodostavat jännitteenjaon transistorin hilalle. Käyttämällä 24 voltin jännitettä hilalle jää 16 voltia, joka on pienempi kuin datalehden ilmoittama maksimi 20 voltia [19]. Uudella 12:n voltin käyttöjännitteellä arvo on 8 voltia. Kytkennän toimivuus tarkistettiin tällä jännitteellä transistorin datalehdestä [19]. Se todettiin toimivaksi (Kuva 17). Käytetyt komponentit on listattu seuraavalla sivulla (Taulukko 2).

Taulukko 2. Virtavahvistimen komponenttien arvot ja tyypit.

R1	1000 $\Omega$
R2	2000 $\Omega$
R3	10000 $\Omega$
R4	2 $\Omega$
Q1	NXP PSMN6R5-80PS
S1	NEC ED2-5NU



$$T_j = 25^\circ\text{C}; I_D = 25\text{A}$$

Kuva 17. Transistorin DS-resistanssi jännitteen funktiona. Kuvassa transistori on lähes kokonaan saturoitunut eli auki 8 voltin jännitteellä [19].

## Puhallin

Järjestelmän lämmönvaihtimeen suunniteltiin asennettavaksi radiaalituuletin (Kuva 18). Sitä voidaan tarvittaessa säätää päälle ja pois lämpösykluslaitteen ohjausohjelmiston avulla. Tuulettimen tarkoituksena on siirtää lämpösyklusvaiheesta riippuen kylmää tai kuumaa ilmassaa testattavia fotoakustisia kammioita kohti. Se tapahtuu lämmönvaihtimeen tarkoituksenmukaisesti suunniteltujen kanavien läpi alhaalta ylöspäin.

Tuulettimen käytöllä huomattiin olevan vain vähän vaikutusta laitteen toiminnan kannalta, mutta se päätettiin pitää osana järjestelmää siltä varalta, että testien vaatimukset muuttuvat tulevaisuudessa.

### 4.2 Laitteen toiminta

#### 4.2.1 Lämmitys

Laitteen lämmitys toteutettiin rinnankytkettyjen tehovastusten avulla. Ensimmäisessä lämpösykluslaitteen versiossa käytettiin tehon syöttöön 24-voltista jännitelähdettä. Lopulta päädyttiin käyttämään 12 voltin järjestelmää. Vastusten kokonaisresistanssi laskettiin siten, että kyseenomaisella jännitteellä saadaan mahdollisimman suuri teho. Suunnitelmissa otettiin huomioon, että vastusten tehonkestoja tai valitun teholähteen korkeinta ilmoitettua syöttötehoa ei pidä ylittää. Vastuksina käytettiin kymmenen ohmin tehovastuksia, joiden ilmoitettu tehonkesto on 20 wattia. Ne valittiin käytännön syistä suoraan Gaseran komponenttivalikoimasta. Vastusten koko ja kiinnitys soveltuivat hyvin tehonkeston lisäksi haluttuun tarkoitukseen. Lämpösykluslaitteelle valitusta 150 watin teholähteestä sovittiin lämmitykselle käytettäväksi noin puolet. Tehovastusten kanssa sarjaan lisättiin ylikuumenemissuojaksi 70°C lämpötilalle määritetty lämpösulake.

Vastusten haluttu kokonaisresistanssi lasketaan kaavalla:

$$R_{total} = \frac{U^2}{P}$$

$R_{total}$  on kytkennän kokonaisresistanssi

$U$  on järjestelmän käyttöjännite 12 voltia

$P$  on tavoiteltu lämmityksen kokonaisteho ja puolet laitteen teholähteen maksimista:

$$\frac{150W}{2} = 75 \text{ wattia}$$

Kaavaa käyttämällä saadaan kokonaisresistanssiksi:

$$\frac{(12V)^2}{75W} = 1,92 \text{ ohmia}$$

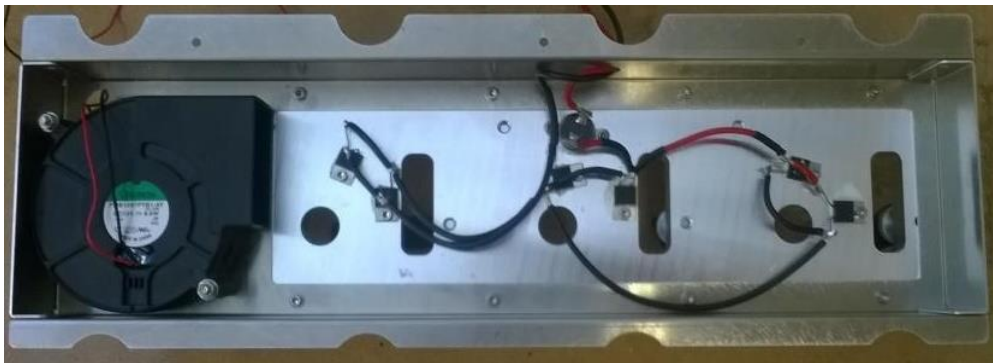
Vastuksia kytkettäessä voidaan päätellä, että viisi 10 ohmin vastusta rinnan muodostaa 2 ohmin kokonaisresistanssin. Päätettiin kuitenkin lisätä kuudes vastus rinnan, koska valmiin kytkennän kokonaisresistanssin uskottiin olevan hieman laskennallista suurempi. Kuuden rinnankytketyn vastuksen resistanssi saadaan kaavalla:

$$R_{Total} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R} + \frac{1}{R}}$$

Vastaukseksi saadaan noin 1,67 ohmia.

Kiinnitettiin tehovastukset lämmönvaihtimeen (Kuva 18). Vastukset yhdistettiin toisiinsa rinnankytkennän mukaisesti ja kiinnitettiin lämmönvaihtimeen. Mitattiin yleismittarilla kokonaisresistanssi ja arvoksi saatiin noin kaksi ohmia. Kokonaistehon määrä tarkistetaan laskemalla:

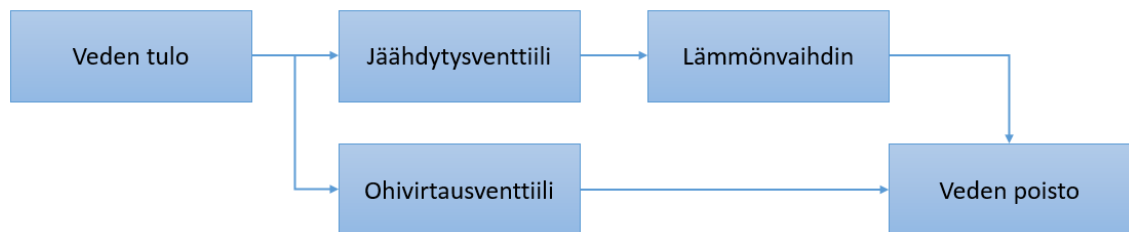
$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{(12V)^2}{2\Omega} = 72W$$



Kuva 18. Lämmönvaihdin tehovastusten kanssa ja radiaalituuletin kuvattuna pohjapuolelta.

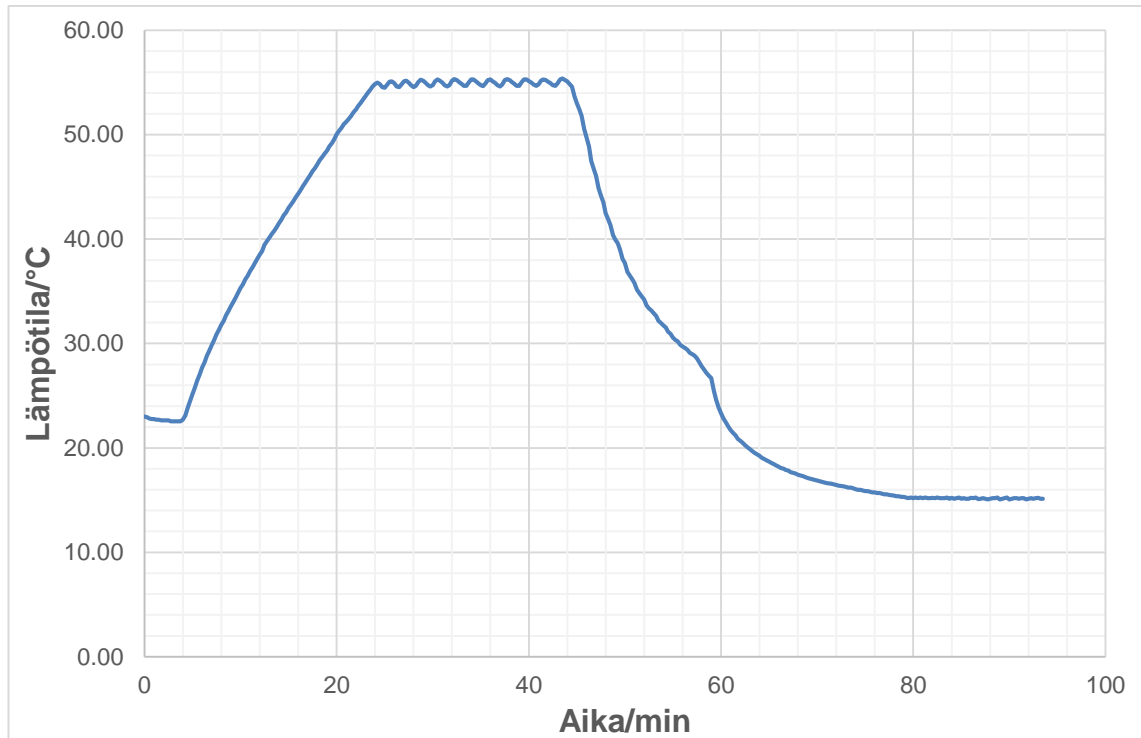
#### 4.2.2 Jäähdytys

Lämpösyklauksen jäähdytysosuus on toteutettu lämmönvaihtimen läpi ohjattavalla kylmällä vedellä. Laitteen ja vesihanauksen väliin on asennettu paineensäädin, jonka avulla voidaan arvioida käytettävän veden virtaus. Jäähdytysnestettä ohjataan kahdella venttiilillä. Ne on suunniteltu siten, että vettä lasketaan jatkuvasti viemäriin joko lämmönvaihtimen läpi tai sen ohi syötettynä. Venttiilit nimettiin jäähdytysventtiiliksi ja ohivirtausventtiiliksi. Jäähdytysmekanismin toiminta on yksinkertainen. Toisen venttiilin ollessa auki jäljelle jäävä on kiinni (Kuva 19). Tällä menetelmällä saadaan aikaan tasainen virtaus. Lisäksi saatetaan estää liiallisen paineen muodostuminen venttiileille.



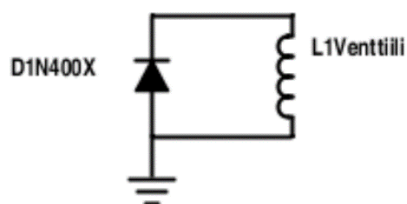
Kuva 19. Vesijäähdytys

Jäähdytyksessä päätettiin käyttää yksinkertaisesti kylmää hanavettä. Se on helppo ja kustannustehokas tapa saavuttaa lämpösyklauksen toiminnan kannalta vaadittava matalin noin 15 °C lämpötila. Hanaveden käyttöön päädyttiin laitteen kehitysvaiheessa. Aikaisemmin suunniteltiin voimakkaalla jäähdytyksellä varustettu vesisäiliö, mutta se koettiin hankalaksi toteuttaa ja käyttää. Lisäksi vesisäiliö olisi vaatinut suuren tilavuutensa lisäksi kohtuuttoman paljon energiaa jäähdytysveden lämpötilan pitämiseksi alle 15 °C:ssa. Talousveden minimilämpötilaa ei ole säädetty erillisellä sosiaali- ja terveysministeriön asetuksella [20], mutta käytännössä kylmän hanaveden lämpötila on tasaista ja riittävän matalaa fotoakustisten kammioiden lämpösyklaukseen.



Kuva 20. Lämpötilan muutos yhden lämpösyklin aikana. Laskevan lämpötilan käytös muuttuu saavutettaessa noin 27°C, joka on ollut keskimäärin huoneen lämpötila testin aikana.

Jäähdytyksessä käytettävien sähköisten vesiventtiilien huomattiin aiheuttavan vikatilanteita DSP-korttien kanssa. Kortit sammuiivat satunnaisesti virtauskomponenttien vaihtaessa tilaa. Venttiilien toimintaa tutkittiin kytkemällä oskilloskooppi niiden sähkönsyötön napojen väliin. Mittarin liipaisuominaisuuden avulla vian aiheuttaja jäljitettiin virtauskomponenttien induktiivisesta rakenteesta aiheutuviin virtapiikkeihin. Ongelma saatiin korjattua asentamalla venttiilien käyttösähkön positiivisen ja negatiivisen navan väliin diodi, jonka tarkoituksena on oikosulkea kaikki mahdolliset estosuuntaiset virtapiikit (Kuva 21).



Kuva 21. Venttiilidiodin kytkentä ja tyyppi. L1Venttiili kuvaa laitteen vesikierrossa käytettävää venttiilityyppiä.

Käytännössä kylmällä hanavedellä laitteen lämpötilan pudottamisen koettiin aiheuttavan erilaisia haasteita. Ensimmäinen ilmeni sen hyvin korkean jäähdystystehon takia. Interferometrin tuottamaa signaalia haluttiin lukea maltillisempien muutosten kanssa. Ongelman arveltiin ilmenevän ainoastaan virtauksen ollessa liian suuri. Niinpä vesihanan yhteyteen asennettiin paineensäädin, jonka avulla voidaan tarkkailla laskettavaa jäähdytysveden määrää.

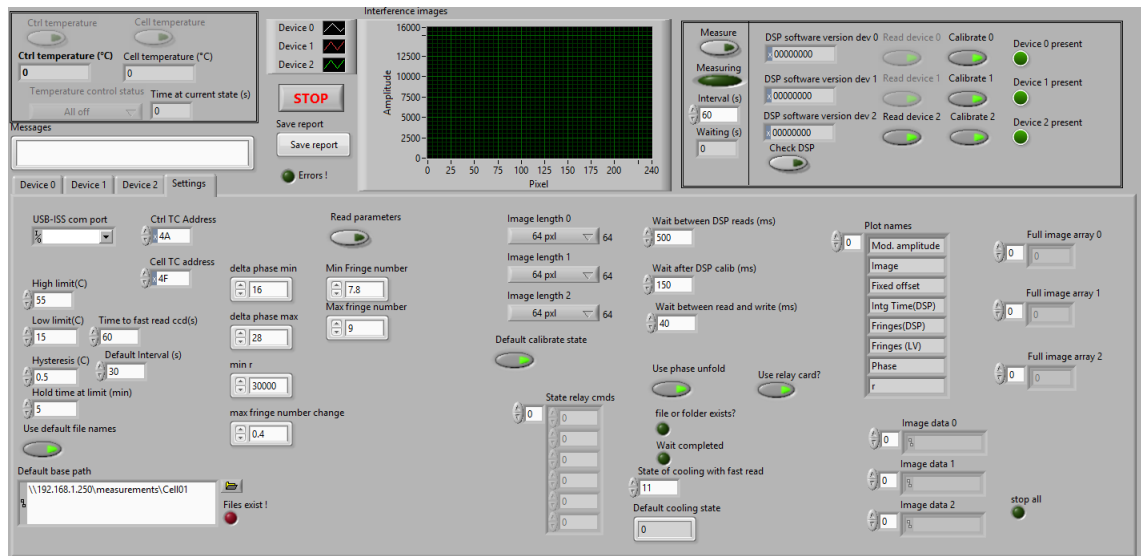
Gaseran laitteita valmistavan alihankkijan tiloihin toimitettujen lämpösykluslaitteiden kanssa huomattiin myös ongelma. Kyseessä olevan merkittävän suurikokoisen tuotantolaitoksen tapauksessa laitteiston jäähdytykselle varatut vesijohdot ovat hyvin pitkiä. Ne kulkevat tilojen sisällä satoja metrejä. Käytännössä putkissa lämmentyneen veden vakiintuminen vesijohtoverkon lämpötilan tasolle voi kestää useita tunteja. Lämpösyklauksen tarve ei välttämättä ole päivittäinen. Myös kiinteästi asennetun vesijohdotuksen suuren hetkittäisen vesimäärän ohivirtauksen toteuttaminen on hankalaa. Tästä syystä järjestelmän käyttöönotto on valmisteltava hyvissä ajoin laskemalla vettä riittävän pitkä aika putkiston läpi ennen lämpösyklauksen aloittamista.

Lisäksi huomattiin kuitenkin tasaisella vesivirtauksella toteutettavan jäähdytyksen olevan merkittävästi epälineaarinen (Kuva 20). Tämä ei ole myöskään suotuisaa interferometrimikrofonin avulla seurattavan juovakuvion antaman informaation kannalta. Käytännössä huomattiin laitteen lämpötilan muuttuvan tasaisesti huoneenlämpöön asti. Sen jälkeen jäähtyminen hidastui merkittävästi. Ongelma saatiin osittain korjattua katkomalla jäähdystyslaitteessa lämmönvaihtimen läpi virtaavaa vettä ohjaamalla se pulssitettuna ohivirtausventtiilille ohjausohjelmiston avulla.

#### 4.2.3 Laitteen ohjaus ja mittausdatan analysointi Labview-ohjelmalla

Labview on kaupallinen korkean tason graafinen ohjelmointiympäristö. Se on yleisesti käytössä laboratorio- ja mittausjärjestelmissä. Labview on suosittu monipuolisten ominaisuuksiensa vuoksi. Se koostuu erilaisista virtuaali-instrumenteista (vi), joita voidaan koota yhteen pääohjelmaan (main-vi). Pääohjelmassa voidaan lukea esimerkiksi erilaisten antureiden antamia arvoja, käynnistää tai sammuttaa laitteita synkronoidusti ja ajaa erilaisia aliohjelmia erilaiseen laskentaan liittyen (Kuva 22). Lukuisista virtuaali-instrumenteista koottu ohjelma voidaan kääntää executive-muotoon, jolloin ohjelman

käyttämisen on mahdollista Labview'n runtime engineen kanssa ilman varsinaista Labview-ohjelmistoa.



Kuva 22. Labview-ohjainohjelmisto.

Gaseran toimesta tehty Tempcycle\_with\_relay\_ctrl.exe - lämpösyklausohjelma kontrolloi releitä, lukee interferometrin dataa ja lämpösyklauksen lämpötilaa, piirtää erilaisia kuvaajia ja tallentaa tietoa haluttuun muotoon. Ohjelman avulla käytetään neljää releitä RLY08-kortin kahdeksasta. Vesiventtiileille on varattu molemmille yksi rele. Lisäksi lämmitystä ohjataan yhdellä releellä. Neljäs rele on tarkoitettu lämmönvaihtimen yhteyteen asennettuun tuulettimeen.

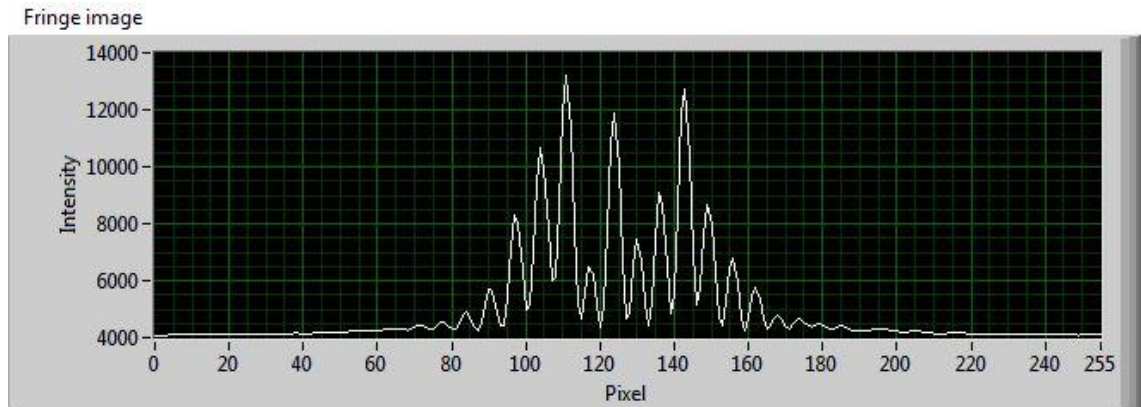
Ohjelma mahdollistaa lämpösyklauksen itsenäisen toiminnan käynnistyksen jälkeen. Se asettaa erilaisia lämpösyklaukseen liittyviä aikamääreitä, järjestyksiä, toimintatiloja ja raja-arvoja. Ohjelman oletusparametreja voidaan tarvittaessa hallita yksinkertaisesti muuttamalla ohjelman kanssa samaan kansioon sijoitettavan parameters-tekstitiedoston sisältöä. Lisäksi arvoja voidaan muuttaa käsin ohjelman jo ollessa käynnissä. Parameters-tiedosto koostuu yksinkertaisesti raja-arvojen ja toimintojen nimistä, joiden vieressä on oletuksena käytettävä lukuarvo. Lisäksi se sisältää käyttäjän avuksi ohjeita ja tallennettavan mittadatan oletuskansion. Parameters-tiedostoon voidaan lisätä kommentteja tavanomaisesti merkitsemällä rivin alkuun ristikkomerkin.

## 5 MITTAUSTULOSTEN TARKASTELU

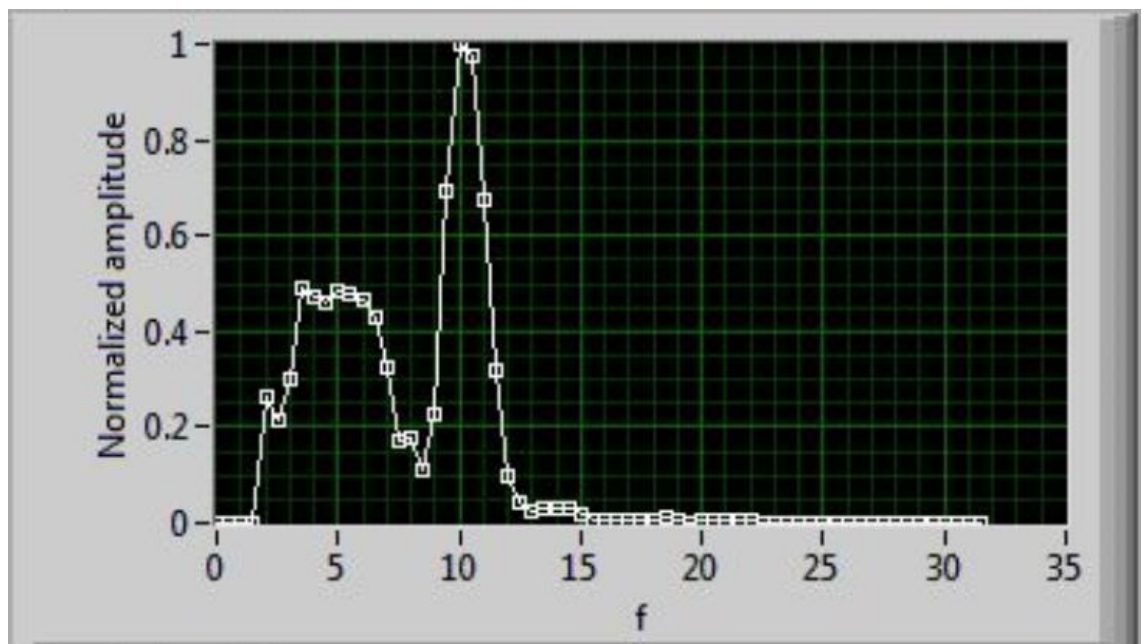
Lämpösykluslaitteen ohjausohjelmisto tulostaa tietoa fotoakustisen kammion käyttäytymisestä kokeen aikana (Kuva 25). Mittausdatan avulla voidaan selvittää, ovatko kyseisen kappaleen ominaisuudet pysyneet haluttujen raja-arvojen sisällä lämpösyklusauksen aikana. Kammioita käytetään myös useissa muissa tuotantotesteissä, jotka suoritetaan joko ennen tai jälkeen lämpösyklausta. Niiden aikana ilmenneitä puutteita tai huomioita ei pääsääntöisesti voida tulkita lämpösyklusadatasta. Koetta läpäisemättömien kammioiden osalta voidaan joutua tekemään kaikki tuotantotestit uudestaan.

Tässä kappaleessa tarkastellaan interferometrin laserin ja optiikan sekä kammion piiläpän toimintaa lämpösyklusauksen aikana. Tämä tehdään pääsääntöisesti tulkitsemalla lämpösykluslaitteen ohjainohjelmiston tulostamia kuvaajia. Kaikki tässä kappaleessa tarkasteltavat kuvat esittävät erään satunnaisesti valitun kammion oikeata lämpösyklusadataa. Kammio on syklatu tässä esimerkissä 18 kertaa (Kuva 26). Kyseinen kammio on läpäissyt lämpösyklusaukseen eli halutut lukemat ovat pysyneet raja-arvojen sisällä.

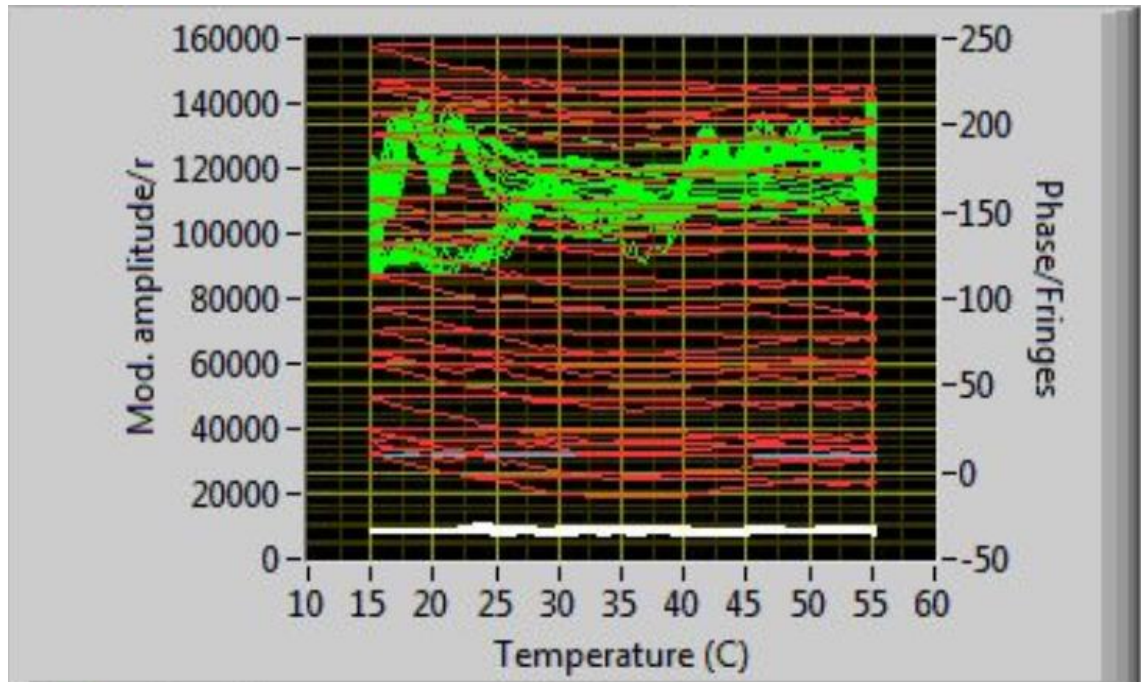
Modulaatioamplitudin ja integrointiajan avulla voidaan kertoa fotoakustisen kammion toiminnasta lämpösyklusauksen aikana. Modulaatioamplitudilla tarkoitetaan juovakuvion syvyyttä eli huippuamplitudin ja kohinatason erotusta (Kuva 23). Laserin intensiteetin arvo esimerkiksi 10000 on suoraan verrannollinen modulaatio-amplitudin suuruuteen. Kirkkaampi valo erottuu kohinatasosta selkeämmin. Tästä voidaan päätellä onko valonlähde pysynyt stabiilina lämpösyklusauksen aikana. Juovakuvion muodosta voidaan päätellä onko laser ja optiikan suuntaus pysynyt säädetyillä paikoillaan. Integrointiaika kertoo CMOS-kennon mittausajan. Sitä voidaan verrata kameran valotusaikaan, jossa kennoa altistetaan valolle määrätty aika. Liian lyhyt aika jättää juovakuvion kohinan sekaan ja liian pitkä saturoi sen käyttökeltottomaan muotoon. Juovakuvion tapauksessa integrointiaikaa voidaan säätää tiettyjen rajojen puitteissa.



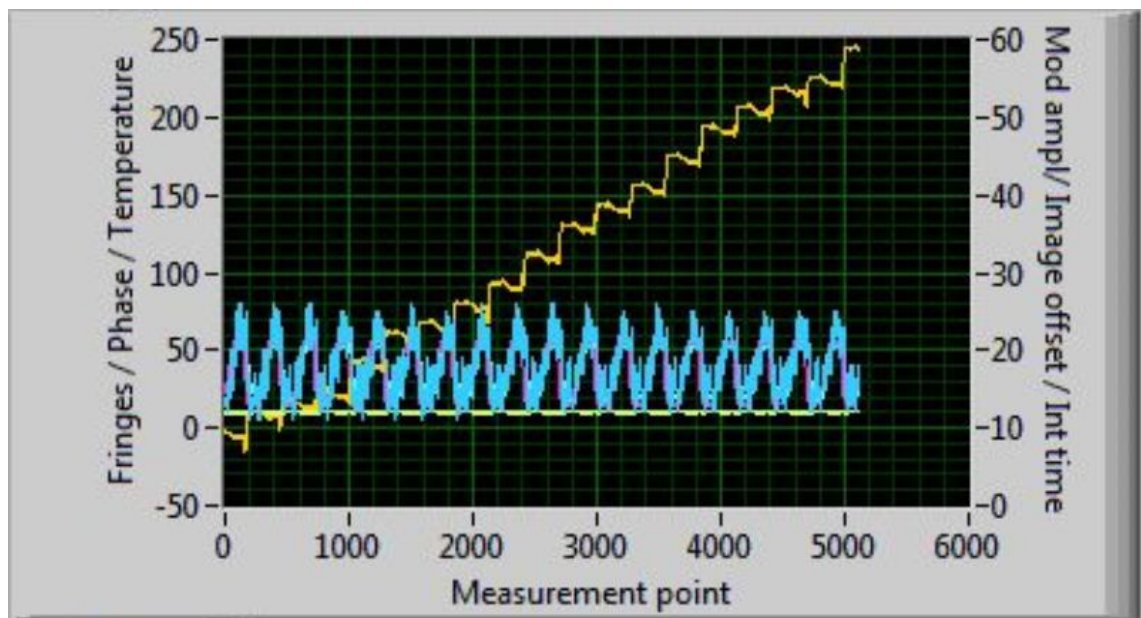
Kuva 23. Juovakuvion syvyys ja muoto. CMOS-kennon pikselit X-tasossa. Pimeätason intensiteetti on noin 4000 ja huippuamplitudi noin 13000. Intensiteetin lukuarvot ovat mielivaltaisia.



Kuva 24. FFT-muunnoksesta saatu amplitudispektri juovakuvion 64 pikselin alueelta.



Kuva 25. Vihreä on  $r$ , joka on juovakuvion FFT-muunnoksen piikin korkeus. Se on suoraan verrannollinen kameran näkemään valon määrään. Valkoinen on modulaatioamplitudi. Punaisen värin tarkoitus on kuvata läpän vaihetta, mutta johtuen näytteenottotaajuudesta ja jäähtytysnopeudesta se ei toimi oikein.



Kuva 26. Lämpösykliä kuvattuna sinisellä värillä. Keltaisella kuvattu on vaihe, jonka laskenta ei toimi. Valkoinen väri näyttää juovakuvion juovien määrän, joka kertoo optisen matkan säilymisestä lämpösyklin aikana.

CMOS-kennolla on 512 pikseliä. Niistä DSP-kortti lukee ensimmäiset 256. Näiden 256 pikselin avulla luetusta juovakuviosta valitaan sen keskeltä sopiva 64 pikselin kokoinen alue. Tästä kohdasta tehdään FFT-muunnos, josta esitetään positiivisen puolijakson spektri (Kuva 24). [21]

## 6 YHTEENVETO

Opinnäytetyössä käydään läpi fotoakustisille kammioille tarkoitetun lämpösykluslaitteiston kokoonpanoa ja kehittämistä. Lisäksi tarkastellaan lämpösykluslaukseen ja fotoakustiseen kaasunmittausteknologiaan liittyviä peruseräiteitä.

Työssä rakennettiin tutkimusluontoisesti lämpösykluslaite. Laitteiston mekaniikka rungon ja siihen liittyvien apulaitteiden, kuten elektroniikkakorttien pitimien, osalta saatiin valmiiksi suunniteltuna. Laitteen toiminnan suunnittelu muiden osa-alueiden, kuten lämpösykluslauksen lopullisen toteutuksen osalta jätettiin alussa avoimeksi. Rakennettaessa opittiin fotoakustisten kammioden vaatimuksista lämpösykluslauksen osalta. Muutoksia ja lisäyksiä tehtiin sen mukaan, että havaitut tarpeet voitiin täyttää. Paljon muutoksia tehtiin myös itse laitteeseen työn edetessä.

Projektin jälkeen saatiin valmiiksi lämpösykluslaite, jota voidaan käyttää fotoakustisten kammioden kehitystehtävissä ja tuotannossa. Gaseran omien lämpösykluslaitteiden lisäksi laitteistoja toimitettiin yrityksen teknologiatuotteita valmistavalle alihankkijalle. Lämpösykluslaitteella saadaan testattua fotoakustiset kammiot ennen kuin ne siirtyvät tuotantoprosessissa eteenpäin ja lopulta asiakkaalle.

Tulevaisuudessa lämpösykluslaitetta voidaan kehittää erilaisilla tavoilla. Päivityksiin voidaan sisällyttää esimerkiksi käyttäjäkokemukseen, lämpösykluslauksen lineaarisuuteen ja laskentaan sekä ohjausohjelmiston yksityiskohtiin liittyviä parannuksia. Lisäksi laitteistoon voidaan lisätä ominaisuuksia lämpösykluslauksen rinnalle. Tulevaisuudessa helposti toteutettavissa oleva laajennus voisi käsittää erilaisia laitteeseen lisättäviä antureita esimerkiksi ilmankosteudelle. Niiden avulla saataisiin enemmän tietoa mittausten aikana vallinneista olosuhteista. Antureista luettava tieto voisi olla apuna selvitetessä erilaisten lämpösykluslaavassa fotoakustisessa kammiossa ilmenevien ongelmien ratkaisemisessa.

## LÄHTEET

- [1] 2016 Minco Products Inc., "Thermal cycling," [Webjulkaisu]. Saatavilla: <http://www.minco.com/Heaters/Product-Applications/Thermal-Cycling>. (Luettu 31.3.2016).
- [2] ESPEC CORP., "Environmental Stress Chamber," [Webjulkaisu]. Saatavilla: <http://www.espec.co.jp/english/products/env-test/tcc150/>. (Luettu 31.3.2016)
- [3] Järvi M., Öljyyn liuenneiden kaasujen analyysi muuntajadiagnostiikassa, Pro gradu –tutkielma, Turun Yliopisto, 2014, 90 s.
- [4] Sinisalo S., Anestesiakaasupäästöjen mittaaminen piiläppämikrofonia hyödyntävällä fotoakustisella kaasuanalysaattorilla, Pro gradu –tutkielma, Turun Yliopisto, 2011, 96 s.
- [5] Tong Cui, Y.J. Chao, J.W. Van Zee, Thermal stress development of liquid silicone rubber seal under temperature cycling, *Polymer Testing*, 2013, 32.7: 1202-1208.
- [6] Pang, H. L. J., Microstructure and intermetallic growth effects on shear and fatigue strength of solder joints subjected to thermal cycling aging, *Materials Science and Engineering*, 2001, 307.1: 42-50.
- [7] JESD22-A104D, Temperature Cycling. JEDEC Solid State Technology Association 2009
- [8] Espec corp., Rapid-Rate Thermal Cycle Chamber TCC-150W. [Datalehti]. Saatavilla: <http://www.espec.co.jp/english/products/env-test/tcc150/>. (Luettu 20.4.2016).
- [9] Sievilä P., Rytönen V-P., Hahtela O., Chekurov N., Kauppinen J., Tittonen I. Fabrication and characterization of an ultrasensitive acousto-optical cantilever. IOP Publishing, 2007.
- [10] Koskinen V., Fonsen J., Roth K., Kauppinen J., Progress in cantilever enhanced photoacoustic spectroscopy. *Vibrational spectroscopy*, 2008, 48.1: 16-21.
- [11] Koskinen V., Fonsen J., Kauppinen J., Kauppinen I., Progress in cantilever enhanced photoacoustic spectroscopy. *Vibrational spectroscopy*, 2008, 48.1: 16-21.
- [12] Koskinen V., Fonsen J., Roth K., Kauppinen J., Progress in cantilever enhanced photoacoustic spectroscopy. *Vibrational spectroscopy*, 2008, 48.1: 16-21.
- [13] Gasera Oy., "Optical Microphone Cantilever Sensor," [Webjulkaisu]. Saatavilla: <http://www.gasera.fi/technology/optical-microphone/>. (Luettu 31.3.2016)
- [14] "CMOS linear image sensors S9227 series," Hamamatsu Photonics K.K., Solid State Division, Hamamatsu City, Japan. 2014.
- [15] Kuusela T., Kauppinen J., Photoacoustic Gas Analysis Using Interferometric Cantilever Microphone. *Applied Spectroscopy Reviews*. 2007.
- [16] M.Sc. Kittilä V-M., henkilökohtainen keskustelu, 14.3.2016.
- [17] Robot-Electronics, "USB-ISS Multifunction USB Communications Module," [Webjulkaisu]. Saatavilla: [http://www.robot-electronics.co.uk/html/usb\\_iss\\_tech.htm](http://www.robot-electronics.co.uk/html/usb_iss_tech.htm). (Luettu 31.3.2016).
- [18] "Miniature Signal Relay ED2/EF2 Series," NEC TOKIN Corporation. 2007.
- [19] "PSMN6R5-80PS N-channel 80 V 6.9 mΩ standard level MOSFET in TO220," NXP B.V. 2010.

[20] Finlex, "Sosiaali- ja terveysministeriön asetus talousveden laatuvaatimuksista ja valvontatutkimuksista," [Webjulkaisu]. Saatavilla:  
<http://www.finlex.fi/fi/laki/alkup/2000/20000461>

[21] FT. Raittila J., henkilökohtainen keskustelu, 28.3.2016.