

Ultraäänitomografialaitteiston instrumentointi

Vesa Mäkitalo

Pro Gradu - tutkielma

Sovelletun fysiikan koulutusohjelma

Itä-Suomen yliopisto, Teknillisen fysiikan laitos

26. kesäkuuta 2023

ITÄ-SUOMEN YLIOPISTO, Luonnontieteiden ja ympäristötieteiden tiedekunta
Sovelletun fysiikan koulutusohjelma, laskennallinen fysiikka
Vesa Mäkitalo: Ultraäänitomografialaitteiston instrumentointi
Luonnontieteiden pro gradu -tutkielma, 56 sivua
Tutkielman ohjaajat:
Professori Marko Vauhkonen FT, Timo Lähivaara FT ja Asko Hänninen FM
Toukokuu 2023

Avainsanat: Ultraäänitomografia, prosessitomografia, laitteisto, instrumentointi

Tiivistelmä

Ultraäänitomografia on ei-invasiivinen ja ei-intrusiivinen kuvantamismenetelmä, jota hyödynnetään laajalti niin lääketieteessä kuin teollisuudessa. Viimeisimpiä ultraäänitomografian sovelluskohteita teollisuudessa ovat esimerkiksi monifaasiputkivirtausten ja kristallisaatioprosessien monitorointi. Näissäkin sovelluskohteissa ultraäänitomografian yksi merkittävä etu on, ettei ultraääniantureiden tarvitse olla suorassa kontaktissa monitoroitavan väliaineen kanssa ja toisaalta itse monitorointi ei vaikuta mitattavaan prosessiin. Nämä ominaisuudet ovat usein välttämättömiä teollisen prosessin monitoroinnissa.

Tässä työssä rakennettiin ultraäänitomografialaitteisto teollisuuden sovelluksiin, jolla voidaan monitoroida putken sisällä olevien nesteiden ominaisuuksia. Rakennettu laitteisto koostuu sekasignaalioloskillooskoopista, vahvistimesta, signaalin esikäsittelypiiristä, ohjauselektronikasta ja 16:sta ultraääninaturista. Käytettyjen ultraääniantureiden keskitaajuus on 400 kHz. Tutkielmassa esitellään laitteiston rakenne, ohjelmisto, käyttöönotto ja tehtyjä testimittauksia.

Rakennettua laitteistoa ohjataan Python-ohjelmalla, jossa käyttäjä määrittää näytetystaajuuden ja mittauksen etenemisnopeuden. Ohjelmistolla ja ohjauselektronikalla varmistetaan, että jokainen ultraäänianturi on mitannut vasteen jokaisen ultraäänianturin lähettämään ultraäänipulssiin. Mitattua vastetta esikäsitellään neljännen asteen Chebyshev kaistanpäästösuotimella.

Laitteiston toimivuutta ja luotettavuutta tutkittiin asettelemalla kaikki 16 ultraäänianturia tasaisesti akryyliputken pinnalle, jonka halkaisija on 25 cm. Mittauksissa putkessa oli joko vettä tai vettä ja pienempi akryylitanko. Mitatuista signaaleista etsitään verhoikäyrä-menetelmällä ultraäänipulssien lentoajat. Lisäksi testattiin lentoaikoihin perustuvaa kuvan rekonstruointialgoritmia. Näiden kokeiden perusteella voidaan todeta, että laitteisto toimii ja kykenee havaitsemaan materiaalin epähomogeenisuuden.

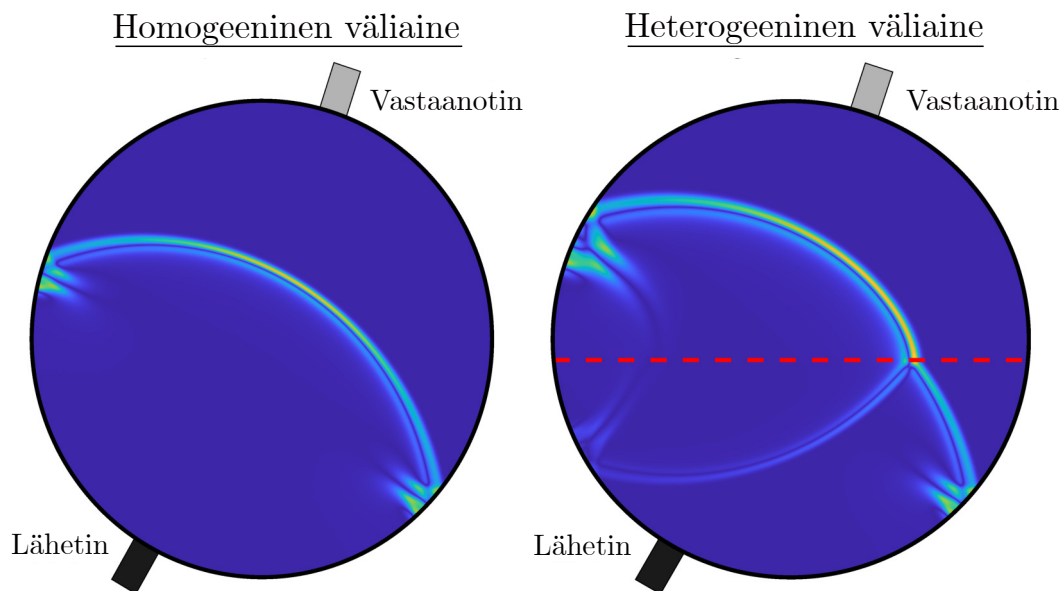
Sisällys

| | |
|---|-----------|
| 1 Johdanto | 4 |
| 2 Ultraäänitomografia | 6 |
| 2.1 Kuvantamismenetelmät ja mittaustavat | 6 |
| 2.2 Akustiset parametrit | 8 |
| 2.3 Kuvan rekonstruointi lineaarisille malleille | 11 |
| 2.4 Laitteisto | 12 |
| 2.4.1 Bathin yliopiston laitteisto | 12 |
| 2.4.2 Avoin lähdekoodi: un0-rick | 14 |
| 3 Kehitetty mittauslaitteisto | 15 |
| 3.1 Rakenne | 15 |
| 3.1.1 Ohjauselektroniikka | 16 |
| 3.1.2 Signaalin esikäsittely | 19 |
| 3.1.3 Ultraäänianturit | 21 |
| 3.1.4 Kaupalliset instrumentit | 23 |
| 3.2 Toiminta | 25 |
| 3.2.1 Ohjelmisto | 25 |
| 3.2.2 Ohjelmoitava logiikka | 30 |
| 3.3 Käyttöönotto | 33 |
| 4 Testimittaukset | 36 |
| 4.1 Mittaustulosten esikäsittely ja mittausasetelma | 36 |
| 4.2 Referenssimittaus | 39 |
| 4.3 Kohteen havainnointi | 42 |
| 5 Johtopäätökset ja pohdinta | 48 |
| Viitteet | 50 |
| Liitteet | 55 |
| A Mittauskartta | 55 |
| B Anturin teline | 56 |

1 Johdanto

Teollisuuden prosessien mittaaminen ja monitorointi on tärkeää monilla eri aloilla, muun muassa lääke- ja elintarviketeollisuudessa sekä energiantuotannossa [1]. Erityisesti monifaasivirtausten, kuten kaasu-neste- tai kiinteä-neste-virtausten kuvantaminen ja karakterisointi on tarpeellista prosessien tehokkuuden ja laadun varmistamiseksi [2]. Tietämys virtaavien materiaalien suhteesta ja virtausprofiilista mahdollistaa prosessien optimoinnin.

Monifaasivirtauksissa eri faasien välillä esiintyy usein suuria akustisen impedanssin eroja, mikä vaikuttaa ääniaaltojen etenemiseen ja heijastumiseen [3]. Kuvassa 1 on havainnollistettu ääniaallon etenemistä homogeenisessa ja heterogeenisessä väliaineessa, josta huomataan heterogeenisen väliaineen faasien rajapinnassa (punainen katkoviiva) tapahtuva ääniaallon muutos. Tämä muutos on taltioitunut vastaanottimella mitattuun signaaliin ja sitä voidaan käyttää kuvan, esimerkiksi putkessa virtaavien nesteiden äänennopeusjakauman, muodostamiseen. Kuvan muodostamiseen tarvitaan useita lähetettyjä ja mitattuja ääniaaltoja eri suunnista väliainetta [4]. Tätä menetelmää kutsutaan ultraäänitomografiaksi.



Kuva 1: Ääniaallon eteneminen homogeenisessa ja heterogeenisessä väliaineessa

Ultraäänitomografialaitteisto koostuu yleensä ultraääniantureista, signaalinkäsittelypiiristä, analogia-digitaalimuuntimesta ja mittaustietokoneesta [5]. Ultraääniantureilla muunnetaan sähköinen signaalin ultraääniaalloiksi ja päinvastoin [6]. Anturien määrä, sijoittelu ja taajuusalue riippuvat kuvantamiskohteesta ja -menetelmästä. Signaalinkäsittely-

piirillä tuotetaan ja vahvistetaan antureiden syötepulssi, sekä suodatetaan ja vahvistetaan antureilla mitattu vaste. Vaste näytteistetään analogia-digitaalimuuntimella ja tallennetaan tietokoneelle. Tietokoneella ratkaistaan käänteisongelma hyödyntämällä valittua ratkaisumenetelmää ja visualisoidaan tuloksia [7].

Tutkielma on jaettu seuraaviin osiin: Luvussa 2 käsitellään ultraäänitomografian perusteita, kuten kuvantamismenetelmiä, akustisia parametreja ja kuvan rekonstruointia. Luvussa 3 kuvataan kehitetyn mittalaitteiston rakenne, toiminta ja käyttöönotto. Luvussa 4 esitellään testimittauksia ja niiden tuloksia. Luvussa 5 tehdään johtopäätökset ja ehdotetaan jatkotutkimuksen aiheita.

2 Ultraäänitomografia

Ultraäänitomografia on ei-invasiivinen ja ei-intrusiivinen kuvantamismenetelmä [8], jota hyödynnetään lääketieteessä sekä teollisuudessa. Lääketieteessä yleisimmät sovelluskohdet ovat kehon sisäisten rakenteiden kuten jänteiden, lihasten, nivelten, verisuonten ja sisäelinten kuvantaminen, jota kutsutaan sonografiaksi [9]. Tässä työssä keskitytään ultraäänitomografian sovelluksiin teollisuuden prosesseissa ja siihen tarvittavaan laitteistoon. Yleensä kun puhutaan ultraäänitomografiasta teollisuuden prosesseissa, käytetään termiä ultraääniprosessitomografia (Ultrasonic process tomography, UPT).

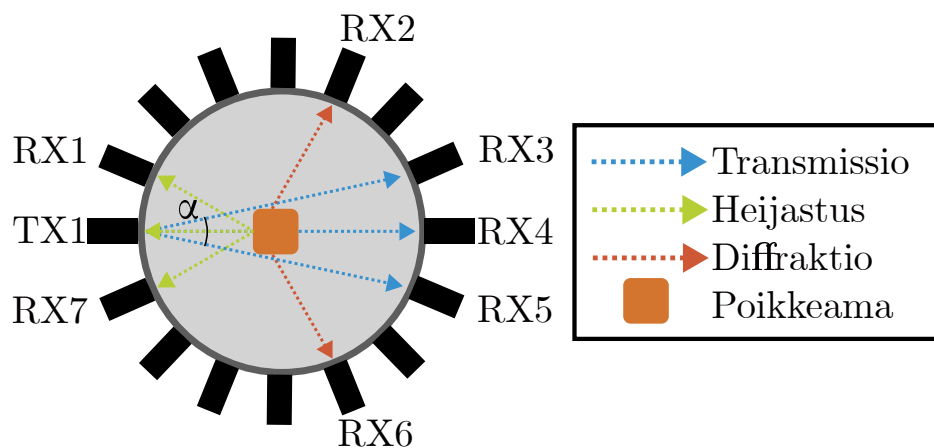
Viime vuosina UPT:ta on hyödynnetty monifaasiputkivirtausten [10, 11, 12] ja kristallisaatioprosessien [13] mittaamisessa. UPT on näihin mielenkiintoinen vaihtoehto, koska antureiden ei tarvitse olla nestekontaktissa ja monitorointi ei vaikuta mitattavaan prosessiin [14]. Lisäksi UPT:lla on päästy reaaliaikaiseen kuvanmuodostukseen lentoaikoihin perustuvia rekonstruktioalgoritmeja hyödyntäen [10, 15, 16]. Nämä ominaisuudet voivat olla tietyn teollisuuden prosessin monitorointiin välttämättömiä. Huomioitavaa on, että ultraääniaallot kuitenkin kulkeutuvat mitattavassa väliaineessa hitaammin kuin sähkömagneettiset aallot, joita hyödynnetään esimerkiksi impedanssi- ja kapasitanssitomografiassa [14].

Ultraäänitomografian mittausjärjestelmä koostuu ultraääniantureista, signaalin käsittelypiiristä, analogia-digitaalimuuntimesta ja mittaustietokoneesta. Usein UPT mittausjärjestelmässä käytetään 16 tai 32 ultraäänianturia [17]. Teollisuuden sovelluksissa puhutaan, että 18 kHz - 100 kHz ovat matalia taajuuksia, 100 kHz - 1 MHz keskisuuria taajuuksia ja 2 MHz - 10 MHz korkeita taajuuksia [18, 19, 20]. Valittava taajuus kuitenkin riippuu suunnitellusta mittausasetelmasta, sillä kuvantamisen resoluutio on suoraan verrannollinen ultraäänipulssin taajuuteen ja akustinen vaimentuminen on suoraan verrannollinen taajuuden neliöön [21]. Eli valitsemalla suurempiin taajuuksiin kykenevät ultraäänianturit saadaan parempi kuvantamisresoluutio, mutta heikompi toimintasyvyys. Kuvantamisen laatuun vaikuttaa myös projektoiden määrää ja mittauksen signaali-kohinasuhde (*Signal-to-noise ratio*, SNR) [7]. Tämän takia parempien UPT instrumenttien kehittäminen on välttämätöntä kuvantamisen laadun parantamiseksi.

2.1 Kuvantamismenetelmät ja mittaustavat

Yleensä UPT jaetaan ultraäänitransmissiotomografiaan (*Ultrasonic transmission tomography*, UTT) ja ultraääniheijastustomografiaan (*Ultrasonic reflection tomography*, URT). Nämä yleisimmät menetelmät hyödyntävät nimensä mukaisesti ultraäänipulssin transmisiossa tai heijastuksessa kulkeutuvaa informaatiota [22]. Kuvassa 2 ultraäänianturi TX1

lähettää ultraäänipulssin, jolloin transmissiodata mitataan antureilla RX3, RX4 ja RX5. Vastaavasti heijastusdata saadaan antureilta RX1 ja RX7. Kuvassa on myös havainnollistettu harvinaisempaa diffraktiomenetelmää, jossa data mitattaisiin antureilla RX2 ja RX6. Yksi kokonainen mittaus on suoritettu, kun jokainen anturi on lähettänyt ultraäänipulssin ja kaikki anturi ovat mitanneet jokaisen pulssin vasteen. Huomioitavaa on, että tässä oletetaan anturin kykenevän mittaamaan ja lähettämään.



Kuva 2: Yksinkertaistettu esimerkki ultraäänipulssin kulkeutumisesta. Kuvassa TX1 on lähettävä ultraäänianturi ja RX1–RX7 mittaavia antureita. Kulma α vastaa anturin suuntaavuutta. Poikkeama tarkoittaa materiaaliepähomogeenisuutta, jossa akustiset ominaisuudet eriävät ympäröivästä väliaineesta, esimerkiksi ilmakuplaa vedessä.

Kuvantamismenetelmillä on omat vahvuudet ja heikkoudet. Neste-kaasu tai neste-kiinteä virtausmittauksissa ultraäänipulssi heijastuu rajapinnasta lähes kokonaan, johon suuresta impedanssierosta. Jos kaasu tai kiinteä materiaali estää jokaisen ultraäänipulssin kulkeutumisen vastakkaiselle anturille, niin UTT ei ole toimiva menetelmä mittaukseen [23]. Toisaalta vahva heijastuminen on hyödyksi URT menetelmälle [24]. On ehdotettu, että kiinteän tai kaasun kokonaisuus nesteestä ei tulisi ylittää 20 % UTT menetelmää hyödyntäessä [23]. Lisäksi on huomattu, että UTT on tarkempi mittausalueen reunoilla, kun taas URT mittausalueen keskiössä [7].

Käsitellyt kuvantamismenetelmät ovat siis erillisinä puutteellisia, ja tämän takia menetelmien yhdistämistä tutkitaan aktiivisesti [10, 25, 26]. Tätä kutsutaan ultraäänifuusiotomografiaksi (Ultrasonic process fusing tomography, UPFT). Käytetään myös termiä *Dual Modality*. UTT menetelmää on esitetty myös yhdistettäväksi impedanssitomografiaan [27], resistanssitomografiaan [28] ja kapasitanssitomografiaan [29]. Kuitenkaan toistaiseksi ei ole kehitetty teollisuuteen sopivaa ja reaaliaikamittaukseen kykenevää UPFT laitteistoa [10].

2.2 Akustiset parametrit

Mittausdatasta halutaan rekonstruoida kuva, jota varten on rakennettava systeemiä karakterisoiva malli. UPT pohjaisen mallin rakentamisessa yleisiä käytettyjä parametreja ovat akustinen impedanssi Z , äänennopeus c , vaimentumiskerroin α ja lentoaika TOF. Seuraavaksi perehdytään näihin parametreihin.

Akustinen impedanssi Z kuvaa väliaineen ominaisuutta vastustaa ääniaallon etenemistä ja sen yksikkö on Rayl. Kansainvälisen yksikköjärjestelmän (SI-järjestelmä) yksiköllä ilmaistuna Rayl on $\text{Pa}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$. Impedanssin suuruuteen vaikuttaa materiaalin äänennopeus c ja materiaalin tiheys ρ siten, että

$$Z = \rho c. \quad (1)$$

Akustinen impedanssi myös karakterisoi materiaalien rajapinnassa tapahtuvaa transmisioita ja heijastusta. Oletetaan, että ultraäänipulssi kohtaa rajapinnan pinnannormaalin suuntaisesti. Tällöin heijastuskerroin R ja transmissiokerroin T ovat

$$R = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad \text{ja} \quad T = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1}, \quad (2)$$

missä Z_1 on lähtömateriaalin ja Z_2 kohdemateriaalin akustinen impedanssi [4]. Eli suuri poikkeavuus materiaalien akustisessa impedanssissa johtaa vahvaan heijastumiseen. Materiaalien Z on myös huomioitava suunniteltaessa anturien kiinnitystä mitattavaan systeemiin [6].

Äänennopeudesta puhuessa tarkoitetaan yleensä pitkittäisen aallon (P-aalto) etenemisnopeutta väliaineessa. Huomioitavaa on, että elastisissa väliaineissa esiintyy myös poikittaista aaltoliikettä (S-aalto). Äänennopeus voidaan määrittää mittaamalla tiettyyn matkaan kulunut aika tai yhtälöstä

$$c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}, \quad (3)$$

missä E on materiaalin kimmokerroin [22]. Taulukossa 1 on esitetty UPT mittauksissa joidenkin usein tutkittujen materiaalien äänennopeudet, tiheydet ja akustiset impedanssit.

Taulukko 1: Materiaalien akustisia ominaisuuksia [30].

| Materiaali | P-aalto (m/s) | S-aalto (m/s) | Tiheys (kg/m ³) | Z (MRayl) |
|------------|---------------|---------------|-----------------------------|-----------|
| Vesi | 1480 | - | 998 | 1.5 |
| Raakaöljy | 1330 | - | 850 | 1.1 |
| Ilma | 343 | - | 1.3 | 0.0004 |
| Akryyli | 2730 | 1430 | 1200 | 3.3 |

Mitatusta signaalista halutaan etsiä myös ajanhetki, jolloin ensimmäinen ultraäänipulssi on saapunut mittaavalle anturille. Tätä kutsutaan lentoajaksi (*Time of flight*, TOF). TOF:n etsimiseen hyödynnetään usein ristikorrelaatiota [31] tai signaalin verhokäyrää [25]. Tässä työssä hyödynnettiin verhokäyrä-menetelmää.

Ultraäänipulssin amplitudi vaimenee sen edetessä väliaineesta toiseen. Tämä johtuu aallon heijastumisesta ja diffraktiosta, joten vain osa alkuperäisestä aallosta siirtyy uuteen väliaineeseen. Lisäksi ultraäänipulssi kokee sisäistä kitkaa homogeenisen materiaalin molekyylien välillä, mikä muuttaa osan äänestä lämpöenergiaksi [32]. Intensiteetti vähenee myös toteuttaen käänteisen neliön lakia. Kuvassa 3 on havainnollistettu ultraäänipulssin vaimentumista putkessa veden ja akustisen poikkeaman kanssa. Kuvasta 3 a) huomioitavaa on kuinka ilman poikkeamaa anturilla RX1 mitataan pienempi amplitudi kuin anturilla RX2. Kuvassa 3 b) ultraäänipulssi kulkeutuu epähomogeenisuuden lävitse, jossa äänennopeus on suurempi kuin ympäröivässä nesteessä. Tällöin amplitudi laskee huomattavasti ja pulssi havaitaan hieman aikaisemmin.

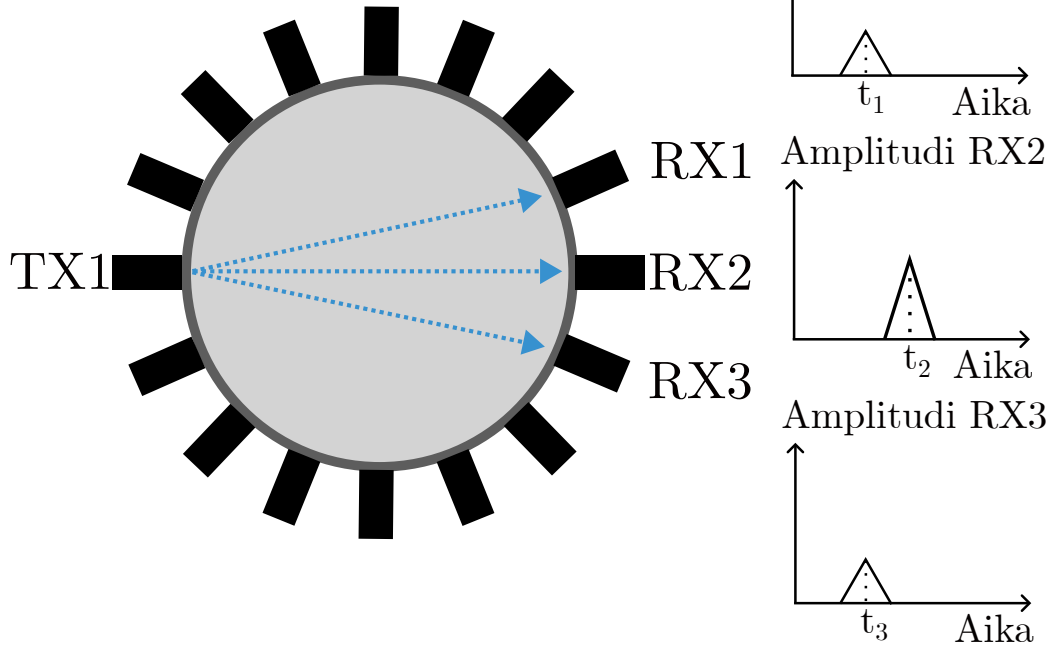
Kuten aiemmin on mainittu käytetyn ultraäänipulssin taajuus vaikuttaa kuvantamisen resoluutioon. Kirjallisuudessa on esitetty yhtenä kriteerinä, että väliaineessa esiintyvää poikkeamaa ei havaita luotettavasti, jos sen halkaisija on pienempi kuin ultraäänipulssin aallonpituus [33]. Täten UPT laitteiston herkkyyttä voidaan havainnollistaa yhtälöllä

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (4)$$

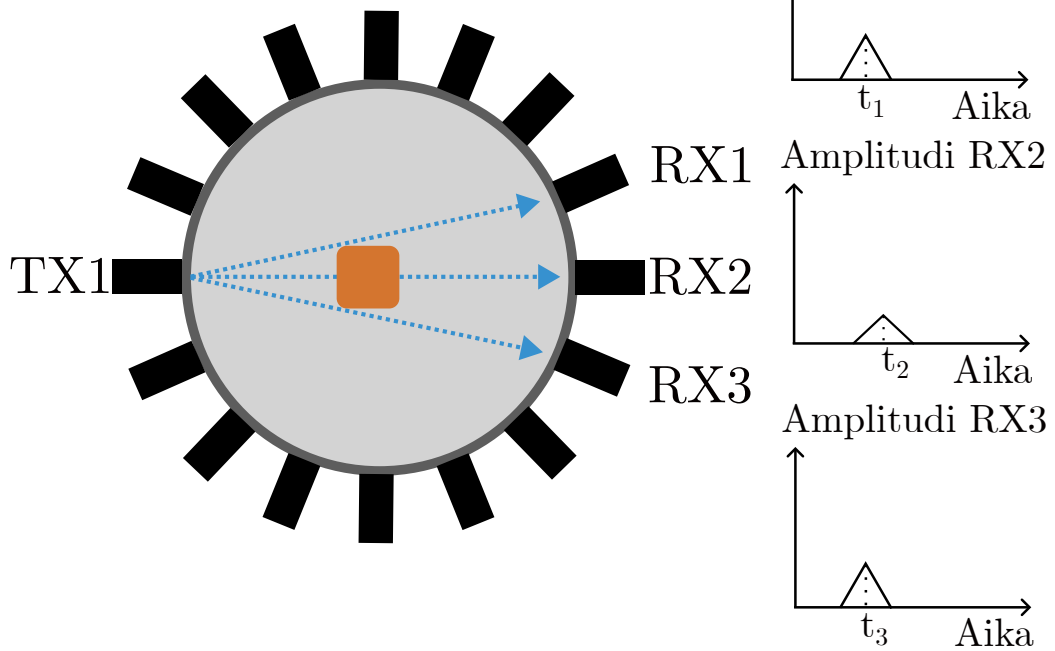
missä λ on aallonpituus ja f taajuus. Esimerkiksi tässä työssä kehitetyn laitteiston herkkyys vedessä on

$$\lambda = \frac{1480 \text{ m/s}}{400 \text{ kHz}} = 3.7 \text{ mm}. \quad (5)$$

a)



b)



Kuva 3: Havainnollistava kuva ultraäänipulssin vaimentumisesta putkessa. a) Putkessa vain vettä. b) Putkessa on vettä ja epähomogeenisuus, jonka äänennopeus on hieman suurempi kuin veden.

2.3 Kuvan rekonstruointi lineaarisille malleille

Kun UPT mittaus on suoritettu ja valittu malli muodostettu, niin seuraavaksi halutaan rekonstruoida kuva. Matriisimuodossa esitettynä tämä ongelma voidaan kirjoittaa

$$g = H\theta + e, \quad (6)$$

missä $g \in \mathbb{R}^n$ on mittausdata, $H \in \mathbb{R}^{n \times m}$ malli, $\theta \in \mathbb{R}^m$ kuva ja $e \in \mathbb{R}^n$ kohina. Matriisi H riippuu käytetystä mallista ja mittausdata g on yleensä mitatut lentoajat [22]. Yhtälöstä (6) kuvan θ eli äänennopeusjakauman ratkaiseminen on käänteisongelma. Käänteisongelmien ratkaiseminen on usein laskennallisesti raskasta, jonka takia on kehitetty monia erilaisia analyyttisiä, iteratiivisia ja reguloivia ratkaisumenetelmiä.

Yksinkertaisin ja tunnetuin analyyttinen ratkaisumenetelmä on lineaarinen takaisinprojektiio (*Linear back projection*, LBP), jossa estimaatti $\hat{\theta}$ todellisesta kuvasta θ voidaan kirjoittaa muodossa

$$\hat{\theta} = H^\top g. \quad (7)$$

Valitettavasti LBP tuottaa usein epätarkan ratkaisun [34]. Tästä paranneltu versio on suodatettu lineaarinen takaisinprojektiio (*Filtered back projection*, FBP), joka yleensä tuottaa hieman paremman kuvan [35]. Analyyttiset menetelmät perustuvat Radon muunnokseen.

Tunnettuja iteratiivisia menetelmiä ovat algebrallinen rekonstruktio menetelmä (*Algebraic reconstruction technique*, ART) ja samanaikainen algebrallinen rekonstruktio menetelmä (*Simultaneous algebraic reconstruction technique*, SART) [36]. ART menetelmässä toistetaan iterointia

$$\hat{\theta}^{k+1} = \hat{\theta}^k + \lambda_k \frac{H^\top (g - H^\top \hat{\theta}^k)}{H^\top H}, \quad (8)$$

kunnes jokin määritelty iterointiehto täyttyy [37]. Yhtälössä (8) λ_k on relaksointiparametri ja k iterointinumero. Iterointiehto voi esimerkiksi olla $\|\hat{\theta}^{k+1} - \hat{\theta}^k\| < \epsilon \in \mathbb{R}$ eli toisin sanoen, kunnes kahden edellisen ratkaisun poikkeama toisistaan on pienempää kuin valittu ϵ . Analyyttiset menetelmät ovat laskennallisesti kevyempiä kuin iteratiiviset algoritmit, mutta iteratiiviset menetelmät tuottavat tarkemman ratkaisun kun mittausdataa on rajoitettu määrä tai kun mittaus sisältää paljon kohinaa [38].

Yleinen menetelmä ratkaista käänteisongelma on etsiä $\hat{\theta}$, joka minimoi pienimmän neliösumman residuaalin eli

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} (\|g - H\theta\|_2^2). \quad (9)$$

Käänteisongelmille ominaista on epästabiilisuus eli pieni muutos mittauksessa voi johtaa

suureen muutokseen ratkaisussa. Tällaisissa tilanteissa on hyödyllistä käyttää esimerkiksi Tikhonovin regularisointia [39]. Yleistetty Tikhonovin regularisointi voidaan kirjoittaa muodossa

$$\hat{\theta} = \arg \min_{\theta} (\|g - H\theta\|_2^2 + \gamma \|L\theta\|_2^2), \quad (10)$$

missä $\gamma \in \mathbb{R}_+$ on regularisointiparametri ja $L \in \mathbb{R}^{n \times m}$ regularisointimatriisi. Matriisi L voidaan valita usealla eri tavalla, mutta yleensä se valitaan vastaamaan ensimmäistä tai toista derivaattaoperaattoria [39, 40]. Lisätietoja Tikhonovin regularisoinnin hyödyntämisestä UPT käänteisongelmien ratkaisussa viitteissä [41, 42].

2.4 Laitteisto

Yksi UPT:n haasteista on kohtuuhintaisten ja helposti saatavilla olevien laitteistojen puute. Useimmat kaupalliset ultraäänijärjestelmät ovat kalliita, patentoituja tai toiminnoiltaan rajoitettuja. Siksi tarvitaan yliopistojen ja avoimen lähdekoodin UPT hankkeita, jotka voivat tarjota edullisia ja mukautettavia ratkaisuja tutkijoille ja harrastelijoille. Tässä kappaleessa esitellään tarkemmin Bathin yliopistolla Britanniassa rakennettu laitteisto ja yksi harrastelijoiden rakentama avoimen lähdekoodin laitteisto.

Taulukossa 2 on esitetty rakennettujen UPT laitteistojen keskeisiä ominaisuuksia. Tässä työssä on keskitytty UPT laitteistoihin eli ultraäänitomografiaan teollisuuden prosesseissa ja siihen tarvittaviin laitteistoihin. Kattava revisio ultraäänitomografia laitteistoista lääketieteen sovelluksiin löytyy artikkelista [5].

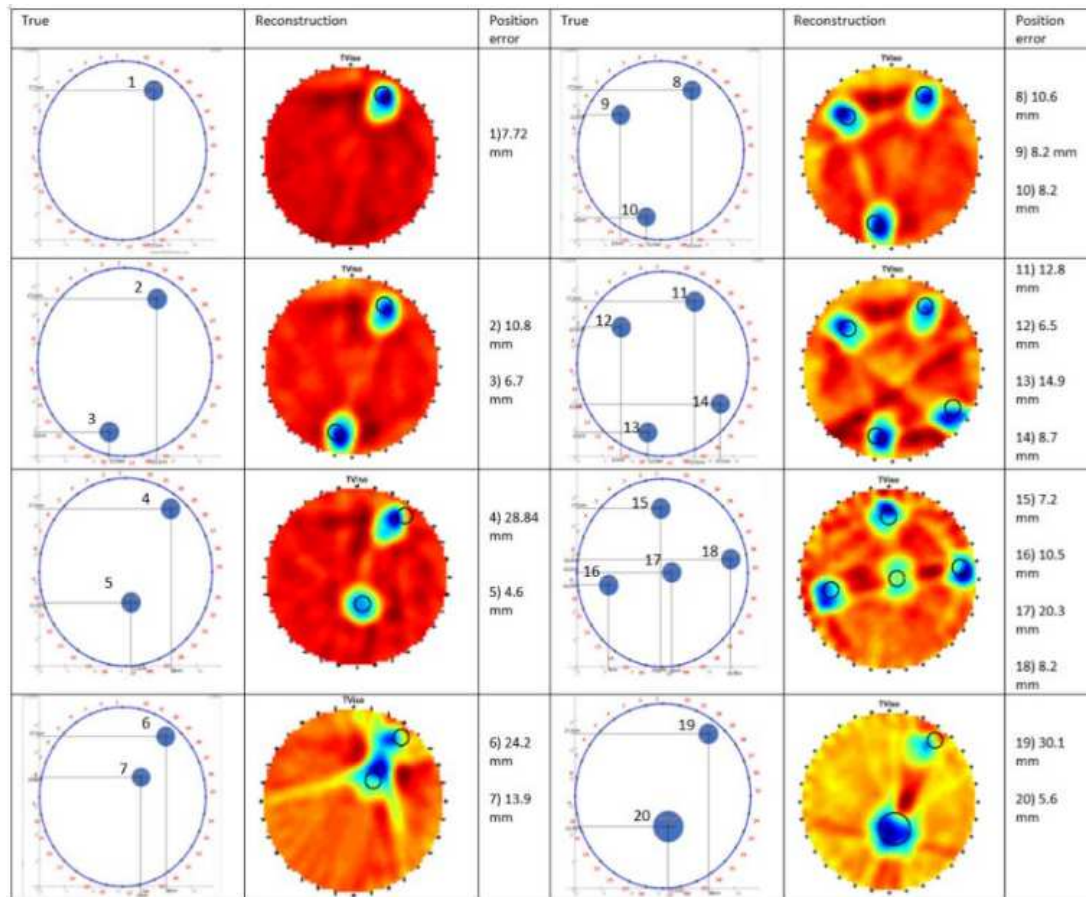
Taulukko 2: Rakennettujen UPT laitteistojen keskeisiä ominaisuuksia. Rivi, jossa ei ole viittausta vastaa tässä työssä rakennettua laitteistoa.

| Käytetty taajuus | Anturien lkm. | Putken sisähalkaisija | Menetelmä | Viittaus |
|------------------|---------------|-----------------------|-----------|----------|
| 40 kHz | 16 | 10.3 cm | UTT | [2] |
| 40 kHz | 32 | 33 cm | UTT | [1] |
| 400 kHz | 16 | 23.2 cm | UTT | - |
| 520 kHz | 32 | 0.53 cm | URT | [24] |
| 1 MHz | 16 | 0.5 cm | UTT | [43] |
| 2 MHz | 42 | 18.7 cm | URT | [3] |

2.4.1 Bathin yliopiston laitteisto

Eräs mielenkiintoinen UPT laitteisto on Bathin yliopiston rakentama laitteisto, jonka kehityksestä ja testeistä on kirjoitettu useita artikkeleita [1, 13, 15, 25, 41, 44]. Ensimmäinen

artikkeli laitteesta julkaistiin 2019 [1]. Tällöin laite koostui 32:ta 40 kHz ultraäänianturista, joita käytettiin hyödyntämällä UTT menetelmää. Käytetty malli perustui lentoaikoihin ja kuvan rekonstruoinnissa hyödynnettiin LBP ja FBP menetelmiä. Kuvassa 5 on esitetty rekonstruoituja kuvia.

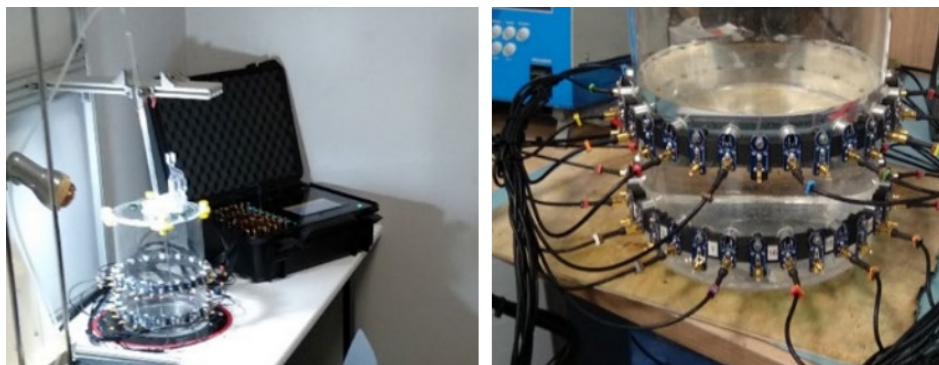


Kuva 4: Bathin yliopiston rakentamalla laitteistolla rekonstruoituja kuvia [1]. Mittausasetelmassa putki on täytetty vedellä ja sen sisähalkaisija on 33 cm. Kuvassa näkyvät sylinterit on täytetty ilmalla. Pienempien halkaisija 2.8 cm ja suuremman 5.8 cm.

Vuonna 2021 kyseisestä laitteesta ja sen sovelluksista julkaistiin neljä artikkelia. Yksi artikkeleista keskittyi reaaliaikamittaukseen [15], yksi mallin kehittämiseen [25] ja kaksi seoksen kiteytymisprosessin mittaamiseen [13, 44]. Tässä vaiheessa 40 kHz anturit vaihdettiin 400 kHz antureihin, joita tässäkin työssä käytetään. Korkeampitaajuuksisten antureiden todettiin tuottavan tarkempi kuva kyseisestä mittausasetelmasta [44]. Mallissa alettiin hyödyntämään transmittoituvan ultraäänipulssin lentoaikaa ja vaimentumista, sekä heijastuneen ultraäänipulssin lentoaikaa [25].

Vuonna 2022 laitteesta julkaistiin artikkeli, jossa samat 32 ultraäänianturia oli jaoteltu kahteen 16:ta anturin kerrokseen [41]. Tavoitteena oli rekonstruoida 3D kuva mitattavasta

kohteesta. Kuvassa 5 on esitetty mittausasetelma kyseisestä tilanteesta.

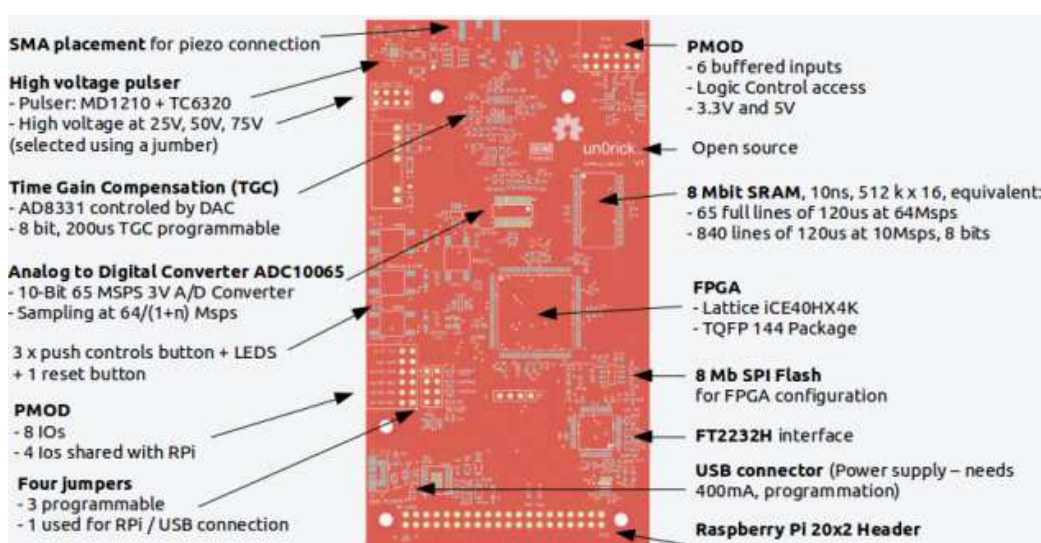


Kuva 5: Bathin yliopistossa rakennettu UPT laitteisto [41].

2.4.2 Avoin lähdekoodi: un0-rick

Yksi esimerkki avoimen lähdekoodin hankkeesta on un0-rick [45]. Projektin tavoitteena on kehittää edullinen ja helposti muokattavissa oleva ultraäänitomografialaitteisto. Projektissa ei keskitytä kuvan rekonstruointiin. Tekijöitä on ollut noin 90 ympäri maailmaa.

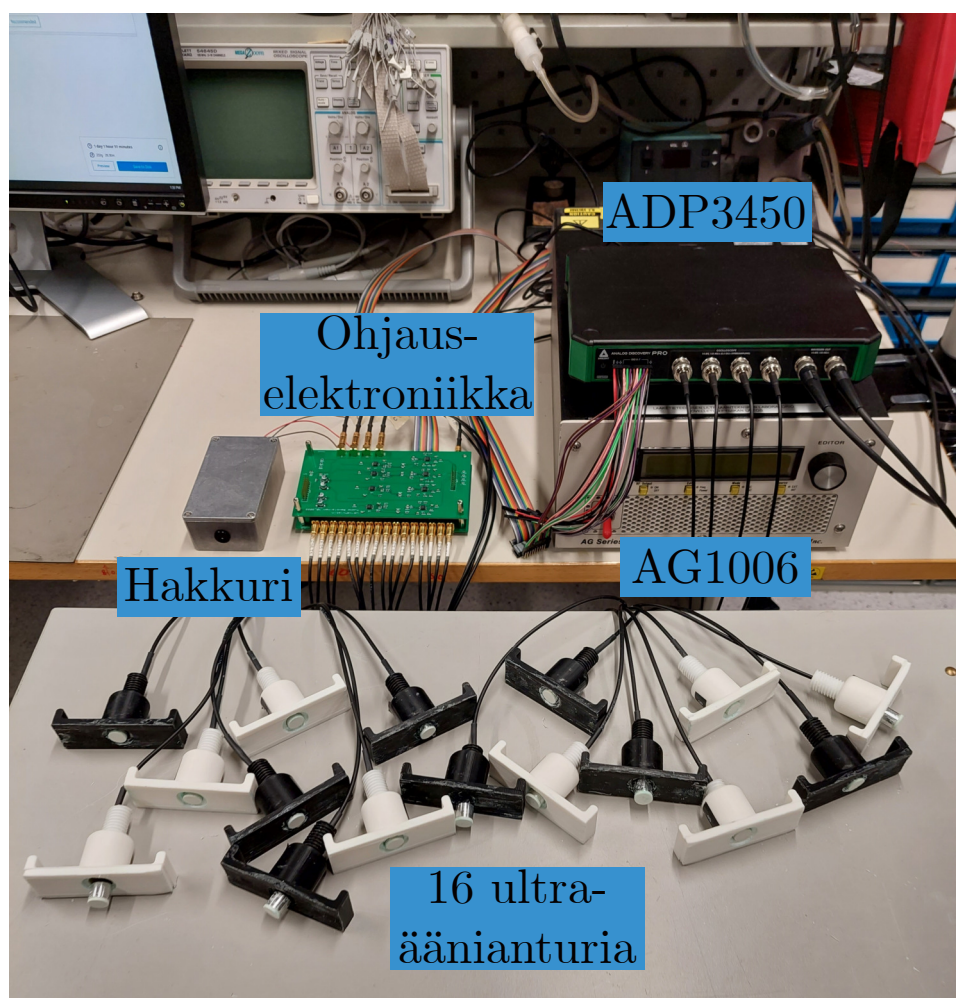
Kuvassa 6 on esitetty kehitetty piirilevy ja sen rakenne. Piirilevyn kytkentäkaaviot ja laitteen ohjaukseen vaadittavat koodit löytyvät projektin GitHub:sta [46]. Piirilevyn tärkeimmät ominaisuudet ovat 65 MHz analogia-digitaalimuunnin ja 25 V, 50 V tai 75 V pulssintuottaja. Laitetta pystyy haluttaessa ohjaamaan Raspberry Pi:llä. Piirilevyn voi myös ostaa valmiiksi rakennettuna noin 450 euron hintaan.



Kuva 6: un0-rick piirilevyn rakenne [45].

3 Kehitetty mittauslaitteisto

Työssä rakennettiin ultraäänitomografialaitteisto yhdistämällä kaupallisia instrumentteja ja itse tehtyä elektroniikkaa. Itä-Suomen yliopiston teknillisen fysiikan laitoksella ei aikaisemmin ole ollut vastaavaa laitteistoa. Työssä kehitetty laitteisto mahdollistaa uusia tutkimusavauksia, kuten esimerkiksi kaksifaasiputkivirtauksen virtausprofiilin ja teollisuuden sekoittumisprosessien tutkimisen [44, 47]. Rakennettu laitteisto on esitetty Kuvassa 7.

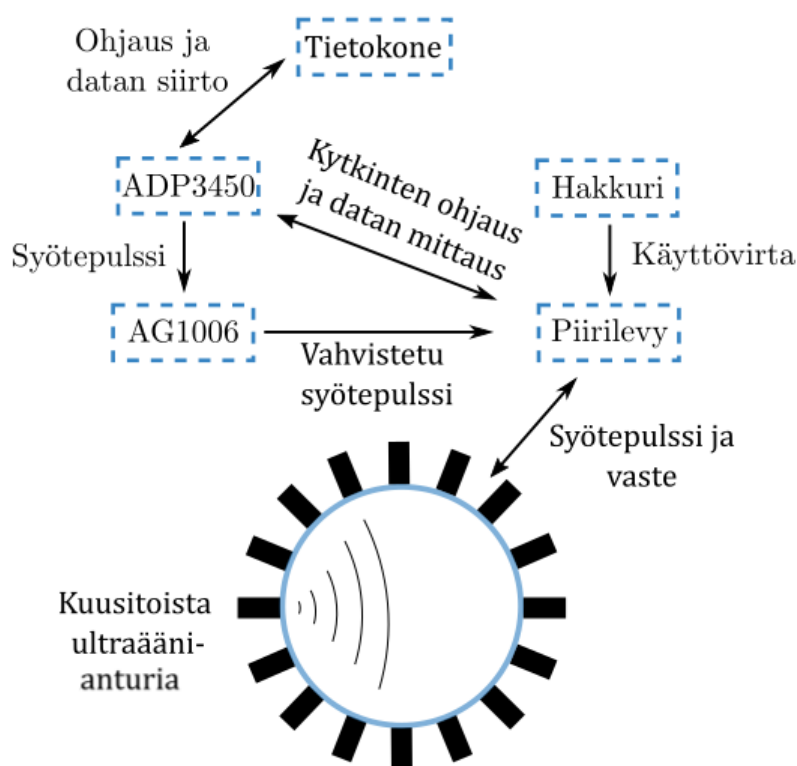


Kuva 7: Rakennettu ultraäänitomografialaitteisto kokonaisuudessaan. Laitteisto koostuu 16:sta ultraäänianturista, hakkuriteholähteestä, ohjauselektroniikasta, vahvistimesta (AG1006) ja sekasignaali-oskilloskooppista (ADP3450).

3.1 Rakenne

Työssä käytetyt kaupalliset instrumentit ovat sekasignaali-oskilloskooppi *Digilent Analog Discovery Pro 3450* (ADP3450) [48] ja vahvistin *T & C Power AG 1006 LF* (AG1006) [49].

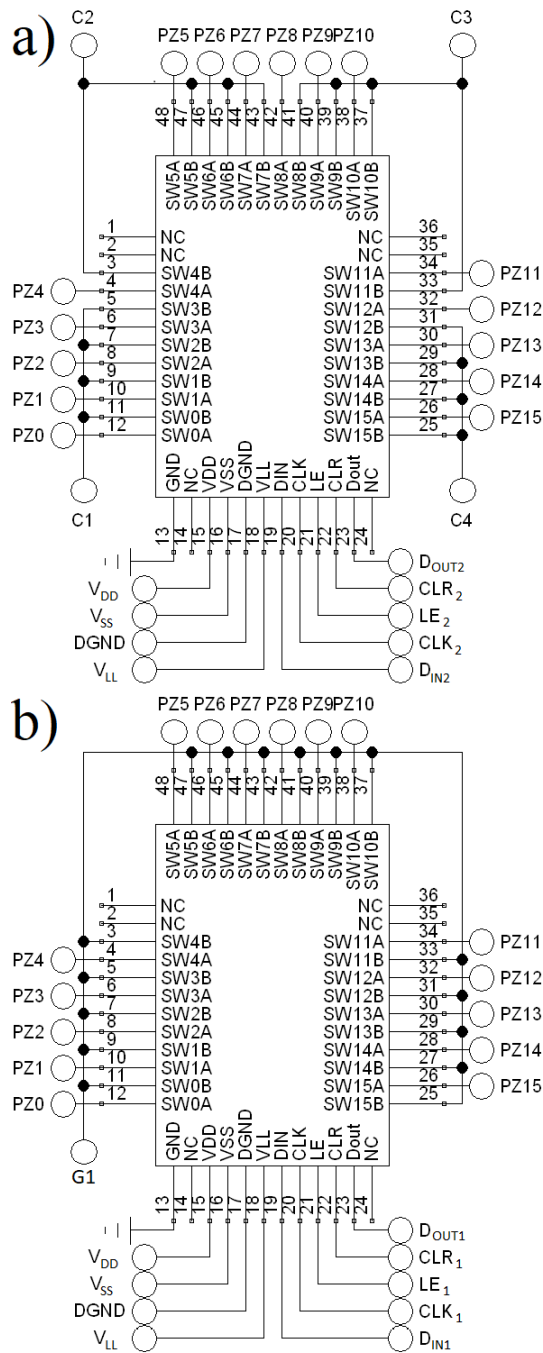
Kaupallisten instrumenttien ympärille suunniteltiin ja rakennettiin systeemi, joka koostuu ohjauselektroniikan sisältävästä piirilevystä, 16:sta ultraäänianturista ja hakkuriteholähteestä (lyhennettynä hakkuri). Käytetyt ultraäänianturit ovat *Multicom* MCUSD11A-400B11RS [50], jotka soveltuvat ultraäänipulssin lähettämiseen sekä mittaamiseen. Kuvassa 8 on esitetty yksinkertaistettu malli laitteen rakenteesta ja eri instrumenttien yhteyksistä. Esimerkissä ultraäänianturit on aseteltu putken ympärille, mutta mittaussasetelma voisi olla myös erilainen. Seuraavissa kappaleissa perehdytään yksityiskohtaisemmin laitteen piirilevyyn, käytettyihin ultraääniantureihin ja kaupallisiin instrumentteihin.



Kuva 8: Rakennetun ultraäänitomografialaitteiston rakenne ja eri instrumenttien yhteydet. Kuvasta huomioitavaa on ADP3450-mittalaitteen yhteys vahvistimeen ja piirilevyyn.

3.1.1 Ohjauselektroniikka

Ohjauselektroniikan sisältävän piirilevyn suunnittelusta vastasi pääasiassa teknillisen fyysikan laitoksen laboratorioinsinööri FT Tuomo Savolainen. Ultraäänitomografialaitteiston piirilevyä suunniteltaessa huomioitavaa on ultraääniantureiden syötepulssin korkea jännite (noin 150 V). Jos korkea jännite pääsee purkautumaan esimerkiksi oskilloskooppiin, niin oskilloskooppi rikkoutuu. Toisaalta ultraääniantureilla mitattu vaste on matalajännitteistä (noin 10 mV), joten piirilevyn kohinan pitää olla vähäistä.



Kuva 9: HV2708 kytkinten kytkennät, missä PZ vastaa ultraäänianturia, C oskilloskoopin kanavaa ja G vahvistimen ulostuloa. Terminaalit V_{DD} , V_{SS} ja V_{LL} vastaavat kytkinten käyttövirtaa ja terminaalit GND sekä DGND maatasoja. ADP3450-mittalaitteen digitaalikanavat yhdistetään terminaleihin D_{OUT}, CLR, LE, CLK ja D_{IN}. Digitaalikanavilla ohjataan SW terminaleja. Kuvassa a) on mittauskytkin ja b) on lähetyskytkin.

Piirilevyn avulla valitaan milloin tietty ultraäänianturi on mittaus- tai lähetystilassa. Yhteyksiä ohjataan kahdella HV2708 analogisella kytkimellä [51], joita hallitaan ADP3450:n digitaalikanavilla. Analogisten kytkinten kytkennät on esitetty Kuvassa 9. Kuvassa merkintä $PZ\ell$ missä $\ell \in \{0, 1, 2, \dots, 14, 15\}$ vastaa ultraäänianturia, Cv missä $v \in \{1, 2, 3, 4\}$ oskilloskoopin kanavaa ja G1 AG1006 vahvistimen ulostuloa.

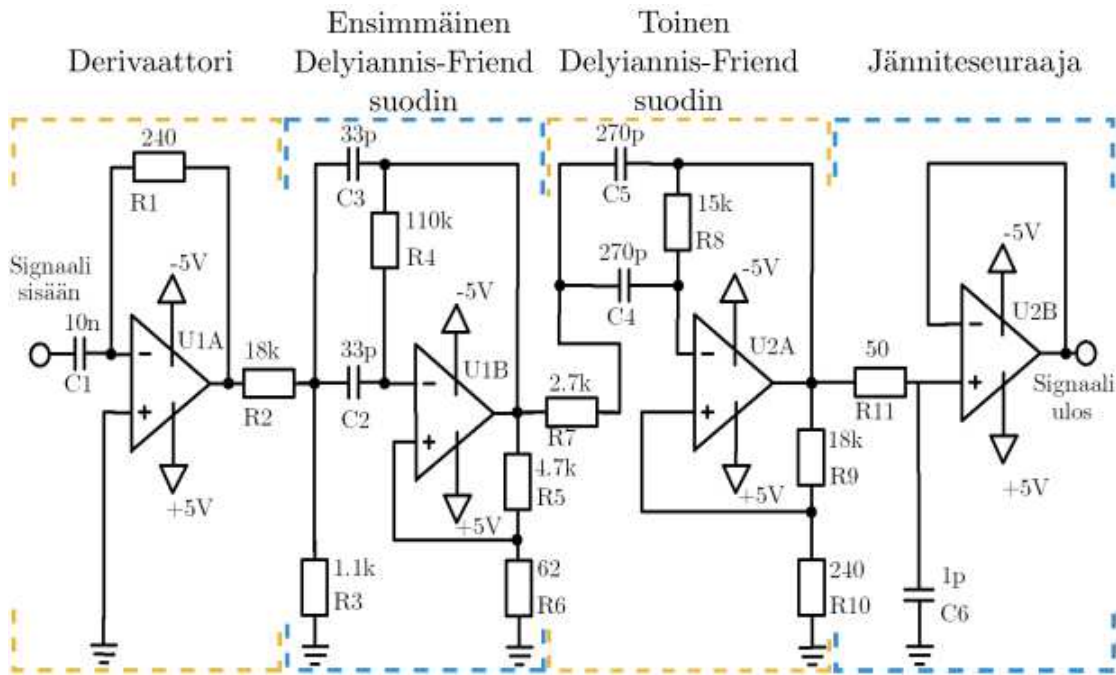
Jokainen ultraäänianturi on siis kytketty sekä mittauskytkimeen että lähetyskytkimeen. Mittauskytkimessä anturit on jaettu neljään neljän anturin ryhmään (Kuva 9) siten, että jokainen ryhmä on kytketty yhteen oskilloskoopin kanavista. Esimerkiksi PZ0, PZ1, PZ2 ja PZ3 on liitetty oskilloskoopin kanavaan C1. Puhutaan, että ultraäänianturi on mittauksessa anturin ollessa yhteydessä johonkin oskilloskoopin neljästä mittauskanavasta. Vastaavasti lähetystilassa, kun anturi on yhteydessä AG1006 vahvistimeen. Jokaisesta mittausryhmästä vain yksi ultraäänianturi on kerrallaan mittauksessa. Näin pystytään hyödyntämään oskilloskoopin neljää kanavaa samanaikaisesti sekoittamatta ultraääniantureiden signaaleja. Lähetyskytkimessä kaikki ultraäänianturit on kytketty AG1006 vahvistimen ulostuloon. Laite on suunniteltu siten, että vain yksi anturi on kerrallaan lähetystilassa. Huomioitavaa on, että ultraäänianturi voi olla samanaikaisesti mittaus- ja lähetystilassa. Tämä ei kuitenkaan riko oskilloskooppia, sillä piirilevyllä ennen oskilloskoopin kanavia on Supertex inc. MD0101 T/R (*Transmit and receive*) kytkin [52]. T/R kytkimen suojadiodit purkavat yli 0.6 V:n tai alle -0.6 V:n jännitteen maatasoon.

Anturi yhdistyy oskilloskooppiin tai vahvistimeen vasta kun kyseisen anturin SWA ja SWB terminaalien välillä oleva portti sulkeutuu. Molemmissa HV2708 kytkimissä on siis 16 erillistä porttia, joita ohjataan digitaalikanavilla. Kytkimissä on lisäksi 16:n bitin siirto-rekisteri, johon tallennetaan jokaisen portin seuraava konfiguraatio vaikuttamatta portin nykytilaan. Tallennettu seuraava konfiguraatio voidaan siirtää kaikille porteille samanaikaisesti.

Ohjauselektronikan tarvitsema käyttövirta saadaan verkkovirrasta. Aluksi verkkovirta muunnetaan kaupallisella muuntimella 12 V:n tasavirraksi. Seuraavaksi hakkurilla tuotetaan saadusta tasavirrasta 9 V:n ja -9 V:n jännitteet, joita säädetään vielä regulaattoreilla komponenttien vaatimaan jännitteeseen. Lisäksi hakkurilla tuotetaan 0 V:n maataso. Kuvassa 9 terminaalit V_{DD} on positiivinen, V_{SS} negatiivinen ja V_{LL} logiikka käyttöjännite. Molempiin HV2708 kytkimiin yhdistetään myös viisi ADP3450-mittalaitteen digitaalikanavaa, jotka ovat D_{OUT} , CLR, LE, CLK ja D_{IN} . Digitaalikanavien käyttöön perehdytään tarkemmin Kappaleessa 3.2.2.

3.1.2 Signaalin esikäsittely

Rakennetulla piirilevyllä hoidetaan myös signaalin esikäsittely. Jokaisella mittausryhmällä on oma esikäsittelykytkentä, joka on esitetty Kuvassa 10. Yksi esikäsittelykytkentä koostuu kahdesta *Analog Devices* AD8034 kaksoisvahvistimesta eli neljästä operaatiovahvistimesta [53], 11:ta vastuksesta ja viidestä kondensaattorista. Kytkennällä vahvistetaan mitattua signaalia ja vaimennetaan ei-haluttuja taajuuksia. Kuvassa 10 merkintä C vastaa kondensaattoria, R vastusta, U1A ja U1B ensimmäisen AD8034 kaksoisvahvistimen operaatiovahvistimia sekä U2A ja U2B toisen AD8034:n operaatiovahvistimia. Käytetyistä operaatiovahvistimista tehtiin kolme erilaista kytkentää siten, että operaatiovahvistin U1A on derivaattori, U2B jänniteseuraaja sekä U1B ja U2A Delyiannis-Friend suotimia.



Kuva 10: Yhden esikäsittelypiirin kytkentäkaavio, jossa C vastaa kondensaattoria, R vastusta ja U operaatiovahvistinta. Kuvassa on eritelty myös operaatiovahvistinkytkennät.

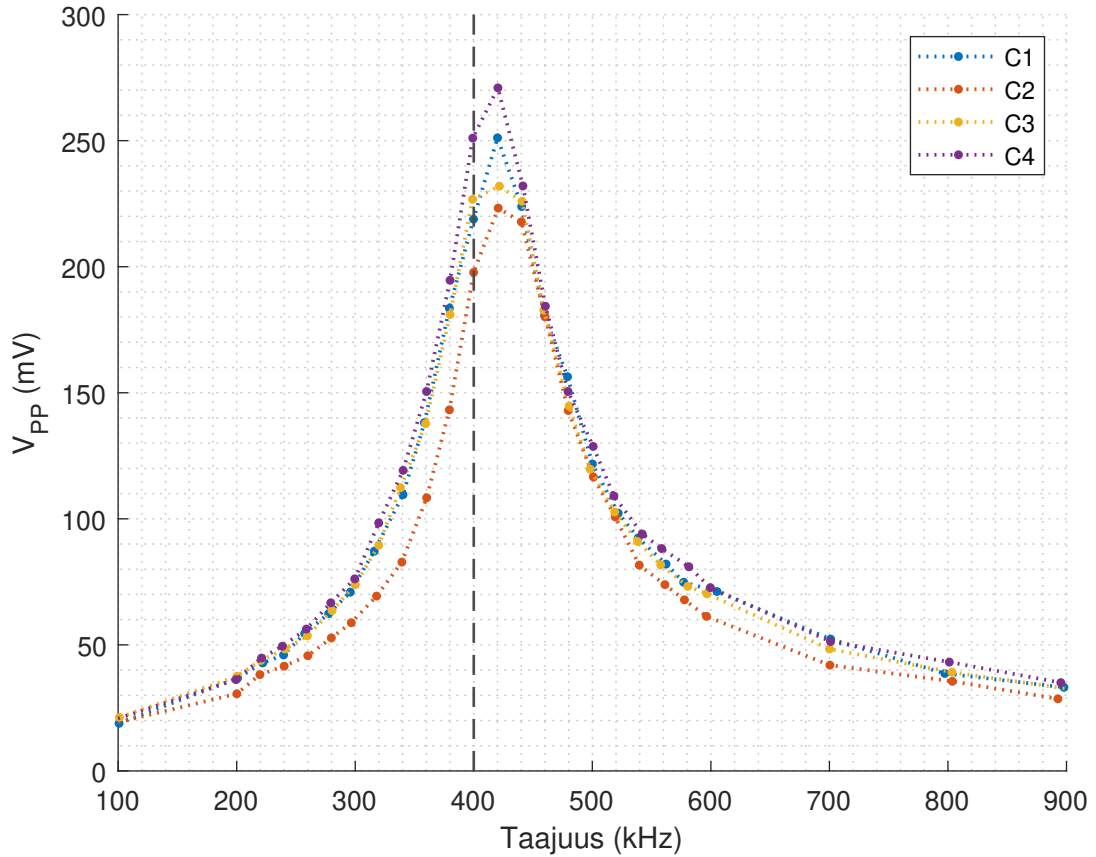
Derivaattori (*Differentiator*) on operaatiovahvistinkytkentätyyppi, jonka vahvistus on suoraan verrannollinen tulossignaalin jännitteen aikaderivaattaan [54]. Derivaattorin voi ajatella toimivan vastaavalla tavalla kuin ylipäästösuodin. Tässä kytkennässä derivaattoria käytetään suodattamaan signaalin matalia taajuuksia ja tasavirtapoikkeamaa.

Seuraavaksi esikäsittelykytkennässä tulee kaksi Delyiannis-Friend suodinta, joka on usean takaisinvedon kaistanpäästösuodin (*Multiple-feedback band-pass filter*). Delyiannis-Friend suotimen keskeiset parametrit ovat resonanssitaajuus ω_0 ja laatuero Q , jotka riippuvat käytettyjen vastusten ja kondensaattorien arvoista [54]. Suodin vahvistaa tulos-

ignaalin komponentteja, joiden taajuus on lähellä arvoa ω_0 ja vaimentaa muita signaalin komponentteja. Vahvistuksen suuruus riippuu kertoimesta Q . Kahdesta sarjaan kytketystä Delyiannis-Friend suotimesta rakentuu neljännen asteen Chebyshev kaistanpäästösuo-
din, jonka suunniteltu keskitaajuus on 400 kHz, päästökaista 100 kHz ja vahvistus 20 dB. Keskitaajuudeksi suunniteltiin 400 kHz, koska se vastaa käytettyjen ultraääniantureiden toimintataajuutta.

Esikäsittelykytkennän viimeinen rakenne ennen oskilloskooppia on jänniteseuraaja (*Voltage follower* tai *Unity gain buffer*). Jänniteseuraaja on kytkentä, jonka vahvistus on 1 eli tulosignaalin ja lähtösignaalin jännitteet ovat samat. Jänniteseuraajan hyödyllinen ominaisuus on suuri tuloimpedanssi yhdistettynä pieneen lähtöimpedanssiin. Tällöin ideaalitapauksessa lähtöpuolelle kytketyn kuorman virranotto on nolla, mutta jännite on sama kuin tulosignaalin. Jos kuorman virranotto olisi suuri, niin tulosignaalin voisi tapahtua ylimääräistä jännitehäviötä. Tässä työssä kuormana on oskilloskooppi lyhyillä kaapeleilla, joten jänniteseuraaja ei ole välttämättömyys, mutta se tekee piirilevystä soveltuvamman erityyppisiin projekteihin.

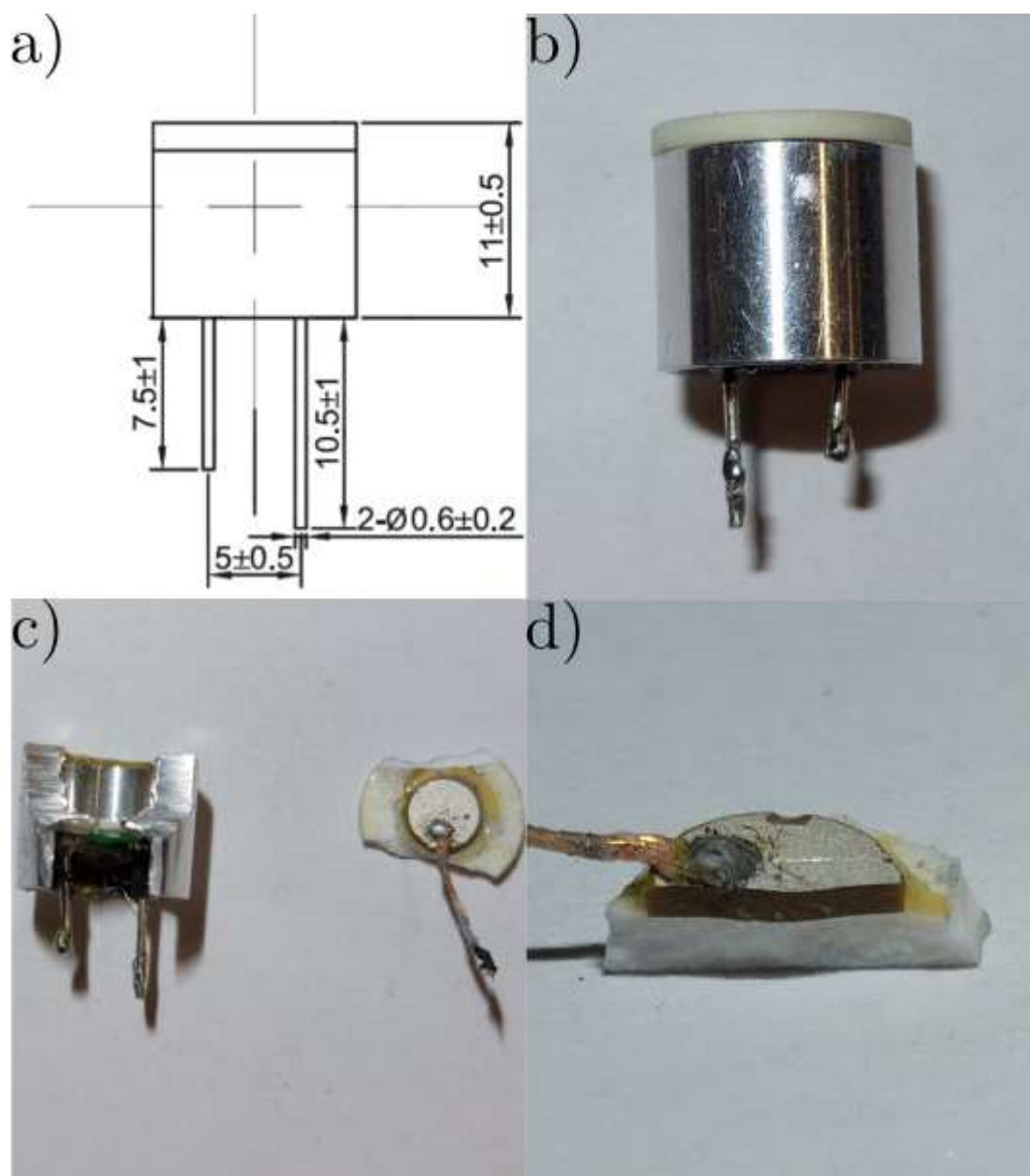
Rakennettua signaalin esikäsittelykytkentää testattiin funktiogeneraattorilla. Mittauksissa funktiogeneraattori kytkettiin suoraan jokaiseen esikäsittelypiiriin siten, että signaali ei kulkenut HV2708-kytkimien lävitse. Oskilloskoopilla mitattiin ulostulosignaalin taajuus ja huipusta-huippuun jännite V_{PP} (*Peak-to-peak voltage*). Funktiogeneraattorilla tuotetun sinisignaalin taajuutta vaihdeltiin pitäen V_{PP} :n arvon vakiona 50 mV. Oskilloskoopin mittaukset on esitetty Kuvassa 11. Kuvasta huomataan, että esikäsittelypiirien keskitaajuus ei vastaa täysin suunniteltua taajuutta ja lisäksi esikäsittelypiirien välillä on poikkeavuutta. Käytetyt vastukset ja kondensaattorit kuuluvat E24-sarjaan, joissa luvataan $\pm 5\%$:n toleranssi komponentin arvolle. Lisäksi jokin esikäsittelypiirin komponenteista voi olla herkkä virheelle, jolloin pieni resistanssin tai kapasitanssin poikkeama aiheuttaa suuren muutoksen kokonaisvahvistukseen. Tämä mahdollisesti selittää esikäsittelypiirin poikkeaman suunnitellusta. Toteutunut vahvistus 400 kHz taajuudella on noin 13 dB. Tässä työssä keskitytään ultraäänisignaalin lentoajan etsimiseen, joten kanavakohtainen poikkeama ei haittaa. Lentoajan etsinnässä siis määritetään vain ajanhetki, jolloin ensimmäinen ultraäänipulssi on havaittu mittaavalla anturilla. Täten esikäsittelypiirikoh-
tainen amplitudien vaihtelu ei vaikuta kyseiseen menetelmään. Jos laitetta halutaan soveltaa täysaaltoinversion tarpeisiin [55], niin tällöin kanavakohtainen kalibrointi on tarpeen, koska täysaaltoinversiossa hyödynnetään myös kulkeutuneen pulssin vaimentumista.



Kuva 11: Signaalin esikäsittelypiiriin taajuusvaste sinisignaaliin, jonka $V_{PP} = 50$ mV. Kuvassa C vastaa oskilloskoopin kanavaa ja musta katkoviiva suunniteltua piirin keskitäajuutta.

3.1.3 Ultraäänianturit

Laitteessa käytettiin 16:ta MCUSD11A400B11RS -ultraäänianturia [50], jotka soveltuvat sekä signaalin vastaanottamiseen että lähettämiseen. Antureiden keskitäajuus on $400 \text{ kHz} \pm 16 \text{ kHz}$ ja halkaisija $11 \text{ mm} \pm 0.5 \text{ mm}$. Lisäksi anturin suuntaavuus on $7^\circ \pm 2^\circ$ (-3dB), eli anturin herkkyys laskee puoleen noin 7 asteen jälkeen. Kuvassa 12 on esitetty anturin mitat ja rakenne yksityiskohtaisemmin. Kuvasta nähdään, että anturissa on alumiininen kotelo, valkoinen impedanssisovituskerros ja pietsokide. Pietsokide on liimattu impedanssisovituskerroksen. Kotelo on ontto, mikä aiheuttaa suuren impedanssieron pietsokiteen ja ilman välille. Tämän vuoksi suurin osa signaalista siirtyy impedanssisovituskerrokseen. Anturin pohjassa on kumimainen absorptiokerros, joka absorboi onttoon tilaan heijastuneet signaalit.



Kuva 12: a) Anturin dimensiot tarkemmin millimetreinä. b) Ehjä anturi. c) Impedanssisovituskerros ja pietsokide irrotettuna kotelosta. d) Pietsokide ja impedanssisovituskerros.

Ultraäänianturin keskitaajuuden sanotaan olevan ensimmäinen paksuuden läpi menevä resonanssitaajuus (*Through-thickness resonance frequency*) eli taajuus, jonka aallonpituus on kaksi kertaa pietsolevyn paksuus tai toisin sanoen

$$d = \frac{\lambda}{2}, \quad (11)$$

missä d on pietsokiteen paksuus ja λ aallonpituus [56]. Aalto-opin perusyhtälön mukaan

$$c = f\lambda, \quad (12)$$

missä c on äänennopeus väliaineessa ja f taajuus. Sijoittamalla λ yhtälöstä (11) yhtälöön (12) saadaan ensimmäinen resonanssitaajuus esitettyä muodossa

$$f = \frac{c}{2d}. \quad (13)$$

Jos pietsokide on kiinnitetty vastaavaan rakenteeseen kuin Kuvasta 12 nähdään, niin pietsokiteen efektiivinen paksuus kasvaa ja täten ensimmäinen resonanssitaajuus laskee [56]. Käytetyn anturin pietsokiteen paksuus on 0.8 mm ja impedanssisovituskerroksen 1.3 mm, joten efektiivinen paksuus on 2.1 mm. Tällöin resonanssitaajuudelle voidaan laskea arvio

$$f = \frac{4200 \text{ m/s}}{2 \cdot 2.1 \text{ mm}} = 1 \text{ MHz}, \quad (14)$$

mutta kuten valmistaja ja testit osoittavat resonanssitaajuus on 400 kHz. Huomioitavaa on, että valmistaja ei kerro pietsokiteen materiaalia eikä äänennopeutta kiteessä, joten lasketussa arviossa oletettiin materiaalin olevan yleisesti käytettyä lyijy zirkonaatti tita-naattia (PZT) äänennopeudella 4200 m/s.

Lasketun ja todellisen resonanssitaajuuden poikkeama osoittaa, että kyseessä on todennäköisesti radiaalivärähtelijä. Tämä tarkoittaa sitä, että kiekon muotoinen pietsokide värähtelee säteensä suuntaisesti, jolloin kiteeseen kiinnitetty impedanssisovituskerros värähtelee pysty akselin suuntaisesti ja näin syntyy 400 kHz signaali.

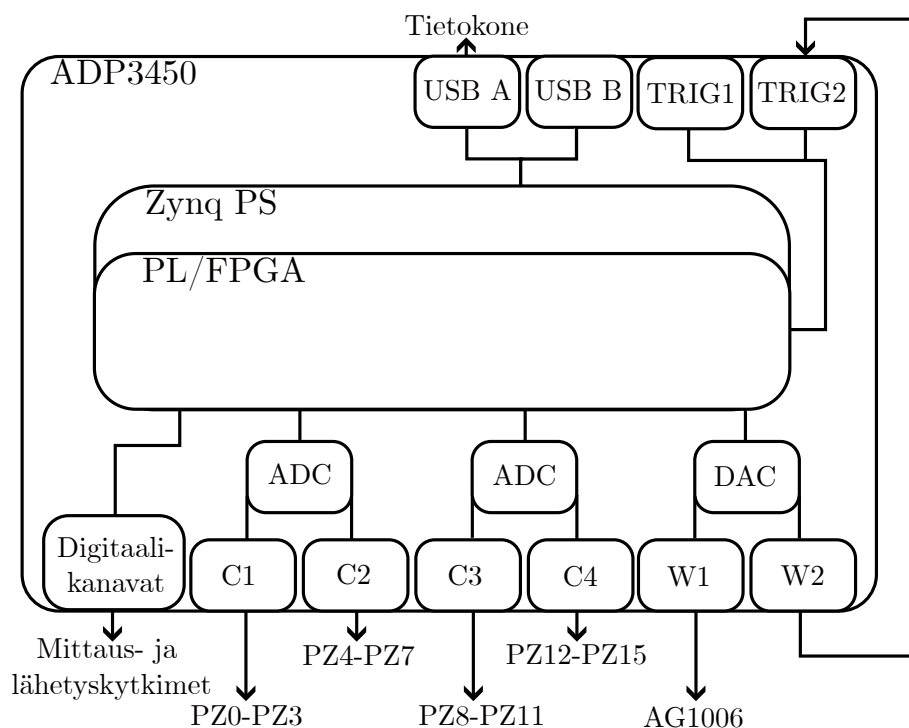
Artikkeleissa [1, 15] on käytetty ultraääniantureita, joiden keskitaajuus on 40 kHz. Myöhemmissä versiossa [44] vaihdettiin samoihin antureihin, joita tässäkin työssä käytetään. Kyseisten artikkeleiden ja tämän työn mittaussasetelmat ovat samankaltaiset, joten on perusteltua valita 400 kHz ultraäänianturit.

3.1.4 Kaupalliset instrumentit

Käytetyt kaupalliset instrumentit ovat ADP3450 sekasignaali oskilloskooppi ja AG1006 vahvistin. Sekasignaali oskilloskooppi koostu neljäkanavaisesta oskilloskoopista, kaksikanavaisesta funktiogeneraattorista ja 16:ta digitaalikanavasta. Rakennetussa laitteessa hyödynnetään kaikkia oskilloskoopin ja funktiogeneraattorin kanavia, mutta käytettävissä olevista digitaalikanavista tarvitaan vain kymmentä. Digitaalikanavia voidaan käyttää myös digitaalisignaalien mittaamiseen eli logiikka-analysointiin. AG1006 on vahvistin, jolla vahvistetaan sekasignaali oskilloskoopin funktiogeneraattorilla luotua syötepulssia.

Kyseiselle vahvistimelle luvataan 55 dB:n vahvistus, kun syötepulssia taajuus on 500 kHz.

Kuvassa 13 on esitetty sekasignaali-oskilloskoopin yksinkertaistettu rakenne, joka muodostuu Xilinxin kehittämän Zynq-tuoteperheen piirilevystä. Zynq on sulautetuissa järjestelmissä (*Embedded system*) käytetty järjestelmäpiiri (*System-on-chip*, SoC), joka yhdistää prosessointijärjestelmän (*Processing system*, PS) ja ohjelmoitavan logiikan (*Programmable logic*, PL). Sekasignaali-oskilloskoopin PS koostuu ARM-pohjaisesta prosessorista ja sen ohjaukseen tarvittavista porteista. Laitteen PL puolestaan koostuu ohjelmoitavasta porttimatriisista (*Field-programmable gate array*, FPGA), joka mahdollistaa laitteiston mukauttamisen eri tarkoituksiin. Mittaustietokoneella ohjataan laitteen prosessointijärjestelmää, joka puolestaan ohjaa FPGA:ta. Prosessointijärjestelmä mahdollistaa koko laitteiston ohjaamisen korkean tason ohjelmointikielillä, esimerkiksi Python ja C++. Sekasignaali-oskilloskoopin valmistaja Digilent tarjoaa ohjelmointirajapinnan korkean tason ohjelmointikielille. Ohjelmointirajapinnan funktioita kutsumalla Zynq piirilevyn prosessori suorittaa FPGA:n ohjelmoinnin. Suora FPGA:n ohjelmointi on monimutkaista ja hidasta, joten vastuun siirtäminen prosessorille helpottaa ohjelmiston kehittämistä. Tämä kuitenkin asettaa rajoitteita, sillä ohjelmiston kehitys täytyy toteuttaa vain ohjelmointirajapinnasta löytyvillä funktiolla. Sekasignaali-oskilloskoopin keskeiset parametrit on esitetty Taulukossa 3.



Kuva 13: Sekasignaali-oskilloskoopin rakenne.

Taulukko 3: Käytetyn sekasignaali-oskilloskoopin keskeiset parametrit instrumenttikoh-
taisesti. S on näytteiden lukumäärän yksikkö.

| | Oskilloskooppi | Funktiogeneraattori | Digitaalikanavat |
|------------------------------|----------------|---------------------|------------------|
| Kanavien lkm. | 4 | 2 | 16 |
| Resoluutio | 14-bit | 14-bit | 1-bit |
| Jännitealue | ± 25 V | ± 5 V | 0 V - 3.3 V |
| Suurin näytteistystaajuus | 125 MHz | 125 MHz | 125 MHz |
| Puskurin koko per kanava | 32 MS | 32 kS | 16 kS |

3.2 Toiminta

Seuraavissa kappaleissa selitetään tarkemmin rakennetun laitteen toiminta. Kerrotaan mi-
ten ADP3450-mittalaitteen eri instrumentteja hyödynnetään ja miten ne saadaan toimi-
maan synkronoidusti. Perehdytään kehitettyyn Python-ohjelmaan ja käytettyyn ohjel-
mointirajapintaan. Lopuksi esitetään digitaalikanavien toiminta ajoituskaavioilla. Ajoi-
tuskaaviot on mitattu logiikka-analysaattorilla, jota hyödynnettiin aktiivisesti kehitysvai-
heessa. Kaavioiden avulla selitetään tarkemmin milloin kukin ultraäänianturi on mittaus-
tai lähetystilassa.

3.2.1 Ohjelmisto

Rakennettua laitetta hallitaan Python-ohjelmalla. Ohjelma kehitettiin Python 3.10 -versiolla,
mutta toiminta testattiin myös versiolla 3.9, jota Matlab R2021b ja uudemmat versiot
tukevat. Pro-gradu työtä kirjoitettaessa vain Matlab R2022b sisältää tuen Python 3.10 -
versioon. Jos käyttäjä haluaa käyttää vain Matlab-ohjelmointiympäristöä, niin ohjelmis-
tojen versioiden pitää olla yhteensopivat. Mittauksen voi myös suorittaa ilman Matlab-
ympäristöä. Ohjelmassa esiintyvät funktiot ovat Digilent WaveForms SDK -ohjelmointira-
japinnasta (*Application programming interface*, API) [57] ja funktioiden nimet noudattavat
Kuvan 14 mukaista rakennetta. Luettavuuden parantamiseksi viitataan API-funktioihin
vain niiden tehtävän mukaan. Jos kontekstista ei selvästi tule ilmi ohjattava instrumentti,
niin tarkennetaan myös se.

Python-ohjelma on muotoiltu yhdeksi funktioksi, jota voidaan kutsua Matlab-ympäris-
töstä. Funktion ulostuloargumenttina on mitatut näytteet oskilloskoopin jokaiselta kana-
valta erillisinä vektoreina. Näytteet ovat jännitelukemia, jotka karakterisoivat ultraäänen
kulkeutumista mitattavassa väliaineessa. Näistä vektoreista voidaan etsiä (tai arvioida)
esimerkiksi ultraäänen lentoaika ja/tai vaimentuminen. Python-ohjelman lohkokaavio on

täten vain allokoida vakiopituiseen vektoriin. Huomioitavaa on, että datan määrä voi kasvaa huolimattomilla mittausparametreilla tarpeettoman suureksi. Esimerkiksi jos $f_s = 6$ MHz ja $f_t = 10$ Hz, niin näytteitä tallennetaan yhteensä 153.6 miljoonaa kappaletta eli saatavilla olevasta keskusmuistista 1.2 Gigatavua käytetään vain datan säilyttämiseen.

Ennen mittauksen aloittamista on myös funktiogeneraattori (**AnalogOut**) ja oskilloskooppi (**AnalogIn**) valmisteltava. Oskilloskoopissa on neljä kanavaa C1, C2, C3 ja C4, joille kaikille määritetään samat asetukset. Vastaavalla tavalla kuin digitaalikanavat, niin myös oskilloskoopin kanavat valitaan aktiivisiksi **EnableSet**-funktiolla. Tämän jälkeen näytteistystaajuus f_s määritetään **FrequencySet**-funktiolla ja mittausaika t_{acq} funktiolla **RecordLengthSet**. Funktiogeneraattorissa on kaksi kanavaa W1 ja W2. Kanavalla W1 toistetaan syötepulssia, jota vielä vahvistetaan AG1006 vahvistimella, ja kanavalla W2 luodaan liipaisusignaali. Myös funktiogeneraattorin kanavat asetetaan ensin aktiivisiksi **EnableSet**-funktiolla. Signaalien amplitudit määritetään **AmplitudeSet**-funktiolla siten, että kanavan W1 amplitudi on 0.1 V ja kanavan W2 3 V. Amplitudit ovat kovakoodattuja, koska niitä muuttamalla voi helposti rikkoa piirilevyn ja/tai ultraäänianturit. Kanavan W1 amplitudi tulee kuitenkin tarkistaa, jos käytetty vahvistin vaihtuu. Funktiolla **FrequencySet** määritetään signaalien taajuudet. Käyttäjä pystyy määrittämään W2 kanavan taajuuden eli liipaisusignaalin taajuuden f_t , mutta syötepulssin taajuus on asetettu vakioksi 400 kHz. Tämä johtuu käytettyjen ultraääniantureiden ominaisuuksista.

Ennen mittaussilmukan aloittamista HV2708-kytkimet pitää alustaa eli asettaa mittauksen alkutilanne ja mittauksen aikana toistettava data. Tärkeimmät API-funktiot digitaalikanavien (**DigitalOut**) käyttämiseen, eli HV2708-kytkinten ohjaamiseen, ovat **EnableSet**, **TypeSet**, **DataSet** ja **DividerSet**. Jokainen käytettävä digitaalikanava asetetaan aktiiviseksi **EnableSet**-funktiolla ja kanavan toimintatyyli määritetään **TypeSet**-funktiolla. Digitaalikanavilla syötetty data on epäsymmetristä kanttiaaltoa, joten kanavien toimintatyyliksi valitaan mukautettu. Epäsymmetrinen kanttiaalto määritetään **DataSet**-funktiolla bitteinä. Käytetyt kanttiaallot esitetään Kappaleessa 3.2.2. Funktiolla **DividerSet** määritellään bittijonon toistonopeus, johon tarvitaan muuttujia f_{CLK1} ja f_{CLK2} . Kun digitaalikanavat on valmisteltu esitetyillä funktiolla, niin datan syöttö kytkimille aktivoidaan **Configure**-funktiolla. Täten kytkimille on asetettu mittauksen alkutilanne, eli ultraäänianturi PZ0 on lähetys- sekä mittaustilassa ja anturit PZ4, PZ8 ja PZ12 ovat vain mittaustilassa. Mittauksen aikana toistettava data alustetaan vastaavalla tavalla.

Erilliset instrumentit on täten alustettu halutuilla parametreilla, mutta eivät vielä toimi synkronoidusti. Kaikkien instrumenttien liipaisu (tahdistus, "triggaus") halutaan tapahtuvan samasta W2 kanavan signaalista, joten W2 on kytketty TRIG1 kanavaan (Kuva 13). Kanavasta TRIG1 liipaisu asetetaan jokaiselle instrumentille erikseen funktiolla **Trig-**

gerSourceSet. Tämän mahdollistaa ADP3450-mittalaitteen liipaisuväylä (*Trigger signals bus*), joka on yhteydessä kanavaan TRIG1 ja kaikkiin laitteen instrumentteihin. Näin erilliset instrumentit saadaan toimimaan synkronoidusti ja mittaussilmukka aloitettua vain käynnistämällä kanavan W2 signaalin toisto.

Uudelleen ohjelmointi

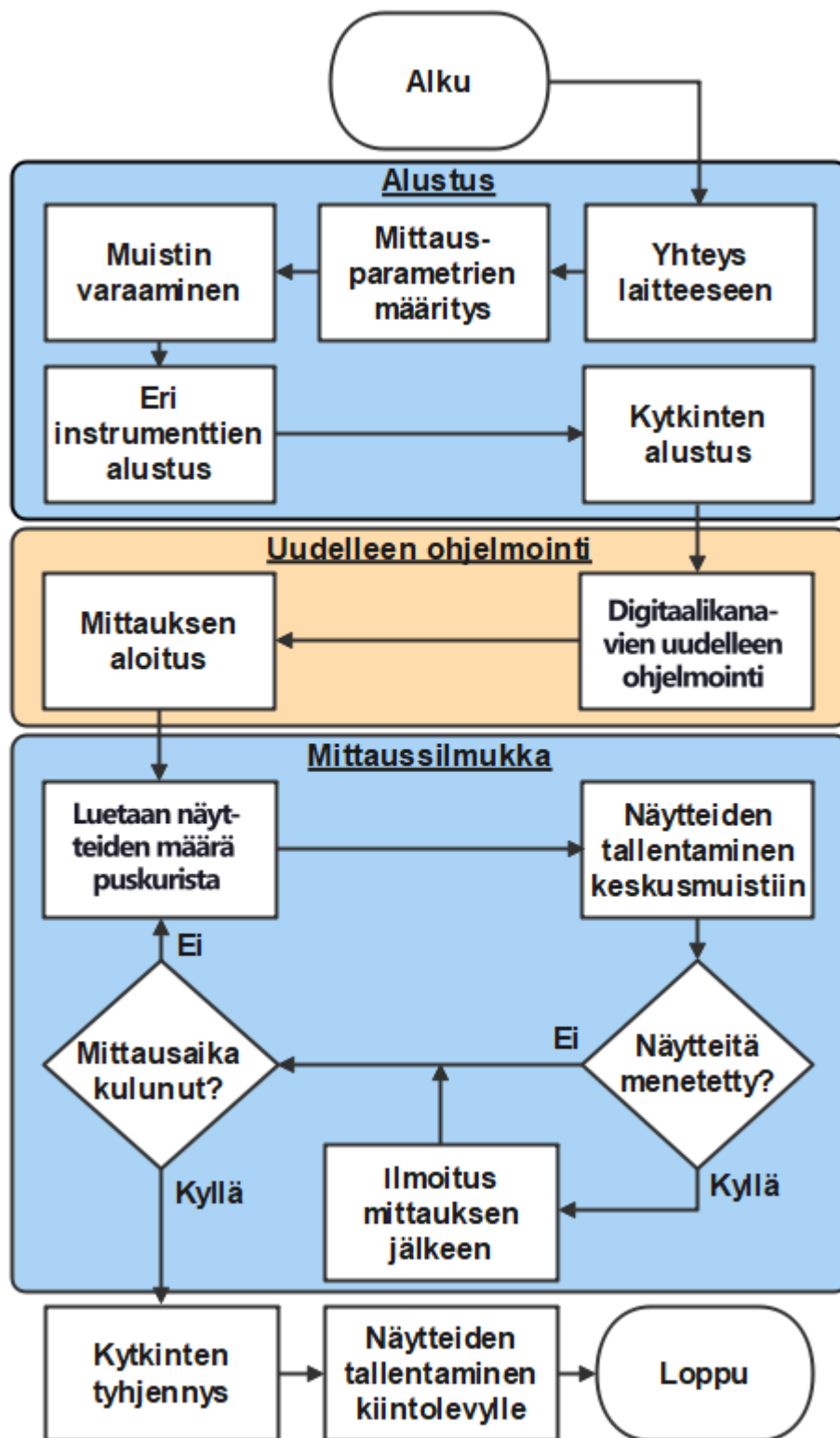
Alustusvaiheessa digitaalikanavoilla asetettiin HV2708-kytkimille mittauksenaloitus konfiguraatio. Uudelleen ohjelmointi -vaiheessa digitaalikanaville määritetään mittaussilmukan aikana toistettava data. Tämä tapahtuu vastaavalla tavalla kuin alustusvaiheessa. Nyt mittalaite on valmis mittaussilmukan aloittamiseen.

Mittaussilmukka

Mittaussilmukka koostuu kolmesta oskilloskoopin funktiosta: **Status**, **StatusRecord** ja **StatusData2**. Mittauksen tilanne eli onko mittausaika umpeutunut tarkastetaan funktiolla **Status**. Funktiolla **StatusRecord** luetaan ADP3450-mittalaitteen puskurissa olevien näytteiden lukumäärä ja tarkastetaan onko näytteitä menetetty. Dataa menetetään, jos mittalaitteen puskuri ehtii täyttyä mittaussilmukan aikana. Tällöin uusi näyte tallennetaan puskuriin vanhan, ei vielä tietokoneella luetun näytteen paikalle. Mittausta ei pysäytetä vaikka dataa menetettäisiin, mutta siitä ilmoitetaan mittauksen päätyttyä. Datan lukeminen ADP3450-mittalaitteen puskurista ja tallentaminen tietokoneen keskusmuistiin tapahtuu funktiolla **StatusData2**. Funktiota kutsutaan neljästi, jotta mittausdata saadaan kaikilta oskilloskoopin kanavilta. Esitetyt kolme funktiota toistuvat mittaussilmukassa iteratiivisesti kunnes mittausaika t_{acq} on kulunut.

Mittaussilmukan toiminnassa keskeistä on ADP3450-mittalaitteen ja tietokoneen riippumattomuus. Mittauksen aikana tietokoneen tehtävä on tyhjentää mittalaitteen puskuria samanaikaisesti kun oskilloskooppi sitä täyttää. Puskuria tyhjennetään vain silloin kun **StatusData2**-funktiota kutsutaan. Lisäksi puskurista luettavien näytteiden lukumäärä ei ole vakio, vaan riippuu mittaussilmukan nopeudesta ja näytteistystaajuudesta. Tietokoneen lukunopeuden maksimoimiseksi mittaussilmukka pidetään mahdollisimman yksinkertaisena.

Mittaussilmukan päätyttyä HV2708-kytkimet tyhjennetään ja erilliset instrumentit palautetaan alkutilaan **Reset**-funktiolla. Kytkinten tyhjentäminen mahdollistaa useamman peräkkäisen mittauksen tekemisen ilman virran katkaisua. Lopuksi mitatut näytteet tallennetaan kiintolevylle Matlabin *.mat binääriformaattissa float64 muodossa.



Kuva 15: Python-ohjelman lohkokaavio. Karkealla tasolla kuvaten, ohjelma koostuu alustusvaiheesta, uudelleen ohjelmoinnista ja mittaussilmukasta. Alustusvaiheessa valmistellaan kaikki ohjattavat instrumentit mittausta varten, jotta mittaussilmukassa voidaan keskittyä näytteiden keskusmuistiin tallentamiseen. Mittauksen jälkeen HV2708-kytkimet tyhjennetään ja näytteet tallennetaan *.mat formaatissa kiintolevylle.

3.2.2 Ohjelmoitava logiikka

Tässä kappaleessa perehdytään tarkemmin digitaalikanavien toimintaan ajoituskaavioiden avulla, jotka on mitattu *Tektronix* TLA5201 logiikka-analysaattorilla [58]. Analysaattori kytkettiin ADP3450-mittalaitteen digitaalikanaviin ja molempiin funktiogeneraattorin kanaviin (W1 ja W2). Huomioitavaa on, että W1 kanavan eli syötepulssin toistokanan amplitudia kasvatettiin ajoituskaaviomittauksien ajaksi. Logiikka-analysaattorin näytteistystaajuudeksi asetettiin 2 MHz, jotta saatiin tarkasti näytteistettyä myös W1 kanavan 400 kHz:n syötepulssi. Ajoituskaaviomittauksien ajaksi Python-ohjelmasta määritettiin mittausparametreiksi $f_s = 5$ MHz ja $f_t = 1$ kHz.

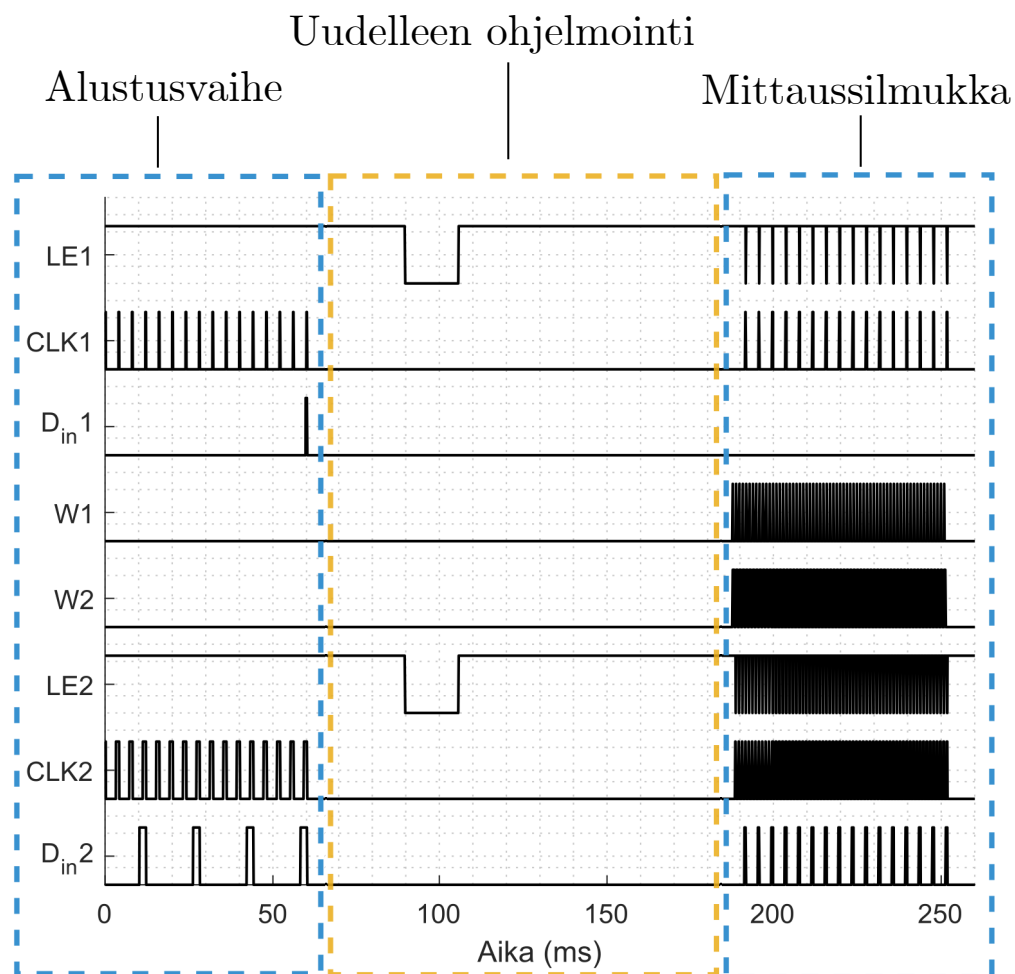
Logiikkaohjelmointi on laitteen toiminnan kannalta ratkaisevaa. Ohjauksella valitaan milloin ultraäänianturi on yhteydessä oskilloskooppiin ja milloin funktiogeneraattoriin. Tämä toteutetaan kahdella HV2708-kytkimellä (mittaus- ja lähetyskytkin) ja kymmenellä ADP3450-mittalaitteen digitaalikanavalla. Digitaalikanavien numerointi, nimet ja tehtävät on esitetty Taulukossa 4.

Taulukko 4: Käytettyjen digitaalikanavien nimet ja tehtävät.

| Pinnin numero | Kanavan nimi | Kanavan tehtävä |
|---------------|--------------------|--|
| 0 | D _{out} 1 | Lähetyskytkimen siirtorekisterin viimeisin bitin arvon |
| 1 | CLR1 | Lähetyskytkimen terminaalien nollaus |
| 2 | LE1 | Lähetyskytkimen siirtorekisterin datan siirto terminaaleihin |
| 3 | CLK1 | Lähetyskytkimen kellosignaali |
| 4 | D _{in} 1 | Datan syöttö lähetyskytkimen siirtorekisteriin |
| 5 | D _{in} 2 | Datan syöttö mittauskytkimen siirtorekisteriin |
| 6 | CLK2 | Mittauskytkimen kellosignaali |
| 7 | LE2 | Mittauskytkimen siirtorekisterin datan siirto terminaaleihin |
| 8 | CLR2 | Mittauskytkimen terminaalien nollaus |
| 9 | D _{out} 2 | Mittauskytkimen siirtorekisterin viimeisin bitin arvon |

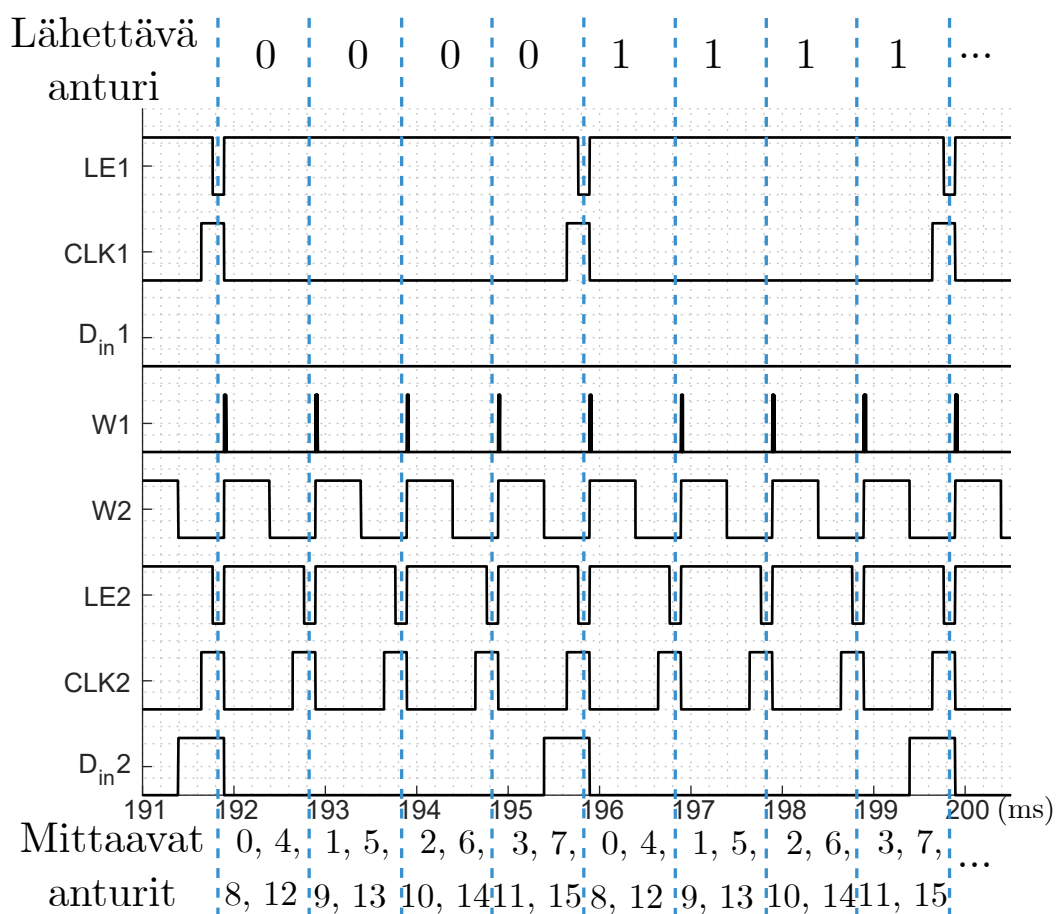
Kuvassa 16 on esitetty yhden koko ultraäänitomografiomittauksen ajoituskaavio, josta nähdään mittauksen eri vaiheet. Alustusvaiheessa molempien kytkimien siirtorekisteriin siirretään 16 bittiä dataa, jotka määritellään kanavilla D_{in}1 ja D_{in}2. Datan kanavan määrittämä bitti siirtyy siirtorekisteriin kellosignaalin nousevalla reunalla (*Low-to-high transition*). Jotta siirtorekisterit saadaan täytettyä kokonaan, tarvitaan siis 16 kellosignaalin

nousevaa reunaa. Siirtorekisterin data siirtyy kaikkiin kytkimen terminaaleihin samanaikaisesti LE1 ja LE2 signaalien laskevalla reunalla (*High-to-low transition*). Kun LE1 ja LE2 kanavat siirtyvät takaisin ylös, terminaalit pitävät määrätyn tilansa ja uusia bittejä voidaan tuoda siirtorekisteriin. Huomioitavaa on, että siirtorekisteriin syötetty ensimmäinen bitti vastaa HV2708-kytkimen viimeisen terminaalin (SW15, kts. Kuva 9) konfiguraatiota ja viimeinen bitti ensimmäisen terminaalin (SW0, kts. Kuva 9) konfiguraatiota. Tämä tarkoittaa, että bitit on syötettävä siirtorekisteriin käänteisessä järjestyksessä. Terminaalin SW15 konfiguraatio voitaisiin lukea D_{out} kanavasta. Rakennetussa laitteessa ei tarvita D_{out1} ja D_{out2} kanavia, mutta niiden ominaisuudet ovat tarpeellisia jos ultraääniantureiden lukumäärää lisätään. Tällöin dataa voitaisiin syöttää ensimmäisen HV2708-kytkimen siirtorekisteriin ja yhdistää kyseisen kytkimen D_{out} terminaali uuden kytkimen D_{in} terminaaliin. Kytkimien D_{out} ja D_{in} kanavat olisivat siis sarjaan kytkettyinä.



Kuva 16: Yhden kokonaisen ultraäänitomografiomittauksen ajoituskaavio, jossa vaakakselilla aika millisekunteina ja pystyakselilla kyseisen kanavan tila. Kuvaajaan on myös hahmoteltu mittauksen eri vaiheet.

Kuvan 16 ajoituskaaviosta nähdään, että alustuksen jälkeen lähetyskytkimen ensimmäinen terminaalit SW_L0 on kiinni ja loput auki, täten vain ensimmäinen ultraäänianturi on yhteydessä vahvistimeen. Vastaavasti mittauskytkimen terminaalit SW_M0, SW_M4, SW_M8 ja SW_M12 (kts. Kuva 16) ovat kiinni ja loput auki. Alustuksen jälkeen digitaalikanavat valmistellaan mittaussilmukkaa varten. Kyseisen vaiheen pituus vaihtelee, koska se riippuu käytetyn tietokoneen nopeudesta suorittaa digitaalikanavien uudelleen ohjelmointi. Tämä todennettiin tekemällä useampi ajoituskaaviomittaus samoilla parametreilla. Toistomittauksilla tarkistettiin myös ettei syötetyissä signaaleissa tapahdu virheitä.



Kuva 17: Osa mittaussilmukan ajoituskaaviosta, jossa vaaka-akselilla aika millisekunteina ja pystyakselilla kyseisen kanavan tila.

Mittaussilmukassa siirtorekisteriin syötetään yksi bitti kerrallaan siten, että jokaisen bitin jälkeen siirtynyt bittijono asetetaan myös terminaleihin. Tämä on mahdollista, koska siirtorekisteri on alustettu jo kerrotulla tavalla, josta on helppo jatkaa iteratiivisesti mittaussilmukan loppuun asti. Tarkastelemalla Kuvasta 16 kanavaa D_{in}1 huomataan, että koko mittauksen aikana lähetyskytkimelle siirretään vain kerran bitti arvolla 1. Tätä bittia

siirretään siirtorekisterissä viisitoista kertaa siten, että jokainen ultraäänianturi on ollut kerran lähetystilassa. Lähetystilassa anturi lähettää ultraäänipulssin neljä kertaa, jonka aikana neljää samanaikaisesti mittaavaa ultraäänianturia vaihdetaan kolmesti. Samanaikaisesti mittaavia ultraääniantureita on neljä, koska oskilloskoopissa on neljä mittauskanavaa. Mittaavia antureita vaihdetaan kolmesti, jotta saadaan mitattua vaste jokaiselta kuudeltatoista ultraäänianturilta. Huomioitavaa on että, anturi voi olla samanaikaisesti sekä mittaus-, että lähetystilassa. Kuvattu mittaussilmukan aikainen vuorottelu on esitetty Kuvan 17 ajoituskaaviossa, jossa W1 vastaa lähetettyä ultraäänipulssia. Lisäksi jokaisen anturin konfiguraatio koko mittauksen aikana on tarkennettu Liitteessä A.

Kuvan 17 ajoituskaaviosta nähdään myös, että peräkkäisten ultraäänipulssien etäisyys vastaa liipaisusignaalin jaksonajan pituutta $1/f_t$. Liipaisusignaalin jaksonajan pituus tulee olla siis vähintään mittaasetelmasta riippuvan ultraäänien lentoajanpituus. Koko mittaussilmukan aikana lähetetään yhteensä 64 ultraäänipulssia (16 anturia * 4 pulssia per anturi), joten yksi mittaussilmukka kestää $64/f_t$ sekuntia. Käytetyillä parametreilla 64 millisekuntia.

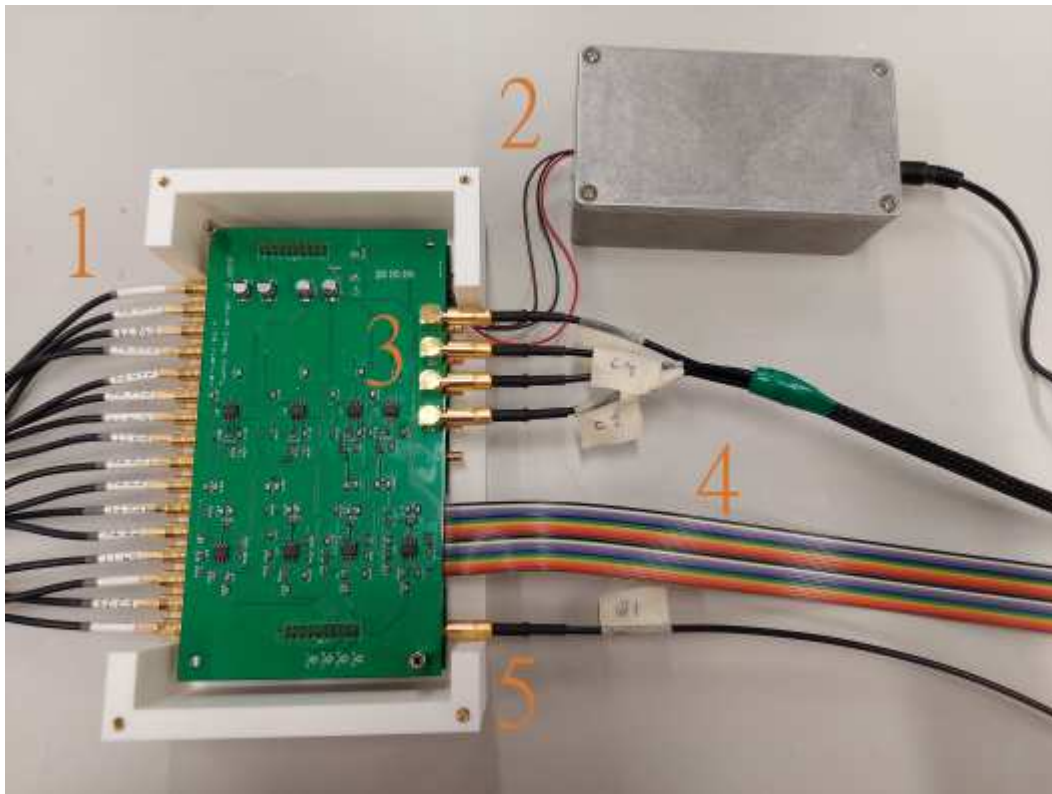
3.3 Käyttöönotto

Tässä kappaleessa esitetään ADP3450:n, AG1006:n ja ohjauselektroniikan yhdistämiseen vaaditut kytkennät. Ennen kytkentöjen tekemistä on kuitenkin suositeltavaa ymmärtää perusteet laitteen toiminnasta. Kuvassa 18 on esitetty ADP3450:n ja AG1006:n kytkennät edestä ja takaa. Kyseisessä kuvassa kohta 1 vastaa digitaalikanavia, joiden nimet ja tehtävät on esitetty Taulukossa 4. Digitaalikanavat kytketään ohjauselektroniikkaan lattakaapelilla. Kohdassa 2 on oskilloskoopin kanavat, jotka yhdistetään ohjauselektroniikkaan koaksiaalikaapeleilla. Kohta 3 vastaa funktiogeneraattorin kanavia, joista W1 kytketään vahvistimen sisäänmenoon (kts. kohta 4) ja W2 ADP3450:n TRIG1 kanavaan (kts. kohta 5). Funktiogeneraattorin kanavien nimet lukevat koaksiaalikaapeleissa ja sekasignaali-oskilloskoopissa. Kohdan 6 USB-johto yhdistetään mittaustietokoneeseen, jolla ohjataan sekasignaali-oskilloskooppia ja siirretään mitattuja näytteitä. Teknillisen fysiikan laitoksen elektroniikkaverstaalla on rakennetulle laitteelle tarkoitettu mittaustietokone, johon on asennettu Kappaleessa 3.2.1 esitetty ohjelmisto ja lentoajan etsintään tarvittavat koodit. Kohdat 7 ja 9 vastaavat ADP3450:n ja AG1006:n käyttövirtoja, jotka saadaan verkkovirrasta. Kohdassa 8 on AG1006:n ulostulo, joka yhdistetään ohjauselektroniikkaan koaksiaalikaapelilla. Huomioitavaa on, että tämä on korkeajännitteistä signaalia.



Kuva 18: a) ADP3450:n ja AG1006:n kytkennät edestä, jossa 1 digitaalikanavat, 2 oskilloskoopin kanavat ja 3 funktiogeneraattorin kanavat. b) ADP3450:n ja AG1006:n kytkennät takaa, jossa 4 funktiogeneraattorin W1 kanavan syötepulssi, 5 funktiogeneraattorin W2 kanava lipausignaali, 6 USB-johto mittaustietokoneelle, 7 ADP3450:n käyttövirta, 8 vahvistetun syötepulssin ulostulo ja 9 vahvistimen käyttövirta.

Kuvassa 19 on esitetty ohjauselektronikan yhdistämiseen vaaditut kytkennät, jossa kohdassa 1 on ultraääniantureiden koaksiaaliakaapelit. Kun ohjauselektronikka on kuvan mukaisessa orientaatioissa, niin ultraäänianturit tulee kytkeä siten, että anturin numero kasvaa alhaalta ylös. Ultraäänianturin numero lukee anturin telineessä sekä koaksiaali-kaapelin liitännässä. Kytkentäjärjestys on tärkeä, jotta lentoajan etsinnässä osataan yhdistää mittausta oikeaan ultraäänianturipariin. Kohdassa 2 on ohjauselektronikan käyttövirta. Kohdassa 3 on esitetty oskilloskoopin kanavien kytkentä, joka on myös järjestysriippuvainen. Kyseisessä orientaatioissa oikea järjestys alhaalta ylös on C2, C3, C4 ja C1. Huomioitavaa on, että ohjauselektronikka koostuu kahdesta päällekkäisestä piirilevyystä. Alemmassa piirilevyssä on HV2708 kytkimet ja ylemmässä piirilevyssä signaalin esikäsittelykytkennät, mutta molemmissa kerroksissa on liittimet oskilloskoopin kanaville. Ylemmistä liittimistä saadaan vahvistettu ja suodatettu signaali, joten näiden käyttäminen on suositeltavaa. Kohdassa 4 on digitaalikanavien lattakaapeli ja kohdassa 5 vahvistetun syötepulssin kytkentä.



Kuva 19: Ohjauselektroniikan kytkennät, jossa 1 ultraääniantureiden johdot, 2 piirilevyn käyttövirta, 3 oskilloskoopin johdot, 4 digitaalikanavien johdot ja 5 vahvistimelta tuleva vahvistettu syötepulssi.

Kuvassa 20 on esitetty AG1006:n asetukset, jossa PAe (*Power added efficiency*) tarkoittaa vahvistuksen rajoitusta. Rajoitukseksi asetetaan 2 W. Lisäksi vahvistimesta tulee valita ulkoinen lähde *Source: EXT*.



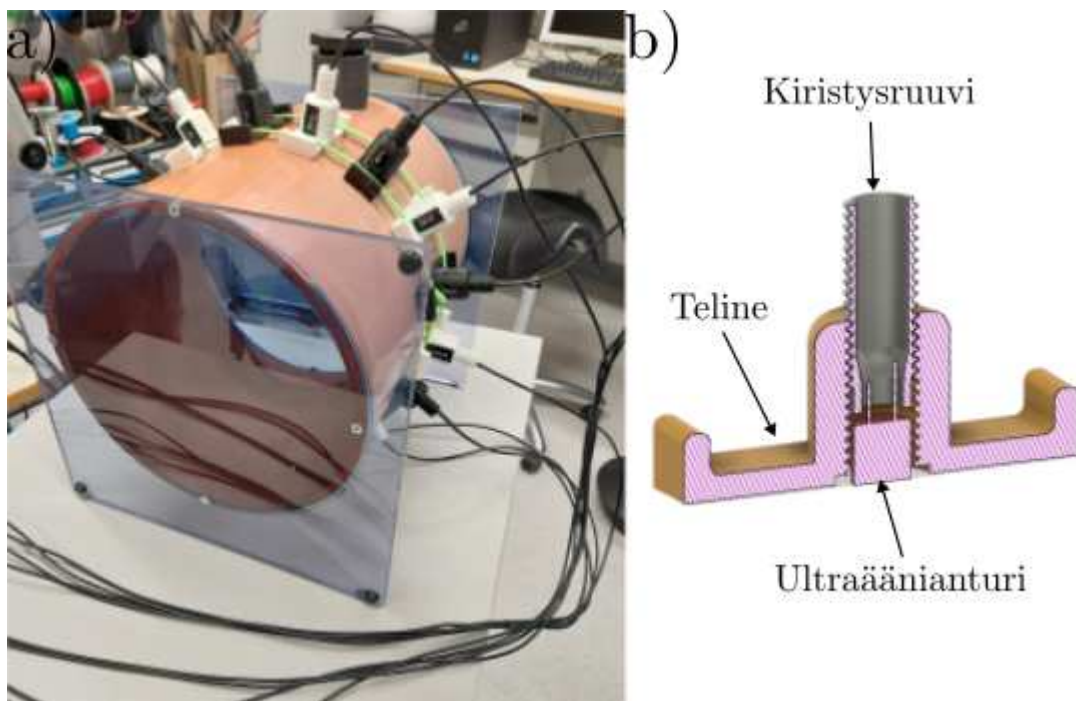
Kuva 20: Vahvistimen asetukset.

4 Testimittaukset

Mittalaitteistolla tehtiin erinäisiä testejä koko kehitysprosessin aikana. Kappaleessa 3.2.2 on esitetty digitaalikanavien toimintaan liittyviä testejä ja Kappaleessa 3.1.2 esikäsittelypiirien taajuusvastetestejä. Mittausgeometriaa tutkittiin ensin vain yhdellä lähettävällä ja yhdellä vastaanottavalla anturilla, jotta monimutkaisesta mittauksesta huomattaisiin virheet helpommin. Mittausasetelma ja sen keskeiset parametrit esitetään Kappaleessa 4.1. Kokonaisten ultraäänitomografiamittausten tuloksia esitetään Kappaleissa 4.2 ja 4.3.

4.1 Mittaustulosten esikäsittely ja mittausasetelma

Mittausgeometria on akryyliputki, jonka ulkohalkaisija on 25 cm, seinämän paksuus 9 mm ja pituus 30 cm. Putken päät on suljettu läpinäkyvillä akryylilevyillä. Toisessa akryylilevyssä on vesitiivis luukku, josta voidaan laittaa kuvattavia kohteita putken sisälle. Putken yläpuolella on lisäksi reikä, josta voidaan täyttää putki esimerkiksi vedellä tai öljyllä. Täyttöreikälle 3D-tulostettiin vesitiivis korkki. Mittausgeometria on esitetty Kuvassa 21 a), jossa systeemiin on kiinnitetty myös ultraäänianturit.

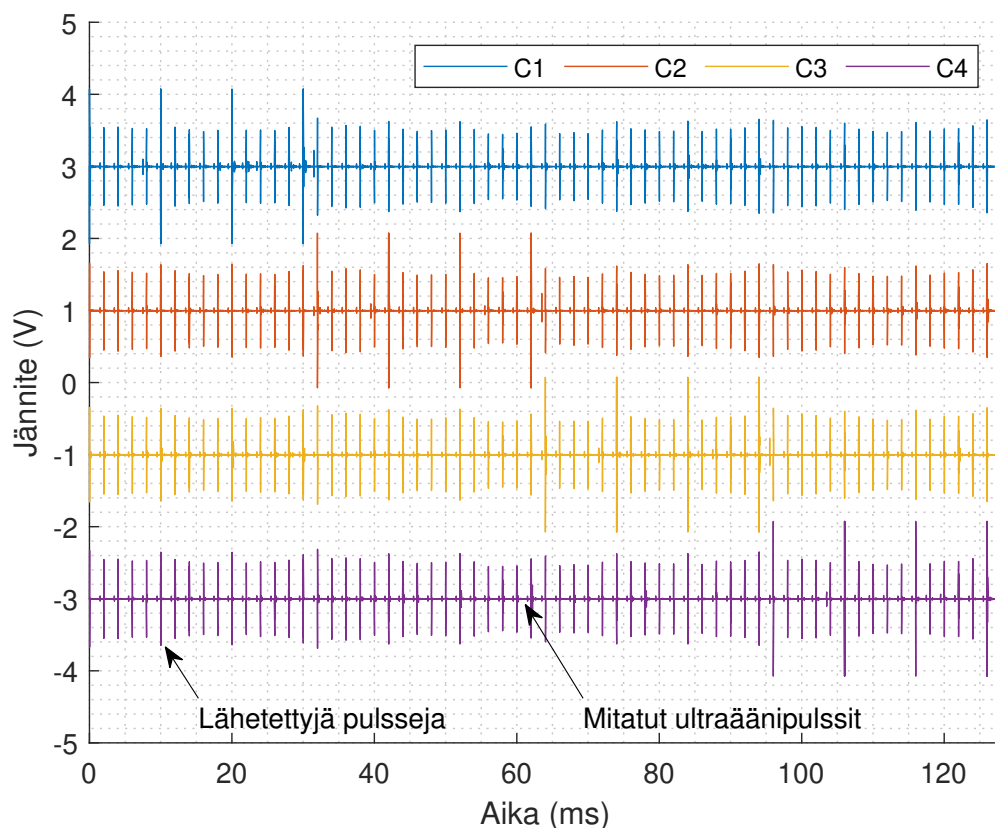


Kuva 21: a) Mittausgeometria ja systeemiin kiinnitetyt ultraäänianturit. b) Ultraäänianturien kiinnitykseen 3D-tulostettu teline.

Ultraäänianturit on kiinnitetty mittausgeometriaan 3D-tulostetuilla telineillä. Telineen 3D-malli on esitetty Kuvassa 21 b) ja mallin mitat löytyvät liitteestä B. Telineet kiinnite-

tään putken pintaan kiristysremmillä tai kumilenkillä. Lisäksi telineen pohja on hieman kaareva, jotta se asettuu paremmin akryyliputken pintaan. Ultraäänianturien kontakti säädetään telineen kiristysruuvilla. Kiristysruuvi mahdollistaa hyvän kontaktin, vaikka ultraääniantureille olisi porattu syvennykset. Kontaktin parantamiseen käytetään myös ultraäänigeeliä. Geeliä laitetaan anturin ja putken pinnan väliin, jotta pintojen väliin ei jäisi ilmaa.

Kun mittausasetelma on rakennettu, niin voidaan suorittaa ultraäänitomografiamittaus. Mittauksen voi käynnistää aloittamalla Kappaleessa 3.2.1 esitetty ohjelmisto Matlab ympäristöstä tai tietokoneen komentoriviltä. Aloittaessa käyttäjä määrittää näytteistystaajuuden f_s ja liipaisusignaalin taajuuden f_t . Seuraavat mittaukset tehtiin asettamalla $f_s = 5 \text{ MHz}$ ja $f_t = 500 \text{ Hz}$. Kuvassa 22 on esitetty yhden kokonaisen ultraäänitomografiamittauksen mittausdata eli kaikki mittaussilmukan aikana kerätty näytteet.

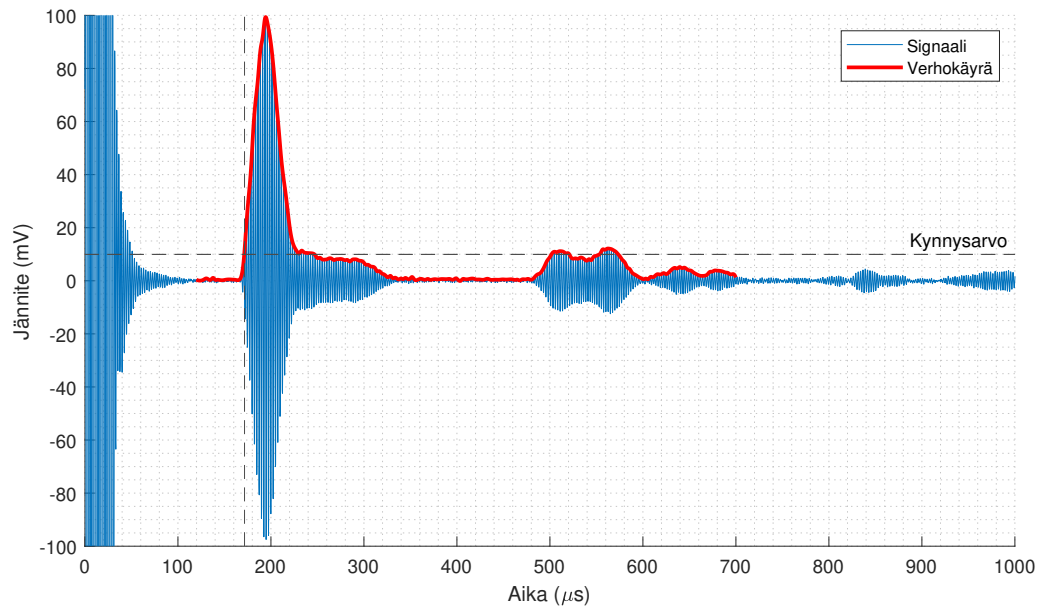


Kuva 22: Ultraäänitomografiamittauksen mittausdata, jossa C1, C2, C3 ja C4 ovat oskilloskoopin kanavat. Visualisointia varten signaalien nollatasoja on siirretty.

Mitatut ultraäänipulssit sijaitsevat Kuvassa 22 näkyvien piikkien välissä. Piikit vastaavat ultraäänianturille lähetettyä syötepulssia, mutta koska syötepulssin jännite on suuri

se kulkeutuu elektroniikan kautta osittain myös oskilloskoopille. Jos jokaiselta kanavalta ei löydy näitä yhteensä 64:ää, niin ohjauselektronikassa on todennäköisesti tapahtunut logiikkahäiriö. Lisäksi jokaiselta kanavalta voidaan erottaa myös neljä suurinta piikkiä, jotka vastaavat tilannetta kun anturi on samanaikaisesti mittaus- sekä lähetystilassa.

Syötepulssin lähetys hetki etsitään verhokäyrä-menetelmällä, jota hyödynnetään myös lentoajan etsinnässä, jossa aluksi mitatusta signaalista luodaan Hilbertin muunnoksella verhokäyrä $v(t)$. Tämän jälkeen määritetään kynnsarvo th siten, että $th = 0.1 \max(v(t))$ eli 10 % verhokäyrän huippuarvosta. Kun verhokäyrä ylittää kynnsarvon, niin seuraava näytteistetty ajanhetki määritetään olemaan TOF. Kuvassa 23 on esimerkki menetelmän toiminnasta.



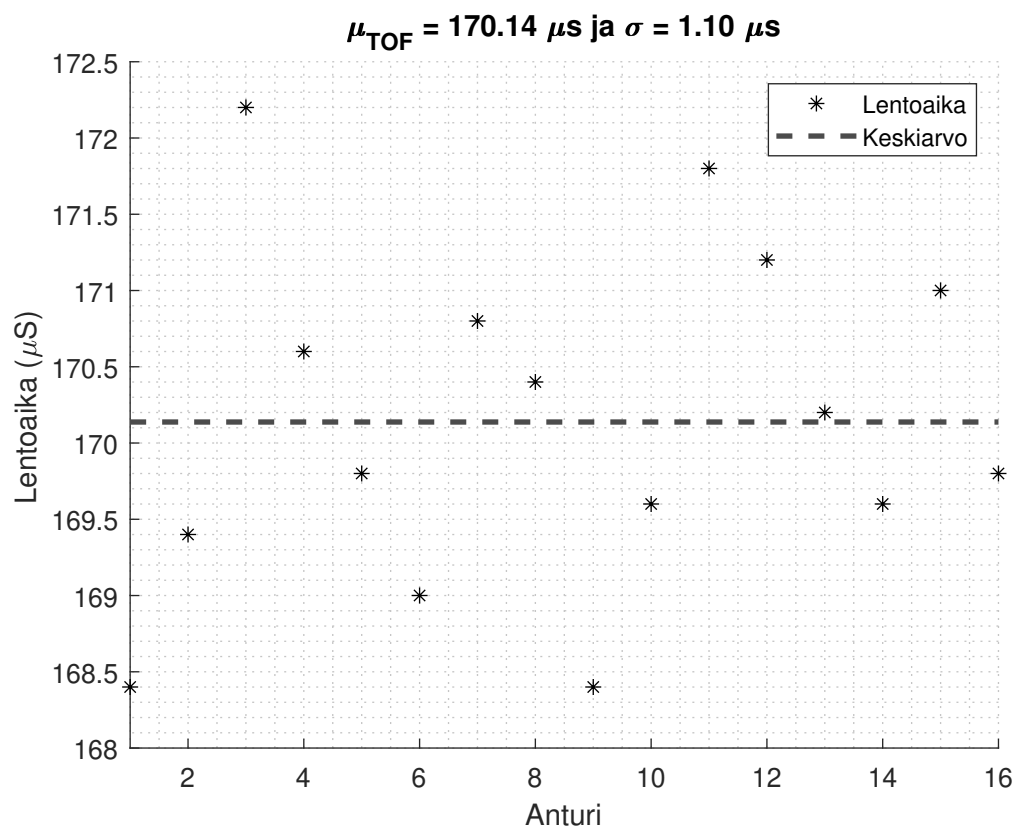
Kuva 23: Lentoajan etsintä hyödyntämällä verhokäyrä-menetelmää. Pystykatkoviiva osoittaa ajanhetken TOF, jolloin verhokäyrä ylittää kynnsarvon.

Kun lentoajan etsintä on suoritettu jokaiselle lähetetylle pulssille, niin saadaan lentoaikamatriisi $\text{TOF}_m \in \mathbb{R}^{16 \times 16}$. Lentoaikamatriisissa rivi vastaa ultraäänipulssin lähettänyttä anturia ja sarake anturia josta lentoaika on laskettu. Lisäksi matriisin diagonaali on asetettu nolaksi, koska kyseiset alkiot vastaavat tilannetta kun anturin on mittaus- ja lähetystilassa samanaikaisesti. Vastaava matriisi voitaisiin laskea myös ultraäänipulssin vaimentumiselle, mutta koska signaalin esikäsittelypiireissä on kanavakohtaista poikkeamaa niin näiden arvojen vertailu ei ole mahdollista ilman kalibrointia. Kappaleessa 4.2 visualisoidaan lentoaikamatriisia kun putkessa on vain vettä ja Kappaleessa 4.3 kun putkessa on myös kohde.

4.2 Referenssimittaus

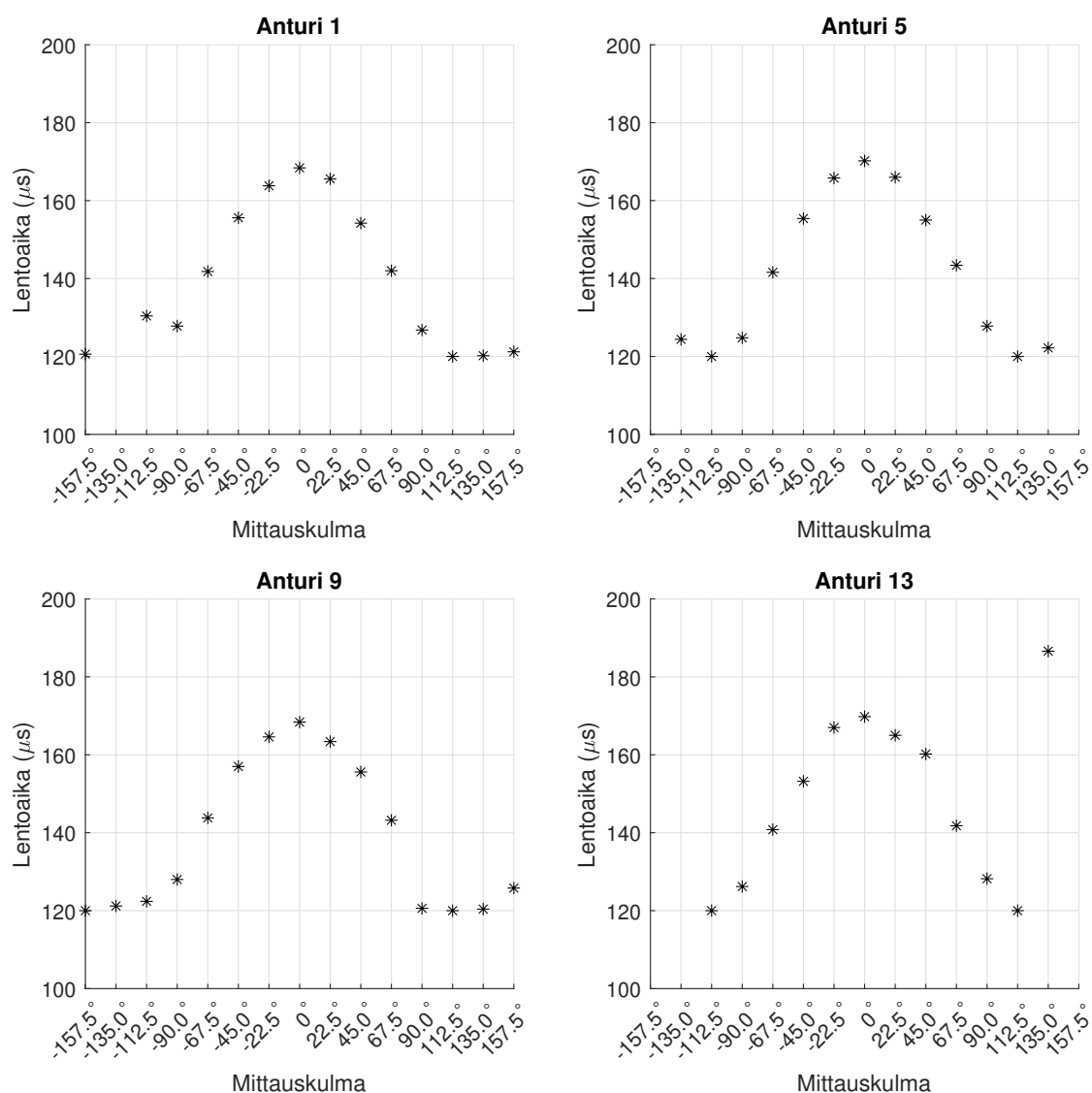
Referenssimittaus voidaan tehdä homogeenisella kohteella, esimerkiksi kun mittauskohde on pelkkää vettä. Ideaalitapauksessa referenssimittauksessa lentoaikamatriisi TOF_m olisi symmetrinen matriisi. Poikkeamaa lentoaikoihin kuitenkin tulee verhoikäyrä-menetelmästä ja mahdollisesti epätäydellisestä putken symmetriasta ja materiaaliepähomogeenisuuksista. Myös antureiden huono kontakti aiheuttaa virhettä. Kuvassa 24 on esitetty lentoaika kun mittaavan anturin vastainen anturi on lähettänyt ultraäänipulssin. Tämä tarkoittaa lentoaikamatriisin alkioita:

$$\begin{aligned} &\text{TOF}_m(1, 9), \quad \text{TOF}_m(2, 10), \quad \text{TOF}_m(3, 11), \quad \text{TOF}_m(4, 12), \\ &\text{TOF}_m(5, 13), \quad \text{TOF}_m(6, 14), \quad \text{TOF}_m(7, 15), \quad \text{TOF}_m(8, 16), \\ &\text{TOF}_m(9, 1), \quad \text{TOF}_m(10, 2), \quad \text{TOF}_m(11, 3), \quad \text{TOF}_m(12, 4), \\ &\text{TOF}_m(13, 5), \quad \text{TOF}_m(14, 6), \quad \text{TOF}_m(15, 7) \quad \text{ja} \quad \text{TOF}_m(16, 8). \end{aligned}$$



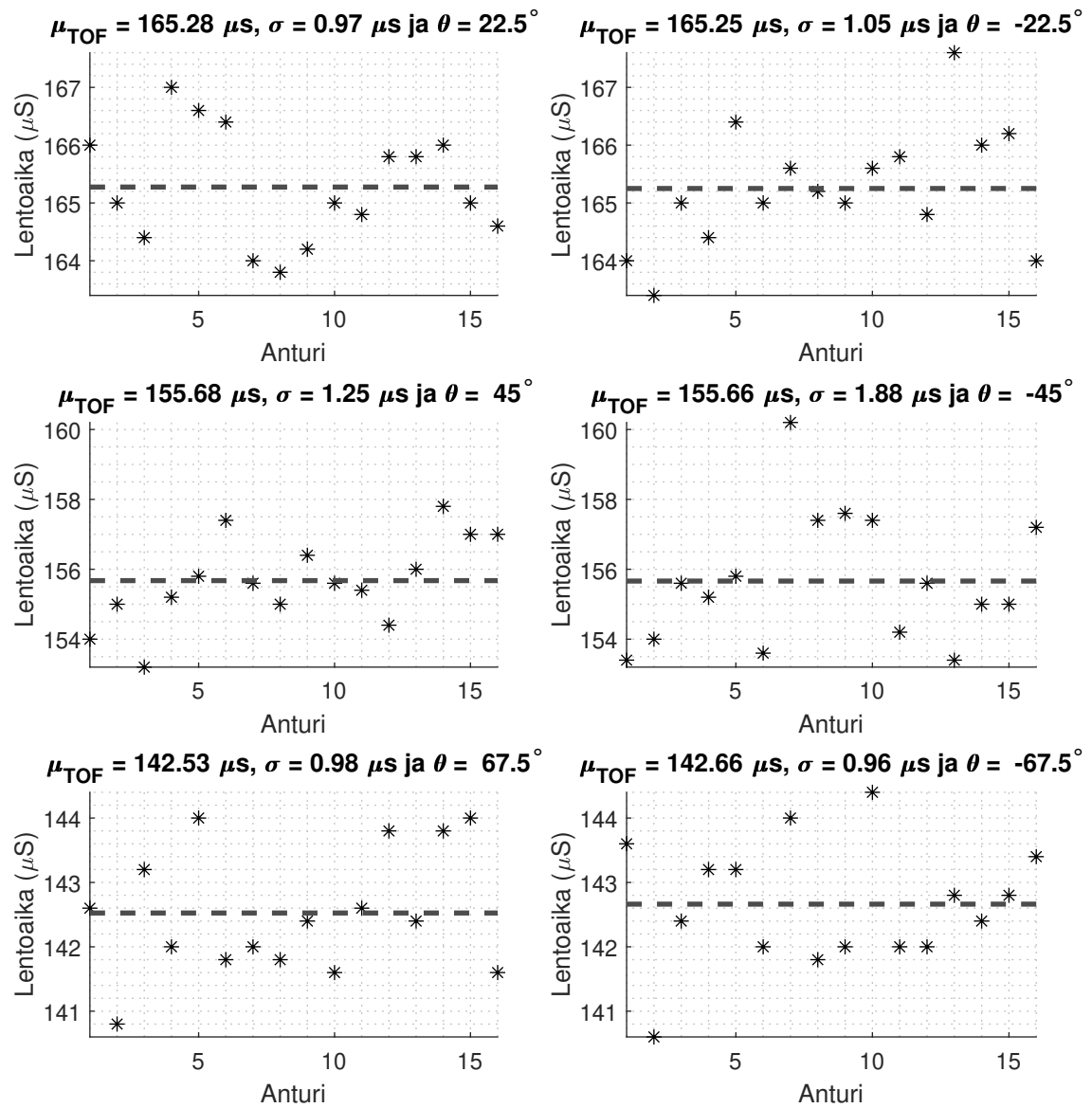
Kuva 24: Lentoaika kun mittaavan anturin vastainen anturi on lähettänyt pulssin. Kuvassa μ_{TOF} vastaa esitettyjen lentoaikojen keskiarvoa ja σ keskihajontaa. Ideaalitapauksessa keskihajonta on nolla.

Ideaalitapauksessa Kuvan 24 lentoaikojen tulisi olla sama arvo, joten referenssimittauksessa keskihajonta on hyvä indikaattori laitteiston luotettavuudelle. Kun käytetään Taulukon 1 arvoja ja systeemin mittoja, niin saadaan laskennalliseksi lentoajaksi $165.33 \mu s$. Kuvassa 25 on esitetty antureilla 1, 5, 9 ja 13 mitatut lentoajat. Kuvaajista huomataan, että lentoajan määrittämisen luotettavuus heikkenee kun mittauskulma kasvaa. Kun mitaava ja lähettävä ultraäänianturit ovat lähekkäin putken pinnalla, niin P- ja S-aaltojen erottamisen on haastavaa ja täten ultraäänipulssin saapumisajan määrittäminen epäluotettavaa.



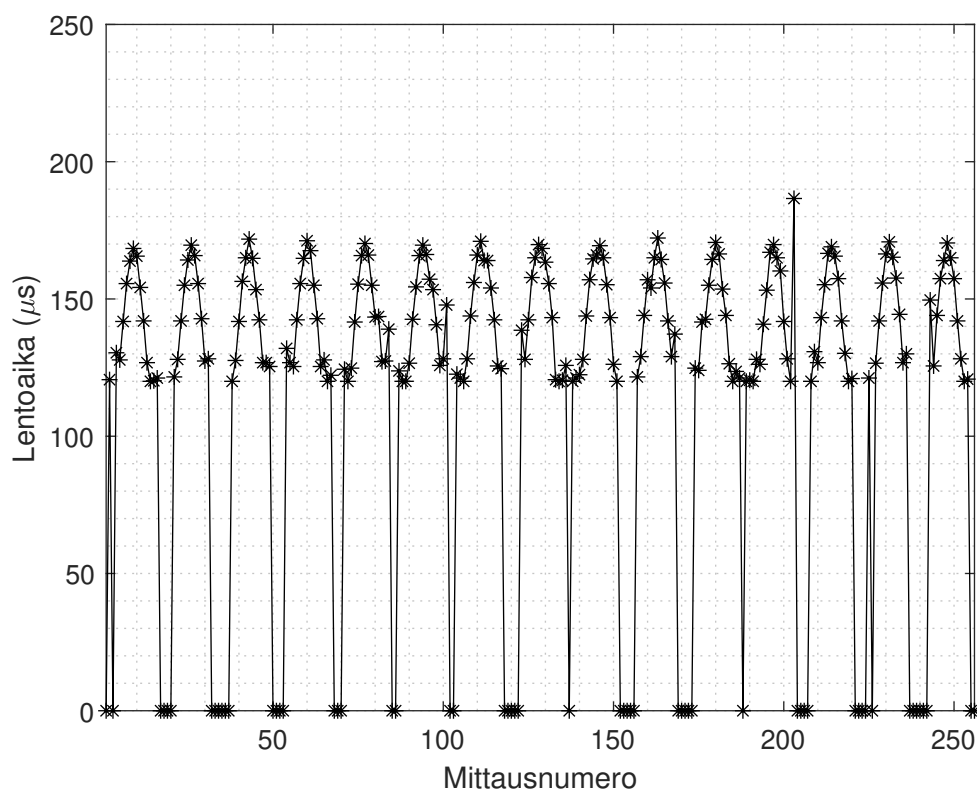
Kuva 25: Antureilla 1, 5, 9 ja 13 mitatut lentoajat. Jos lentoaika on ollut suurempi kuin $200 \mu s$, niin sen arvoksi on määritetty nolla.

Kuvassa 26 on esitetty kaikki lentoajat kun mittauskulma on 22.5° , 45° , 67.5° , -22.5° , -45° ja -67.5° . Kuvaajista huomataan, että lentoajan etsinnän luotettavuus ei huomattavasti muutu kun mittauskulma on -67.5° – 67.5° . Tämä vastaa lähettävän anturin seitsemää vastaista anturia.



Kuva 26: Lentoajan etsinnän luotettavuuden vertailu eri mittauskulmilla. Kuvassa μ_{TOF} vastaa esitettyjen lentoaikojen keskiarvoa, σ keskihajontaa ja θ mittauskulmaa.

Kuvassa 27 on esitetty kaikki referenssimittauksen 256 mitattua lentoaikaa. Jos lentoaika on ollut suurempi kuin $200\ \mu\text{s}$, niin sen arvoksi on määritetty nolla, koska tällöin kyseessä on virheellinen lentoaika. Jos näistä valitaan lentoajat mittauskulmalla $-67.5^\circ - 67.5^\circ$, niin jäljelle jää $16 \cdot 7 = 112$ luotettavaa lentoaikaa.

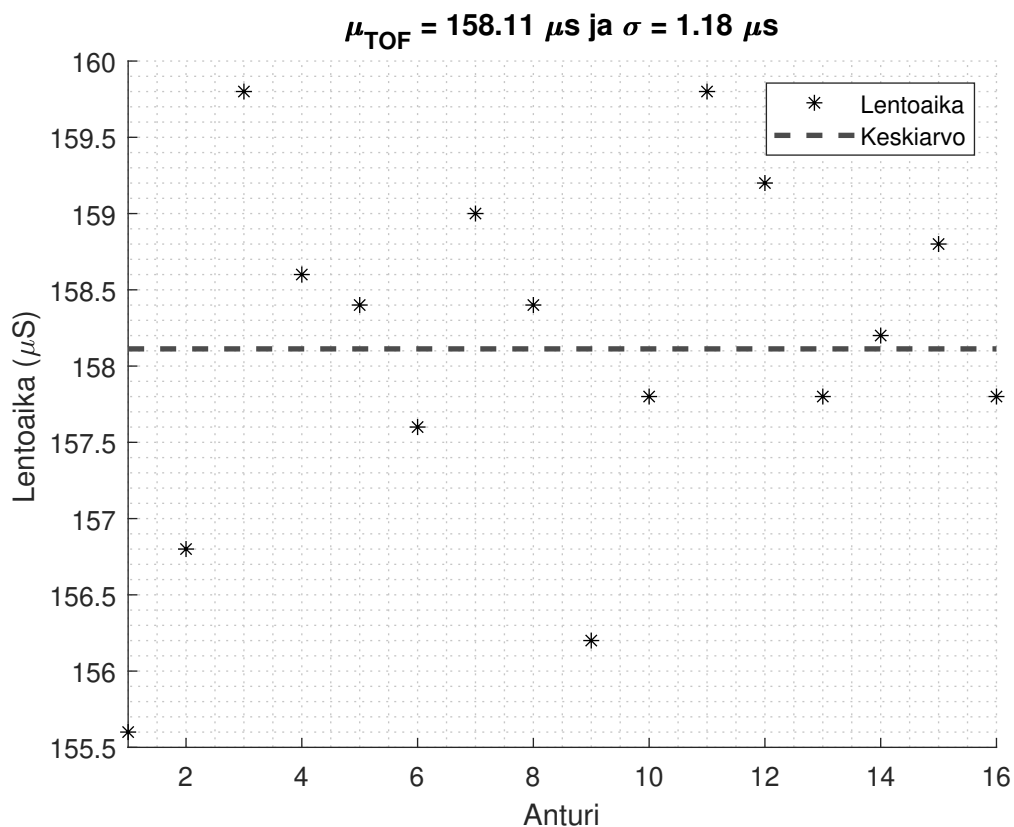


Kuva 27: Yhden kokonaisen referenssimittauksen kaikki mitatut lentoajat. Kaikki lentoajat, jotka ovat suurempia kuin $200\ \mu\text{s}$ on asetettu nolaksi, koska kyseessä on virheellisiä mittauksia.

4.3 Kohteen havainnointi

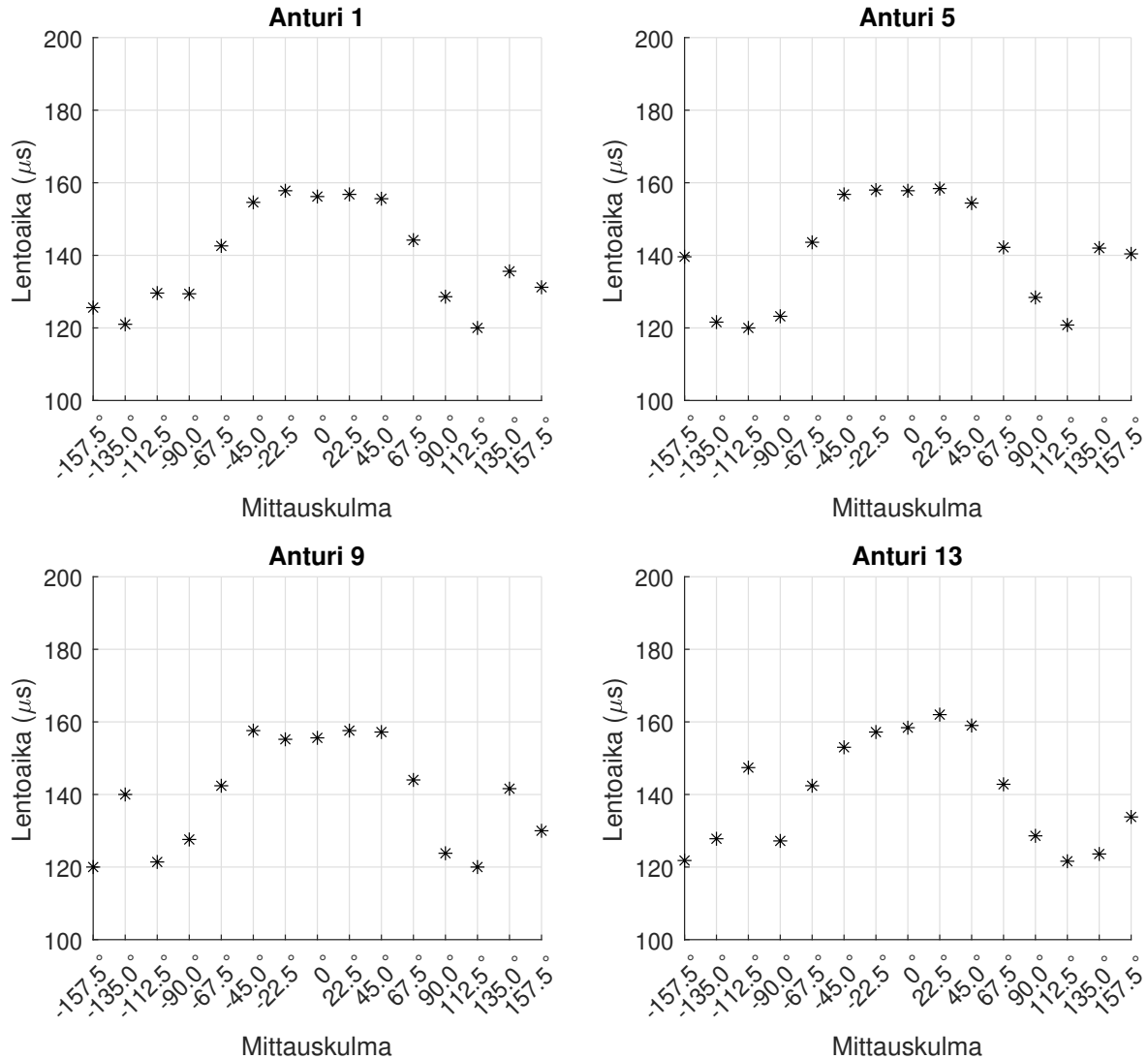
Mittalaitteiston kohteen havainnointikykyä kokeiltiin asettamalla vedellä täytettyyn tankkiin umpinainen akryylitanko, jonka halkaisija oli 5 cm. Tanko asetettiin pystyasentoon mahdollisimman keskelle akryyliputken sisään. Kuvassa 28 on esitetty lentoajat kun mitaavan anturin vastainen anturi on lähettänyt ultraäänipulssin. Huomataan, että Kuvan 28 lentoaikojen keskiarvo on pienempi kuin referenssimittauksessa. Tämä johtuu siitä, että äänennopeus akryylitangossa on suurempi kuin ympäröivässä vedessä. Kun käytetään Taulukon 1 arvoja ja uuden mittausasetelman mittoja saadaan laskennalliseksi lentoajaksi $155.35\ \mu\text{s}$. Keskihajonta ei ole kuitenkaan kasvanut huomattavasti. Jos tanko ei

olisi keskellä, niin geometria olisi epäsymmetrinen ja täten lentoaikojen vertailu ei olisi mielekäästä, koska niiden ei pitäisikään olla samoja.



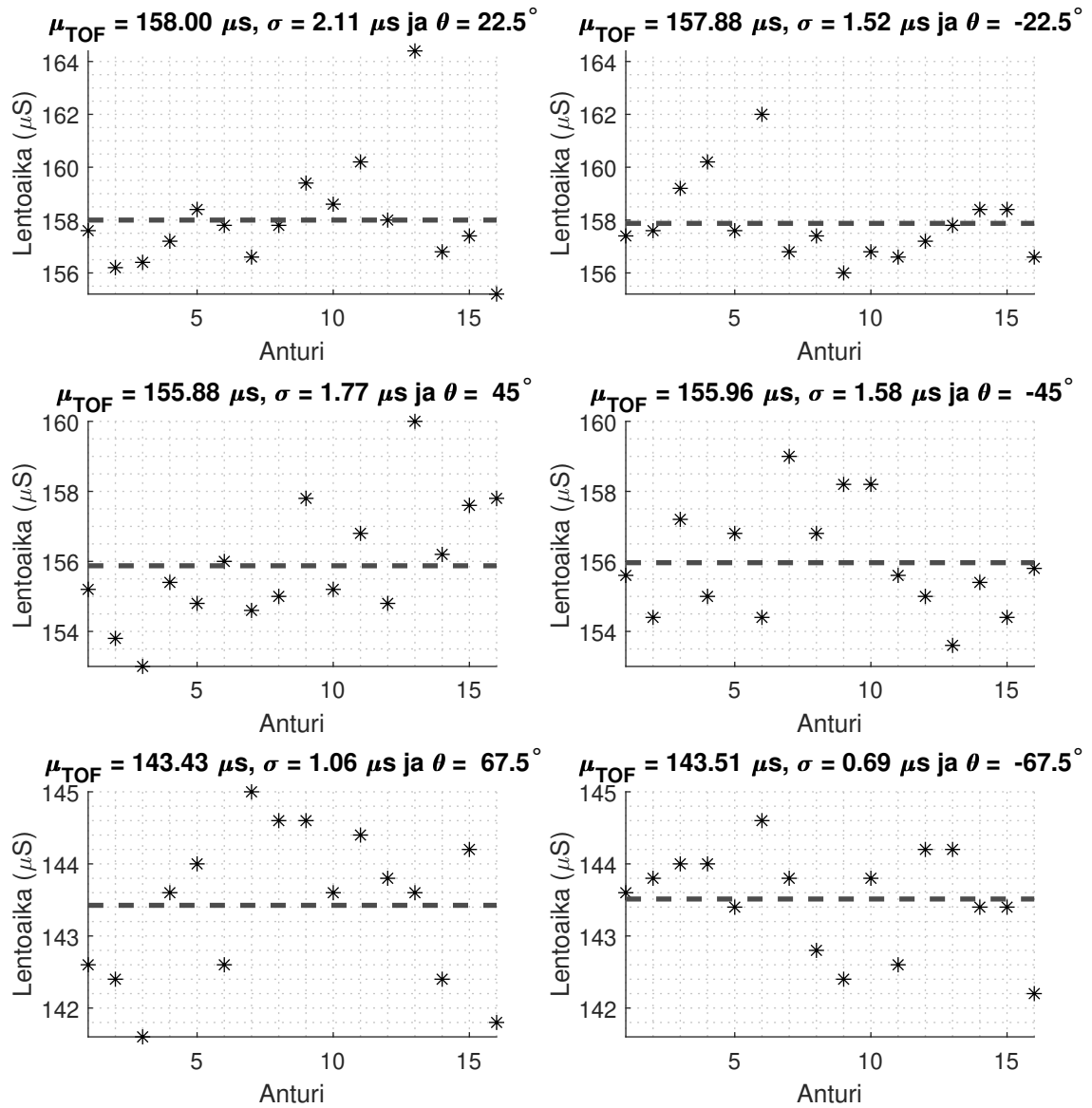
Kuva 28: Lentoajat kun mittaavan anturin vastainen anturi on lähettänyt pulssin ja putken keskellä on akryylitanko. Kuvassa μ_{TOF} vastaa esitettyjen lentoaikojen keskiarvoa ja σ keskihajontaa.

Kuvassa 29 on esitetty lentoaikoja eri mittauskulmilla akryylitangon ollessa putkessa. Kuvasta huomataan, että pienillä mittauskulmilla lentoaika on lyhentynyt verrattuna Kuvaan 25, mutta suuremmilla mittauskulmilla ei ole tapahtunut muutosta. Tämä johtuu siitä, että akryylitanko on keskellä putkea, jolloin ultraäänipulssi kulkeutuu tangon lävitse vain pienillä mittauskulmilla.



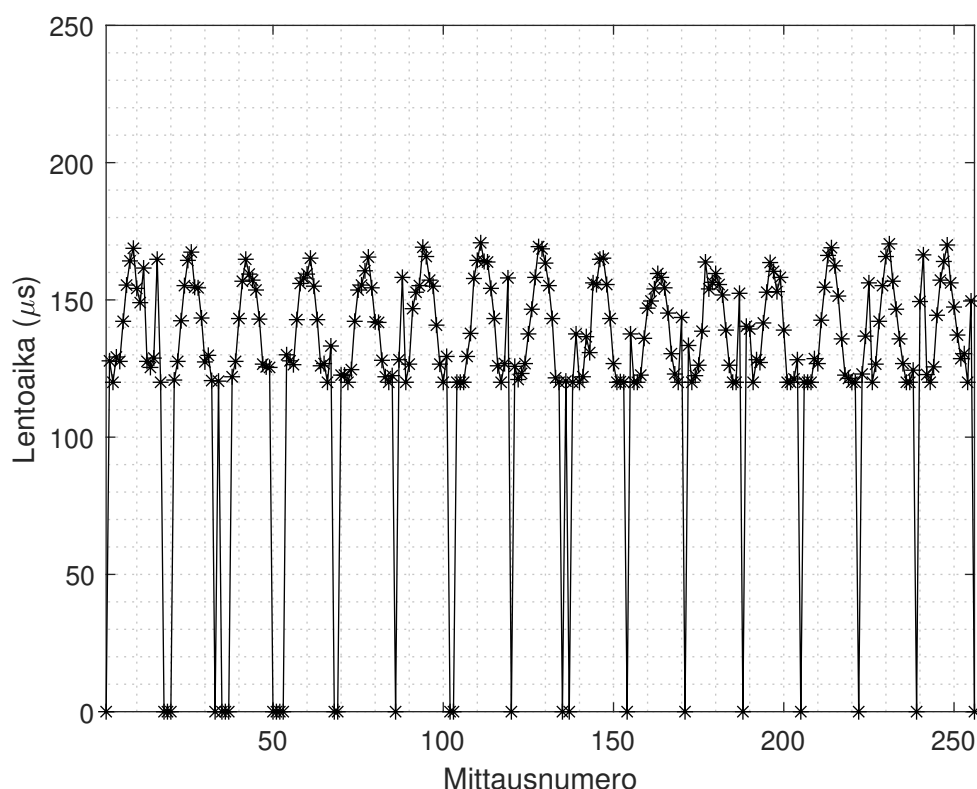
Kuva 29: Antureilla 1, 5, 9 ja 13 mitatut lentoajat. Jos lentoaika on ollut suurempi kuin 200 μs , niin sen arvoksi on määritetty nolla.

Kuvassa 30 on esitetty lentoajat mittauskulmilla 22.5°, 45°, 67.5°, -22.5°, -45° ja -67.5° kun akryylitanko on keskellä putkea. Kuvaajista huomataan, että keskihajonta näyttää olevan suurempaa pienillä mittauskulmilla. Tämä vastaa tilannetta kun ultraäänipulssi on kulkeutunut tangon lävitse. Ultraääniantureihin ei koskettu referenssimittauksen ja kohteen havainnointimittauksen aikana, joten kasvanut keskihajonta voi johtua siitä, että akryylitanko ei ollut tarkalleen putken keskellä. Tämä ei tarkoita että mittaus olisi epäonnistunut. Epäsymmetrisissä tilanteissa keskihajonnan kasvaminen on odotettavaa.



Kuva 30: Lentoajan etsinnän luotettavuuden vertailu eri mittauskulmilla. Kuvassa μ_{TOF} vastaa esitettyjen lentoaikojen keskiarvoa, σ keskihajontaa ja θ mittauskulmaa.

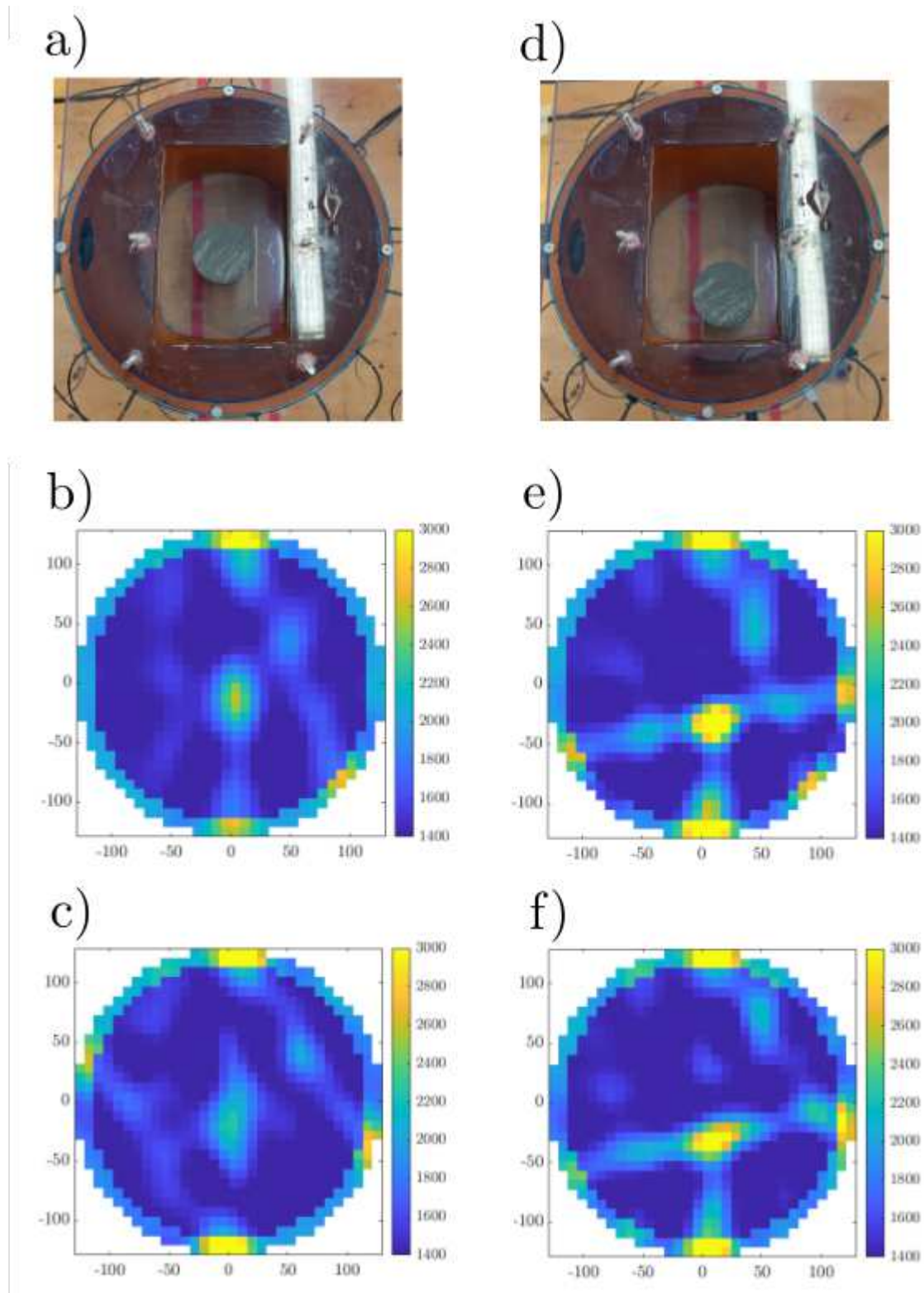
Kuvassa 31 on esitetty kaikki 256 mitattua lentoaikaa kun akryylitanko on keskellä putkea. Lentoaika on asetettu nolllaksi sen ollessa suurempaa kuin $200\ \mu\text{s}$, koska tällöin kyseessä on heijastunut ultraäänipulssi tai verhoikäyrä-menetelmän virheellinen merkin-tä. Jos näistä vielä valitaan lentoajat mittauskulmalla $-45^\circ-45^\circ$, niin jäljelle jää $16 \cdot 5 = 80$ luotettavaa lentoaikaa.



Kuva 31: Kaikki mitatut lentoajat kun akryylitanko on keskellä putkea. Kaikki lentoajat, jotka ovat suurempia kuin $200\ \mu\text{s}$ on asetettu nolllaksi, koska kyseessä on virheellisiä mit-tauksia.

Kuvan rekonstruointi

Mittaustuloksista rekonstruointiin myös kuvia, joista vastasi FM Tommi Veiste Pro Gra-du - tutkielmassaan [59]. Rekonstruointimittauksissa, joiden mittausasetelmat on esitetty Kuvissa 32 a) ja 32 d), käytettiin samaa akryylitankoa kuin aiemmissa testimittauksissa. Kuvissa 32 b) ja 32 e) on esitetty asetelmaa vastaavat rekonstruoinnit hyödyntämällä mi-tatuista lentoajoista vain mittauskulmia $-45^\circ-45^\circ$ vastaavia lentoaikoja. Kuvissa 32 c) ja 32 f) on hyödynnetty mittauskulmia $-67.5^\circ-67.5^\circ$ vastaavia lentoaikoja. Kuvien oikealla puolella on esitetty ratkaistun äänennopeusjakauman skaala yksikössä m/s.



Kuva 32: a) Akryylitanko keskellä putkea. b) Mittauskulmalla -45° – 45° rekonstruoitu kuva kun tanko keskellä. c) Mittauskulmalla -67.5° – 67.5° rekonstruoitu kuva kun tanko keskellä. d) Akryylitanko ei keskellä putkea. e) Mittauskulmalla -45° – 45° rekonstruoitu kuva kun tanko ei ole keskellä. f) Mittauskulmalla -67.5° – 67.5° rekonstruoitu kuva kun tanko ei ole keskellä.

5 Johtopäätökset ja pohdinta

Tässä Pro Gradu -tutkielmassa rakennettiin ultraäänitomografialaitteisto teollisuuden sovelluksiin yhdistämällä kaupallisia instrumentteja ja itse tehtyä elektroniikkaa. Tutkielmassa esitettiin rakennetun laitteiston käyttöönotto, ohjelmisto sekä elektroniikka. Laitteiston toimintaa havainnollistettiin myös ajoituskaavioilla ja signaalin esikäsittelypiirin taajuusvasteella. Lopuksi esitettiin mittalaitteisolla tehtyjä testimittauksia, joissa ensimmäisessä mittauksessa putkessa oli vain vettä ja toisessa akryylitanko vedessä keskellä putkea.

Rakennettu ultraäänitomografialaitteisto koostuu ADP3450-sekasignaali-oskilloskoopista, AG1006-vahvistimesta, hakkuriteholähteestä, ohjauselektroniikasta ja 16:ta MCUSD-11A400B11RS-ultraäänianturista. Sekasignaali-oskilloskooppilla näytteistetään ultraäänipulssit, luodaan digitaalisignaali ohjauselektroniikalle ja generoidaan ultraääniantureiden syötepulssi, jota vielä vahvistetaan AG1006-vahvistimella. ADP3450 on siis keskeinen osa mittauslaitteistoa ja sitä ohjataan Python-ohjelmalla. Koko mittauksen pystyy myös suorittamaan Matlab-ympäristöstä.

Jokaiselle oskilloskoopin mittauskanavalle rakennettiin oma signaalin esikäsittelypiiri. Esikäsittelypiirillä vahvistetaan ultraääniantureilla mitattua signaalia ja vaimennetaan erittäin suuri- ja pienitaajuisia signaaleja (kts. Kuva 11). Esikäsittelypiirien taajuusvasteissa on poikkeavuutta, joka voi johtua käytettyjen komponenttien arvojen poikkeavuudesta luvattuun arvoon. Toteutunut vahvistus 400 kHz taajuudella on noin 13 dB. Tässä työssä keskityttiin ultraäänisignaalin lentoajan etsimiseen, joten kanavakohtainen poikkeama ei haitannut. Jos laitetta halutaan soveltaa täysaaltoinversioon, tällöin kanavakohtainen kalibrointi tai esikäsittelypiirin uudelleen rakentaminen on tarpeen.

Ideaalitapauksessa referenssimittauksen (putkessa vain vettä) lentoaikamatriisi olisi symmetrinen matriisi, joten symmetristen lentoaikojen keskihajonta on hyvä tapa karakterisoida rakennetun mittauslaitteiston luotettavuutta. Mitattujen lentoaikojen uskottavuutta voidaan tarkastella vertailemalla symmetristen lentoaikojen keskiarvoa laskennalliseen lentoaikaan. Referenssimittauksessa laskennallinen lentoaika putken lävitse kulkevalle ultraäänipulssille on $165.33 \mu\text{s}$ ja tätä vastaavien mitattujen lentoaikojen keskiarvoksi saatiin $170.14 \mu\text{s}$. Lentoaikojen keskihajontaa tarkasteltiin mittauskulmilla -67.5° – -67.5° ja nämä vaihtelivat välillä 0.96 – $1.88 \mu\text{s}$. Tätä suuremmilla mittauskulmilla P- ja S-aaltojen erottaminen havaitusta signaalista on haastavaa ja täten ultraäänipulssin saapumisajan määrittämisestä tulee epäluotettavaa.

Mittauslaitteiston kohteen havainnointia testattiin asettamalla putken keskelle akryylitanko. Kyseessä on edelleen symmetrinen asetelma, joten keskihajontaa on mielekästä

tarkastella. Tässä mittausasetelmassa laskennallinen lentoaika putken lävitse kulkevalle ultraäänipulssille on $155.35 \mu\text{s}$. Kun mittaustuloksista lasketaan vastaavien lentoaikojen keskiarvo, niin saadaan $158.11 \mu\text{s}$. Keskihajontaa tarkasteltiin mittauskulmilla -67.5° – 67.5° ja nämä vaihtelivat välillä 0.69 – $2.11 \mu\text{s}$. Tuloksista huomataan, että keskihajonta on suurempaa pienillä mittauskulmilla eli kun ultraäänipulssi on kulkeutunut tangon lävitse. Keskihajonta kasvaa jos akryylitanko ei ole tarkalleen putken keskellä, mutta epäsymmetrisissä tilanteissa keskihajonnan kasvaminen on odotettavaa.

Rakennettu mittauslaitteisto on toimiva, mutta kyseessä on vasta ensimmäinen versio. Tällä hetkellä mittaus- ja lähetyskytkimet ovat samalla piirilevyllä, jolloin syötepulssin korkea jännite aiheuttaa häiriöitä mittauskanaviin (kts. Kuva 23). Tästä johtuen jokainen syötepulssi aiheuttaa oskilloskoopissa noin 60 mikrosekuntin pituisen ajanjakson, jolloin näytteistettyä signaalia ei voida hyödyntää. Tämä hankaloittaa lentoajan etsintää. Ratkaisu voisi olla rakentaa erilliset piirilevyt mittaus- ja lähetyskytkimille, jolloin kytkimillä olisi erilliset maatasot. Mittaussilmukan aikana tapahtuu joskus myös logiikkahäiriöitä, jolloin dataa jää mittaamatta tai ultraäänipulsseja lähettämättä. Tämä havaitaan helposti tarkastelemalla koko mittauksen dataa (kts. Kuva 22). Ongelmaa tutkittiin vertailemalla usean mittauksen ajoituskaavioita, mutta näistä ei löydetty poikkeavuutta. Logiikkahäiriöitä voi tapahtua piirilevyllä kytkinten kanavien välillä. Tekemällä testimittauksia erilaisilla mittausasetelmilla osataan laitetta kehittää oikeaan suuntaan.

Viitteet

- [1] P. Koulountzios, T. Rymarczyk ja M. Soleimani, “A quantitative ultrasonic travel-time tomography to investigate liquid elaborations in industrial processes”, *Sensors*, vol. 19, nro. 23, s. 5117, 2019.
- [2] R. A. Rahim, M. F. Rahiman, K. Chan ja S. Nawawi, “Non-invasive imaging of liquid/gas flow using ultrasonic transmission-mode tomography”, *Sensors and Actuators A: Physical*, vol. 135, nro. 2, s. 337–345, 2007.
- [3] L. Xu, Y. Han, L.-A. Xu ja J. Yang, “Application of ultrasonic tomography to monitoring gas/liquid flow”, *Chemical Engineering Science*, vol. 52, nro. 13, s. 2171–2183, 1997.
- [4] H. Schlager, M. Yang ja B. Hoyle, “Ultrasound reflection tomography for industrial processes”, *Ultrasonics*, vol. 36, nro. 1-5, s. 297–303, 1998.
- [5] E. Boni, C. Alfred, S. Freear, J. A. Jensen ja P. Tortoli, “Ultrasound open platforms for next-generation imaging technique development”, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics, and Frequency Control*, vol. 65, nro. 7, s. 1078–1092, 2018.
- [6] V. T. Rathod, “A review of acoustic impedance matching techniques for piezoelectric sensors and transducers”, *Sensors*, vol. 20, nro. 14, s. 4051, 2020.
- [7] C. Goh, A. Ruzairi, F. Hafiz ja Z. Tee, “Ultrasonic tomography system for flow monitoring: A review”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, nro. 17, s. 5382–5390, 2017.
- [8] M. S. Beck ym., *Process tomography: principles, techniques and applications*. Butterworth-Heinemann, 2012.
- [9] A. Carovac, F. Smajlovic ja D. Junuzovic, “Application of ultrasound in medicine”, *Acta Informatica Medica*, vol. 19, nro. 3, s. 168, 2011.
- [10] C. Tan, X. Li, H. Liu ja F. Dong, “An ultrasonic transmission/reflection tomography system for industrial multiphase flow imaging”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, nro. 12, s. 9539–9548, 2019.
- [11] E. Muramatsu, H. Murakawa, K. Sugimoto, H. Asano, N. Takenaka ja N. Furuichi, “Multi-wave ultrasonic Doppler method for measuring high flow-rates using staggered pulse intervals”, *Measurement Science and Technology*, vol. 27, nro. 2, s. 025303, 2015.

- [12] S. Ricci, V. Meacci, B. Birkhofer ja J. Wiklund, “FPGA-based system for in-line measurement of velocity profiles of fluids in industrial pipe flow”, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, nro. 5, s. 3997–4005, 2016.
- [13] P. Koulountzios, T. Rymarczyk ja M. Soleimani, “Ultrasonic time-of-flight computed tomography for investigation of batch crystallisation processes”, *Sensors*, vol. 21, nro. 2, s. 639, 2021.
- [14] U. Hampel *ym.*, “A review on fast tomographic imaging techniques and their potential application in industrial process Control”, *Sensors*, vol. 22, nro. 6, s. 2309, 2022.
- [15] P. Koulountzios, T. Rymarczyk ja M. Soleimani, “Handwriting with Sound-Speed Imaging Using Ultrasound Computed Tomography”, *IEEE Sensors Letters*, vol. 5, nro. 10, s. 1–3, 2021.
- [16] H. Murakawa, T. Shimizu ja S. Eckert, “Development of a high-speed ultrasonic tomography system for measurements of rising bubbles in a horizontal cross-section”, *Measurement*, vol. 182, s. 109654, 2021.
- [17] W. Li ja B. Hoyle, “Ultrasonic process tomography using multiple active sensors for maximum real-time performance”, *Chemical Engineering Science*, vol. 52, nro. 13, s. 2161–2170, 1997.
- [18] M. K. Khan ja F. Chemat, “Application of low and high power ultrasound in food analysis”, *Analytical Chemistry Letters*, vol. 1, nro. 1, s. 103–114, 2011.
- [19] J. Chandrapala, “Low intensity ultrasound applications on food systems.”, *International Food Research Journal*, vol. 22, nro. 3, 2015.
- [20] V. Mohammadi, M. Ghasemi-Varnamkhasti, R. Ebrahimi ja M. Abbasvali, “Ultrasonic techniques for the milk production industry”, *Measurement*, vol. 58, s. 93–102, 2014.
- [21] N. Parker ja M. Povey, “Scanning acoustic microscopy for mapping the microstructure of soft materials”, *arXiv preprint arXiv:0904.4832*, 2009.
- [22] M. T. M. Khairi *ym.*, “Ultrasound computed tomography for material inspection: Principles, design and applications”, *Measurement*, vol. 146, s. 490–523, 2019.
- [23] M. Ohkawa, N. Kawata ja S. Uchida, “Cross-sectional distributions of gas and solid holdups in slurry bubble column investigated by ultrasonic computed tomography”, *Chemical Engineering Science*, vol. 54, nro. 21, s. 4711–4728, 1999.

- [24] S. Langener, M. Vogt, H. Ermert ja T. Musch, “A real-time ultrasound process tomography system using a reflection-mode reconstruction technique”, *Flow Measurement and Instrumentation*, vol. 53, s. 107–115, 2017.
- [25] P. Koulountzios, T. Rymarczyk ja M. Soleimani, “A triple-modality ultrasound computed tomography based on full-waveform data for industrial processes”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, nro. 18, s. 20 896–20 909, 2021.
- [26] J. Gu, Y. Chen ja Y. Gu, “Research on ultrasonic process fusing tomography for numerical and laboratory imaging in liquid-background two-phase flow”, *Applied Acoustics*, vol. 205, s. 109278, 2023.
- [27] X. Duan, P. Koulountzios ja M. Soleimani, “Dual modality EIT-UTT for water dominate three-phase material imaging”, *IEEE Access*, vol. 8, s. 14 523–14 530, 2020.
- [28] S. Teniou ja M. Meribout, “A multimodal image reconstruction method using ultrasonic waves and electrical resistance tomography”, *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 24, nro. 11, s. 3512–3521, 2015.
- [29] J. Pusppanathan *ym.*, “Single-plane dual-modality tomography for multiphase flow imaging by integrating electrical capacitance and ultrasonic sensors”, *IEEE Sensors Journal*, vol. 17, nro. 19, s. 6368–6377, 2017.
- [30] Y. Fu, I. I. Kabir, G. H. Yeoh ja Z. Peng, “A review on polymer-based materials for underwater sound absorption”, *Polymer Testing*, vol. 96, s. 107115, 2021.
- [31] D. Marioli, C. Narduzzi, C. Offelli, D. Petri, E. Sardini ja A. Taroni, “Digital time-of-flight measurement for ultrasonic sensors”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 41, nro. 1, s. 93–97, 1992.
- [32] R. Challis, M. Povey, M. Mather ja A. Holmes, “Ultrasound techniques for characterizing colloidal dispersions”, *Reports on Progress in Physics*, vol. 68, nro. 7, s. 1541, 2005.
- [33] B. S. Hoyle, “Process tomography using ultrasonic sensors”, *Measurement Science and Technology*, vol. 7, nro. 3, s. 272, 1996.
- [34] M. Faramarzi, S. Ibrahim, M. A. M. Yunus ja J. Pusppanathan, “Image reconstruction methods for ultrasonic transmission mode tomography in bubbly flow regime”, *Jurnal Teknologi*, vol. 70, nro. 3, 2014.

- [35] Y. Norose, K. Mizutani, N. Wakatsuki ja T. Ebihara, “Noise reduction in ultrasonic computerized tomography by preprocessing for projection data”, *Japanese Journal of Applied Physics*, vol. 54, nro. 7S1, s. 07HC12, 2015.
- [36] A. H. Andersen ja A. C. Kak, “Simultaneous algebraic reconstruction technique (SART): a superior implementation of the ART algorithm”, *Ultrasonic Imaging*, vol. 6, nro. 1, s. 81–94, 1984.
- [37] R. Gordon, “A tutorial on ART (algebraic reconstruction techniques)”, *IEEE Transactions on Nuclear Science*, vol. 21, nro. 3, s. 78–93, 1974.
- [38] P. P. Bruyant, “Analytic and iterative reconstruction algorithms in SPECT”, *Journal of Nuclear Medicine*, vol. 43, nro. 10, s. 1343–1358, 2002.
- [39] G. H. Golub, P. C. Hansen ja D. P. O’Leary, “Tikhonov regularization and total least squares”, *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, vol. 21, nro. 1, s. 185–194, 1999.
- [40] L. I. Rudin, S. Osher ja E. Fatemi, “Nonlinear total variation based noise removal algorithms”, *Physica D: nonlinear phenomena*, vol. 60, nro. 1-4, s. 259–268, 1992.
- [41] P. Koulountzios, T. Rymarczyk ja M. Soleimani, “A 4-D ultrasound tomography for industrial process reactors investigation”, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, s. 1–14, 2022.
- [42] W. Zhu, X. Chang, Y. Wang, H. Zhai ja Z. Yao, “Reconstruction of hydraulic fractures using passive ultrasonic travel-time tomography”, *Energies*, vol. 11, nro. 5, s. 1321, 2018.
- [43] H. Liu, C. Tan ja F. Dong, “Continuous-wave ultrasonic tomography for oil/water two-phase flow imaging using regularized weighted least square framework”, *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, vol. 42, nro. 4, s. 666–679, 2020.
- [44] P. Koulountzios, S. Aghajanian, T. Rymarczyk, T. Koironen ja M. Soleimani, “An ultrasound tomography method for monitoring CO₂ capture process involving stirring and CaCO₃ precipitation”, *Sensors*, vol. 21, nro. 21, s. 6995, 2021.
- [45] *un0rick : open-source FPGA board for single element ultrasound imaging*, 2019. [Verkossa]. Saatavilla: https://www.researchgate.net/publication/338491502_un0rick_open-source_fpga_board_for_single_element_ultrasound_imaging

- [46] *un0-rick Github*, 2022. [Verkossa]. Saatavilla: <https://github.com/kelu124/un0rick/>
- [47] N. A. Zulkifli *ym.*, “Ultrasound tomography hardware system for multiphase flow imaging”, *IEEE International Conference on Signal and Image Processing Applications (ICSIPA)*. IEEE, 2019, s. 264–268.
- [48] *Analog Discovery Pro 3450*, 2021. [Verkossa]. Saatavilla: <https://digilent.com/reference/test-and-measurement/analog-discovery-pro-3x50/start>
- [49] *AG 1006 LF*, 2005. [Verkossa]. Saatavilla: <http://www.ad-elektronik.de/AG1006revB.pdf>
- [50] *MCUSD11A400B11RS*, 2022. [Verkossa]. Saatavilla: <https://www.farnell.com/datasheets/3771823.pdf>
- [51] *HV2708*, 2020. [Verkossa]. Saatavilla: <https://ww1.microchip.com/downloads/aemDocuments/documents/APID/ProductDocuments/DataSheets/20006390B.pdf>
- [52] *MD0101*, 2003. [Verkossa]. Saatavilla: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/MD0101.pdf>
- [53] *AD8034*, 2008. [Verkossa]. Saatavilla: https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/AD8033_8034.pdf
- [54] S. Franco, *Design with operational amplifiers and analog integrated circuits*. McGraw-Hill New York, 2002.
- [55] M. Pérez-Liva, J. Herraiz, J. Udías, E. Miller, B. Cox ja B. Treeby, “Time domain reconstruction of sound speed and attenuation in ultrasound computed tomography using full wave inversion”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, vol. 141, nro. 3, s. 1595–1604, 2017.
- [56] L.-H. Lee, *Adhesive bonding*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [57] *WaveForms SDK*, 2023. [Verkossa]. Saatavilla: <https://digilent.com/reference/software/waveforms/waveforms-sdk/reference-manual>
- [58] *TLA5201*, 1997. [Verkossa]. Saatavilla: <https://accusrc.com/uploads/datasheets/Tektronix\%20TLA5203\%20Datasheet.pdf>
- [59] T. Veiste, “Image Reconstruction in Ultrasound Tomography”, *Itä-Suomen yliopisto, Sovelletun fysiikan laitos, Pro Gradu -tutkielma*, 2022.

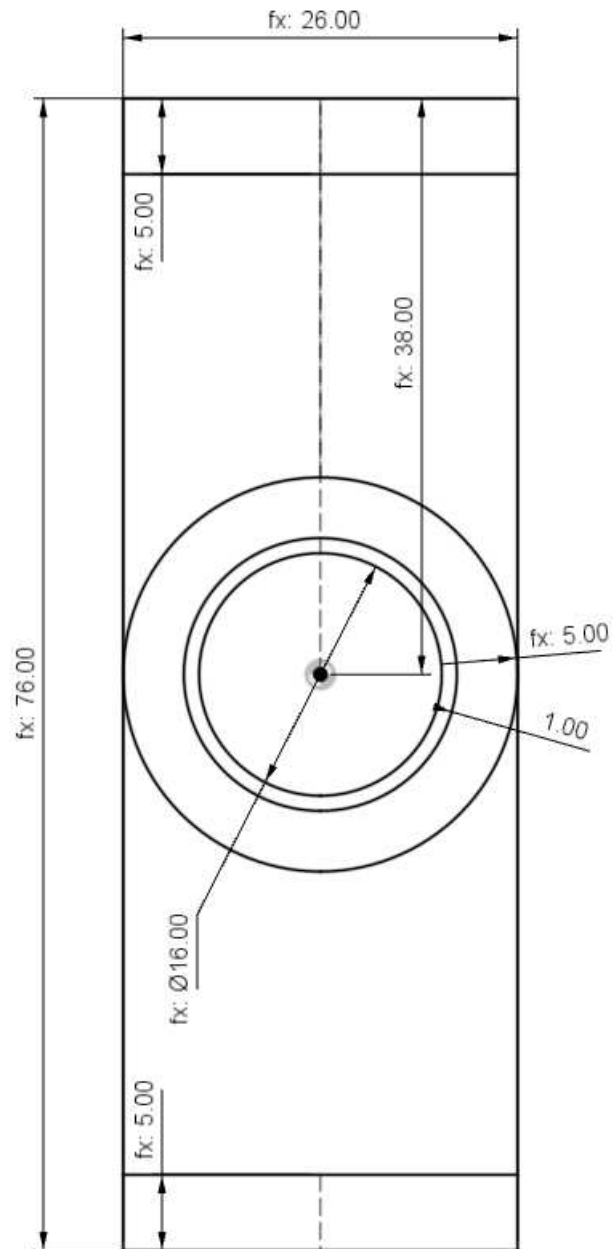
Liitteet

A Mittauskartta

Taulukko 5: Yhden kokonaisen mittauksen mittauskartta. Korostettu mittaava anturi tarkoittaa, että kyseinen anturi on mittaus- sekä lähetystilassa. Huomaa, että joka neljäs mitausanturien konfiguraatio on sama, mutta lähetttävä anturi on vaihtunut.

| Mittaavat anturi | | | | | | Mittaavat anturi | | | | | |
|---------------------|----------|----------|----|----|----------------------|---------------------|----|----|-----------|-----------|----------------------|
| Pulssin numero | C1 | C2 | C3 | C4 | Lähetttävä anturi | Pulssin numero | C1 | C2 | C3 | C4 | Lähetttävä anturi |
| 1 | 1 | 5 | 9 | 13 | 1 | 33 | 1 | 5 | 9 | 13 | 9 |
| 2 | 2 | 6 | 10 | 14 | 1 | 34 | 2 | 6 | 10 | 14 | 9 |
| 3 | 3 | 7 | 11 | 15 | 1 | 35 | 3 | 7 | 11 | 15 | 9 |
| 4 | 4 | 8 | 12 | 16 | 1 | 36 | 4 | 8 | 12 | 16 | 9 |
| 5 | 1 | 5 | 9 | 13 | 2 | 37 | 1 | 5 | 9 | 13 | 10 |
| 6 | 2 | 6 | 10 | 14 | 2 | 38 | 2 | 6 | 10 | 14 | 10 |
| 7 | 3 | 7 | 11 | 15 | 2 | 39 | 3 | 7 | 11 | 15 | 10 |
| 8 | 4 | 8 | 12 | 16 | 2 | 40 | 4 | 8 | 12 | 16 | 10 |
| 9 | 1 | 5 | 9 | 13 | 3 | 41 | 1 | 5 | 9 | 13 | 11 |
| 10 | 2 | 6 | 10 | 14 | 3 | 42 | 2 | 6 | 10 | 14 | 11 |
| 11 | 3 | 7 | 11 | 15 | 3 | 43 | 3 | 7 | 11 | 15 | 11 |
| 12 | 4 | 8 | 12 | 16 | 3 | 44 | 4 | 8 | 12 | 16 | 11 |
| 13 | 1 | 5 | 9 | 13 | 4 | 45 | 1 | 5 | 9 | 13 | 12 |
| 14 | 2 | 6 | 10 | 14 | 4 | 46 | 2 | 6 | 10 | 14 | 12 |
| 15 | 3 | 7 | 11 | 15 | 4 | 47 | 3 | 7 | 11 | 15 | 12 |
| 16 | 4 | 8 | 12 | 16 | 4 | 48 | 4 | 8 | 12 | 16 | 12 |
| 17 | 1 | 5 | 9 | 13 | 5 | 49 | 1 | 5 | 9 | 13 | 13 |
| 18 | 2 | 6 | 10 | 14 | 5 | 50 | 2 | 6 | 10 | 14 | 13 |
| 19 | 3 | 7 | 11 | 15 | 5 | 51 | 3 | 7 | 11 | 15 | 13 |
| 20 | 4 | 8 | 12 | 16 | 5 | 52 | 4 | 8 | 12 | 16 | 13 |
| 21 | 1 | 5 | 9 | 13 | 6 | 53 | 1 | 5 | 9 | 13 | 14 |
| 22 | 2 | 6 | 10 | 14 | 6 | 54 | 2 | 6 | 10 | 14 | 14 |
| 23 | 3 | 7 | 11 | 15 | 6 | 55 | 3 | 7 | 11 | 15 | 14 |
| 24 | 4 | 8 | 12 | 16 | 6 | 56 | 4 | 8 | 12 | 16 | 14 |
| 25 | 1 | 5 | 9 | 13 | 7 | 57 | 1 | 5 | 9 | 13 | 15 |
| 26 | 2 | 6 | 10 | 14 | 7 | 58 | 2 | 6 | 10 | 14 | 15 |
| 27 | 3 | 7 | 11 | 15 | 7 | 59 | 3 | 7 | 11 | 15 | 15 |
| 28 | 4 | 8 | 12 | 16 | 7 | 60 | 4 | 8 | 12 | 16 | 15 |
| 29 | 1 | 5 | 9 | 13 | 8 | 61 | 1 | 5 | 9 | 13 | 16 |
| 30 | 2 | 6 | 10 | 14 | 8 | 62 | 2 | 6 | 10 | 14 | 16 |
| 31 | 3 | 7 | 11 | 15 | 8 | 63 | 3 | 7 | 11 | 15 | 16 |
| 32 | 4 | 8 | 12 | 16 | 8 | 64 | 4 | 8 | 12 | 16 | 16 |

B Anturin teline



Kuva 33: Ultraäänianturin telineen suunnitelma millimetreinä.