

Jauheiden triboelektrisen varauksen mittaaminen akustisen levitaation avulla

Pro gradu -tutkielma
Turun yliopisto
Fysiikan ja tähtitieteen laitos
Fysiikka
2023
Sebastian Icking
Tarkastajat:
Dos. Matti Murtomaa
Prof. Jarno Salonen

Turun yliopiston laatujärjestelmän mukaisesti tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck-järjestelmällä

TURUN YLIOPISTO
Fysiikan ja tähtitieteen laitos

ICKING, SEBASTIAN Jauheiden triboelektrisen varauksen mittaaminen akustisen levitaation avulla

Pro gradu-tutkielma, 34 s.
Fysiikka
Joulukuu 2023

Työssä on kehitetty uusi mittaussuunnitelma jauheiden triboelektrisen varautumisen mittaamiseksi. Menetelmä perustuu akustiseen levitaatioon, jonka avulla hienojakoisia näytteitä voidaan käsitellä ilman että niihin tarvitsee koskea. Työssä rakennettiin itse akustisen levitaation laite ja sitä ympäröivä varauksen mittaamiseen tarkoitettu laitteisto. Laitteistolla suoritettiin koemittauksia, joilla sen todettiin kykenevän levitoimaan hienojakoisia jauheita ja määrittämään jauheseoksen komponenttien polariteetit. Ymmärrys jauheiden triboelektrisestä varautumisesta on tärkeää esimerkiksi lääketieteessä, missä se voi hankaloittaa jauhemaisten lääkeaineiden sekoittumista ja annostusta. Varautumisen tarkka mittaaminen on ollut hankalaa, sillä jauheen koskiessa mittalaitteeseen tai säiliöön varautumista tapahtuu myös näiden välillä.

Asiasanat: Akustinen levitaatio, Gor'kovin potentiaali, jauheet, TinyLev, triboelektrinen sarja, triboelektrinen varautuminen

Sisällys

Johdanto	1
1 Akustinen levitaatio	1
1.1 Levitaatiomenetelmistä yleisesti	1
1.2 Akustisen levitaation teoriaa	3
1.3 Akustisen levitaation menetelmiä	5
1.4 TinyLev	9
2 Jauheiden varautuminen	9
2.1 Varautumisen mittaussmenetelmiä	12
3 Koelaitteisto	14
3.1 Levitaattorin rakenne	15
3.2 Ympäröiva laitteisto	17
3.3 Laitteiston ohjaaminen	18
3.3.1 Käyttöliittymä	20
4 Koemittaukset	21
4.1 Käytetyt materiaalit	21
4.2 Levitaation toimintakyky	22
4.3 Triboelektrisen varauksen mittaaminen	26
5 Tulokset	28
5.1 Levitaation onnistuminen	28
5.2 Laitteen säädön parametrit	28
5.3 Varautuminen	29
6 Johtopäätökset	30

Johdanto

Työssä kehitettiin uusi mittaussuomenetelmä hienojakoisten jauheiden sähköstaattisen varautumisen mittaamiseksi. Hiukkasten sähköstaattinen varautuminen tapahtuu triboelektrisen ilmiön kautta. Ilmiön toimintamekanismia ei vielä ymmärretä erityisen hyvin, ja erityisesti hienojakoisilla näytteillä sen tutkiminen on osoittautunut haastavaksi [1].

Triboelektrinen varautuminen voi aiheuttaa useita ongelmia teollisuudessa. Syn-tyneen varauksen purkautuminen voi vaurioittaa sähkölaitteita [2] tai aiheuttaa rä-jähdyksiä [3]. Jauheiden varautuminen voi vaikeuttaa niiden käsittelyä ja aiheuttaa tukoksia ja kulumaa niitä käsittelevissä koneissa [4]. Se voi myös vaikeuttaa jauhei-
den sekoittumista esimerkiksi lääkeaineissa [5] tai aiheuttaa ongelmia inhalaattorilla käytettyjen lääkkeiden annostuksessa [6].

Edellä esitetyissä esimerkeissä ongelmallisiksi jauheiksi on havaittu erityisesti noin 100 μm kokoiset ja sitä hienojakoisemmat jauheet. Työssä käsitellyn jauheen raekoko on noin 70 μm , mikä on siis juuri teollisuudessa kiinnostavassa kokoluokassa.

Kehitetyn mittaussuomenetelmän keskeisenä työkaluna käytetään akustista levitaat-toria. Tällä näytteitä on tarkoitus käsitellä niin, että jauheen hiukkaset koskevat ai-noastaan toisiinsa eivätkä esimerkiksi säiliöihin tai mittalaitteisiin. Näin varautumi-nen tapahtuu ainoastaan hiukkasten välillä. Tällaisen käsittelyn hankaluus on ollut keskeinen ongelma jauheiden varautumisen tutkimuksissa.

1 Akustinen levitaatio

1.1 Levitaatiomenetelmistä yleisesti

Kappaleita voi levitoida useaan fysikaaliseen toimintaperiaatteeseen pohjautuen. Julkaisussaan Brandt [7] erittelee aerodynaamisen, akustisen, optisen, sähköisen, magneettisen, radiotaajuisten ja suprajohtavan levitaation.

Aerodynaamisessa levitaatiossa kappaleeseen kohdistetaan fluidisuihku joka nostaa sen ylös. Levitaatio on vakaata, koska kappale poikkeuttaa suihkua itseään kohti, mikä synnyttää palauttavan voiman.

Akustisessa levitaatiossa muodostetaan ilmaan seisova aaltoliike, jonka solmu-kohtiin syntyvä paine-ero pitää kappaleita paikallaan. Levitaation vakaus riippuu oleellisesti muodostuneen akustisen kentän muodosta.

Optisessa levitaatiossa kohdistetaan voimakas laservalo kappaleeseen. Valon säteilypaine kohdistaa kappaleeseen voiman, joka mahdollistaa pienien kappaleiden levitaation.

Sähköisessä levitaatiossa muuntuvalla sähkökentällä synnytetään varautuneelle kappaleelle vakaa levitaatiopiste. Vakaa levitaatio staattisella sähkökentällä ei ole mahdollista.

Magneettisessa levitaatiossa kappale levitoidaan kesto- tai sähkömagneetin yläpuolella. Diamagneettisille kappaleille kestmagneeteilla saa muodostettua vakaan levitaation sellaisenaan, para- ja ferromagneeteille tarvitsee lisätä vakauttavia järjestelmiä esimerkiksi sähkömagneeteilla.

Radiotaajuinen levitaatio liittyy läheisesti magneettiseen levitaatioon. Siinä käytetään käämiä, johon indusoidaan vaihtovirralla muuttuva magneettikenttä. Käämin keskelle asetettavaan metallikappaleeseen indusoituu pyörrevirtoja, jotka syrjäyttävät kentän kappaleen sisällä ja saavat kappaleen käyttäytymään diamagneetin tavoin. Syntynyt diamagneetti asettuu levitoimaan käämin keskelle.

Suprajohtavassa levitaatiossa suprajohde asetetaan kestmagneetin päälle tai magneetti suprajohteen päälle. Suprajohde on täydellinen diamagneetti, joten sillä saavutetaan vakaa levitaatio, jossa kappaleiden välinen hylkimisvoima voi olla hyvinkin suuri.

Tässä työssä sopivaksi menetelmäksi valittiin akustinen levitaatio. Se soveltuu jauheille, nesteille ja millimetrin suuruusluokan kappaleille. Menetelmän toimivuus

ei ratkaisevasti riipu kappaleen ominaisuuksista, joskin tiheitä kappaleita on vaikeampi levitoida. Sähkömagnetismiin perustuvat menetelmät rajoittuvat materiaaleihin, joilla on niihin soveltuvat sähkömagneettiset ominaisuudet, kuten ferromagneettisuus tai suprajohtavuus. Optinen levitaatio tuottaa vain pienen voiman ja soveltuu lähinnä hyvin pienille kappaleille. Aerodynaaminen levitaatio soveltuu vain yksittäisille kappaleille, ei jauheille tai nesteille.

1.2 Akustisen levitaation teoriaa

Akustisessa levitaatiossa muodostetaan ilmaan seisova aaltoliike, jonka solmukohtiin muodostuu potentiaaliminimi, joka pitää kappaleita paikallaan. Matemaattisesti tämä voidaan esittää Gor'kovin potentiaalilla [8]. Gor'kovin potentiaali pätee pyöreille kappaleille, joiden säde R on pieni äänen aallonpituuteen λ verrattuna.

$$F = -\nabla U \quad (1)$$

$$U = 2\pi R^3 \left(\frac{f_1}{3\rho_0 c_0^2} \langle p^2 \rangle - \frac{f_2 \rho_0}{2} \langle v^2 \rangle \right). \quad (2)$$

Tässä kappaleeseen kohdistuva voima F ilmaistaan potentiaalilla U avulla. ρ_0 ja c_0 ovat väliaineen tiheys ja äänen nopeus väliaineessa. R on kappaleen säde. p ja v ovat väliaineen paine ja väliaineen hiukkasten nopeus kappaleen kohdalla, näiden neliöstä otetaan keskiarvo ajan suhteen. f_1 ja f_2 ovat parametreja jotka liittyvät kappaleen ja väliaineen mekaanisiin ominaisuuksiin:

$$f_1 = 1 - \frac{\rho_0 c_0^2}{\rho_k c_k^2} \quad (3)$$

$$f_2 = 2 \left(\frac{\rho_k - \rho_0}{2\rho_k - \rho_0} \right). \quad (4)$$

Tässä ρ_k ja c_k ovat kappaleen tiheys ja äänen nopeus kappaleessa. Kun väliaineena on ilma ja levitettava kappale on kiinteä, voidaan yleensä olettaa, että $\rho_k \gg \rho_0$

jolloin saadaan $f_1 = f_2 = 1$. Näin ollen potentiaaliksi saadaan

$$U = 2\pi R^3 \left(\frac{1}{3\rho_0 c_0^2} \langle p^2 \rangle - \frac{\rho_0}{2} \langle v^2 \rangle \right). \quad (5)$$

Gor'kovin potentiaalin yksityiskohtainen johto on esitetty esimerkiksi artikkeleissa [9, 10].

Tehdään lineaarinen tarkastelu potentiaalin syntymisestä yksiulotteisen aallon tapauksessa. Yksiulotteinen aaltofunktio voidaan esittää muodossa

$$p = p_0 \cos(\omega t) \cos\left(\frac{\omega}{c_0} z\right) \quad (6)$$

missä p_0 on paineen amplitudi, ω aallon kulmataajuus, t aikakoordinaatti ja z paikkakoordinaatti.

Hiukkasten nopeus saadaan Eulerin yhtälöstä

$$\frac{\delta \mathbf{v}}{\delta t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\frac{\nabla p}{\rho} + \mathbf{g} \quad (7)$$

$$\frac{\delta \mathbf{v}}{\delta t} = -\frac{\nabla p}{\rho_0} \quad (8)$$

missä yhtälössä (8) on oletettu, että äänen nopeus väliaineessa on suuri joten $|\frac{\delta \mathbf{v}}{\delta t}| \gg |\mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v}|$, painovoimaa ei oteta huomioon eli $\mathbf{g} = 0$, äänen amplitudi on pieni, joten $\rho = \rho_0$ ja väliaine ei ole liikkeessä.

Ratkaisemalla yhtälö (8) yhtälöllä (6) saadaan

$$\mathbf{v} = \frac{p_0}{\rho_0 c_0} \sin(\omega t) \sin\left(\frac{\omega}{c_0} z\right) \hat{\mathbf{k}}. \quad (9)$$

Ratkaistaan näiden neliön keskiarvo ajan suhteen:

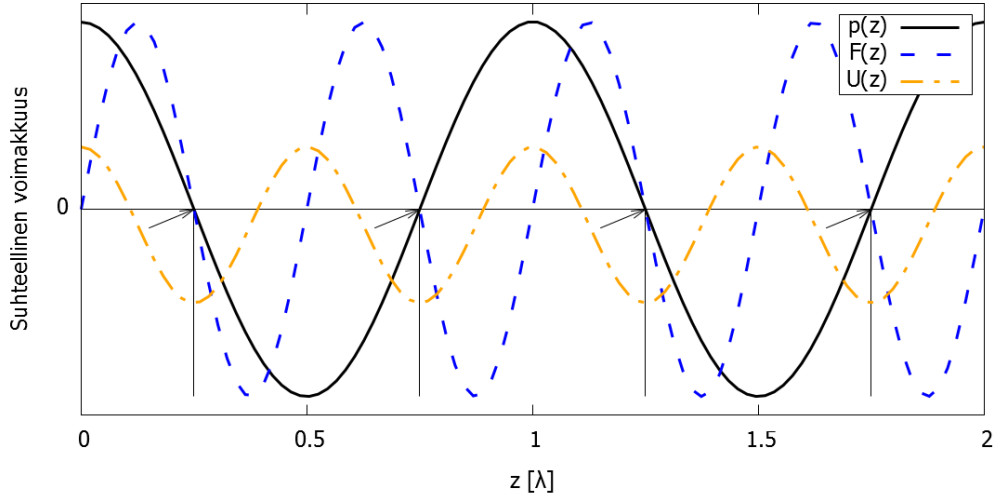
$$\langle p^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} p_0^2 \cos^2(\omega t) \cos^2\left(\frac{\omega}{c_0} z\right) dt = \frac{p_0^2}{2} \cos^2\left(\frac{\omega}{c_0} z\right) \quad (10)$$

$$\langle |\mathbf{v}|^2 \rangle = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \frac{p_0^2}{\rho_0^2 c_0^2} \sin^2(\omega t) \sin^2\left(\frac{\omega}{c_0} z\right) dt = \frac{p_0^2}{2\rho_0^2 c_0^2} \sin^2\left(\frac{\omega}{c_0} z\right). \quad (11)$$

Näillä voidaan yhtälöistä (5) ja (1) laskea potentiaali ja kappaleeseen kohdistuva voima:

$$U = \pi R^3 \frac{p_0^2}{\rho_0 c_0^2} \left(\frac{1}{3} \cos^2\left(\frac{\omega}{c_0} z\right) - \frac{1}{2} \sin^2\left(\frac{\omega}{c_0} z\right) \right) \quad (12)$$

$$F = \frac{5}{6} \pi R^3 \frac{p_0^2 \omega}{\rho_0 c_0^3} \sin\left(2\frac{\omega}{c_0} z\right) \hat{\mathbf{k}}. \quad (13)$$



Kuva 1: Akustisen kentän paine p , Gor'kovin potentiaali U ja siitä laskettu voima F . Nuolilla merkattu pisteet, joissa voima on palauttava ja joihin kappale siis asettuu.

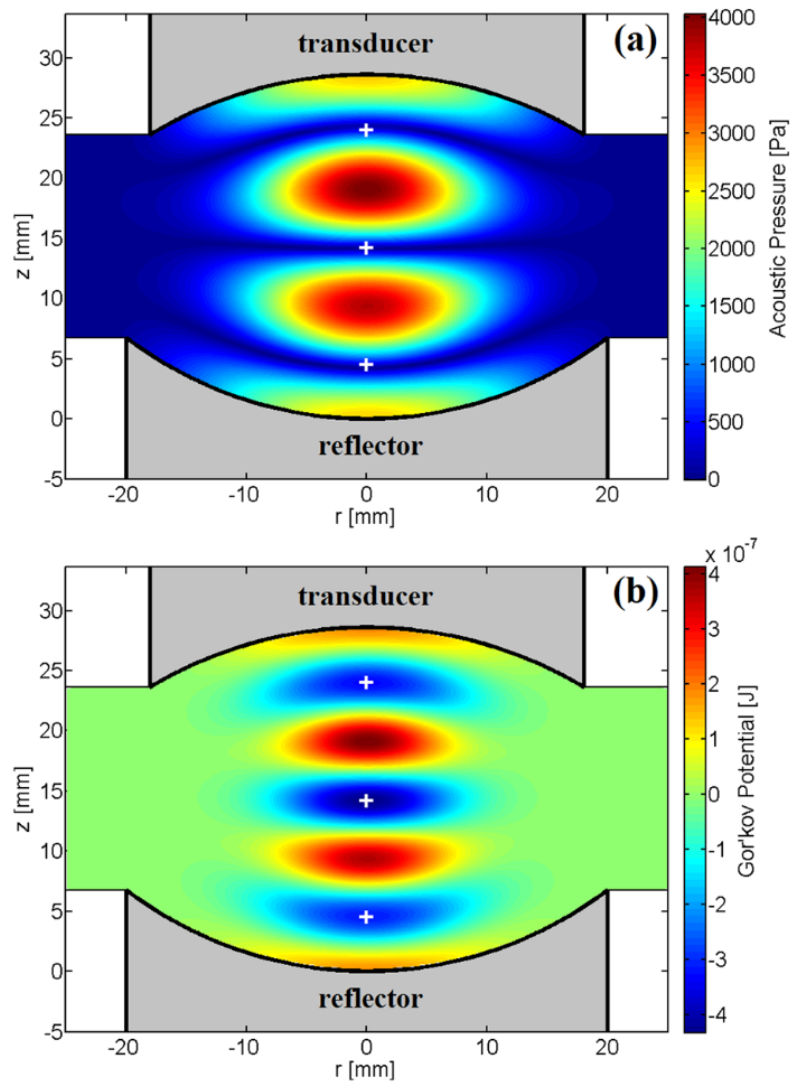
Akustisen paineen ja voiman kuvaajat on esitetty kuvassa 1. Kuvaajasta näkee, miten voima saa kappaleen asettumaan kentän solmukohtiin potentiaaliminimiin.

Kuvassa 2 on Perez et al [11] esittämä simulaatio yksinkertaisen laitteen muodostamasta akustisesta kentästä. Gor'kovin potentiaali laskettiin halkaisijaltaan 3 mm kappaleelle, kun väliaineena on ilma. Simulaatioon on merkattu kolmen kappaleen sijainnit potentiaaliminimien kohdalle. Tosiasiassa kappaleet asettuisivat hieman näiden alapuolelle, sillä painovoiman vaikutusta ei ole simulaatiossa huomioitu.

1.3 Akustisen levitaation menetelmiä

Akustisen levitaation laitteita on toteutettu yksittäisestä ultraäänisarvesta ja heijastuspinnasta tai kahdesta toisiaan kohti osoittavasta ultraäänisarvesta. Ultraäänisarvien tilalla on myös käytetty pienistä antureista koostuvia ryppäitä. Ryppäillä on myös toteutettu yksipuolisia levitaattoreita jotka eivät vaadi vastakkaista ryppäitä tai heijastuspintaa. Ultraäänisarvelle muita termejä ovat akustinen aalto-opas, akustinen torvi, sonotrodi, ultraäänisauva ja ultraäänisormi [12].

Jos laitteessa vastinkappaleena on heijastuspinta, perustuu se systeemin reso-



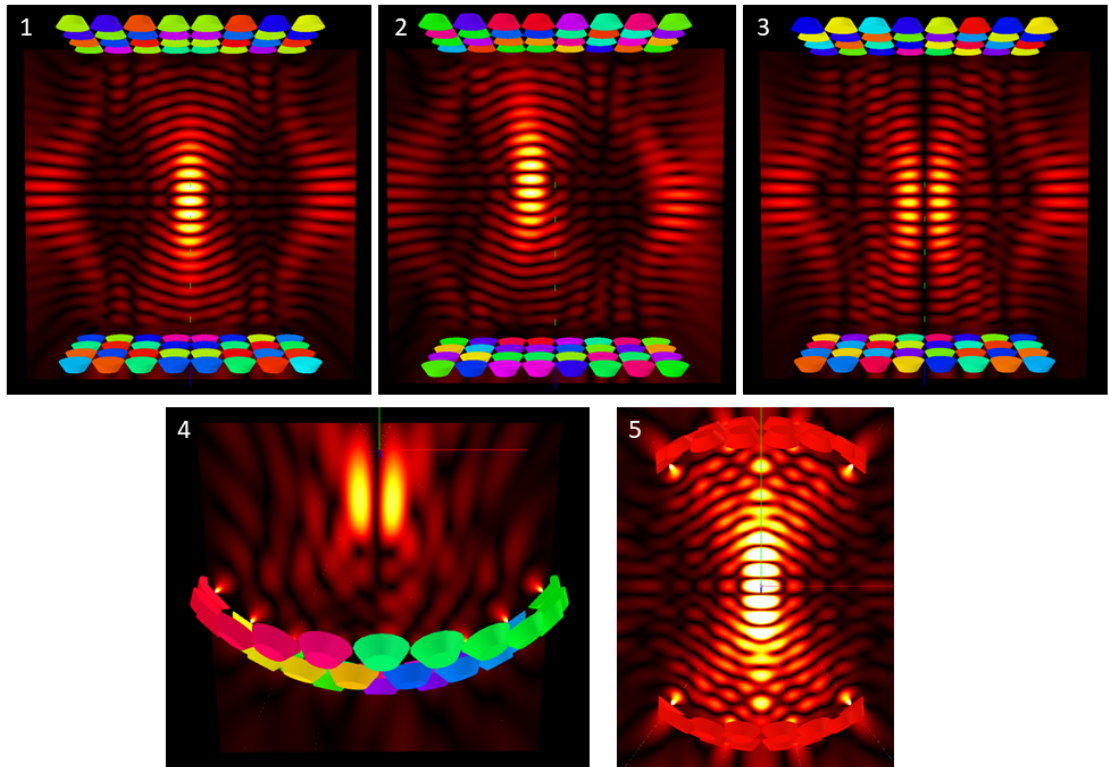
Kuva 2: Simulaatio akustisen kentän paineesta ja Gor'kovin potentiaalista [11].

nanssiin. Tällöin anturin ja heijastuspinnan välinen etäisyys täytyy kalibroida sopivaksi, jotta seisova aaltoliike voisi muodostua. Tällaiset laitteet mahdollistavat suuren akustisen kentän amplitudin, mikä mahdollistaa tiheiden kappaleiden levitaation. Näissä laitteissa levitointua kappaletta ei voi liikuttaa, sillä interferenssikuvio riippuu suoraan laitteen rakenteesta. Laitteen kalibraatio voi myös olla ongelmallista, sillä esimerkiksi lämpötilan muuttuessa voi ultraäänisarven taajuus muuttua, jolloin heijastuspinnan etäisyys pitää kalibroida uudestaan.

Jos laite koostuu kahdesta vastakkaisesta ultraäänisarvesta tai anturiryppästä, syntyy interferenssikuvio näiden synnyttämistä vastakkaisiin suuntiin etenevistä aalloista. Tällöin laite on ei-resonoiva ja ääniaaltoja heijastavia pintoja pyritään itseasiassa välttämään. Tällaisessa laitteessa interferenssikuvio on vähemmän riippuvainen laitteen muodosta ja kappaletta voi liikuttaa esimerkiksi laitteen puoliskojen välisellä vaihesiirrolla.

Uusimmat laitteet koostuvat juuri anturiryppäistä. Ryppäät voivat olla esimerkiksi tasomaisia tai pallon kalotin muotoisia. Tasomaisilla laitteilla interferenssikuvioita ja siten muodostuvia solmuja voi siirtää antureiden vaihesiirrolla kolmessa ulottuvuudessa. Kalotin muotoisilla solmut asettuvat ryppäiden väliselle akselille. Kalotin muotoisilla ryppäillä akustisen kentän amplitudi laitteen keskellä on suurempi kuin tasomaisilla, sillä antureiden suuntaus kohdistuu sinne paremmin. Ne ovat myös helpompia ohjata, sillä solmukohtaa ei tarvitse muodostaa antureiden välisellä vaihesiirrolla, joten jokaista anturia ei tarvitse ohjata erikseen. Kuvan 3 ruuduissa 1 ja 2 on esitetty solmukohdan siirtäminen tasomaisessa levitaattorissa muuttamalla antureiden keskinäisiä vaihesiirtoja. Ruudussa 5 on esitetty kahdesta kalotin muotoisesta osasta koostuva levitaattori, jossa solmukohta muodostuu laitteen keskipisteeseen ilman antureiden välisiä vaihesiirtoja.

Levitaation mahdollistava solmun ympäristössä oleva interferenssikuvio voi olla vaak- tai pystysuora. Vaakasuora kuvio luo vakaan levitaatiopisteen silloin kun kap-



Kuva 3: Erilaisia levitaattorin konfiguraatioita ja interferenssikuvioita. Antureiden eri värit kuvaavat niiden välisiä vaihesiirtoja. Simulaatiot paineen amplitudista Marzo et al kehittämällä simulaatio-ohjelmalla [14].

paleen molemmilla puolilla on anturirypäs, tai toisella puolella anturirypäs ja toisella heijastuspinta. Pystysuoralla interferenssikuvioilla levitaatiovoiman pystysuora komponentti on jopa suuruusluokan pienempi kuin vaakasuoralla kuviolla mutta sillä voi esimerkiksi toteuttaa levitaatiota yksipuolisella laitteella [13]. Kuvan 3 ruudussa 3 on esitetty pystysuora kuvio tasomaisella levitaattorilla, ruudussa 4 yksipuolisella kulhon muotoisella levitaattorilla

Pystysuoralla interferenssikuvioilla kappaleen pyörimistä voi hallita kuviota pyörittämällä, tällä on saavutettu 4 kHz pyörimisnopeus [15]. Tässä hallinta rajoittuu kuitenkin vain laitteen pysty akselin suuntaiseen pyörimisliikkeeseen, täydellistä kolmiulotteista orientaation hallintaa ei ole vielä osoitettu [16].

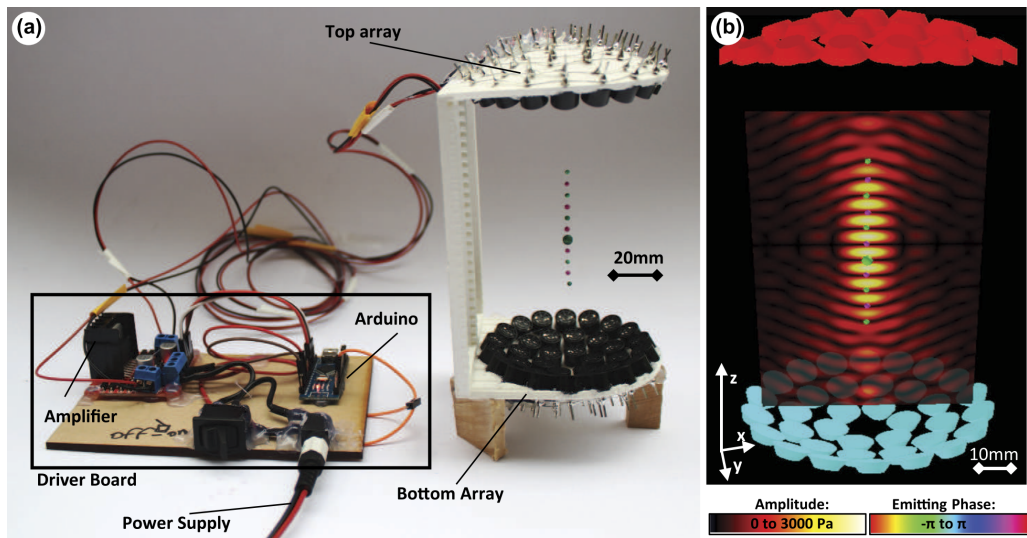
1.4 TinyLev

Tässä työssä valmistetun levitaattorin pohjana on käytetty TinyLev -akustista levitaattoria [17]. Laite koostuu käytännössä Arduino Nano -mikro-ohjaimesta, signaalinvahvistimesta ja 72 ultraäänianturista. Anturit on asetettu pallon kehälle kahdeksi kalotiksi, jolloin ne muodostavat keskelle polttopisteen, jossa akustisen kentän amplitudi on riittävä kannattelemaan pieniä esineitä. Arduino lähettää vahvistimen kautta antureille signaalin niiden resonanssitaajuudella. TinyLev-laite näkyy kuvassa 4.

Laitteessa käytetyt anturit ovat alun perin etäisyyden mittaamiseen tarkoitettuja. Niiden havaittiin olevan riittävän tehokkaita, tasalaatuisia ja halpoja soveltuakseen käyttöön levitaattorissa. Tyypillisesti näiden resonanssitaajuus on 40 kHz. Niitä ohjataan kanttiaallolla, mutta antureiden mekaanisten osien hitauden takia syötetty kanttiaalto synnyttää lähestulkoon sinimuotoisen ääniaallon. Antureiden ohjaamiseen on valittu Arduino Nano mikro-ohjain ja L297N vahvistin. Laitteen runko koostuu kahdesta 3D-tulostetusta kalotista, johon anturit on asetettu. Muodosta johtuen laitteen keskelle muodostuu polttopiste, jonka molemmin puolin laitteen akselin suuntaisesti syntyy paineen minimejä ja maksimejä. Rungon rakenteessa on pyritty minimoimaan heijastukset, koska ne aiheuttavat hankalasti ennustettavia interferenssikuvioita. Ylemmän ja alemman kalotin antureita voi ohjata erikseen, jolloin näiden välistä vaihesiirtoa muuttamalla kappaleita voi siirtää ylös tai alas. [17]

2 Jauheiden varautuminen

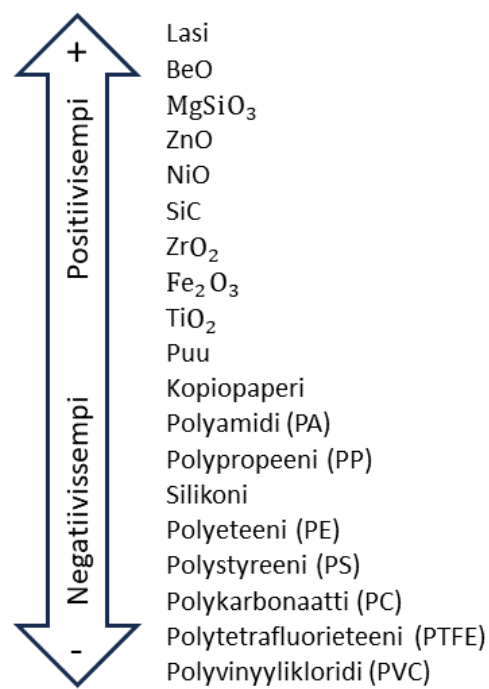
Jauheen hiukkaset varautuvat triboelektrisen ilmiön kautta. Arkikielisemmin voidaan puhua hankaussähköstä. Ilmiön taustasta ei ole vielä täyttä selvyyttä, sen aiheuttajiksi on esitetty kappaleiden polarisoituminen sekä elektronien, ionien ja



Kuva 4: TinyLev järjestelmä: vasemmalla rakenne, jossa kaiutinryppäitä ohjataan Arduinolla ja vahvistimella, oikealla hahmotelma äänen amplitudista laitteen sisällä [17].

materiaalipalasten siirtyminen kappaleiden välillä. Oletettavasti kussakin vuorovai-
kutuksessa on mukana useampi näistä tekijöistä. [1]

Kappaleiden varautumiseen on havaittu vaikuttavan kappaleiden materiaali, pin-
tojen ominaisuudet ja kosketuksen luonne. Eri materiaalia olevien kappaleiden väli-
sessä kosketuksessa materiaalin ominaisuudet ovat yleensä varauksen muodostumi-
sessa dominoiva tekijä. Tästä syystä materiaaleja on jaettu triboelektriseen sarjaan,
jonka eri päissä olevat materiaalit käytännössä aina varaavat toisiaan samalla ta-
valla. Esimerkiksi kuvan 5 sarjan mukaan Polyeteenin (PE) ja lasin kosketuksessa
lasi varautuu positiivisesti ja PE negatiivisesti. Triboelektrinen sarja ei kuitenkaan
ole aukoton tai lineaarinen. Joissain tilanteissa muut varauksen muodostumisen te-
kijät voivat nousta dominoiviksi, ja eri mittausmenetelmillä onkin saatu erilaisia
tuloksia sarjan järjestykselle. Joillakin materiaaliyhdistelmillä sarjan on myös ha-
vaittu olevan syklinen: esimerkiksi lasi varautuu negatiivisesti silkin suhteen, silkki
negatiivisesti sinkin suhteen ja sinkki negatiivisesti lasin suhteen. [1, 18]



Kuva 5: Yksi esitys triboelektrisestä sarjasta. Näytteiden varautuminen elohopean suhteen. Pohjautuu artikkeleiden [19, 20] tietoihin.

Jos kappaleet ovat hyvin lähellä toisiaan triboelektrisessä sarjassa tai peräti samaa materiaalia, korostuu pintojen ominaisuudet ja kosketuksen luonne. Pienet kappaleet varautuvat yleensä negatiivisesti ja vastaavasti suuret positiivisesti. Tämä saattaa johtua siitä, että pienempi kappale altistaa suuremman osan pinta-alastaan kosketuksessa ja siten menettää varauksenkuljettajia nopeammin. Vastaava ilmiö syntyy, jos kahta sauvaa hieroo toisiinsa niin, että yksi koskee koko pituudeltaan ja toinen vain yhdestä pisteestä. Silloin yhdestä pisteestä koskeva menettää enemmän varauksenkuljettajia. [1, 21]

Varautumisen simulaatiot ovat hankalia, sillä kilovoltin suuruusluokan jännitteiden muodostamiseksi tarvittava varaustiheys on vain $10^{-4} \frac{\text{C}}{\text{m}^2}$, mikä vastaa yhtä elektronia 100 000 pinta-atomia kohti. Simulaation tarkkuus täytyisi siis olla suuruusluokkaa 1/100 000. Lisäksi kontaktissa ei siirry vain yksittäisiä varauksenkuljettajia, vaan useita molempiin suuntiin, ja kokonaisvaraus syntyy pienestä poikkeamasta näiden liikkeessä. [1]

2.1 Varautumisen mittausmenetelmiä

Suurempien kappaleiden varauksia voi mitata koskettamalla niitä toisiinsa ja tarkastelemalla paikallisesti muodostuneita varauksia esimerkiksi elektrometrillä [22]. Pienillä kappaleilla varauksien mittaaminen on vaikeampaa, sillä kappaletta on vaikea käsitellä niin ettei samalla vaikuta varautuneeseen alueeseen. Millimetrien suuruusluokan kappaleilla mittauksia on toteutettu törmäyttämällä niitä ja mittaamalla niihin kertynyt varaus tai niiden käytös ulkoisessa sähkökentässä.

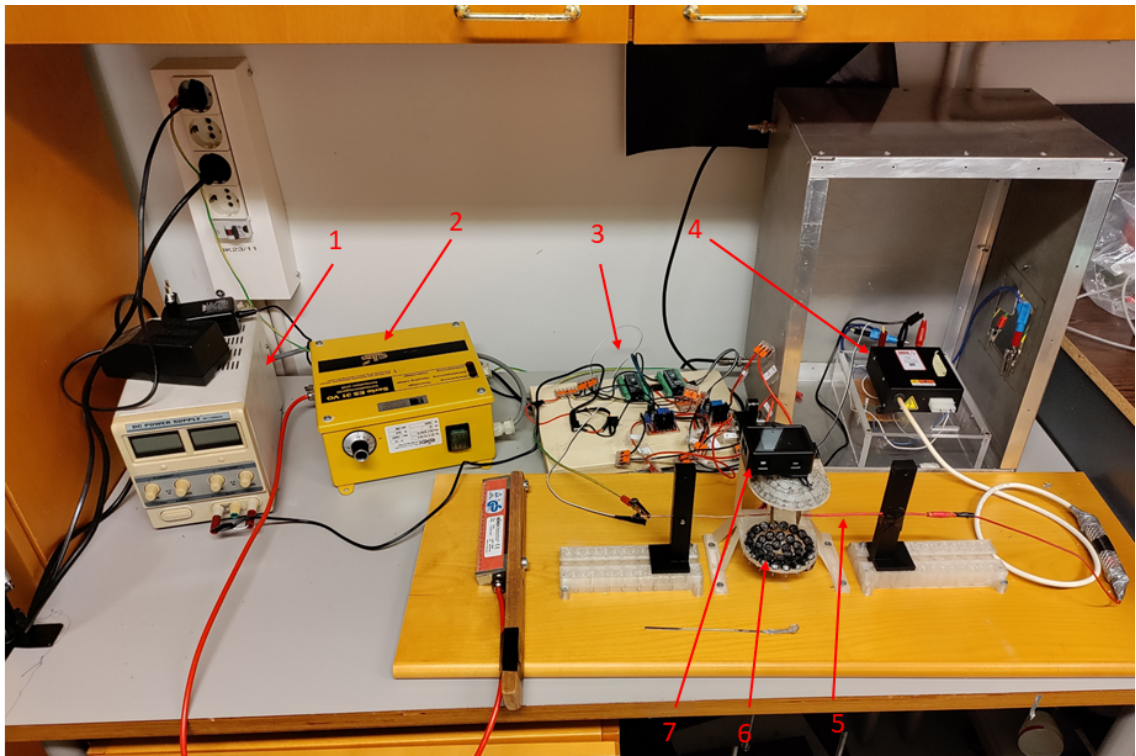
Esimerkiksi kappaleita on pudotettu niin että ne ovat törmänneet toiseen mittattavaan kappaleeseen tai suurempaan levyyn, ja sitten Faradayn kuppiin jossa on mitattu syntynyt varaus [23, 24]. Toisissa kokeissa on tyhjiökammiossa pudotettu kappaleita ja niiden kanssa kamera. Kappaleiden törmätessä toisiinsa ja varautuessaan niiden liikeradat muuttuvat, näin varauksen suuruus voitiin määritellä vi-

deoanalyysin perusteella [25, 26]. Akustisella levitaatiolla on pompoteltu kappaletta alumiinilevyn päällä. Jokaisen pompun jälkeen laitteessa on kytketty päälle muuttuva sähkökenttä ja kameralla mitattu kappaleen resonanssitaajuus ja -amplitudi. Näistä on päätelty kappaleeseen syntynyt varaus [27]. Akustisella levitaatiolla on mitattu vastaavalla tavalla kahden kappaleen törmäyksissä syntyvää varautumista. Akustiseen kenttään on asetettu tappi, joka jakaa interferenssikuvion synnyttäen kaksi potentiaaliminimiä. Jos tapin veti kentästä pois ja asetti takaisin yhdistyivät potentiaaliminimit hetkeksi. Tällöin kappaleet törmäsivät toisiinsa, kimposivat, ja asettuivat uudestaan omiin potentiaaliminimeihinsä. Kappaleiden varautumisen muutosta mitattiin levitaation aikana tarkastelemalla niiden resonanssiamplitudia muuttuvassa sähkökentässä [28].

Hyvin hienojakoisille mikrometrin suuruusluokan jauheille edellä kuvatuskaltaisen yksittäisten hiukkasten käsittely on kuitenkin hankalaa. Eräs näille käytetty mittaussuunnitelma on jauhepeti, johon on ilmasuihkulla muodostettu suihkulähde. Pedin yläpuolelle on asetettu elektrometri, jolla on mitattu sen lähelle tulleiden hiukkasten varaus [29]. Toisessa menetelmässä jauheita on valutettu putkea pitkin Faradayn kuppiin. Aluksi jauhe varautui kosketuksesta putken kanssa, mikä sai sen tarttumaan putken pintaan. Näin pinnoitettuun putkeen valutettiin toista jauhetta, jolloin voitiin mitata jauheiden välistä triboelektristä ilmiötä. [30].

Näissä molemmissa mittaussuunnitelmissä hiukkasten kokojakauma vaikuttaa oleellisesti niiden liikkeeseen ja siten mittaustulokseen. Tulosten kvantifointi on myös hankalaa, sillä elektrometrille tai faradayn kuppiin asti päätyy vain osa jauheen hiukkasista, ja varattuja hiukkasia jää jauhepetiin tai putken seinämään kiinni.

Tässä työssä esitetty menetelmä mahdollistaa uudenlaisen jauheiden ominaisuuksista vähemmän riippuvaisen triboelektrisen varauksen mittaamisen.



Kuva 6: Koelaitteiston komponentit. 1: Säädetty virtalähde, 2: Deionisaattori, 3: Ohjauspiiri, 4: Korkeajännitelähde, 5: Korkeajännitteen elektrodit, 6: Levitaattori, 7: Kamera

3 Koelaitteisto

Laitteisto koostuu itse levitaattorista, korkeajännitelähteestä, näyttökeräyspinnasta ja deionisaattorista. Levitaattori koostuu kahdesta anturiryppästä, niitä ohjaavasta elektronikasta ja säädetystä laboratoriovirtalähteestä. Lisäksi laitteistoon on yhdistetty kamera, joka kuvaa näyttöä toiminnan aikana. Levitaattorista on kaksi konfiguraatiota, joissa on erilaiset anturiryppäiden muodot. Nämä mahdollistavat erilaisten näyttöiden levitaation ja analysoinnin. Laitteisto on esitetty kuvassa 6 ja konfiguraatiot kuvassa 7.

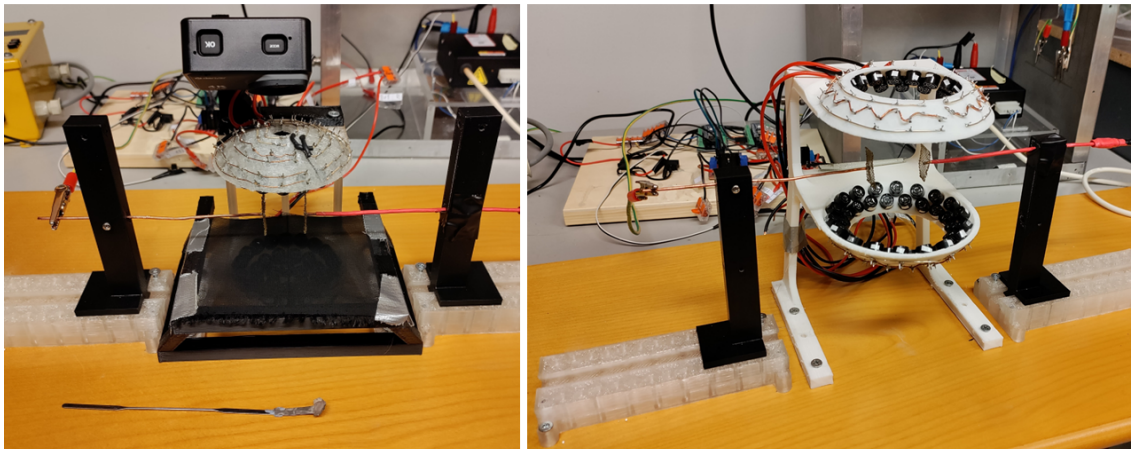
3.1 Levitaattorin rakenne

Levitaattori pohjautuu TinyLev-järjestelmään, johon on tehty tiettyjä muutoksia. Laitteen runko on valmistettu 3D-tulostamalla, sillä se on helpoin tapa valmistaa yksittäisiä monimutkaisen muotoisia kappaleita. Runko on suunniteltu niin että anturit asettuvat useampaan renkaaseen muodostaen pyörähdyssymmetrisen rakenteen. Anturit on pakattu renkaille mahdollisimman tiiviisti, sillä antureiden väliin jäävä tila heikentää levitaatiovoimaa. Ensinnäkin kyseisessä paikassa ei ole anturia tuotamassa signaalia, toisekseen kaikki ylimääräiset pinnat voivat heijastaa ääniaaltoja ja aiheuttaa ei toivottuja interferenssejä.

Konfiguraatio A muodostuu kahdesta pallon kalotista. Pallon halkaisijaksi valittiin 95 mm, sillä suurin pystysuora voima on havaittu 90 mm halkaisijan laitteella [17], ja tämä jättää käyttäjälle tilaa missä työskennellä. Kunkin kalotin keskipisteeseen on jätetty 10 mm aukko, joka mahdollistaa jauheen putoamisen laitteesta ja kameran asettamisen kuvaamaan suoraan ylhäältä. Anturit on asetettu kolmeen renkaaseen, joissa on 6, 12 ja 18 anturia.

Konfiguraatiossa B ylä- ja alaosassa olevat reiät on laajennettu halkaisijaltaan 65 mm suuruisiksi. Pallon halkaisija kasvatettiin 115 mm suuruiseksi, jotta vyöhykkeet joihin anturit asettuvat olisivat riittävän erillään toisistaan. Anturit on tässä asetettu kahteen renkaaseen, joissa on molemmissa 18 anturia. Tämä konfiguraatio tuottaa heikomman levitaatiovoiman, mutta mahdollistaa tarkemman näytteen talteenoton ja analyysin.

Laitteeseen valitut ultraäänianturit ovat mallia Camdenboss CTD40K1007R. Nämä valittiin helpon saatavuuden perusteella ja koska ne ovat varsin samanlaisia kuin TinyLev järjestelmässä käytetyt Murata MA40S4S -anturit [17]. Valittujen antureiden halkaisija on 10 mm ja resonanssitaajuus on 40 ± 1 kHz. Antureita käsitellessä on havaittu, että niiden polariteettimerkintä ei ole luotettava, joten se on tarkistettu erikseen oskilloskoopilla [17]. Jos anturin navat kytkee oskilloskoopin



Kuva 7: Levitaattorin rakenteen eri konfiguraatit. Vasemmalla konfiguraatio A, oikealla B. Vasemmalla on asetettu paikalleen keräyskalvo, levitaattorin alaosan voi juuri nähdä sen läpi. Vasemmassa kuvassa laitteen edessä on näytteiden asettamiseen tarkoitettu lusikka.

sisääntuloon ja painaa anturin etupintaa kynällä, syntyy oskilloskooppiin signaali, jonka muodosta voi päätellä anturin polariteetin. Itse polariteetilla ei ole merkitystä, kunhan se on kaikilla kytkennän antureilla sama.

Laitteiston virtalähteenä toimii säädettävä laboratoriovirtalähde. Lähdejännitteen portaaton säätö on olennaista, sillä se vaikuttaa akustisen kentän amplitudiin. Tarvittava amplitudi riippuu tarkasteltavan näytteen raakoosta ja tiheydestä ja se pitää siis määrittää jokaiselle näytteelle erikseen. Liian suurella amplitudilla näytteestä tulee epävakaa ja se voi pudota pois akustisesta kentästä, liian pienellä amplitudilla taas levitaatiovoima ei riitä kannattelemaan näytettä.

3.2 Ympäröiva laitteisto

Näytteen triboelektrisen varauksen määrittämiseksi käytetään levitaation alussa deionisaattoria ja lopussa korkeajännitelaitetta. Prosessin päätteeksi näyte pudotetaan laitteen konfiguraatiosta riippuen keräyskalvolle tai -pinnalle. Laitteeseen on myös kytketty kamera, jolla näytteen liikettä voi seurata prosessin aikana.

Deionisaattorilla käsitellään näytettä levitaation alussa, jotta näytteessä ennestään esiintyvät varaukset saadaan purettua. Näin kaikki mitattu sähköinen varautuminen johtuu näytteessä levitaation aikana tapahtuneista ilmiöistä. Käytetty deionisaattori on mallia Eltex R44 -ionisaattoritanko. Toimintaan testattiin myös ionisaattoripuhallinta, mutta se osoittautui huonosti toimivaksi, sillä sen aiheuttama ilmavirta häiritsi levitaattorin toiminta.

Korkeajännitelähteellä muodostetaan sähkökenttä, joka jakaa näytteen siihen syntyneen polariteetin mukaan. Tämä perustuu Coulombin lakiin

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (14)$$

jonka mukaan kappaleeseen kohdistuva voima \mathbf{F} riippuu sen varauksesta q ja ulkoisesta sähkökentästä \mathbf{E} . Erimerkkisiin varauksiin siis kohdistuu vastakkaisuuntainen voima. Sähkökenttä muodostetaan levitaatioalueen sisälle näytteen välittömään ympäristöön, jotta se olisi mahdollisimman voimakas mutta läpilyöntiä korkeajännitteen elektrodilta muuhun laitteistoon ei tapahtuisi. Käytetty jännite on 5 kV luokkaa ja elektrodien etäisyys toisistaan 35 mm. Laitteen keskipisteen ympäristössä sähkökentän voi olettaa homogeeniseksi, joten sähkökentän voimakkuus saadaan kaavalla

$$E = \frac{V}{r}, \quad (15)$$

missä V on elektrodien välinen potentiaaliero ja r niiden välinen etäisyys. Sähkökentän voimakkuus on siis suuruusluokkaa 100 kV/m. Jännitettä voi muuttaa käsiteltävälle näytteelle sopivaksi. Esimerkiksi jos näytteessä esiintyy voimakasta varautu-

mista, voi osa siitä karata levitaation loukusta liian voimakkaan sähkökentän takia. Elektrodit on muodostettu akustisesti permittiivisestä metalliverkosta, jotta ne häiritisivät levitaattorin synnyttämää interferenssikuvioita mahdollisimman vähän. Ne voi myös helposti siirtää sivuun näytteen asettamisen ajaksi.

Kun levitaatio katkaistaan, putoaa näyte keräyskalvolle. Näyte voidaan tästä kerätä kirkkaalla teipillä ja siirtää mikroskoopin näytelasille. Mikroskoopilla voi tarkastella, miten näytteen eri materiaalit ovat jakautuneet. Jos näytteeseen oli muodostunut varauksia, kulkee niiden jakauma sähkökentän suuntaisesti. Konfiguraatiossa A keräyskalvo asettuu levitaatioalueen sisälle, joten sen tulee olla hyvin akustisesti permittiivinen, jotta sen paikalleen asettaminen ei häiritse levitaation toimintaa. Tämä yleensä vaatii materiaalin huokoisuutta, samalla keräyskalvon tulisi olla riittävän tiivis, että hienojakoinen jauhenäyte ei pääse putoamaan sen läpi. Paras tähän löydetty materiaali on ohut sifonkikangas. Konfiguraatiossa B keräyspinnan voi valita vapaammin, sillä näyte pääsee putoamaan levitaattorin pohjassa olevasta reiästä. Laitteen alle voi myös asettaa muita mittalaitteita, mutta niitä ei ole tässä työssä toteutettu.

Levitaattorin huipulle on myös asetettu kamera, jolla näytteen liikkeitä voi tarkastella levitaation aikana. Tätä voi käyttää erityisesti laitteen parametrien hienosäätöön, mutta myös kvalitatiiviseen arvioon näytteen varautumisesta ja levitaation onnistumisesta.

3.3 Laitteiston ohjaaminen

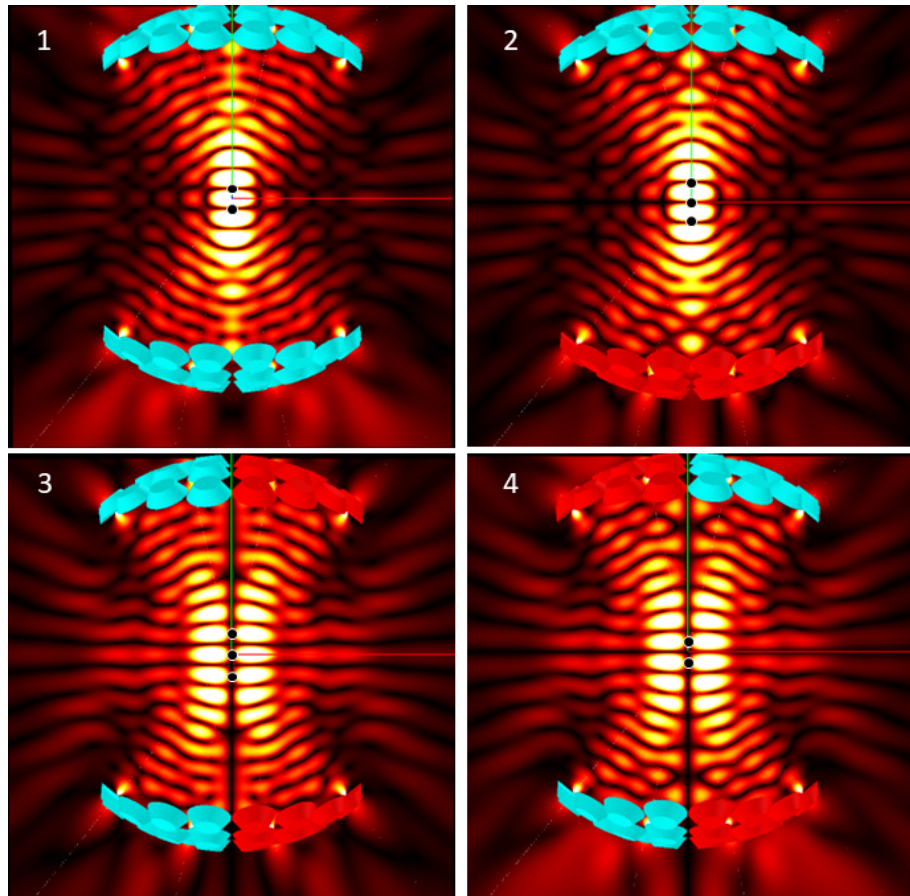
Laitteen ohjaamiseen käytetään kahta Arduino Nano -mikro-ohjainta ja kahta L298N moottoriohjainmoduulia. Yksi Arduino tuottaa 40 kHz taaajuudella signaalia, joka syötetään vahvistimena toimiviin moottoriohjaimiin ja niistä edelleen levitaattorin ultraääniantureihin. Toinen Arduino huolehtii laitteen käyttöliittymästä. Arduinojen toiminta on jaettu, koska levitaatiota ohjaava signaali ei saa missään vaiheessa

häiriintyä käyttöliittymään liittyvien prosessien ajaksi.

Levitaattorin anturiryppäät on jaettu pystyakselin suhteen kahtia. Kaikkia neljää näin syntynyttä osaa voidaan ohjata erikseen, mikä mahdollistaa interferenssikuvion tarkan säätämisen. Jos ylä- ja alaosan välille muodostaa vaihesiirron siirtyy interferenssikuvio pystysuunnassa ylös tai alas. Jos vasemman ja oikeanpuoleiset osat kulkevat samassa vaiheessa muodostuu pyörähdyssymmetrinen kuvio, jossa loukut ovat vaakasuorassa. Jos nämä kulkevat vastakkaisessa vaiheessa muodostuu keskeltä jakautunut kuvio, jossa loukut ovat pystysuorassa. Pystysuorien loukkujen synnyttämä pystysuuntainen voima on merkittävästi vaakasuorien loukkujen vastaavaa voimaa pienempi, jälkimmäisen on havaittu olevan noin kymmenkertainen [13]. Pyörähdyssymmetrisessä kentässä jauhenäytteet alkavat kuitenkin helposti pyöriä ja tämän johdosta sinkoutua pois. Pystysuoraan halkaistu kenttä estää tämän pyörimisen ja siten vakauttaa näytteen.

Kuvassa 8 näkee miten hiukkaset asettuvat eri interferenssikuvioiden loukkuihin. Hiukkanen asettuu muodostuneiden korkeapainealueiden väliin, joten jos vaakasuoralla loukulla laitteen keskipisteeseen muodostuu korkeapainealue, asettuvat hiukkaset hieman keskipisteen ylä- tai alapuolelle (kuva 8 ruutu 1). Vastaavassa pystysuoran loukun tapauksessa hiukkanen asettuu tasan keskipisteeseen (kuva 8 ruutu 3). Tästä johtuen jompaa kumpaa interferenssikuvioita täytyy siirtää pystysuunnassa, jotta hiukkasten sijainti olisi molemmissa moodeissa sama. Levitaatio osoittautui onnistuvan myös ilman tätä interferenssikuvion siirtoa, mutta tämä hienosäätö vakautti näytettä merkittävästi. Toimivat yhdistelmät ovat siis kuvan 8 simulaatioista ruudut 1 ja 4 tai 2 ja 3.

Parhaan tuloksen aikaansaamiseksi tulee eri kuvioita ajaa vuorotellen: vaakasuora loukku maksimoi levitaatiovoiman ja pystysuora vakauttaa näytteen pyörimistä vastaan. Ohjelma on jaettu kolmeen eri moodiin: yhdessä molemmat puolet kulkevat samassa vaiheessa, toisessa vasen puoli käännetään vastakkaiseen vaiheeseen ja



Kuva 8: Simulaatio paineen amplitudista Marzo et al kehittämällä simulaatio-ohjelmalla [14]. Siniset ja punaiset anturit ovat vastakkaisessa vaiheessa toisiinsa nähden. Kuviin on merkitty sijainnit, joihin kappaleet asettuvat laitteen polttopisteen ympäristössä.

kolmannessa oikea puoli. Moodeja 2 ja 3 käytetään vuorotellen, jotta vaiheen muutoksesta aiheutuvat mahdolliset häiriötekijät tasaantuisivat molemmille puolille.

3.3.1 Käyttöliittymä

Laitteen varsinainen käyttöliittymä koostuu laboratoriovirtalähteen jännitteensäädöstä ja yhdestä napista. Muut parametrit tulee säätää Arduinoissa suoraan.

Laitteen lähdejännite tulee säätää kullekin näytteelle sopivaksi, jotta levitaatio olisi vakaata. Jos kuitenkin lähdejännitettä kasvattaa levitaation aikana voi sillä

saada näytteen värisemään, mikä edesauttaa näytteen hiukkasten keskinäistä hankautumista ja triboelektrisen varauksen syntymistä. Tämä vaatii hienovaraisuutta, jotta näyte ei putoaisi kentästä pois.

Nappi sammuttaa levitaation ja käynnistää korkeajännitelaitteen. Tässä toiminnassa on lyhyt viive, jotta korkeajännitelaite ehtisi aktivoitua ja sähkökenttä muodostua ennen kuin näyte pudotetaan. Sähkökentän ei kuitenkaan tule olla päällä pitkään, jotta kentän vaikutus ei vääristäisi triboelektrisen varautumisen kehittymistä, saati kenttä suoraan polarisoisi näytettä.

Käyttöliittymän Arduinossa säädettävät parametrit ovat korkeajännitelähteen jännite ja korkeajännitteen aktivoinnissa esiintyvä viive. Levitaattorin ohjauksen arduinossa säädettävät parametrit ovat kunkin värähtelymoodin pituus jaksojen lukumääränä.

4 Koemittaukset

Laitteelle suoritettiin koemittauksia, joiden tarkoitus on osoittaa sen toimintakyky hienojakoisten jauheiden levitoimisessa ja triboelektrisen varauksen havainnoimisessa. Näyteaineina käytetyt jauheet olivat lasia, polyeteeniä (PE) ja solupolystyreeniä (EPS).

4.1 Käytetyt materiaalit

Triboelektrisen varautumisen mittauksissa käytettiin näyteaineina polyeteenikuulia mallia Cospheric CPMS-0.96 63-75 μm ja lasipalloja mallia Cospheric HGMS-0.42 63-75 μm . Molempien näytteiden halkaisija on siis 63-75 μm , PE-kuulien tiheys on 0.96 g/cm^3 ja lasipallojen tiheys on 0.42 g/cm^3 . Nämä valittiin koska niillä on tarkka kokojakauma ja muoto, ja koska ne ovat eri päissä kuvan 5 triboelektristä sarjaa. Näytteiden pitäisi siis kokea triboelektristä varautumista.

Näytteestä tehtiin seos, jossa oli kappalemäärältään noin 60% polyeteeniä ja 40% lasia. Tähän päädyttiin, sillä polyeteeniä havaittiin keräyskalvolla lasia vähemmän. Polyeteenikuulat ovat tiheämpiä, joten niitä saattoi varista levitaation aikana pois tai niitä saattoi pudota keräyskalvon läpi.

Levitaation toiminnan määrittämisessä käytettiin yllä mainittuja polyeteenikuulia ja lasipalloja, sekä halkaisijaltaan 125-250 μm PE-kuulia, 250-500 μm PE-kuulia ja 1 mm EPS-kuulia.

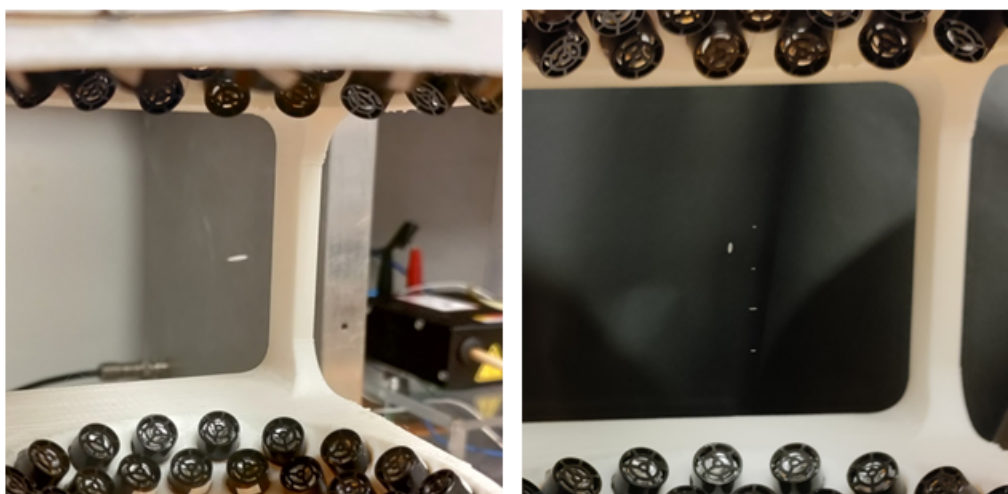
4.2 Levitaation toimintakyky

Levitaation toimintaa testattiin asettamalla näyte levitaattoriin ja nostamalla tai laskemalla laitteen lähdejännitettä, kunnes näyte ei ollut enää vakaa. Levitoitua näytettä pidettiin vakaana, jos se pysyi kyseisellä lähdejännitteellä levitaatiossa 30 sekunnin ajan. Mittaukset tehtiin molemmilla levitaattorin konfiguraatioilla. Käytetty jännitealue oli 4.2-15.0 V, koska tätä pienemmillä jännitteillä laite sammui ja suuremmilla laite voisi rikkoutua.

Kvalitatiivisesti havaittiin, että osa jauheesta varisi näytteen asettamisen aikana pois. Tämä oli minimoitavissa pitämällä kättä mahdollisimman vakaana, mutta ei täysin vältettävissä. Levitaation aikana näyte oli ohut ja pyöreä kiekko, tämä on nähtävissä kuvassa 9 vasemmalla. Jos sähkökenttä aktivoitiin, venyi näyte kentän suuntaisesti ja putosi levitaation katkettua jakautuen kentän suuntaisesti. Ylhäältä otettu kameran kuva levitaatiossa olevasta näytteestä on kuvassa 10.

Havaitut jännitteet on esitetty taulukossa I. V_{min} ja V_{max} ovat pienin ja suurin jännite, jolla näyte pysyi levitaatiossa. $V_{lisäys}$ on pienin jännite jolla näytteen sai asetettua levitaatioon. Kaikilla näytteillä $V_{lisäys} > V_{min}$, koska lusikka aiheutti pientä häiriötä akustiseen kenttään.

Konfiguraatiossa B näytteellä PE 63-75 μm havaittiin $V_{lisäys} > V_{max}$. Tällä jännitteellä näyte pysyi hetken aikaa levitaattorissa, mutta värisi voimakkaasti ja putosi

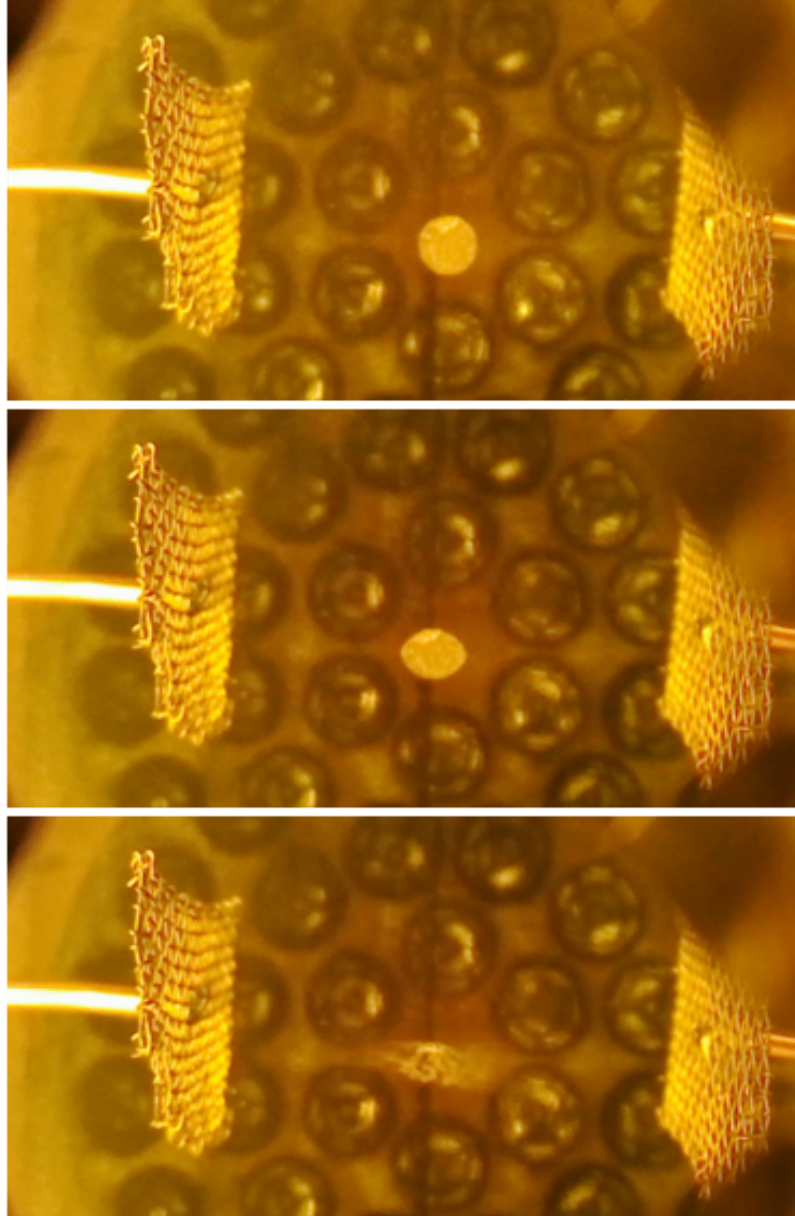


Kuva 9: Jauhe levitaatiossa: vasemmalla normaali toiminta, oikealla suurella lähdejännitteellä näyte jakautunut viiteen loukkuun.

pois, jos jännitettä ei laskenut vakaalle alueelle. Tällä näytteellä havaittiin myös, että levitaatio ei aina onnistunut aiemmin toimivaksi havaituilla parametreillä. Tämä saattaa johtua antureiden lämpötilanmuutoksesta tai huoneen ilmanvaihdon aiheuttamista ilmavirtauksista.

Näyte PE 125-250 μm oli molemmilla konfiguraatioilla altis pyörimään. Konfiguraatiossa B tämä aiheutti näytteen sinkoutumisen pois hyvin pian sen asettamisen jälkeen. Kalibraatio tälle aineelle voisi toimia muuttamalla laitteen vaihesiirron periodeja, mutta sitä ei tässä kokeessa testattu.

Hienojakoisimmilla jauheilla suurilla jännitteillä jauhetta asettui pieniä määriä useaan loukkuun. Lasinäytteellä tämä havaittiin 11-15 V jännitteellä. Tämän ja normaalin toiminnan ero on havainnollistettu kuvassa 9.



Kuva 10: Jauheen käyttäytyminen levitaatiossa. Ylimpänä ilman sähkökenttää, keskellä jauhekasa venyy sähkökentän vaikutuksesta, alimpana levitaatio on sammutettu ja jauhe putoaa jakautuen kentän suuntaisesti.

Konfiguraatio A			
Näyte	V_{min} [V]	V_{max} [V]	$V_{lisäys}$ [V]
Lasi 63-75 μm	4.2	7.0	6.0
PE 63-75 μm	6.0	7.8	7.2
PE 125-250 μm	6.9	10.5	7.4
PE 250-500 μm	9.3	10.7	9.4
EPS 1 mm	8.5	15.0	9.0

Konfiguraatio B			
Lasi 63-75 μm	4.2	6.5	6.5
PE 63-75 μm	6.0	7.0	7.5
PE 125-250 μm	-	-	-
PE 250-500 μm	7.9	9.0	8.6
EPS 1 mm	7.5	15.0	8.6

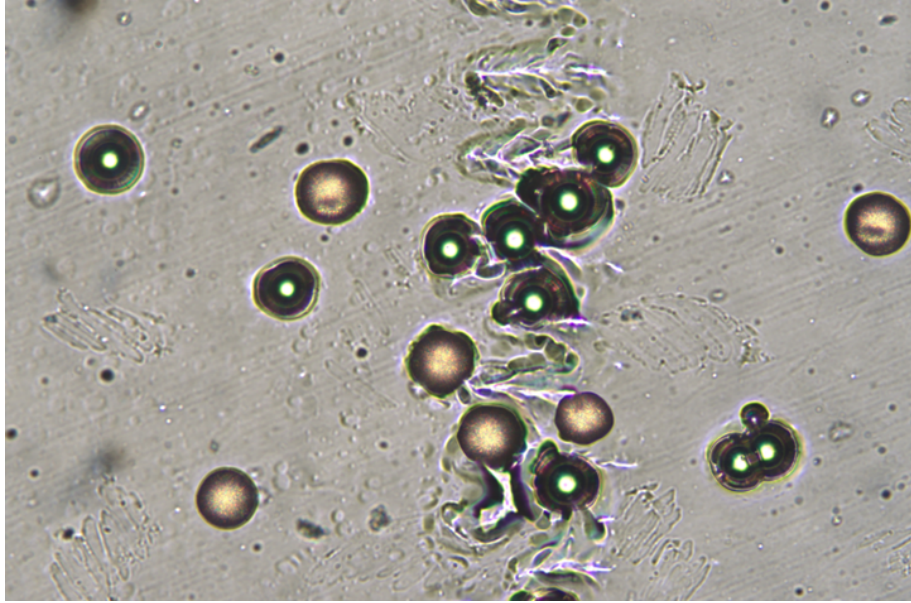
Taulukko I: Levitaation toimintaan vaaditut lähdejännitteet.

4.3 Triboelektrisen varauksen mittaaminen

Koemittaukset toteutettiin seuraavan kaavan mukaan.

- Jauhenäyte sekoitettiin niin, että siinä on kappalemäärän mukaan 60/40 jakouma PE-kuulia ja lasipalloja. Tähän käytettiin tarkkuusvaakaa ja valmistajan tietoja näyteaineiden tiheydestä ja raakoosta.
- Levitaattori käynnistettiin ja näyte asetettiin varovasti akustisesti permittii-visestä metalliverkosta tehdylle lusikalla.
- Näyte deionisoitiin.
- Nostamalla varovasti virtalähteen jännitettä näyte saatiin värisemään. Tämä toteutettiin useina muutaman sekunnin värinäpulsseina, joiden välissä jännite laskettiin, jotta näytteestä ei tulisi epävakaata. Tämän on tarkoitus tuottaa näytteessä hankaussähköä.
- Korkeajännitteen elektrodit siirrettiin paikalleen, korkeajännitettä ei vielä kytketty päälle.
- Näytteenottokalvo siirrettiin paikalleen.
- Korkeajännite aktivoitiin ja levitaatio sammutettiin. Näyte putosi näytteenottokalvolle jakautuen sähkökentän suuntaisesti.
- Näyte kerättiin kalvolta läpinäkyvällä teipillä ja siirrettiin mikroskooppilevyille. Mikroskoopin alla tarkasteltiin ovatko näytteen eri hiukkaset jakautuneet eri puolille.

Mikroskoopin alla tarkasteltiin näytteen jakaumaa sähkökentän suunnassa. Mikroskooppilevyyn tehtiin merkinnät 1 millimetrin välein ja siihen merkittiin levitaattorin keskipiste. Mikroskoopilla pystyi havaitsemaan 2 mm leveän kuvan, joten näyt-

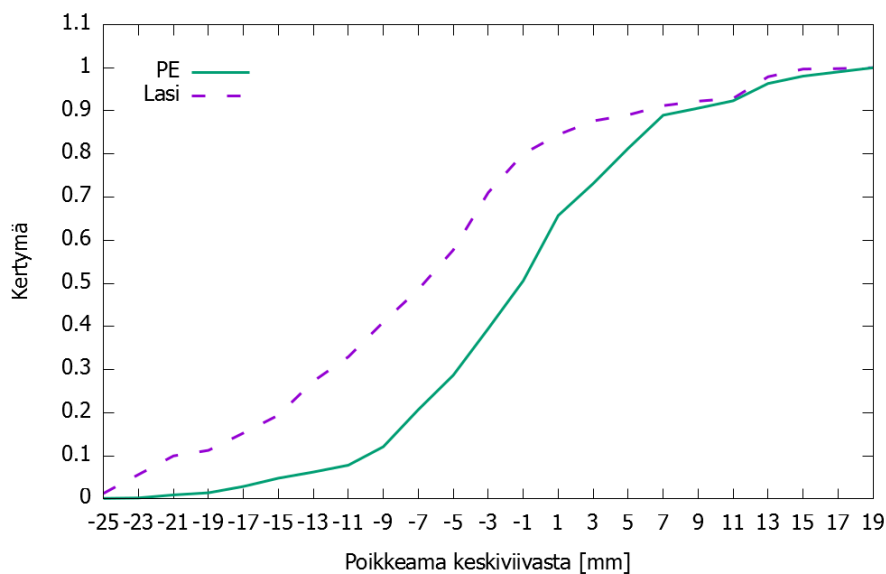


Kuva 11: Mikroskooppikuva näytteistä. Lasipallot muodostavat eräänlaisen linssin ja niiden keskeltä loistaa valo. Polyeteenikuulat ovat tasaisen matat.

teestä laskettiin hiukkasten määrä kullakin 2 mm leveällä kaistaleella keskipisteen molemmin puolin. Mikroskoopin havaintokuva on esitetty kuvassa 11.

Mittaus toistettiin 5 kertaa, saadut jakaumat normalisoitiin ja sitten laskettiin yhteen. Normalisointi suoritettiin, jotta mittaukset eivät painottuisi hiukkasten kokonaismäärän mukaan. Saatu jakauma on esitetty kuvassa 12. Kuvaajasta näkee, että lasin ja polyeteenin jakaumat painottuvat eri puolille näytettä. Keskiviivan positiivisella puolella oli korkeajännitteen positiivinen elektrodi. Polyeteenin voi siis päätellä varautuvan negatiivisesti ja vastaavasti lasin positiivisesti. Tulokset siis pitävät yhtä kuvan 5 triboelektrisen sarjan kanssa.

Mittauksissa mikroskooppilevyillä havaittiin 2000 lasipalloa ja 600 polyeteenikuulaa. Tämä siitä huolimatta, että mittauksissa käytetyssä jauheseoksessa oli enemmän polyeteeniä kuin lasia. Joko levitaatio itse tai näytteenottokalvon rakenne siis painottavat havaintoja kevyempiä lasipalloja kohti.



Kuva 12: Kappaleiden jakauman kertymä mikroskooppilevyllä.

5 Tulokset

5.1 Levitaation onnistuminen

Laite onnistuu levitoimaan pieniä määriä hienojakoisia jauheita. Laite testattiin 63-75 μm raekoon jauheella sekä karkeammilla, 150 μm , 250 μm ja 1 mm raekoolla. Karkeampi raekoko osoittautui helpommaksi levitoida, joten laitteella pystyy käsittelemään suurta osaa jauheiden tutkimuksessa kiinnostavista näytteistä.

Seoksissa voi syntyä tilanteita, joissa vain toista seoksen komponenttia voi levitoida kerrallaan, vaikka kullekin erikseen löytyisikin sopivat parametrit. Näin voi tapahtua, jos seoksen komponentit poikkeavat toisistaan merkittävästi joko tiheyden tai raekoon suhteen.

5.2 Laitteen säädön parametrit

Levitaation parametrejä tulee yleensä säätää eri näytteiden välillä. Onnistunut levitaatio edellyttää oikeaa amplitudia ja vaihesiirron periodisuutta. Liian pienellä

amplitudilla levitaattori ei pysty vastustamaan painovoimaa, liian suurella amplitudilla näytteestä sinkoaa hiukkasia yksitellen pois. Vaihesiirrossa tulee onnistua vastustamaan sekä painovoimaa riittävästi että estämään pyörimistä. Vaihesiirron periodisuus voi synnyttää näytteeseen ei toivottua liikettä. Nyrkkisääntönä voi pitää, että hienojakoisemmat näytteet tarvitsevat pienemmän amplitudin ja lyhyemmät vaihesiirron periodit. Suurempi amplitudi ja pidempi periodi kasvattavat levitaatiovoimaa ja tekevät interferenssikuvioista vakaamman, joten niistä on hyötyä, kun levitöi suurempia kappaleita, jotka eivät ole niin herkkiä näiden aiheuttamille häiriöille. Vaihesiirrossa vaaka- ja pystysuoran loukun toiminta-ajan suhde vaikuttaa tuotettuun kappaleita kannattelevaan ja pyörimistä estävään voimaan. Tiheämmät näytteet voivat hyötyä siitä, että lisää näytteitä kannattelevan vaakasuoran osuuden toiminta-aikaa.

Yleisesti laitteen kalibraatio on osoittautunut hankalaksi. Sopiva vaihesiirron periodi voi vaihdella 2 ja 150 jakson välillä, sopiva lähdejännite 5 V ja 15 V välillä. Näytteelle toimiva parametrien alue voi olla varsin kapea, esimerkiksi ± 1 V, ja sopivien parametrien haravointi siten työlästä. Parametrit voivat myös muuttua ympäristön vaikutuksesta, esimerkiksi lämpötilan muutos voi muuttaa tarvittavaa lähdejännitettä. Tällainen parametrien muutos on kuitenkin pientä ja helppo hienosäätää kullakin mittauskerralla. Vaihesiirrossa sopiva vaaka- ja pystysuoran loukun toiminta-ajan suhde osoittautui olevan 2:1, eli esimerkiksi 10 jakson ajan vaakasuora loukku ja 5 jakson ajan pystysuora. Tässä ei esiintynyt merkittävää variaatiota.

5.3 Varautuminen

Laitteella ei ole vielä toteutettu kvantitatiivisia varautumisen mittauksia. Laite on kuitenkin osoittanut, että sillä voidaan synnyttää ja havaita triboelektristä varautumista ja todentaa kappaleiden varauksen polariteetti. Käytetyllä mittausmenetelmällä saa suuntaa antavan tuloksen varautumisen voimakkuudesta: mitä enemmän

kuvassa 12 esitetyt materiaalien jakaumat poikkeavat toisistaan, sitä voimakkaampaa varautuminen on. Laitteen varautumisen mittaussuunnitelma soveltuu hienojakoisille jauheille, joille varautumisen mittaussuunnitelmat ovat tähän asti olleet puutteellisia.

Varauksen mittauksille ei kuitenkaan tehty referenssimittauksia: mittauksessa, jossa varautumiselle ei annettu aikaa deionisoinnin jälkeen tehtiin vain silmämääräinen havainto, että näyteaineet olivat sekoittuneet tasaisesti. Vastaavasti mittauksessa, jossa näytettä ei deionisoitu lainkaan havaittiin silmämääräisesti, että näytteiden jakautuminen oli voimakkaampaa kuin tässä esitetyissä mittauksissa.

6 Johtopäätökset

Työssä rakennettiin laite, jolla onnistuttiin levitoimaan hienojakoisia jauheita, mitä ei tämän tyyppisellä anturiryppäistä toteutetulla levitaattorilla tietävästi ole ennen tehty. Laitteella pystyy havaitsemaan jauheissa syntyvän triboelektrisen varautumisen syntymisen ja määrittämään näytteen komponenttien välisen polariteetin.

Laitteistossa on selkeitä kehitysmahdollisuuksia, erityisesti levitaattorin rengasmaisessa konfiguraatiossa B. Tämän voisi toteuttaa suuremmalla määrällä ultraääniantureita tai käyttäen suurempia ja siten tehokkaampia antureita. Esimerkiksi 16 mm halkaisijan anturit ovat hyvin saatavilla ja ovat osoittaneet kasvattavan levitaatiovoimaa merkittävästi TinyLev -levitaattorin kaltaisessa BigLev levitaattorissa [17]. Suurempi levitaatiovoima kasvattaisi käsiteltävissä olevien näytteiden kirjoa ja voisi myös tehdä levitaatiosta vakaampaa niille näytteille, joita nykyisellä laitteella pystyy käsittelemään. Vakaampi levitaatio helpottaisi kokeiden toteuttamista ja mahdollistaisi suurempien jauhemäärien levitaatiota kerrallaan, mikä parantaisi tulosten luotettavuutta.

Konfiguraatiossa B levitaattorin alle voi asettaa erinäisiä mittalaitteita sillä ne eivät siellä haittaa levitaation onnistumista. Esimerkiksi asettamalla sinne kaksi Fa-

radayn kuppia näytteeseen muodostunut positiivinen ja negatiivinen varaus voidaan mitata tarkasti. Tarkastelemalla kuppeihin kertynyttä näytteen määrää saataisiin tarkka kvantitatiivinen tulos kappaleisiin muodostuneen varauksen voimakkuudesta.

Viitteet

- [1] D. Lacks ja T. Shinbrot. “Long-standing and unresolved issues in triboelectric charging”. *Nature Reviews Chemistry* 3 (heinäkuu 2019), s. 465–476. DOI: 10.1038/s41570-019-0115-1.
- [2] P. Tamminen, L. Ukkonen ja L. Sydänheimo. “Correlation of component human body model and charged device model qualification levels with electrical failures in electronics assembly”. *Journal of Electrostatics* 79 (helmikuu 2016), s. 38–44. DOI: 10.1016/j.elstat.2015.12.002.
- [3] A. Ohsawa. “Brush and propagating brush discharges on insulating sheets in contact with a grounded conductor”. *Journal of Electrostatics* 88 (elokuu 2017), s. 171–176. DOI: 10.1016/j.elstat.2017.01.006.
- [4] K. Pingali, S. Hammond ja F. Muzzio. “Use of a static eliminator to improve powder flow”. *International Journal of Pharmaceutics* 369.1 (maaliskuu 2009), s. 2–4. DOI: 10.1016/j.ijpharm.2008.12.041.
- [5] Y. Pu, M. Mazumder ja C. Cooney. “Effects of Electrostatic Charging on Pharmaceutical Powder Blending Homogeneity”. *Journal of Pharmaceutical Sciences* 98 (heinäkuu 2009), s. 2412–2421. DOI: 10.1002/jps.21595.
- [6] J. Mitchell, D. Coppolo ja Nagel M. “Electrostatics and inhaled medications: influence on delivery via pressurized metered-dose inhalers and add-on devices.” *Respiratory Care* 52 (maaliskuu 2007), s. 283–300.
- [7] E. H. Brandt. “Levitation In Physics”. *Science* 243 (tammikuu 1989), s. 349–355. DOI: 10.1126/science.243.4889.349.
- [8] L. P. Gor’kov. “On the Forces Acting on a Small Particle in an Acoustical Field in an Ideal Fluid”. *Sov. Phys.-Doklady* 6 (1962), s. 773–775.
- [9] M. Andrade, N. Pérez ja J. Adamowski. “Review of Progress in Acoustic Levitation”. *Brazilian Journal of Physics* 48 (huhtikuu 2018), s. 190–213. DOI: 10.1007/s13538-017-0552-6.
- [10] H. Bruus. “Acoustofluidics 7: The acoustic radiation force on small particles”. *Lab on a Chip* 12 (2012), s. 1014–1021. DOI: 10.1039/c2lc21068a.
- [11] N. Perez, M. Andrade ja R. Canetti. “Experimental determination of the dynamics of an acoustically levitated sphere”. *Journal of Applied Physics* 116 (marraskuu 2014), s. 184903. DOI: 10.1063/1.4901579.
- [12] Hielscher Ultrasonics. *Power Ultrasoundin käyttö ultraäänisarvien avulla*. URL: <https://www.hielscher.com/fi/application-of-power-ultrasound-using-ultrasonic-horns.htm> (viitattu 02.11.2023).
- [13] L. Cox, A. Croxford ja B. W. Drinkwater. “Acoustic Lock: Position and orientation trapping of non-spherical sub-wavelength particles in mid-air using a single-axis acoustic levitator”. *Applied Physics Letters* 113 (heinäkuu 2018), s. 054101. DOI: 10.1063/1.5042518.

- [14] A. Marzo, T. Corkett ja B. W. Drinkwater. “Ultraino: An Open Phased-Array System for Narrowband Airborne Ultrasound Transmission”. *IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* 65 (tammikuu 2018), s. 102–111. DOI: 10.1109/TUFFC.2017.2769399.
- [15] M. Röthlisberger, M. Schuck ja J. W. Kolar. “Kilohertz-Frequency Rotation of Acoustically Levitated Particles”. *IEEE TRANSACTIONS ON ULTRASONICS, FERROELECTRICS, AND FREQUENCY CONTROL* 69 (huhtikuu 2022), s. 1528–1534. DOI: 10.1109/TUFFC.2022.3149131.
- [16] M. Andrade, A. Marzo ja J. Adamowski. “Acoustic levitation in mid-air: Recent advances, challenges, and future perspectives”. *Applied Physics Letters* 116.25 (2020), s. 250501. DOI: 10.1063/5.0012660.
- [17] A. Marzo, A. Barnes ja B. W. Drinkwater. “TinyLev: A multi-emitter single-axis acoustic levitator”. *Review of Scientific Instruments* 88.8 (2017), s. 085105. DOI: 10.1063/1.4989995.
- [18] D. J. Lacks. “The Unpredictability of Electrostatic Charging”. *Angewandte Chemie* 51 (heinäkuu 2012), s. 6822. DOI: 10.1002/anie.201202896.
- [19] H. Zou, Y. Zhang ja L. Guo. “Quantifying the triboelectric series”. *Nature Communications* 10 (maaliskuu 2019), s. 1427. DOI: 10.1038/s41467-019-09461-x.
- [20] H. Zou, L. Guo ja H. Xue. “Quantifying and understanding the triboelectric series of inorganic non-metallic materials”. *Nature Communications* 11 (huhtikuu 2020), s. 2093. DOI: 10.1038/s41467-020-15926-1.
- [21] J. Lowell ja W. S. Truscott. “Triboelectrification of identical insulators. II. Theory and further experiments”. *Journal of Physics D: Applied Physics* 19 (1986), s. 1281–1298. DOI: 10.1088/0022-3727/19/7/018.
- [22] J. Lowell ja A.C. Rose-Innes. “Contact electrification”. *Advances in Physics* 29 (heinäkuu 1980), s. 947–1023. DOI: 10.1080/00018738000101466.
- [23] F. Chowdhury, M. Ray ja A. Passalacqua. “Electrostatic charging due to individual particle-particle collisions”. *Powder Technology* 381 (maaliskuu 2021), s. 352–365. DOI: 10.1016/j.powtec.2020.12.012.
- [24] J. Haeberle, A. Schella ja M. Sperl. “Double origin of stochastic granular tribocharging”. *Soft Matter* 14 (kesäkuu 2018), s. 4987–4995. DOI: 10.1039/c8sm00603b.
- [25] X. Jiang, J. Li ja V. Lee. “Evolutionary strategy for inverse charge measurements of dielectric particles”. *The Journal of Chemical Physics* 148 (kesäkuu 2018), s. 234302. DOI: 10.1063/1.5027435.
- [26] S. R. Waitukaitis, V. Lee ja J. M. Pierson. “Size-dependent same-material tribocharging in insulating grains”. *Physical Review Letters* 112 (toukokuu 2014), s. 218001. DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.218001.

- [27] V. Lee, N. M. James ja S. R. Waitukaitis. “Collisional Charging of Individual Sub-Millimeter Particles: Using Ultrasonic Levitation to Initiate and Track Charge Transfer”. *Physical Review Materials* 2 (maaliskuu 2018), s. 035602. DOI: 10.1103/PhysRevMaterials.2.035602.
- [28] A. Kline, M. Lim ja H. Jaeger. “Precision measurement of tribocharging in acoustically levitated sub-millimeter grains”. *Review of Scientific Instruments* 91 (helmikuu 2020), s. 023908. DOI: 10.1063/1.5133049.
- [29] K. M. Forward, D. J. Lacks ja R. M. Sankaran. “Methodology for studying particle–particle triboelectrification in granular materials”. *Journal of Electrostatics* 67 (tammikuu 2009), s. 178–183. DOI: 10.1016/j.elstat.2008.12.002.
- [30] J. Peltonen, M. Murtomaa ja J. Salonen. “Measuring electrostatic charging of powders on-line during surface adhesion”. *Journal of Electrostatics* 93 (maaliskuu 2018), s. 53–57. DOI: 10.1016/j.elstat.2018.03.007.