

TEKNILLINEN KORKEAKOULU  
Teknillisen fysiikan koulutusohjelma

ERIKOISTYÖ  
Tfy-44.198 Materiaalifysiikka  
05.12.2000

## SONOLUMINESENSSILAITTEISTON PARAMETRIT JA NIIDEN MÄÄRITYS

Mikko Voutilainen  
51693R

# Sisältö

<b>1</b>	<b>Johdanto</b>	<b>2</b>
1.1	Sonoluminesenssi . . . . .	2
1.2	Sonoluminesenssin historiaa . . . . .	2
1.3	Erikoistyön tarkoitus . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Käytetty koelaitteisto</b>	<b>4</b>
2.1	Aiempi avoin systeemi . . . . .	4
2.2	Nykyinen suljettu systeemi . . . . .	4
2.3	Resonaattorin akustiikka . . . . .	6
2.4	Sähköpiiri . . . . .	7
2.5	Ilman poisto vedestä . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Resonanssimoodien laskeminen</b>	<b>8</b>
<b>4</b>	<b>Optimiparametrien etsiminen</b>	<b>11</b>
4.1	Pietsojen oikea kiristys . . . . .	13
4.2	Liunneen ilman määrä ja siihen liittyvä kupladynamiikka . .	14
4.3	Sonoluminesenssin etsintä . . . . .	16
<b>5</b>	<b>Sonoluminesenssilaitteistosta mitattuja parametrejä</b>	<b>18</b>
5.1	Liunneen ilman määrä . . . . .	18
5.2	Lämpötila . . . . .	20
<b>6</b>	<b>Pohdinnat</b>	<b>23</b>
6.1	Tulosten luotettavuus . . . . .	23
6.2	Laitteiston jatkokehittäminen . . . . .	25
<b>7</b>	<b>Yhteenveto</b>	<b>26</b>
<b>8</b>	<b>Viitteet</b>	<b>27</b>
<b>A</b>	<b>Laitteiston piirustukset</b>	<b>29</b>
A.1	Resonaattori sivulta . . . . .	29
A.2	Päätylevyt . . . . .	30
A.3	Pietson kiinnittimen päällyslevy . . . . .	30

# 1 Johdanto

## 1.1 Sonoluminesenssi

Sonoluminesenssi on ilmiö, jossa nesteessä olevaan kuplaan kohdistettu voimakas ultraäänikenttä saa kuplan lähettämään valoa. Ilmiö jaetaan usein transientteihin monen kuplan systeemeihin (MBSL, Multibubble Sonoluminescence) sekä yksittäiseen äänikenttään vangittuun kuplaan (SBSL, Single Bubble Sonoluminescence). Tässä työssä käsitellään lähinnä yksittäisen kuplan sonoluminesenssia, johon viitataan jatkossa lyhyesti SL.

Äänikentässä voimakkaan epälineaarisesti kavitoiva kupla romahtaa suurella nopeudella, jopa Mach 4 [1], lähes kovaan ytimeen ("Van der Wals hard core") saakka. Samalla kupla kuumenee tuhansien (MBSL) [2], jopa kymmenien tuhansien (SBSL) [3], [4] asteiden lämpötilaan. Syntyvä valopulssi on erittäin lyhyt, sillä pienin mitattu yläraja pulssin kestolle on 50 ps [5]. Suuri lämpötila saa ilman kaasut ja vesihöyryn reagoimaan keskenään ja liukenemaan veteen, jolloin kuplaan kertyy vain ilman sisältämiä kemiallisesti inerttejä jalokaasuja, pääasiassa argonia [6, 7, 8].

Yleisimmin hyväksytyn teorian mukaan romahdusvaiheessa muodostuu shokkiaaltoja, jotka kohdentuvat kuplan keskellä ja räjähtävät ulospäin kuumentuen kuplan korkeisiin lämpötiloihin (kuva 1). Kuumentunut kaasu muodostaa plasman, jonka lähettämä säteily nähdään valona. Valon spektri muistuttaa mustan kappaleen säteilyn tai Bremsstrahlung-säteilyn spektriä [9]. Säteilymekanismia on selitetty myös elektroni-ionirekombinaatiolla.

## 1.2 Sonoluminesenssin historiaa

Kavitaatiotutkimuksen katsotaan saaneen alkunsa 1917, kun englantilainen fyysikko lordi Rayleigh sai Kuninkaalliselta laivastolta tehtäväkseen selvittää laivojen potkurien voimakasta kulumista. Rayleigh osoitti kulumisen johtuvan potkurien pinnalle suurten paine-erojen vaikutuksesta syntyvien kuplien kavitoinnista, joka synnyttää erittäin voimakkaita paikallisia paineaaltoja pienelle alueella potkurin pinnassa [11]. Rayleigh-Plesset -yhtälöä (kaava 2) käytetään yhä mallintamaan sonoluminesenssissa kavitoivan kuplan liikettä.

Ensimmäistä maailmansotaa varten kehitettyjen kaikuluontainten parissa työskentelevät kemistit huomasivat 1920–1930 luvuilla ultraäänien katalysoivan kemiallisia reaktioita. Hieman myöhemmin Richards ja Loomis havaitsivat, että vedessä, johon kohdistetaan suuriamplitudista ultraääntä syntyy  $H_2O_2$ :ta. Reaktioon tarvittava energiamäärä on huomattavasti suurempi kuin ääniaaltojen sisältämä energia. Tämän johdattamana Frenzel ja Schultes Kölnin yliopistosta löysivät sonoluminesenssin 1934 [12].

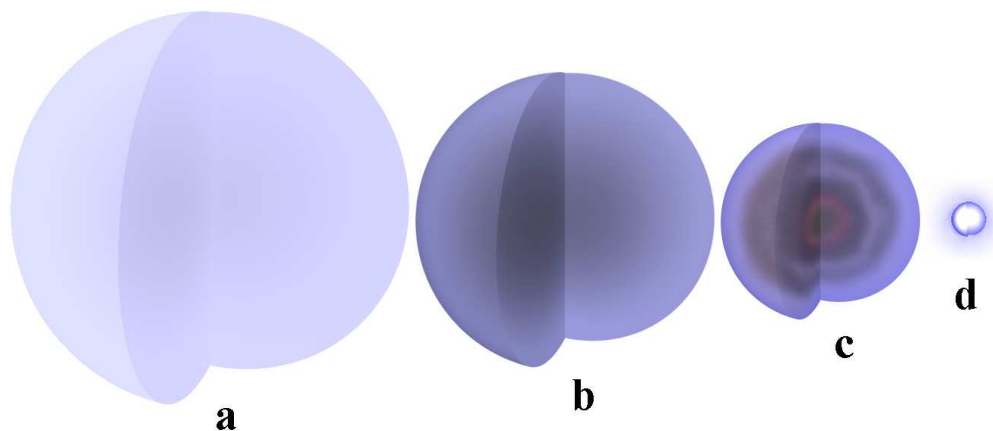
Sonoluminesenssitutkimus keskittyi pitkään transienttien kuplapilvien tutkimukseen (MBSL), kunnes väitöskirjansa parissa työskennellyt Gaitan vuonna 1990 onnistui kehittämään kokeellisen järjestelyn yksittäisen kuplan (SBSL) vangitsemiseksi stabiiliin tilaan, jossa kupla värähtelee periodisesti

ja lähettää valopulssin kerran periodin aikana [13]. SBSL on sittemmin tuotannut suuren määrän ilmiötä käsitteleviä tutkimuksia ja artikkeleita. Sonoluminesenssille on keksitty myös useita varsin eksoottisia selityksiä, kuten kvanttityhjösteily [10]. Tämä teoria on kuitenkin useaan otteeseen osoitettu erittäin epätodennäköiseksi.

### 1.3 Erikoistyön tarkoitus

Tässä erikoistyössä tarkastellaan Materiaalifysiikan laboratoriossa kesällä 2000 valmistuneen sylinterimäisen resonaattorin virittämistä toimintakuntoon sekä sonoluminesenssin kannalta olennaisten parametrien määrittämistä ja säätämistä kohdalleen suljetussa systeemissä.

Työn lähtökohtana on aikaisempi avoin systeemi, joka on nyt täydennetty suljetuksi. Apuna on käytetty laboratoriossa aiemmin käytössä olleella pallomaisella resonaattorilla määritettyjä parametrejä [14] sekä muiden tutkijoiden kokemuksia sylinterimäisten resonaattorien käytöstä [15]. Myös kirjallisuudesta löytyviä viitteitä sonoluminesenssin aikaansaamiseksi tarvittavan ilman osapaineen ja veden lämpötilan osalta on pyritty hyödyntämään. Kukin koelaitteisto on kuitenkin oma yksilönsä, ja siksi tarkkojen parametrien löytäminen kirjallisuudesta ei ole mahdollista.



Kuva 1: Yleisesti hyväksytyimmän mallin mukaan sonoluminesenssikuplan kuumentuminen tapahtuu useassa vaiheessa. Ensimmäisessä vaiheessa adiabattinen puristuminen kuumentaa kuplaa (a–b). Seuraavassa vaiheessa yli äänennopeudella romahtava seinämä laukaisee shokkiaaltoja kohti kuplan keskustaa. Shokkirintama kohdentuu ja kuumentaa kuplan keskustaa entisestään (c). Viimeisessä vaiheessa kupla on puristunut lähes kiinteään ytimeen (Van der Waals hard core) asti. Ulospäin räjähtävät shokkiaallot kuumentavat kuplan kymmenien tuhansien Kelvinien lämpötilaan, ja kupla lähettää lyhyen valopulssin näkyvällä alueella (d).

Sonoluminesenssi on voimakkaasti riippuvainen veteen liunneen ilman määrästä, joten liunneen ilman määrän säätely ja vakioiminen kohdalleen on välttämätön edellytys laitteiston käytölle tutkimuksessa. Tähän tavoitteeseen on nyt päästy. Nykyinen suljettu systeemi mahdollistaa aiempaa paremman ilman osapaineen hallinnan. Sonoluminesenssi on suuresti riippuvainen myös lämpötilasta, mutta tämän säätely ei vielä onnistu nykyisellä laitteistolla. Oikein viritettynä resonaattorin lämpötila saadaan kuitenkin vakiintumaan vain muutaman asteen huoneen lämpötilaa korkeammalle, jolloin kupla on pienillä säädöillä mahdollista pitää vakaana useita tunteja.

## 2 Käytetty koelaitteisto

### 2.1 Aiempi avoin systeemi

Aikaisemmin Materiaalifysiikan laboratoriossa ollut sonoluminesenssilaitteisto oli avonainen, eli veden ilmapitoisuus ei ollut tarkasti hallittavissa. Laitteisto koostuu taaajuusgeneraattorista, vahvistimesta, äänen tuottavista pietsosista sekä pallomaisesta resonaattorista. Lisäksi käytössä on oskilloskooppi, jolla seurataan vahvistimen tuottamaa jännitettä, virtaa pietsojen yli sekä resonaattoriin liimatun mikrofonin signaalia.

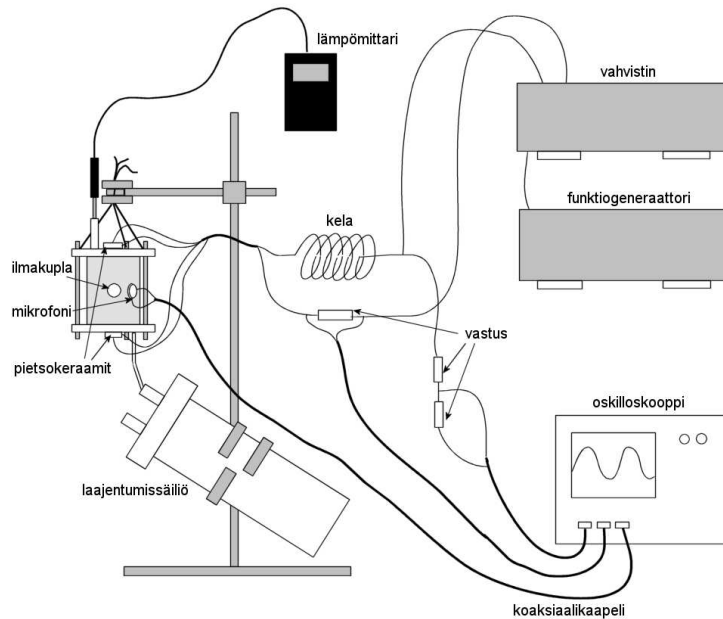
Ilman poisto vedestä sekä halutun ilmamäärän luottaminen suoritetaan erillisessä suljettua systeemiä varten valmistetussa laitteistossa, joka koostuu tyhjäpumpusta, tarkkuusventtiilillä varustetusta putkistosta, typpiloukusta sekä veden säilytysastianä käytetystä 1,0 l Erlenmayer-pullosta lisäputkella [16]. Putkistossa olevaa painetta tarkkaillaan painemittarilla, jonka tarkkuusmitta-alueella on  $\pm 10$  mbar.

### 2.2 Nykyinen suljettu systeemi

Suljetun systeemin (kuva 2) pohjana on aikaisemmin käytetty avoin systeemi. Jo aiemmin suljettua systeemiä varten rakennettuun vedenvalmistulaitteistoon ei ole juurikaan tehty lisäyksiä. Ainoana muutoksena Erlenmayer-pullon lisäputkeen on liitetty pikaliitin, joka mahdollistaa veden siirron päästämättä vettä kosketuksiin ilman kanssa. Tarkasti suljettu laitteisto kuvataan Tuula Mäen erikoistyössä [17].

Resonaattorin oheislaitteista oskilloskooppi, signaaligeneraattori ja vahvistin ovat käytössä ilman muutoksia. Suurimmat muutokset ovat kohdistuneet itse resonaattoriin, joka on vaihdettu sylinterimäiseen (kuva 3). Sylinterimäisen rakenteen etuna on erilaisten liitännöiden helppo läpivienti päätylevyjen kautta.

Resonaattoriin vievät johdot on uusittu ja vaihdettu osittain koaksiaalikaapeliin sähköisten häiriöiden vähentämiseksi kaapeleiden välillä. Kupla tuotetaan tiivistetyn läpiviennin kautta kytketyllä hehkulangalla, johon saadaan virta kahdesta sarjaan kytketystä 9 V paristosta. Piiriin liitetty



Kuva 2: Käytössä oleva nykyinen suljettu systeemi. Vettä siirrettäessä lämpömittari poistetaan resonaattorista ja tilalle asetetaan pikaliittimellä varustettu kumiletku, jonka kautta vesi tuodaan resonaattoriin. Laajentumissäiliötä käytetään paitsi paineentasaukseen, myös veden imemiseen alipaineella resonaattoria täytettäessä.

painokatkaisija mahdollistaa hyvin lyhyen kuplituksen, jolloin ylimääräinen lämmöntuotto on minimissään.

Pietsojen kiinnityksessä todettiin mekaaninen kiinnitys parhaaksi. Pietsoja painetaan suoraan teräksistä päätylevyä vasten tasaiseksi hiotuilla kuparinapeilla, jotka on liimattu eristävällä epoksilla suurempaan rautalevyyn (kuva 14). Tasainen puristus on varmistettu kolmella symmetrisesti asetetulla ruuvilla ja mutterilla, joista kutakin voidaan kiristää erikseen (kuva 3).

Veden paine pidetään vakiona alalevyyn kapillaariputken kautta liitettyllä kaasunkeräysspussilla, jota käytetään nesteen laajentumissäiliönä. Kaasunkeräysspussia hyödynnetään myös veden siirrossa vedenvalmistulaitteistosta resonaattoriin. Resonaattoriin imetään tyhjä ja pussin ympärille n. 150 mbarin suhteellinen alipaine Erlenmayeriin nähden. Tällöin paine-ero työntää veden 100–400 mbarin paineessa olevasta Erlenmayer-pullosta resonaattoriin. Veden siirto tapahtuu 6 mm sisähalkaisijaltaan olevan putken kautta, jossa on kiinni kumiletkuun liitetty pikaliitin. Kun vesi on valmista ja resonaattori normaalipaineessa, kumiletku poistetaan ja tilalle liitetään kumitulpalla tiivistetty lämpömittarin anturi.

## 2.3 Resonaattorin akustiikka

Tärkein tekijä sonoluminesenssin kannalta on riittävän voimakas ja laadukas äänikenttä. Kun astia on saatu resonoimaan, veteen syntyy paineantinoodeja, jotka vetävät kuplan puoleensa. Yleensä kokeessa käytetään astian ensimmäistä resonanssia, jolloin paineantinoodi sijaitsee resonaattorin keskellä. Äänikentän kuplaan aiheuttama voima riittää kumoamaan nosteen ja kupla jää levitoimaan.

Sonoluminesenssiin tarvittava paineamplitudi on kirjallisuuslähteiden mukaan luokkaa 1.2–1.5 bar. Kokeiden perusteella arvoituna tämä vastaa n. 5–8 V mikrofonisignaalia nykyisessä laitteistossa. Kupla käy paineamplitudin kasvaessa läpi useita vaiheita: vangitsemisraja, liukenemisraja, tanssimisraja, stabiloitumisraja sekä alempi ja ylempi sonoluminesenssiraja. Ylemmällä sonoluminesenssirajalla kupla yleensä katoaa yhtäkkisesti, mutta toisinaan kupla alkaa amplitudia kasvatettaessa ensin huojahdella satunnaisesti, sitten himmetä ja väristä rajusti juuri ennen katoamista.

Sähköisen piirin Q-arvo kertoo hukkatehon suhteen piiriin varastoituneeseen energiaan ja mekaanisen resonaattorin Q-arvo hukkatehon suhteen resonaattoriin varastoituneeseen energiaan. Q-arvot määritellään kaavalla

$$Q = \frac{\omega_r * W}{P_l}, \quad (1)$$

jossa  $\omega_r = 2\pi f_r$  on resonanssikulmataajuus,  $W$  on resonaattoriin tai sähköiseen piiriin varastoitunut energia ja  $P_l$  on häviöteho. Suurella Q:n arvolla on siis mahdollista synnyttää voimakas amplitudikenttä resonanssitaajuudella pienellä syöttöteholla.

Toisaalta Q-arvo kuvaa myös resonaattorin taajuusselektiivisyyttä. Pienellä Q-arvolla resonanssialue on laaja, mutta suurin saavutettavissa oleva varastoituneen energian määrä pieni. Suurella Q:n arvolla ongelmaksi muodostuu resonanssin taajuuskaistan kapeus. Suurin varastoituneen energian määrä kapealla taajuuskaistalla on korkea, mutta pienenee voimakkaasti taajuuskaistan ulkopuolella. Tämä vaikeuttaa resonanssin säilyttämistä akustisen resonanssitaajuuden vaeltaessa lämpötilan mukana. Käytännössä resonaattorin Q-arvoa ei ole kuitenkaan saatu liian suureksi stabiloituneen laitteiston muutaman kymmenyksen lämpötilanvaihteluihin nähden. Resonaattorin akustista Q-arvoa sekä amplitudia voidaan säätää pietsojen kiristystä ja kiristykseen tasapainoa muuttamalla sekä pienentämällä akustisia häviöitä.

Suurella Q-arvolla pietsoihin menevässä virrassa on varsin helposti havaittava piikki resonanssikohtassa. Mikrofonisignaali on puhtaasti sinimuotoinen, ja kupla stabiloituu helposti. Usein stabiili SL voidaan havaita siniaallon päälle muodostuvista kuplan kavitoinnista aiheutuvista väreistä (kuva 7). Jos signaalin laatu on hyvä, resonanssikohta terävä ja kupla kavitoi voimakkaasti, ovat väreet selviä ja resonanssikohta voidaan määrittää jopa n. 1 Hz:n tarkkuudella.

## 2.4 Sähköpiiri

Jotta pietsot saataisiin tuottamaan riittävästi ääntä, niihin on syötettävä suuri jännite. Koska vahvistimella on rajoituksensa, on sähköpiirin impedanssi säädettävä mahdollisimman pieneksi, jotta saataisiin aikaiseksi riittävä äänikentän amplitudi. Tämä tapahtuu säätämällä piiriin liitetyn kelan induktanssi vastaamaan pietsojen kapasitanssia, jolloin piiri saadaan sähköiseen resonanssiin. Induktanssi ja kapasitanssi ovat molemmat taajuudesta riippuvia, mistä johtuen kelan induktanssia joudutaan säätämään akustisen resonanssitaajuuden muuttuessa. Tämä tapahtuu siirtämällä kelan sydämenä käytettävää grafiittisauvaa.

Grafiittisauva kuumenee hieman käytössä siihen indusoituvien pyörrevirtojen johdosta, mutta pienillä, alle 3V:n ajojännitteillä, kuumeneminen ei yleensä ole ongelma. Pietsojen, ilmeisesti myös grafiittisauvan, kuumeneminen on kuitenkin eksponentiaalisesti riippuvaista piiriin syötetystä jännitteestä. 4-5V ajojännitteellä (vahvistimesta saatava jännite on noin satokertainen) pietsot ja grafiittisauva kuumenevat voimakkaasti ja tästä aiheutuu kahdenlaisia ongelmia: sonoluminesenssin kirkkaus vaimenee eksponentiaalisesti lämpötilan kasvaessa ja lisäksi grafiittisauvan kuumeneminen voi heikentää sähköisen piirin Q-arvoa.

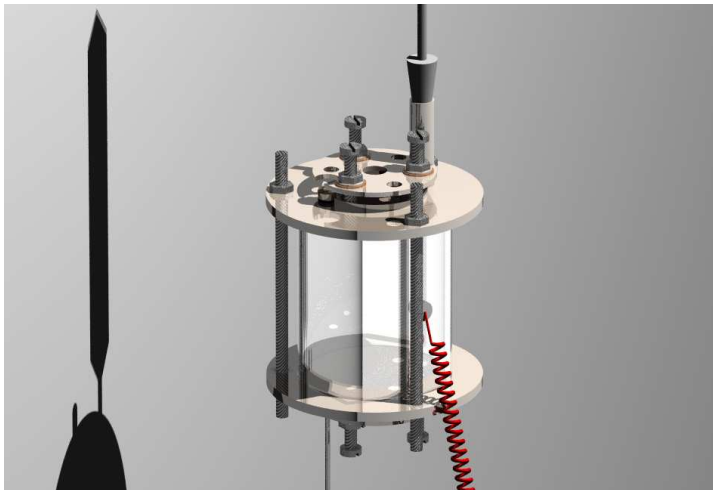
Resonaattorin mekaanisen Q-arvon ollessa suuri sonoluminesenssi saadaan aikaan jopa alle 2.5 V:n jännitteellä, jolloin grafiittisauva ja pietsot lämpenevät vähän ja resonaattorin lämpötila vakiintuu 3–4 °C ympäröivää ulkolämpötilaa korkeammalle. Mekaanisen resonanssin ollessa huono on jouduttu kuitenkin käyttämään yli viidenkin voltin ajojännitteitä, jolloin resonaattorin lämpötila nousee varttituntissa yli 38 °C ja grafiittisauva lämpenee tulikuumaksi.

## 2.5 Ilman poisto vedestä

Äänikentässä värähtelevä kupla on jatkuvasti dynaamisessa tasapainossa ympäröivän nesteen kanssa. Laajentumisvaiheen aikana kuplaan diffundoituu kaasua ja supistumisvaiheen aikana kaasua liukenee veteen. Koska kuplan värähtely on voimakkaasti epälineaarista, on laajentumisvaihe kuitenkin huomattavasti pidempi kuin supistumisvaihe. Siksi kylläisessä vedessä kuplaan diffundoituu enemmän ilmaa kuin sieltä liukenee pois, ja kupla kasvaa nopeasti.

Dynaaminen tasapaino saavutetaan, kun vedestä poistetaan riittävästi ilmaa. Nykyisellä laitteistolla 100–350 mbar on havaittu sopivaksi. Kuplan tasapainoon vaikuttaa myös käytetty äänikentän voimakkuus, sillä laajentumisvaiheen suhteellinen pituus kasvaa äänikentän paineamplitudin kasvaessa. Tasapainon säätö on tarkkaa, sillä liian suurella ilmamäärällä kupla kasvaa ja muuttuu epästabiiliksi suurilla amplitudeilla, kun taas liian pienellä ilmamäärällä kupla liukenee kaikilla amplitudeilla.





Kuva 3: 3D-malli kokeessa käytetystä resonaattorista. Veden vienti resonaattoriin tapahtuu yläputkesta ilmatiiviillä kumiletkulla liitetyn pikaliit-timen kautta. Kun resonaattori on paineistettu, kumiletkun tilalle vaihde-taan muovitulpalla tiivistetty lämpömittarin anturi (oikea yläkulma). Reso-nanssin etsimisessä hyödynnetään pientä lasisylinterin puoliväliin liimattua mikrofonina toimivaa pietsoelementtiä.

Oikealla ilmamäärällä on vaikutusta myös sonoluminesenssiin (kuva 8). Pienillä ilmamäärillä kupla on mahdollista saada kirkkaammaksi, sillä tällöin kupla pysyy stabiilina suuremmilla paineamplitudeilla ja kuplaan on mahdollista syöttää enemmän tehoa. Toisaalta kupla liukenee suotuisan alueen ympäristössä helpommin ja valon aikaansaanti vaatii suuremman minimitehon. Suurella ilmamäärällä kuplan dynamiikan seuranta on helpompaa ja valoa näkyy hieman aiemmin, mutta kupla alkaa huojua katoamisrajaa lähestyttäessä, jolloin maksimi-intensiteetti jää pienemmäksi ja SL-taajuusväli kapeammaksi. Liian suurilla ilmamäärillä kuplaa ei enää saa stabiloitua lainkaan tanssimisrajan ja ylemmän sonoluminesenssirajan välissä, vaan kupla jatkaa värisemistä katoamiseen asti lähettämättä valoa.

### 3 Resonanssimoodien laskeminen

Kuplan säteen liikettä ajan funktiona voidaan mallintaa Rayleigh-Plesset-yhtälöllä [14]

$$\rho \left( R\ddot{R} + \frac{3}{2}\dot{R}^2 \right) = \left[ \left( p_0 + \frac{2\rho}{R_0} - p_v \right) \left( \frac{R_0}{R} \right)^{3\gamma} + p_v \right] - \left[ \frac{2\sigma}{R} + \frac{4\eta\dot{R}}{R} + p_0 + P(t) \right]. \quad (2)$$

Tässä  $\rho$  on nesteen tiheys,  $R$  kuplan säde ja  $\dot{R}$  sekä  $\ddot{R}$  säteen ensimmäinen ja toinen aikaderivaatta,  $p_0$  nesteen hydrostaattinen paine kuplan ulkopuolel-

la,  $R_0$  pyöreän kuplan säde tasapainossa,  $p_v$  höyrynpaine kuplan sisällä,  $\gamma$  adiabaattivakio,  $\sigma$  nesteen pintajännitys,  $\eta$  viskositeetti ja  $P(t)$  ajasta riippuva paineamplitudi. Kuvassa 4 on mallinnettu kuplan liikettä tyypillisillä parametriervoilla [14] laskemalla yhtälön ratkaisua numeerisesti.

Sonoluminesenssin aikaansaamiseksi tarvittava taajuus on aina jokin astian resonanssimoodeista, sillä vain näissä veteen saadaan syötettyä riittävästi tehoa. Sylinterimäisessä resonaattorissa resonanssitaajuuDET voidaan laskea lähtemällä aaltoyhtälöstä

$$\frac{\partial^2 P(\vec{r}, t)}{\partial t^2} = c^2 \nabla^2 P \quad (3)$$

jossa  $P(\vec{r}, t)$  on paineenvaihtelu ulkoisen paineen  $P_0$  ympärillä ja  $c$  on äänen nopeus nesteessä. Kun rajaehdoiksi otetaan paineantinoodi päätylevyissä ( $z = \pm L/2$ ) ja painenoodi sylinterin seinämässä ( $r = R$ ), saadaan astian keskellä ( $z = 0$ ) sijaitseville, kulmasta riippumattomille resonanssimoodeille [15]

$$P(\rho, z) = \tilde{P} J_0(k_\rho \rho) \cos(k_z z), \quad (4)$$

jossa  $J_0$  on nollannen asteen Besselin funktio ja  $\tilde{P}$  on paineamplitudi astian keskellä. Aaltoluvut  $k_\rho$  ja  $k_z$  saadaan rajaehdoista  $R$ -säteisen ja  $L$ :n pituisen sylinterin seinämässä

$$P(R, z) = 0 \quad (5)$$

ja päätylevyissä

$$\left[ \frac{d}{dz} P(\rho, z) \right]_{z=\pm L/2} = 0. \quad (6)$$

Ensimmäisestä ehdosta saadaan säteittäinen aaltoluku  $k_\rho$  Besselin funktion nollakohtien avulla,  $J_0(k_\rho R) = 0$ , missä  $k_\rho R = 2.405, 5.520, 8.654, \dots$ . Toinen ehto määrittää  $k_z$ :n yhtälöllä  $\sin(k_z L/2) = 0$  eli  $k_z = 2\pi n_z / L$ ,  $n_z = 1, 2, 3, \dots$ . Aaltoluku  $k$  saadaan yhtälöstä 5

$$k = \sqrt{k_\rho^2 + k_z^2}, \quad (7)$$

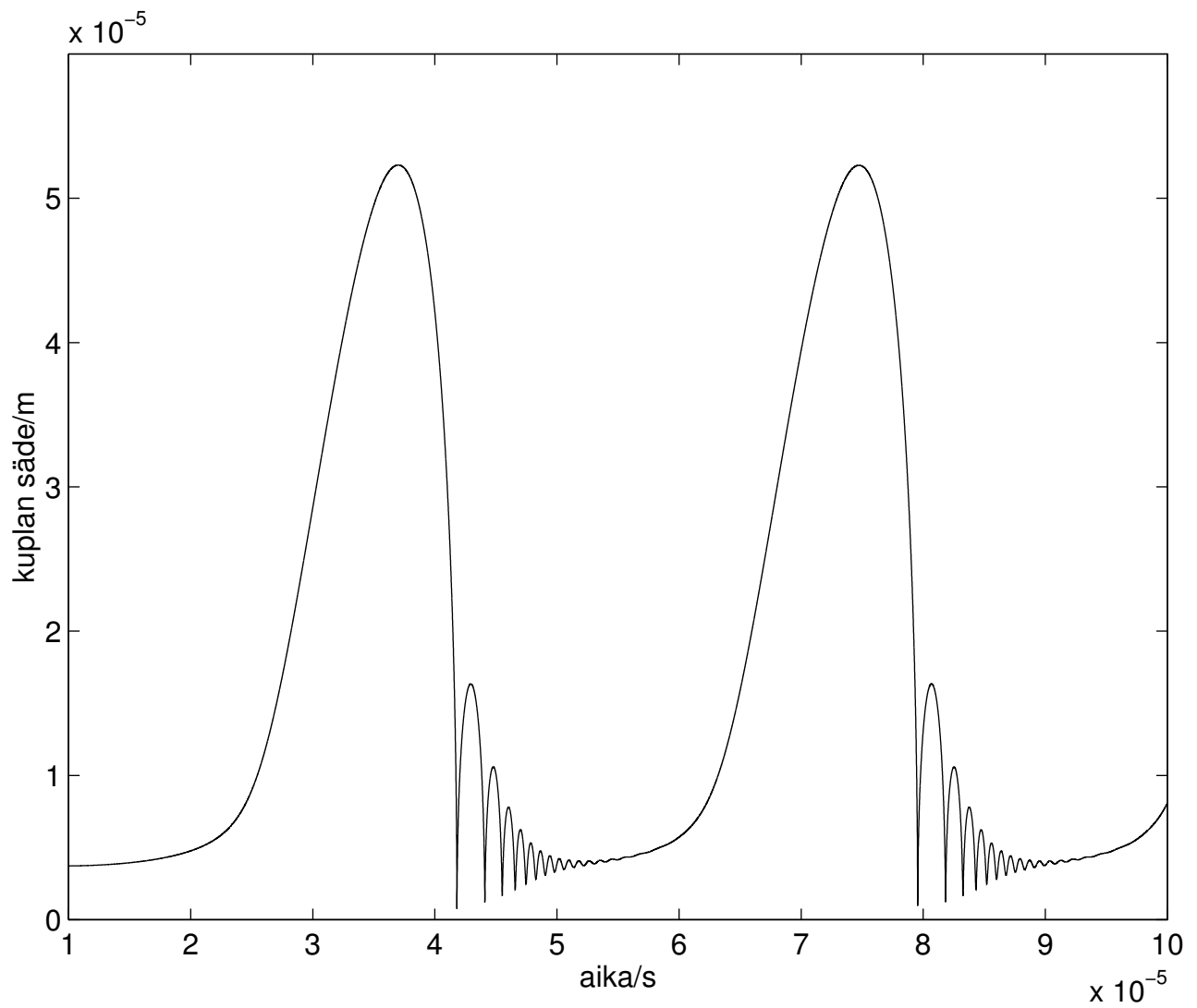
ja moodin taajuus on

$$\omega = ck = c\sqrt{k_\rho^2 + k_z^2}. \quad (8)$$

Molemmista päädyistä symmetrisesti ajatus resonaattorissa vain parittomalla asteluvulla  $n_z$  olevat resonanssit vahvistuvat. Käyttämämme koe-laitteisto on viritetty ensimmäiseen säteittäiseen ja akselin suuntaiseen moodiin, jossa  $k_\rho = 2.405$  ja  $n_z = 1$ . Taulukossa 1 on laskettu resonanssitaajuuksia eripituisille resonaattoreille veden lämpötiloissa 20, 25 ja 30 °C sijoittamalla kaavaan

$$f = \frac{c_{\text{vesi}}(T)}{2\pi} \sqrt{\left(\frac{2.405}{R_{\text{ulko}}}\right)^2 + \left(\frac{2\pi n_z}{L_{\text{sisä}}}\right)^2}. \quad (9)$$

Sonoluminesenssi on onnistuttu saamaan aikaan 55 mm pituisella resonaat-



Kuva 4: Sonoluminesenssikuplan säteen kuvaaja ajan funktiona tyypillisillä parametriarvoilla. Resonanssitaajuus on 25 kHz. Kupla romahtaa yli äänennopeudella noin 50 mikrometristä noin 0.5 mikrometriin. Romahduksen jälkeen kupla oskilloi muutaman kerran, ennen kuin värähtely vaimenee, kupla palaa normaalisäteeseen ja sykli alkaa alusta. *Kuva: A. Särkilahti [18].*

Taulukko 1: Erimittaisten sylinteriresonaattorien laskennallisia resonanssitaajuuksia lämpötiloilla 20, 25 ja 30 °C. Todelliset resonanssitaajuudet ovat n. 20% pienemmät. Kokeissa käyttämämme sylinterin pituus on lihavoitu. Kaikkien resonaattorien ulkohalkaisija on 50 mm ja sisähalkaisija 46,4 mm.

	20 °C	25 °C	30 °C
40 mm	43 461 Hz	43 882 Hz	44 247 Hz
50 mm	37 341 Hz	37 703 Hz	38 016 Hz
<b>55mm</b>	<b>35 239 Hz</b>	<b>35 580 Hz</b>	<b>35 876 Hz</b>
60 mm	33 552 Hz	33 877 Hz	34 158 Hz
70 mm	31 045 Hz	31 345 Hz	31 606 Hz

torilla taajuudella 29 100 Hz lämpötilassa 25 °C. Laskennallinen resonanssitaajuus on yli 20% korkeampi kuin havaittu, joten kupla on mahdollisesti joutunut johonkin perusmoodia matalampitaajuuksiseen antipainenoodiin. Tätä tukisi myös se, että kupla ei sijaitse aivan resonaattorin keskellä, vaan pystysuuntaisen poikkileikkauksen (kuva 12) vasemmassa kolmanneksessa hieman keskikohdasta alaspäin. Vaihtoehtoisesti poikkeama voi johtua resonaattorin epäsymmetrisyydestä ja rajaehto-oletusten epätarkkuudesta.

Kuten kaavasta (9) nähdään, resonanssitaajuus on suoraan riippuvainen äänennopeudesta vedessä. Äänennopeuden ja lämpötilan välinen riippuvuus ei kuitenkaan ole lineaarinen, joten äänennopeuden laskemiseen lämpötilan funktiona on käytetty National Physical Laboratoryn merivedelle tarkoitettua interaktiivista laskinta [19] veden suolapitoisuudella 0 ppt ja paineella 100 kPa. Laskin käyttää kansainvälistä standardialgoritmia, joka tunnetaan myös nimellä UNESCO-kaava [20], [21], [22]. Kuvassa 5 on laskettu resonanssitaajuus lämpötilan funktiona kaavalla

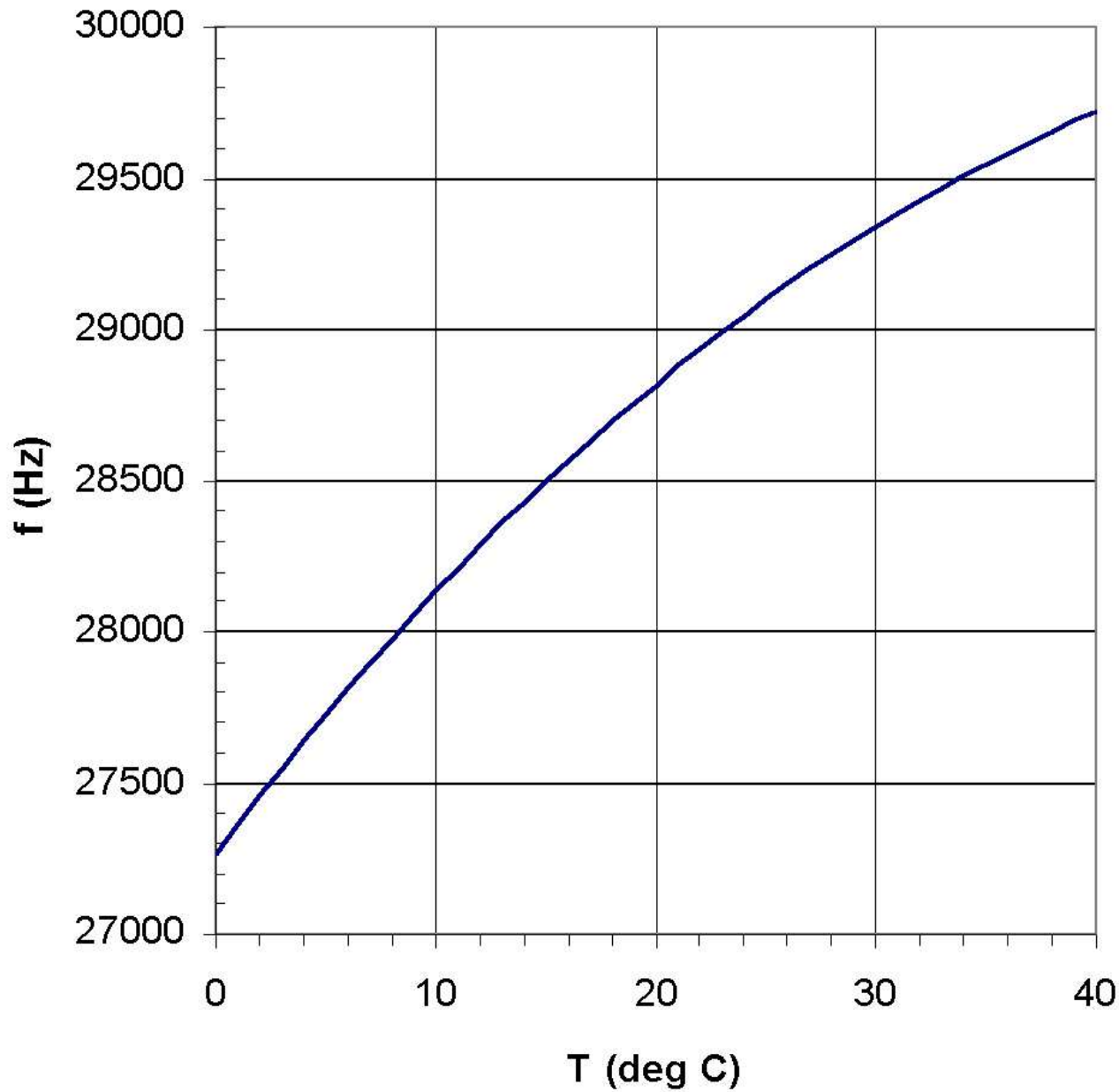
$$f = c(T)f_0/c(T_0), \quad (10)$$

jossa  $f_0$  ja  $T_0$  on sidottu arvoihin 29 100 Hz ja 25 °C.

## 4 Optimiparametrien etsiminen

Koelaitteiston saattamiseksi parhaaseen mahdolliseen toimintakuntoon on ensin kyettävä virittämään resonaattoriin tuotettava äänikenttä mahdollisimman voimakkaaksi ja laadukkaaksi. Tämän jälkeen voidaan säätää veden ilmatasapainoa ja hienosäätää paineamplitudi ja taajuus kohdalleen. Mahdollisten tulevien muutosten varalta on myös hyvä tietää, kuinka nykyiset säädöt on etsitty.

Nykyinen laitteisto on saatu toimimaan parhaiten seuraavilla parametreillä: SL:n mikrofonisignaali/signaaligeneraattorin jännite 8 V/3.0 V, il-



Kuva 5: Resonanssitaajuuden laskennallinen lämpötilariippuvuus. Kuvaaja on sidottu lämpötilassa 25 °C taajuuteen 29 100 Hz. Kokeellisesti määritetty lämpötilariippuvuus löytyy kuvasta 9.

manpaine valmistusvaiheessa 150 mbar, 55 mm lasisynterilin resonanssi 29.1 kHz, stabiiliin lämpötilan suhde ulkolämpötilaan 25 °C/20 °C. Himmeässä valaistuksessa kupla erottuu tummaa taustaa vasten ja täysin pimeässä huoneessa se näkyy vielä noin puolentoista metrin päästä. Kaikki arvot ovat suuntaa antavia, todelliset arvot vaativat aina hienosäätöä.

#### 4.1 Pietsojen oikea kiristys

Laitteistoa korjatessa tai puhdistettaessa voidaan pietsot joutua irrotta-  
maan ja kiinnittämään uudelleen. Tällöin on kiinnitettävä suurta huomio-  
ta pietsojen oikeaan kiristykseen, sillä sen on havaittu vaikuttavan ratkai-  
sevasti veteen tuotetun äänen voimakkuuteen ja laatuun. Kiristettäessä on  
kuitenkin varottava vääntämästä muttereita liian kireälle, sillä liian voima-  
kas ja epätasainen puristus murtaa pietsokeraamin.

Toimivaksi havaittu tapa oikean virityksen etsimiseen on ensin kiinnittää  
pietsot kevyesti. Tämän jälkeen käynnistetään signaaligeneraattori, oskil-  
loskooppi ja vahvistin tässä järjestyksessä. Mikrofonin kytketään kiinni os-  
killoskooppiin, jännite säädetään noin 3 V ja taajuutta ja grafiittisauvaa  
siirtämällä etsitään odotetulta resonanssialueelta (28–30 kHz 55 mm reso-  
naattorilla) voimakkain ja puhtain sinimuotoinen mikrofonisignaali.

Yläkiinnikkeen muttereita aletaan kiristää vähän kerrallaan kutakin vuo-  
rollaan. Tavoitteena on saada mikrofonisignaalin amplitudi mahdollisim-  
man voimakkaaksi puhdas sinimuoto kuitenkin säilyttäen. Kun jonkin mut-  
terin kohdalla lisäkiristys ei näytä enää auttavan, voidaan mutteria vielä  
hienosäätää hieman edestakaisin kiristämällä ja löysentämällä. Kun kaikki  
mutterit on saatu kiristettyä edellä kuvatulla tavalla, voidaan vielä käydä  
läpi kaikki kolme mutteria ennen kuin siirrytään käsittelemään alakiinnikettä  
vastaavalla tavalla.

Kiristettäessä voi tulla vastaan tilanne, jossa kiristys ensin pienentää  
signaalia, mutta kiristämällä vielä hieman lisää signaali alkaa taas kasvaa.  
Tällöin suurempi kiristys on usein parempi, mutta kannattaa muistaa koh-  
tuus. Jos mutteri ei enää käänny melko kevyellä vääntämisellä, on levy luul-  
tavasti jo liian kireällä ja pietsot saattavat hajota.

Ylä- ja alakiinnikkeen virittämistä joudutaan luultavasti toistamaan vuo-  
rotellen useita kertoja, ennenkuin tulos on hyvä. Tavoitteena on saada piet-  
sojen yhdessä tuottama äänikenttä mahdollisimman symmetriseksi, ja tällöin  
on eduksi, jos pietsojen erilliset kentät ovat likimain yhtä voimakkaat, siis  
myös kiristykset melko samanvahvuiset.

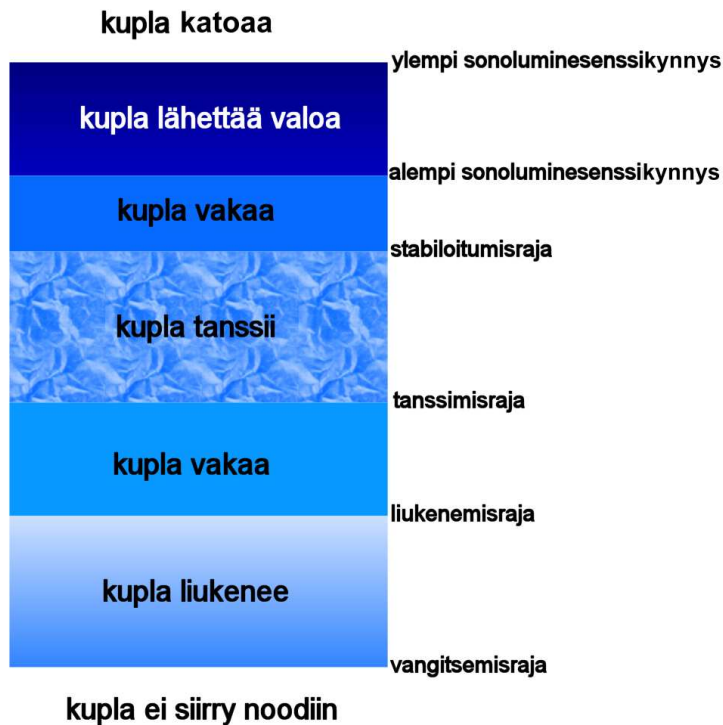
Viritys on toimiva, kun 3 voltin jännite resonanssikohdassa suorastaan  
imee kuplia keskelle. Hyvässä virityksessä mikrofonisignaalin amplitudi on  
tällöin ollut 6-8 V:n paikkeilla. Signaalin suuruus tosin riippuu käytetystä  
mikrofonista ja resonaattorista.

On myös toinen toimiva tapa tunnistaa oikein viritetty resonaattori ja et-  
siä samalla summittainen resonanssitaajuus. Oskilloskooppi kytketään mit-

taamaan piirissä kulkevaa virtaa  $1 \Omega$  vastuksen avulla ja säädetään saatu siniaalto näkymään ruudulla mahdollisimman voimakkaana. Jännitteen arvoksi on hyvä asettaa 2–4 V ja sijoittaa grafiittisauva kohdalleen. Kun taajuutta pyöritetään säädetyn maksimin molemmin puolin, pitäisi pietsojen virrassa näkyä resonanssitajuudella pieni nytkähdys alas ja takaisin ylös (ks. A. Särkilahti: SBSL, Fig. 5.1(a) [14]). Tämä johtuu siitä, että resonanssissa pietsot vievät vähemmän tehoa kuin välittömästi resonanssin ympäristössä. Nytkäys on parhaimmillaankin hyvin pieni ja huonosti säädettyllä resonaattorilla sen erottaminen on mahdotonta.

## 4.2 Liunneen ilman määrä ja siihen liittyvä kupladynamiikka

Kuplan ja veden välisestä dynaamisesta tasapainosta johtuen veteen liunneen ilman määrä vaikuttaa voimakkaasti kuplan dynamiikkaan. Oikean ilmamäärän löytämiseksi on osattava tunnistaa kuplan liikkeen eri alueet. Kuvan 6 mukaisesti kuplan dynamiikassa on useita raja-alueita: vangitsemisraja, liukenemisraja, tanssimisraja, stabiloitumisraja sekä alempi ja ylempi sonoluminesenssikynnys. Kuvassa 8 on esitetty kupladynamiikan raja-alueiden riippuvuus ilmanpaineesta nykyisessä koekokoonpanossa.



Kuva 6: Kupladynamiikan eri alueet. Alueiden suhteellinen pituus eri ilmamäärillä on esitetty kuvassa 8.

Vangitsemisraja on paineamplitudi, jolla äänikenttä alkaa vetää kuplaa paineantinoodiin ja antinoodin imu riittää voittamaan kuplan nosteen. Kupla jää levitoimaan astian keskelle, mutta liukenee muutamien sekuntien kuluessa. Liukeneminen nopeutuu paineamplitudia kasvatettaessa.

Jos vedessä on riittävästi ilmaa, liukeneminen lakkaa yht'äkkiä liukenemisrajalla. Kupla kavitoi vakaasti paikallaan, mutta äänikenttä ei ole riittävän voimakas saamaan aikaan valoa. Jos ilmaa on liian vähän, kupla liukenee kaikilla amplitudeilla.

Tanssimisrajalla kuplan pieni vapina yltyy voimakkaaksi värinäksi. Jos ilman määrä on jotakuinkin kohdallaan, kupla joko värisee hyvin voimakkaasti pienellä alueella tai näkyy pienenä utuisena pilvenä, joka muodostuu suuresta määrästä äärimmäisen pieniä keskenään törmäileviä kuplia. Hieman suuremmalla ilmamäärällä kuplapilven koko kasvaa tai kupla alkaa lähettää pieniä rinnakkaiskuplia, jotka lentävät muutamien millimetrien päähän ja palaavat takaisin. Vielä suuremmilla ilmamäärillä kupla paisuu ja karkaa astian seinämiin. Tällöin myös astian seinämiin kertyy helposti kuplia, jotka häiritsevät keskuskuplaa.

Stabiloitumisrajalla kuplan tanssiminen äkkiä lakkaa. Kupla kelluu astian keskellä aivan liikkumatta, ja se on melko helppo nähdä sivulta tulevan sironneen valon avulla. Tässä vaiheessa mikrofonisignaalisissa voi usein jo nähdä alkavaa kavitaatioväreilyä, jos taajuus on säädetty kohdalleen (kuva 7).

Alemmalla sonoluminesenssikynnyksellä stabiili kupla alkaa lähettää näkyvää valoa, joka kirkastuu amplitudia lisättäessä. Ylempää sonoluminesenssirajaa lähestyttäessä kupla voi alkaa toisinaan nytkähdellä satunnaisesti.

Ylemmällä sonoluminesenssikynnyksellä stabiili SL-kupla yht'äkkiä katoaa silmänräpäyksessä. Toisinaan valo himmenee ja kuplan liike yltyy nopeaksi ja voimakkaaksi edestakaiseksi heilahteluksi tai rajuksi värinäksi hieman ennen katoamista. Tällöin kupla usein näyttää parin–kolmen millimetrin mittaiselta suoralta viivalta ennen häviämistään.

Jos ilman määrä on vähäinen ja äänikenttä särötön, ylempi sonoluminesenssiraja voi olla varsin liukuva. Amplitudia varovasti nostamalla voi kuplan saada pysymään vakaana pitkäänkin rajakohdan alun jälkeen, ennen kuin kupla yhtäkkiä katoaa jonkin pienen häiriön seurauksena. Uuden kuplan tekeminen ei kuitenkaan onnistu kuin aivan raja-alueen alarajalla. Suuremmilla amplitudeilla kupla joko liukenee jo matkalla paineantinoodiin tai katoaa välittömästi perille päästyään.

Alle 250 mbarin ilmamäärillä tanssimis- ja stabiloitumisrajat puuttuvat kokonaan. Kupla alkaa loistaa valoa pian liukenemisrajan jälkeen, muttei käy läpi normaalia tanssimisvaihetta. Yli 500 mbarin ilmamäärillä sonoluminesenssialue taas kutistuu olemattomiin, ja kuplan katoamista ennakoiva huojunta alkaa välittömästi tanssimisen jälkeen. Rajakohdan voi erottaa kuplan liikehdinnän pienestä muuttumisesta tai mikrofonisignaalisissa näkyvästä



huojuvasta kavitaatioväreilystä, mutta valoa ei saa enää näkyviin.

Ylempi sonoluminesenssiraja on tärkein tuntomerkki, jolla tietää saako astiaan riittävästi tehoa. Jos tehoa on liian vähän, kuplan saa kyllä vangittua ilman että se liukenee, muttei koskaan katoamaan yht'äkkisesti. Jos taas tehoa on aivan liian vähän, kuplaa ei saa edes säilymään, mutta tämän sotkee helposti liian pienen ilmamäärän aiheuttaman käytöksen kanssa. Käyttämällä aluksi lähes 1000 mbarin vettä on helppo varmistaa, paljonko tehoa vähintään tarvitaan kuplan saamiseksi tanssimisvaiheeseen.

### 4.3 Sonoluminesenssin etsintä

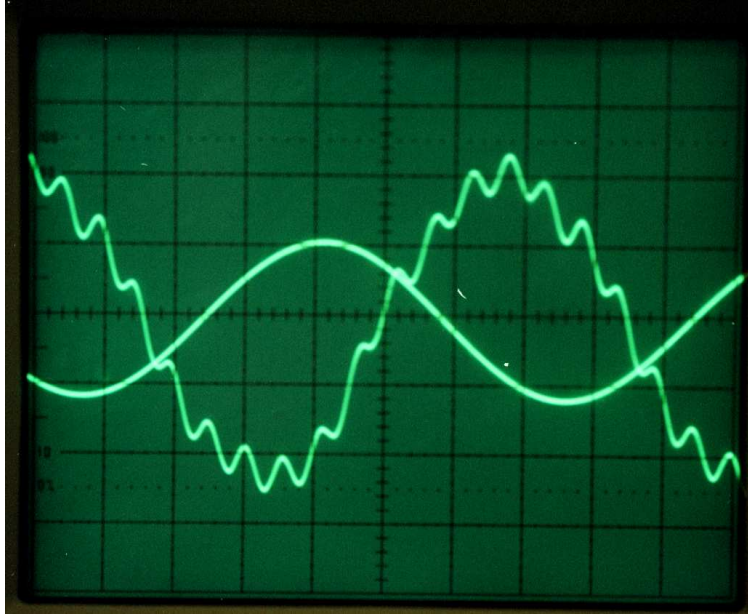
Kun pietsojen kiristys ja ilman määrä on saatu kohdalleen, voidaan ryhtyä etsimään parametrejä, joilla kupla loistaa valoa. Ensimmäisenä on hyvä aloittaa etsimällä summittainen resonanssikohta. Taajuus asetetaan teoreettisesti laskettuun kohtaan, jännite säädetään 3–4 volttiin ja grafiittisauvan avulla asetetaan virta pietsojen yli maksimiinsa. Taajuutta vaihdellaan teoreettisen arvon molemmin puolin ja etsitään virtasignaalista pieni piikki resonanssikohdassa. Mikäli piikki ja resonanssikohta löytyy, voidaan siirtyä suoraan taajuuden ja amplitudin hienosäätöön, muutoin resonanssia täytyy metsästä kupladynamiikan avulla.

Vaihtoehtoinen tapa etsiä resonanssi on kupladynamiikan ja mikrofonisignaalin hyödyntäminen. Jännite asetetaan alussa 2–3 V:n paikkeille. Taajuutta vaihdellaan lasketun alueen ympäristössä ja etsitään taajuuksia, joilla mikrofonisignaali on maksimissaan ja mahdollisimman lähellä siniaaltoa. Kuplittamalla yritetään saada kupla vangittua.

Kun kupla saadaan säilymään, nostetaan amplitudia, kunnes se alkaa tanssia, stabiloituu uudestaan, alkaa jälleen väristä ja katoaa. Jos kuplaa ei saada katoamaan, siirretään taajuutta hieman ja yritetään uudestaan. Ellei lähiympäristönkään kokeilu auta, on yritettävä etsiä muita resonanssitaajuuksia. Jos nämäkään eivät toimi, on laitteiston säädöissä jotain väärin. Yleensä resonaattorin mekaaninen virittäminen kannattaa aloittaa pietsojen kiinnityksestä ja vasta sitten kokeilla laitteiston ripustusta tai ilmamäärän muuttamista.

Kun kupla on saatu katoamaan, etsitään pienillä muutamien kymmenien hertsien taajuuden vaihteluilla taajuus, jolla kupla katoaa pienimmällä amplitudilla. Nyt on löydetty sonoluminesenssialue melko hyvällä tarkkuudella. Taajuussäätö kannattaa viimeistään nyt asettaa 1 Hz:n tarkkuudelle ja säätää amplitudia niin, että kupla juuri ja juuri alkaa huojua. Tässä vaiheessa kupla jo luultavasti lähettää valoa. Taajuutta voidaan vielä hienosäätää hertsin tarkkuudella etsimällä mikrofonisignaalista kavitaatioväreilyä (kuva 7). Tavoitteena on saada kavitaatioväreily mahdollisimman jyrkäksi ja vakaaksi, jolloin sonoluminesenssia on helppo seurata mikrofonisignaalista lämpötilan funktiona.

Jos SL on kovin epästabili tai astiassa muita häiriöitä, kavitaatioväreily



Kuva 7: Kun resonanssi on säädetty tarkasti kohdalleen ja SL-kupla on stabiili, kavitoivan kuplan aikaansaama korkea ääni näkyy mikrofonsignaalisina väräilyinä.

voi helposti häipyä taustakohinaan. Liian suuri ja liian pieni amplitudi voivat myös häivyttää tai sekoittaa väräilyä. Täytyy myös muistaa, että resonanssin tulee olla riittävän terävä ja tällöin taajuuskaista, jolla väräilyä näkyy on usein vain n. 1–5 Hz. Samoin amplitudialue voi olla niinkin pieni kuin 0.3 V. Sonoluminesenssivaloa voi kuitenkin näkyä suuremmallakin alueella kuin siitä johtuvaa kavitaatioväreilyä, jopa  $\pm 200$  Hz. Tällöin valon näkymisalueella voi olla useita kavitaatioväreilytaajuuksia. Valo ei myöskään välttämättä ole kirkkaimmillaan juuri kavitaatioväreilytaajuudella, mutta tällä alueella SL on mahdollisimman stabiili, mikä on mittausten kannalta ihanteellista.

Jos valoa ei kuitenkaan näy, voi syynä olla heikkolaatuinen signaali, jolloin kuplaa ei saada stabiiliksi riittävän suurilla amplitudeilla, tai liian korkea lämpötila, jolloin kupla on liian himmeä havaittavaksi. Kupla on yleensä kirkkaimmillaan juuri ennen kuin se alkaa huojuua, ja intensiteetin lämpötilariippuvuus on  $I \propto e^{-T}$ . Vielä 25 °C lämpötilassa valon pitäisi näkyä verrattain helposti, mutta jo lämpötilassa 30 °C kuplan näkeminen on usein vaikeaa. Parhaimmillaan kuplan voi erottaa vielä himmeässä huonevalaistuksessa (Kuva 11).

Kuplan havaitsemista edesauttaa huoneen täydellinen pimentäminen, mittarivalojen ja oskilloskoopin näytön peittäminen ja totuttelu pimeään. Silmän hämäränäköä edistävän näköpurppuran määrä on suurimmillaan vii-

dentoista minuutin pimeässä oleskelun jälkeen, mutta voi valossa kadota muutamissa sekunneissa. Sen lisäksi silmän keskustan tappisolut näkevät niitä ympäröiviä sauvasoluja heikommin hämärässä, joten katsominen hieman kuplasta sivuun auttaa huomattavasti. Katseen kohdentaminen ja tarkentaminen pimeässä sentti kuplan viereen vaatii yleensä hieman harjoitusta, joten himmeän kuplan havaitseminen ei ole aivan helppoa.

## 5 Sonoluminesenssilaitteistosta mitattuja parametrejä

Laitteistosta määritetyt parametrit on tutkittu käyttäen 55 mm resonaattoria sekä 3mm päätylevyjä. Laitteiston toiminta vaihtelee hieman kokoaamiskerrasta toiseen, mutta muut kuin testattavana olevat parametrit on pyritty pitämään mahdollisimman vakaana. Määritettyjen graafien virherajat ovat varsin suuret, mutta graafit antavat kvalitatiivisen kuvan laitteiston toiminnan riippuvuudesta eri parametreistä.

### 5.1 Liunneen ilman määrä

Resonaattoriin siirrettävä vesi valmistetaan seuraavasti: 1.0 l vetoisessa Erlenmayer-pullossa olevaa vettä, n. 0.4 l, kiehutetaan tyhjiössä 15 min, kunnes käytännöllisesti katsoen kaikki ilma on poistunut vedestä. Tämän jälkeen Erlenmayeriin päästetään tarkkuusventtiilin kautta haluttu ilmanpaine (yläpaine) ja vettä sekoitetaan magneettisekoittajalla. Kun paine Erlenmayerissa ei enää muutu, venttiili suljetaan ja samalla aletaan imeä resonaattoria ja laajentumispuussia tyhjäksi, jotta mahdolliset ylijäämävesipisararat ehtivät haihtua nestepussista ennen veden siirtoa [17].

Haluttuun ilmanpaineeseen säädetyn ilman annetaan liueta veteen koko ajan sekoittaen noin 15 min, jolloin veden pitäisi olla lähellä kyllästymispistettä. Laajentumisäiliön kuoriosan painetta nostetaan suhteelliseen 150 mbarin alipaineeseen, jotta kaasupussi ei repeä, ja resonaattori kytketään pikaliittimellä Erlenmayeriin. Erlenmayerin ja resonaattorin välinen painero työntää resonaattorin ( $V_{\text{resonaattori}} = 0.9 \text{ dl}$ ) nopeasti lähes täyteen vettä. Parin minuutin kuluttua kaasupussiin on valunut noin 0.1–0.5 dl vettä, jonka jälkeen laajentumisäiliön kuori paineistetaan ja takaisin virtaava vesi työntää resonaattoriin vielä jääneet kuplat resonaattorista takaisin Erlenmayer-pulloon. Kuplien poistuttua resonaattori kytketään irti ja siirretään telineeseen.

Painemittarilla tarkastetaan lopuksi vielä Erlenmayeriin jäänyt paine (alapaine). Veteen liunneen ilman määrä vastaa korkeintaan kylläistä vettä yläpaineessa. Lisäksi siirrettäessä vettä tyhjiöityyn resonaattoriin vesi ehtii kuplia voimakkaasti 2–5 sekuntia, jolloin ilman määrä entisestään vähenee. Osa näistä kuplista ehtii liueta takaisin, osa siirtyy loppuvaiheessa putken

kautta Erlenmayeriin, jonka paine myös on laskenut nesteen tilavuuden pienennyttyä hieman. Erlenmayerin painetta lopussa käytetään arviona alapaineesta, jota suurempi todellisen ilman osapaineen tulisi olla. Veteen liuenneen ilman määrän arvioidaan vastaavan ylä- ja alapaineiden välissä valmistettua kylläistä vettä. Näillä paineilla on yleensä eroa n. 20–40 mbar.

Useissa kirjallisuuslähteissä [15], [6], [7], [9] olleiden mainintojen sekä A. Särkilahden kirjoittaman diplomityön [14] perusteella soveliaimman ilmanpaineen odotettiin olevan 200–400 mbarin välillä. Ensimmäiset onnistuneet kokeet suoritettiin 370 mbar ja 340 mbarin ilmanpaineilla, tässä järjestyksessä.

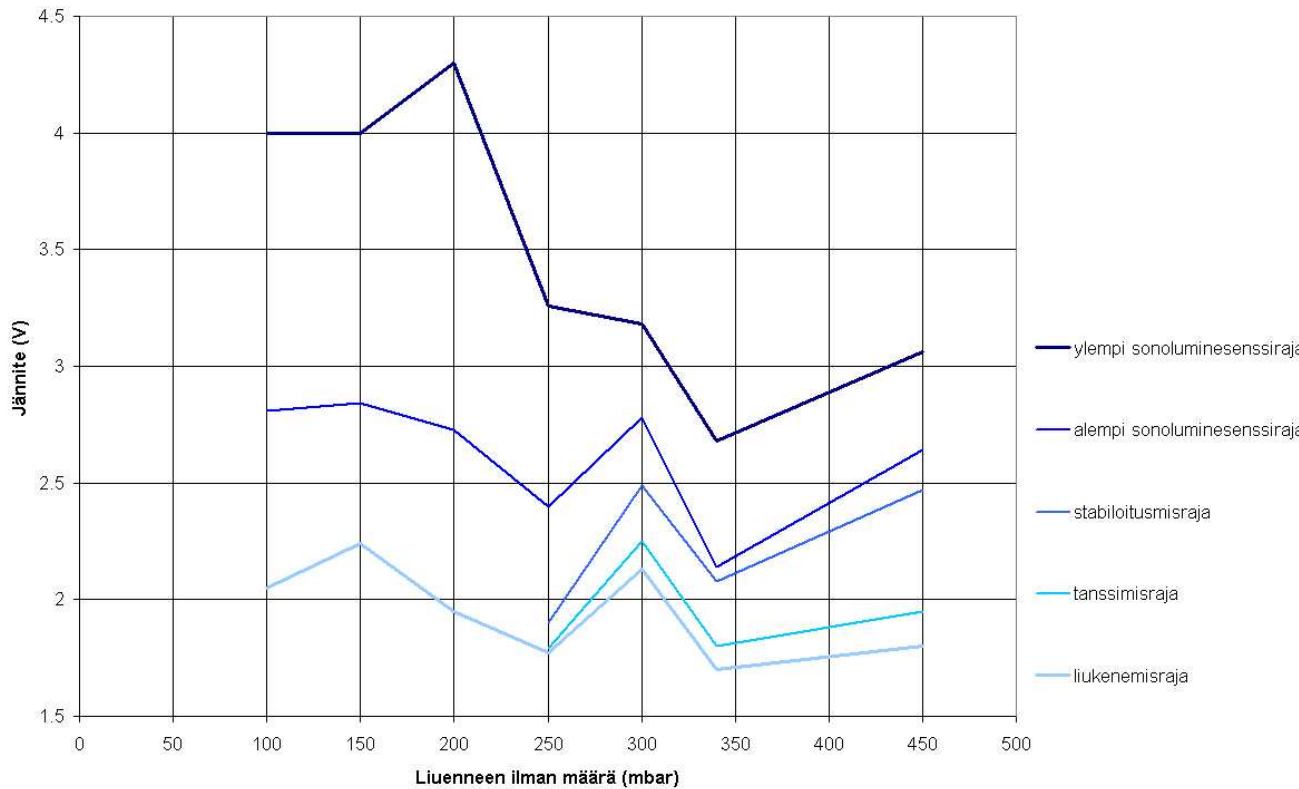
Parhaan ilmanpaineen löytämiseksi sonoluminesenssi etsittiin myös ilmanpaineilla 250, 200, 150, 100, 450 ja 300 mbar. Kokeet suoritettiin tässä järjestyksessä, eikä mittauskertojen välillä koskettu resonaattorin säätöihin. Kaikki muut parametrit paitsi liuenneen ilman määrä pyrittiin pitämään vakiona. Veden lämpötila oli  $25 \pm 3$  °C ja taajuus  $29\,100 \pm 50$  Hz siten, että SL saatiin mahdollisimman kirkkaaksi.

Kuvan 8 graafista tehtiin samankaltainen kuin Anne Särkilahden diplomityössä määritetty (Fig. 5.3 [14]), jotta tulosten vertaaminen on mahdollista. Ajojännite ei kuitenkaan suoraan kerro astiaan tuotetun painekentän amplitudia, joten mitatut arvot eivät ole täysin vertailukelpoisia. Aluperin ajojännitteen paikalla oli tarkoitus käyttää mikrofonisignaalia, mutta lähes viikon kestäneiden kokeiden lopulla havaittiin, että mikrofonin koaksiaalikaapelin liitin oli viallinen ja se vaimensi signaalia epämääräisellä kertoimella.

Koska kerroin oli vaihdellut sattumanvaraisesti mittauskerrasta toiseen, jouduttiin aineiston analyysissä turvautumaan mitattuihin ajojännitteisiin, jotka onneksi kertovat melko tarkasti pietsoihin syötetyn tehon. Pietsojen kiinnityksen muuttamista ja irrottamista kokeiden välillä vältettiin, jotta tästä ei aiheutuisi virhettä tuloksiin. Samoin resonaattorin päätylevyt pidettiin paikoillaan kokeiden välillä.

Veden lämpötila aiheuttaa muutoksia paitsi kuplan kirkkaudessa, myös resonanssitaajuudessa ja ylemmässä sonoluminesenssirajassa. Koska kuplan kirkkautta on valitettavan hankala kvantifoida silmämääräisesti, olemme tyytyneet tekemään vain summittaisia arvioita kuplan kirkkaudesta ja keskittyneet enemmän resonanssitaajuuden sekä ylemmän ja alemman sonoluminesenssirajan seuraamiseen.

Resonanssitaajuuden ja suurimman paineamplitudin mittauksissa on käytetty *stabiilia* sonoluminesenssia taajuudella, jolla voidaan havaita voimakasta kavitoitinväreilyä (kuva 7). Siirtymä stabiilista SL:stä epästabiiliin, jossa epäsymmetrinen romahdusvaihe saa aikaan kuplan huojumista ja vapinaa on varsin terävä, joten ajojännitteeseen verrannollinen amplitudi on voitu mitata 0.01 V:n tarkkuudella. Selvät kavitaatioväreilyt mahdollistavat myös taajuuden seurannan 1 Hz:n tarkkuudella. Digitaalinen lämpömittari, joka on sijoitettu putkeen ylälevyn tasalle mittaa lämpötilaa  $\pm 0,1$  °C:n tarkkuu-

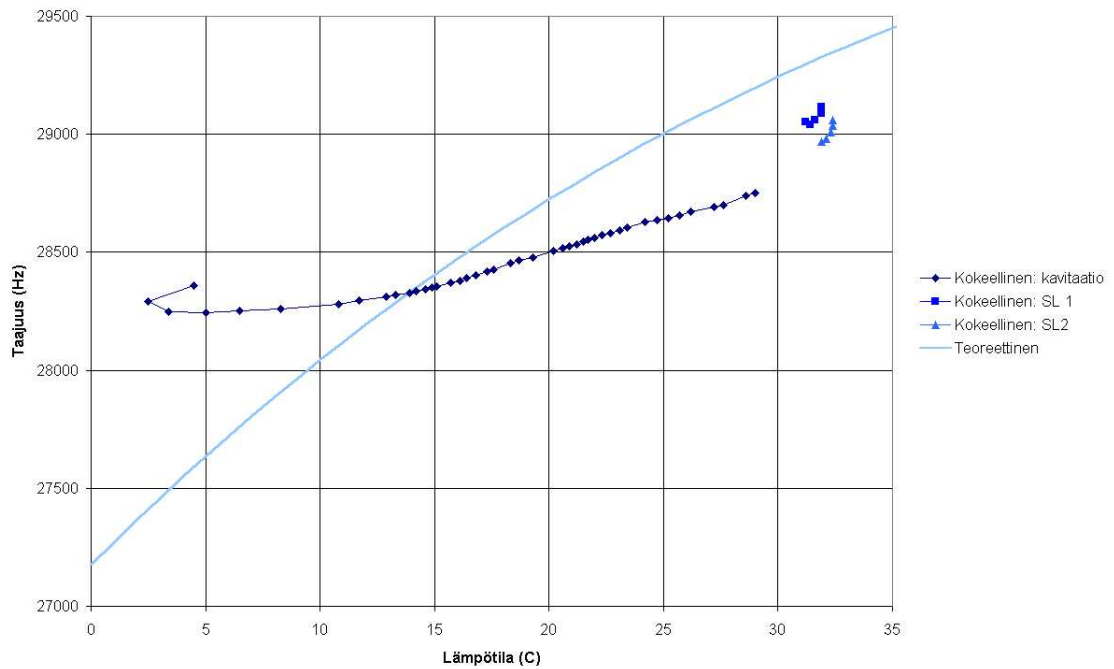


Kuva 8: Kokeellisesti määritetty kupladynamiikan riippuvuus liunneen ilman määrästä sekä tehoon verrannollisesta signaaligeneraattorin jännitteestä ilmanpainealueella 100-450 mbar.

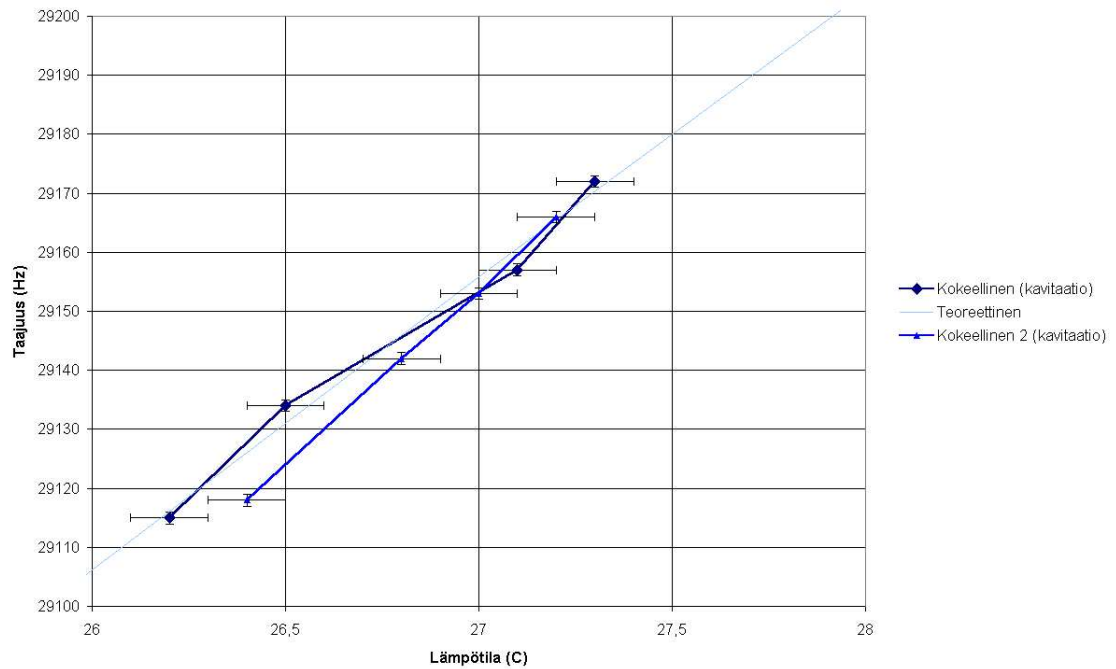
della.

## 5.2 Lämpötila

Näin tarkat mittaukset rajoittavat kuitenkin käytössä olevaa lämpötila-alueetta, sillä lämpeneminen tulee olla hidasta, jotta lämpötilaerot ehtivät tasaantua. Koska käytössä ei ole kunnollista lämpötilan säätelyyn soveltuvaa laitteistoa, alle huoneenlämpötilassa tehtävät mittaukset ovat hyvin hankalia. Kuvan 9 mittauksessa etukäteen jäädytetyn laitteiston annettiin vapaasti lämmetä käyttölämpötilaan. Ennen mittausta resonaattori esijäädytettiin jääkaapissa 4 °C:n lämpötilaan, jonka jälkeen sitä pidettiin kavitatiotaajuuden ja sopivan ajojännitteen etsimisen ajan viileänä kaatamalla resonaattorin päälle kylmää ilmaa nestetyypikannusta. Lämpeneminen jäähtytyksen loputtua oli varsin nopeaa, joten sonoluminesenssin aikaansaanti ei onnistunut nopeimman lämpenemisen aikana.



Kuva 9: Kavitaatiotaajuuden riippuvuus lämpötilasta alueella 0–30 °C. Mittaus on suoritettu antamalla jäähdetytyn laitteiston lämmetä vapaasti normaaliin käyttölämpötilaan. Ennen mittausta laitteiston on jäähdytetty jääkaapissa 4 °C ja pidetty kavitaatiotaajuuden etsimisen ajan kylmänä nestetyypikannun ohi virtaavalla kylmällä ilmalla. Nopeasti lämpenevä neste ei suosi sonoluminesenssia, joten valoa ei saatu näkymään alhais- ten lämpötilojen kavitaatiotaajuuksilla. Teoreettinen verrantosarja on sidot- tu 25 °C:n lämpötilassa taajuuteen 29 000 Hz. Käytetty ilmanpaine on 160 mbar ja ajojännite kavitaatioissa 4,3–4,8 V sekä SL:ssä 3,4–3,9 V.



Kuva 10: Kavitaatiotaajuuden riippuvuus lämpötilasta alueella 26–28 °C. Mittaus on suoritettu antamalla huoneenlämpötilassa olleen laitteiston lämmitä hitaasti (20–30 min) normaaliin käyttölämpötilaan pitäen ajojännite stabiilin kavitaation ylärajalla, välillä 2,21–2,32 V. Huoneen lämpötilaksi mitattiin molemmilla kerroilla aloittaessa 23 °C. Sarjojen 1 ja 2 mittaukset on suoritettu peräkkäisinä päivinä samalla vedellä. Teoreettinen verrantosarja on sidottu 25 °C:n lämpötilassa taajuuteen 29 055 Hz. Ilmanpaine on 340 mbar.

Huomattavasti teoreettista kuvaajaa loivempi käyrä selittyy sillä, että lämpömittarin anturi sijaitsi vain muutaman millimetrin päässä metallisesta päätylevyistä. Ilmajäähdytys kohdistui pääasiassa ylälevyyn lämpömittarin viereen, joten todellisuudessa vesi oli mittauksen alkaessa ehtinyt lämmentä jo 10-15 °C:n lämpötilaan. Alimmillaan mittarin lukemat olivat jäähdytyksestä johtuen -2,5 °C:n paikkeilla. Nopean lämpenemisen aikana veteen ehti syntyä suurehkoja lämpötilagradientteja, kun suurella ajojännitteellä käytetyt pietsot kuumenivat. Tällöin astian keskimääräinen lämpötila on ollut useita asteita mittarin lukemaa alhaisempi. Kuvaajan perusteella keskilämpötila olisi kuplan pokshtaessa (kavitaatiosarjan loppupiste) ollut huoneenlämpötilan 23 °C paikkeilla.

Kuvassa 10 on kaksi huomattavasti lyhyemmällä lämpötilavälillä ja hitaammalla lämpenemisellä määritetty käyrää. Mittaukset on suoritettu peräkkäisinä päivinä. Virherajat ovat pienet: lämpömittarin asteikon tarkkuus eli 0.1 °C sekä pienin selvä muutos kavitaatioväreilyssä, 1 Hz. Pisteeseen 25 °C/29 055 Hz sidottu teoreettinen suora sopii yhtä pistettä lukuunottamatta virherajojen sisään, joten vastaavuus kokeelliseen tulokseen on hyvä.

## 6 Pohdinnat

Sonoluminesenssin onnistuminen riippuu voimakkaasti resonaattorin akustiikasta, mikä tuli erittäin selväksi laitteiston rakennusvaiheen aikana. Jouduimme virittämään lähestulkoon valmista laitteistoa erilaisilla pietsojen kiinnityksillä, päätylevyillä ja lasisylintereillä puolitoista kuukautta ensimmäisen version valmistumisen jälkeen, ennenkuin SL saatiin lopulta onnistumaan. Tämänkin jälkeen laitteiston viritettämistä on jatkettu, jotta käytetty ajojännite saatiin niin alas, että ylikuumenemisiongelmita vältyttiin. Myös kuplan kirkkautta on pystytty parantamaan merkittävästi.

Laitteiston ominaisuudet tunnetaan riittävän hyvin, joten stabiili SL voidaan luotettavasti ja toistettavasti tuottaa koska tahansa. Nyt ollaan jo lähellä vaihetta, jossa sonoluminesenssistä voidaan alkaa tehdä tieteellisesti päteviä tutkimuksia, mikä olikin erikoistyön päätavoite.

### 6.1 Tulosten luotettavuus

Laitteistolla suoritettujen parametrien määrittäminen on parhaimmillaankin vain suuntaa antava, sillä kaikkien parametrien yhtäaikainen pitäminen vakiona on vaativaa ja SL on erittäin herkkä niiden muutoksille. Lisäksi laitteiston toimintaan vaikuttavia muuttujia on huomattavan suuri määrä, osa niistäkin tuntemattomia, ja toisinaan niiden yhteisvaikutus voi olla varsin arvaamaton. Tulosten luotettavuutta on pyritty parantamaan suorittamalla koesarjan mittaukset ajallisesti lähellä toisiaan, pysymällä hyväksi havaituissa rutiineissa ja välttämällä laitteiston säätöihin koskemista.



Erityisesti liunneen ilman määrän mittauksissa virhelähteitä löytyy useita. Lisättäessä ilmaa veteen käytössä ei ollut mitään luotettavaa tapaa varmistaa, kuinka lähelle haluttua ilmanpainetta vesi ehtii kyllästyä 15 min aikana. Käytimme kuitenkin kyseistä aikaa, koska se oli todettu toimivaksi avoimella laitteistolla. Vettä siirrettäessä vesi kohtaa resonaattorissa olevan tyhjän, ja voimakas kuplinta poistaa vedestä tuntemattoman määrän ilmaa. Toisaalta resonaattorin yläosaan jää 3–10 mbarin tyhjästä ja kuplinnasta johtuen pieni määrä ilmaa (1–10 mm kerros) kun vesi on saatu juoksettua resonaattoriin. Tätä ilmaa saattaa liueta veteen ylenmäärin, kun kupla ajetaan pois resonaattorista paineistamalla laajentumisäiliö.

Vesi altistuu suoralle ilmakosketukselle muutaman sekunnin ajan myös irroitettaessa pikaliitin ja kiinnitettäessä lämpömittari sen tilalle. Kosketuksiin pääsevä pinta-ala on kuitenkin alle  $0.5 \text{ cm}^2$ , joten liukenevan ilman määrän pitäisi olla mitättömän pieni. Virheen pitämiseksi mahdollisimman vakiona eri kokeiden välillä veden valmistus ja siirto suoritettiin joka kerta mahdollisimman samalla tavalla.

Pietsoja ja päätylevyjä koossa pitävien ruuvien kiristykset aiheuttavat vaihtelua tarvittavaan ajojännitteeseen. Astiaan syntyvän painekentän amplitudi ja aaltomuoto ovat voimakkaasti riippuvaisia erityisesti siitä, kuinka pietso on kiristetty. Tähän vaikutti paljolti se, että kokeissa käytetyissä päätylevyissä pietsojen alla olevaan 0.3 mm kerrokseen metallia syntyi jännityksiä ja lievä muodonmuutos verstaalla putkia ja kiinnitysmuttereita hitsatessa. Tämän johdosta pietso eivät koskettaneet tasaisesti päätylevyä, ja kiristettäessä alustan epätasaisuus näkyi signaalin suurena herkkyytenä kiristykseen muuttamiselle varsinkin ylälevyissä. Kiristykseen muuttamisen vaikutus pyrittiin minimoimaan käyttämällä laitteistoa samalla kiristyksellä muutama kerta ennen mittausten aloittamista. Kiristykseen ei myöskään koskettu mittausten välillä eikä niiden aikana.

Kolmas merkittävä virhelähde mitatessa ilmanpaineen vaikutusta sonoluminesenssiin oli veden lämpötila. Veden ja pietsojen ominaisuudet ja sitä kautta myös SL:n resonanssitaajuus ja tarvittu paineamplitudi riippuvat lämpötilasta. Äänen nopeus vedessä luonnollisesti vaikuttaa resonanssitaajuuteen, mutta myös sonoluminesenssin ylärajan havaittiin laskevan ajojännitteellä mitaten, kun vesi lämpeä. Toisaalta mikrofonisignaalin voimakkuus samalla ajojännitteellä kasvoi hieman laitteiston lämmitessä, joten on epäselvää missä määrin suurimman ajojännitteen lasku johtui veden ominaisuuksien, kuten viskositeetin ja höyrynpaineen muuttumisesta veden lämmitessä ja missä määrin resonaattoriin tuotetun tehon kasvusta eli pietsojen ominaisuuksien muuttumisesta lämpötilan kasvaessa. Vaikutusten erottelua hankaloitti myös se, että mikrofonin BNC-liitin havaittiin vialliseksi vasta mittausten päätyttyä, ja mikrofonisignaalin voimakkuudesta tehdyt mittaukset jouduttiin hylkäämään.

Lämpötilan vaikutusta ilmanpaineen vaikutusta mitatessa pyrittiin minimoimaan käyttämällä laitteistoa jonkin aikaa ennen mittauksia, jolloin

lämpötila vakiintui ajojännitteestä ja huoneenlämpötilasta riippuen alueelle  $27 \pm 2$  °C. Vakaana pysyvä lämpötila vähensi myös kuplaa häiritseviä konvektiovirtauksia vedessä ja veteen päässeet pienet roskat ehtivät laskeutua astian pohjalle.

Muita laitteiston toimintaan vaikuttavia tekijöitä ovat resonaattorin ripustus ja sylinterin epäsymmetria. Mekaaniset häviöt ja ulkopuolelta tulevien värinöiden vaikutus pyrittiin minimoimaan ripustamalla resonaattori roikkumaan päätylevyistään kolmella ohuella vaijerilla. Alalevystä laajentumissäiliöön johtava kapillaariputki on varsin jäykkä ja tukee resonaattorin alaosaa paikalleen. Värinöiden johtumisen estämiseksi alaputkeen syntyviä jännityksiä yritettiin välttää sopivalla ripustuksella. Todennäköisesti hehkulangan ja lämpömittarin anturin vaikutuksesta SL-kupla on siirtynyt hieman astian toista laitaa kohti. Syynä voi tosin olla myös lasisylinterin epäsymmetria tai päätylevyjen tai pietsojen kiinnityksen epäsymmetrisyys. Anturin kääntelyn yläputkessa havaittiin siirtävän SL-kuplaa muutamia millimetrejä, mutta muuta suurempaa vaikutusta sillä ei näyttänyt olevan. Kokeiden aikana anturia ja hehkulankaa ei kuitenkaan siirretty, ja vettä vaihdettua anturi asetettiin aina samaan paikkaan pää pari millimetriä päätylevyn alapuolella.

## 6.2 Laitteiston jatkokehittäminen

Nykyisessä laitteistossa on mahdollista tarkasti säätää ja hallita veteen liuenneen ilman määrää, painekentän amplitudia ja taajuutta, tarvittaessa myös jossain määrin resonaattorissa olevan nesteen painetta, joka yleensä vakioidaan ilmanpaineeseen. Lämpötila voidaan stabiloida hieman ulkolämpötilaa korkeammalle laitteistoa jonkin aikaa käyttämällä, mutta sen säätely ei vielä ole mahdollista.

Tärkein jatkokehityksen kohde on laitteiston tietokoneistaminen GPIB-kortin ja LABVIEW-ohjelmiston avulla. Tällöin taajuuden ja amplitudin säätö voidaan hoitaa ohjelmallisesti. Tämä mahdollistaa ns. mode locking -toiminnon lisäyksen. Ohjelma voidaan asettaa seuraamaan kavitaatioväreilyn taajuutta ja amplitudia, jolloin sonoluminesenssi saadaan pysymään vakaana huolimatta pienistä asteen kymmenyksen tai muutamien asteiden lämpötilanvaihteluista kokeen aikana. Tämä ominaisuus oli alunperin tarkoitettu lisätä jo aiemmin, mutta rakenteluvaiheen ongelmien takia aikataulu viivästyi.

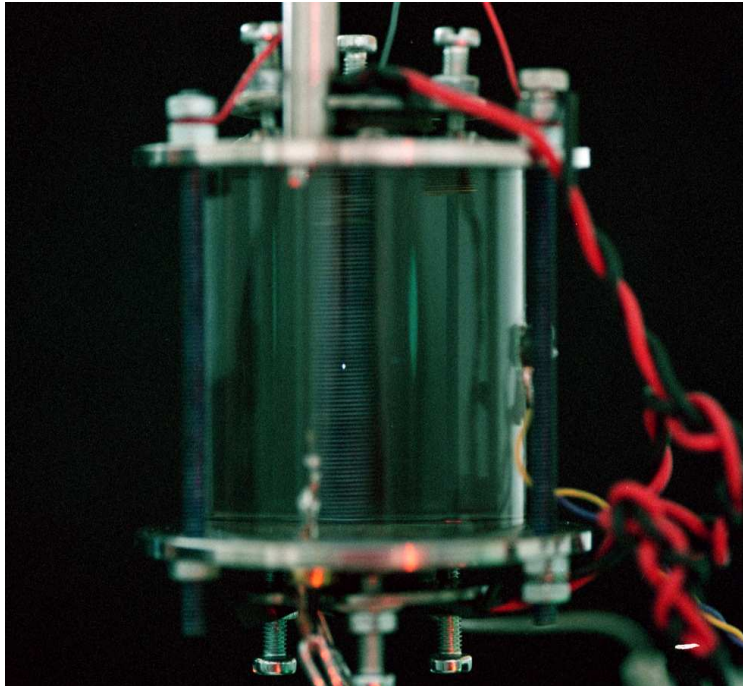
Toinen jatkokehittelyn kohde voi olla jäähdytysjärjestelmän lisääminen, joka mahdollistaisi lämpötilan kontrolloinnin. Tällöin sonoluminesenssi olisi myös mahdollista saada kirkkaammaksi. Tämä voidaan mahdollisesti toteuttaa esim. sijoittamalla resonaattoriosan kokonaisuudessaan viileätilaan, lisäämällä resonaattorin päätylevyihin jäähdyttimiä tai järjestämällä suljettu nestekierto, joka pumppaa vettä jäähdytyshauteen kautta.

Edellä mainittujen komponenttien lisäksi laitteistoon tarvitaan mahdol-

lisesti lasersirontalaitteisto, hydrofoni, valonvahvistin, stroboskooppi ja kuvauslaitteisto, riippuen siitä mitä SL-parametrejä halutaan tutkia.

## 7 Yhteenveto

Työssä tarkasteltiin ensin ilmiötä nimeltä sonoluminesenssi, sen historiaa, tutkimustuloksia sekä kokeellista tuottamista. Työssä käydään läpi suljetun laitteiston toiminnan kannalta olennaisimpien parametrien merkitys kokeen onnistumiselle sekä niiden säätö olemassaolevassa laitteistossa. Kokeellisesti määritetään tarvittavan ajojännitteen riippuvuus liuennon ilman määrästä sekä resonanssitaajuuden muuttuminen lämpötilan vaikutuksesta. Pohdinnat osiossa käsitellään mahdollisia virhelähteitä, kuten liuennon ilman määrän mittaamisen epätarkkuutta, pietsojen kiristyneen vaikutusta sekä ajojännitteen muuttumista lämpötilan nousun vaikutuksesta. Lopuksi pohditaan laitteiston jatkokehittämistä.



Kuva 11: Kirkkaana loistavan sonoluminesenssikuplan (sinivalkoinen piste keskellä) voi erottaa läheltä vielä himmeästi valaistussa huoneessa.

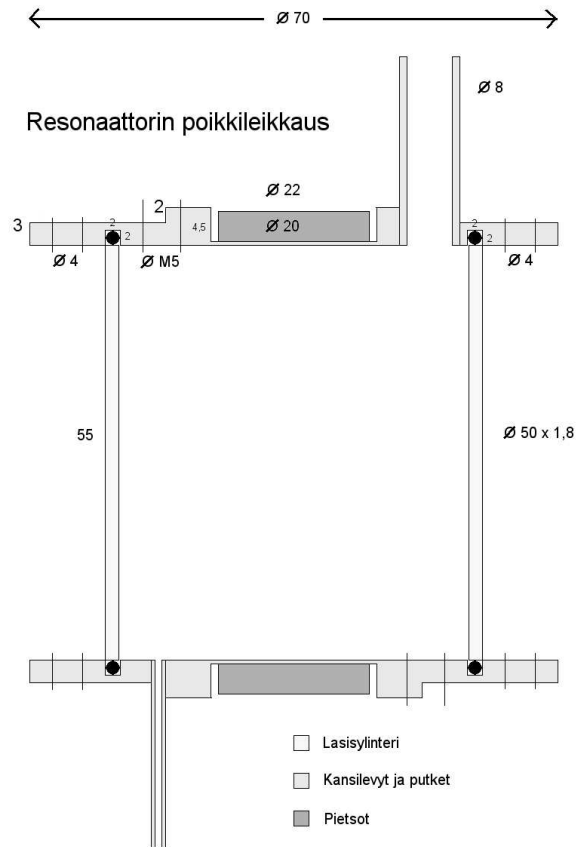
## Viitteet

- [1] K.R. Weninger, B.P. Barber, and S.J. Putterman, "Pulsed Mie Scattering Measurements of the Collapse of a Sonoluminescing Bubble", *Phys. Rev. Lett.* **78**, 1799 (1997).
- [2] T.J. Matula, R.A. Roy, P.D. Mourad, W.B. McNamara III, and K.S. Suslick, "Comparison of Multibubble and Single-Bubble Sonoluminescence Spectra", *Phys. Rev. Lett.* **75**, 2602 (1995).
- [3] S.J. Putterman, "Sonoluminescence: Sound into Light", *Sci. Am.* **272**, 32 (1995).
- [4] R. Hiller, S.J. Putterman, and B.P. Barber, "Spectrum of Synchronous Picosecond Sonoluminescence", *Phys. Rev. Lett.* **69**, 1182 (1992).
- [5] B.P. Barber, R.A. Hiller, K. Arisaka, H. Fetterman, and S. Putterman, "Resolving the Picosecond Characteristics of Synchronous Sonoluminescence", *J. Acoust. Soc. Am.* **91**, 3061 (1992).
- [6] D. Lohse, M.P. Brenner, T.F. Dupont, S. Hilgenfeldt, and B. Johnston, "Sonoluminescing Air Bubbles Rectify Argon", *Phys. Rev. Lett.* **78**, 1359 (1997).
- [7] M.P. Brenner, S. Hilgenfeldt, and D. Lohse, "Why Air Bubbles in Water Glow so Easily?", in *Nonlinear Physics of Complex Systems - Current Status and Future Trends*, edited by J. Parisi, S.C. Müller and W. Zimmermann, 79, Springer, Berlin (1996).
- [8] D. Lohse and S. Hilgenfeldt, "Inert Gas Accumulation in Sonoluminescing Bubbles", *J. Chem. Phys.* **107**, 6986 (1997).
- [9] B.P. Barber, R.A. Hiller, R. Löfstedt, S.J. Putterman, and K.R. Weninger, "Defining the Unknowns of Sonoluminescence", *Phys. Rep.* **281**, 65 (1997).
- [10] J. Schwinger, "Casimir Energy for Dielectrics", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A* **89**, 4091 (1992); J. Schwinger, "Casimir Light: Field Pressure", *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A* **91**, 6472 (1994); C. Eberlein, "Theory of Quantum Radiation Observed as Sonoluminescence", *Phys. Rev. A* **53**, 2772 (1996); C. Eberlein, "Sonoluminescence as Quantum Vacuum Radiation", *Phys. Rev. Lett.* **76**, 3842 (1996).
- [11] Lord Rayleigh, "On the Pressure Developed in a Liquid on the Collapse of a Spherical Cavity", *Phil. Mag.* **34**, 94 (1917).

- [12] H. Frenzel & H. Schultes, "Lumineszenz im Ultraschallbeschickter Wasser", (Luminescence in Ultrasonically Driven Water), *Z. Phys. Chem. B* **27**, 421 (1934).
- [13] D.F. Gaitan, "An Experimental Investigation of Acoustic Cavitation in Gaseous Liquids", Ph.D. Thesis, Univ. of Miss. (1990).
- [14] A. Särkilahti, "Single-Bubble Sonoluminescence", Master's Thesis, Materials Physics Laboratory, Helsinki University of Technology (2000).
- [15] R.A. Hiller, "The Spectrum of Single Bubble Sonoluminescence", Ph.D. Thesis, Physics Department, UCLA (1995).
- [16] A. Särkilahti, "Nesteen kaasupitoisuuden kontrolloiminen suljetussa sonoluminesenssilaitteistossa", erikoistyö, Ydin- ja energiatekniikan laboratorio, Teknillinen Korkeakoulu.
- [17] T. Mäki, "Suljetun sonoluminesenssilaitteiston rakentaminen", erikoistyö, Materiaalifysiikan laboratorio, Teknillinen Korkeakoulu (2000).
- [18] A. Särkilahti, "Sonoluminescence", Special Assignment, Materials Physics Laboratory, Helsinki University of Technology (1996).
- [19] National Physical Laboratory;  
<http://www.npl.co.uk/npl/acoustics/techguides/soundseawater/content.html>.
- [20] C.-T. Chen and F.J. Millero, "Speed of sound in seawater at high pressures", *J. Acoust. Soc. Am.* **62** 1129 (1977).
- [21] N.P. Fofonoff and R.C. Millard Jr., "Algorithms for computation of fundamental properties of seawater", *UNESCO technical papers in marine science. No. 44, Division of Marine Sciences* (1983).
- [22] G.S.K. Wong and S. Zhu, "Speed of sound in seawater as a function of salinity, temperature and pressure", *J. Acoust. Soc. Am.* **97** 1732 (1995).

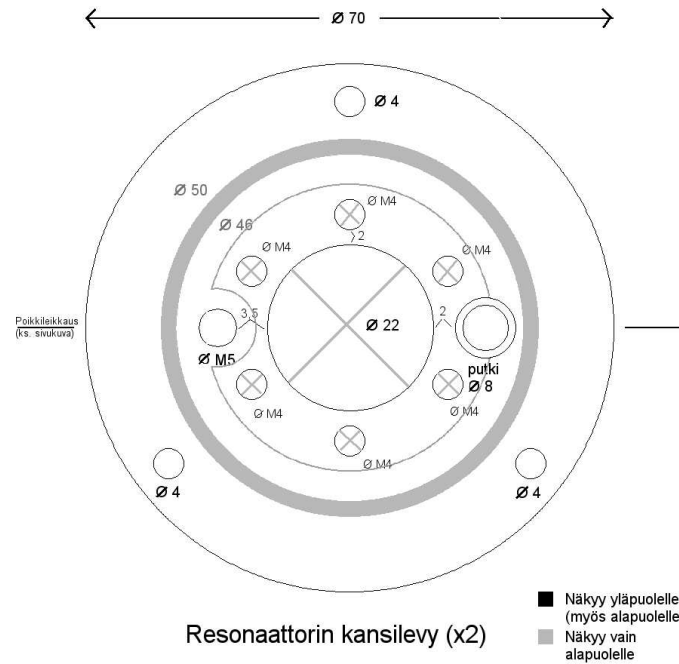
# A Laitteiston piirustukset

## A.1 Resonaattori sivulta



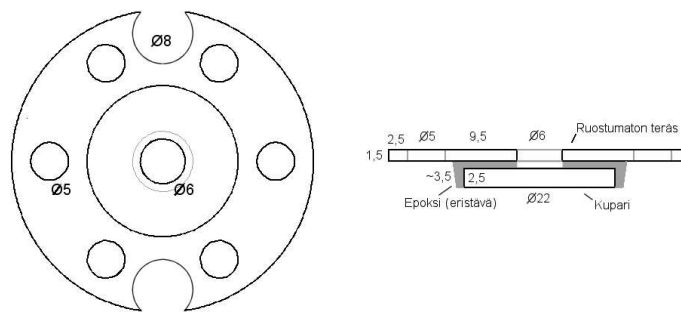
Kuva 12: Resonaattorin poikkileikkaus.

## A.2 Päätylevyt



Kuva 13: Resonaattorin päätylevy.

## A.3 Pietson kiinnittimen päällyslevy



Kuva 14: Mekaanisen pidikkeen päällyslevy. Epoksikerros on tehty antamalla paksun kerroksen epoksia kuivua levyjen ja kuparinappien päällä. Kapaleet on epoksikerroksen kovettumisen jälkeen liimattu tuoreella epoksilla. Johdonreistä ylimääräinen epoksi on poistettu poraamalla, sivuilta sorvaamalla. Kuparinapin pinta on lopuksi hiottu tasaiseksi ja kiiltäväksi hiontalevyllä.