



SAVONIA

■ OPINNÄYTETYÖ - AMMATTIKORKEAKOULUTUTKINTO
TEKNIIKAN JA LIIKENTEEN ALA

PLASMAA TUOTTAVAN JÄRJESTELMÄN SÄHKÖISEN TOIMINNAN OPTIMOINTI

TEKIJÄ: Olli-Pekka Antila

Koulutusala Tekniikan ja liikenteen ala	
Koulutusohjelma Elektroniikan koulutusohjelma	
Työn tekijä Olli-Pekka Antila	
Työn nimi Plasmaa tuottavan järjestelmän sähköisen toiminnan optimointi	
Päiväys	27.3.2014
Sivumäärä/Liitteet	43/0
Ohjaaja(t) Projektipäällikkö Mikko Laasanen ja lehtori Väinö Maksimainen	
Toimeksiantaja/Yhteistyökumppani(t) Dublin Institute of Technology / Yliopettaja P. J. Cullen	
Tiivistelmä	
<p>Tässä opinnäytetyössä tutustuttiin dielectric-barrier discharge (DBD) –tyyppisen plasmajärjestelmän sähköiseen toimintaan. Työn suorituspaikka oli Dublin Institute of Technology (DIT, Irlanti), jossa DBD-plasmajärjestelmällä tehdään tutkimusta mm. erilaisten marjojen ja muiden tuoretuotteiden säilyvyyden parantamiseksi. Tavoitteena oli tuottaa aineisto plasmajärjestelmän sähköistä toimintaa kuvaavista parametreista erilaisten fyysisten suureiden suhteen. Lisäksi aineisto haluttiin tuottaa kahdella, sähköiseltä kytkennältään toisistaan eroavalla plasmajärjestelmällä.</p> <p>Aineisto hankittiin sarjaankytkemällä kondensaattori plasmajärjestelmän elektrodien kanssa ja mittaamalla jännitteet sekä kondensaattorin, että elektrodien yli. Mittauksista muodostettiin Lissajous:n kuviot, josta kerättyjen varaus- ja jännite –arvoparien sekä Manleyn yhtälöiden avulla laskettiin halutut suureet.</p> <p>Tuloksena saatiin kattava aineisto plasmajärjestelmän sähköisestä toiminnasta DIT:n tutkijoiden käyttöön. Lasketut arvot kuten teho, varauksen muutos ja purkaus aika ovat suuruusluokaltaan vastaavia muiden samankaltaisten DBD-plasmajärjestelmien kanssa. Lisäksi aineiston pohjalta havaittiin pieni tehon muutos eri järjestelmien välillä.</p>	
Avainsanat Dielectric-barrier discharge, DBD, plasma, tuoretuotteet, Lissajous-kuvio, Manley	
julkinen	

Field of Study Technology, Communication and Transport			
Degree Programme Degree Programme in Electronics Engineering			
Author Olli-Pekka Antila			
Title of Thesis Electrical Optimisation of Dielectric-barrier Discharge Plasma			
Date	27 March, 2014	Pages/Appendices	43/0
Supervisor(s) Mr. Mikko Laasanen, Project Manager and Mr. Väinö Maksimainen, Lecturer			
Client Organisation /Partners Dublin Institute of Technology / Mr. P. J. Cullen, Senior Lecturer			
<p>Abstract</p> <p>The aim of this thesis was to characterise the electrical parameters of a high voltage dielectric-barrier discharge (DBD) plasma system, developed at Dublin Institute of Technology (DIT, Ireland) for decontamination of fresh-cut products. The electrical characterisation specifically involved the study of discharge parameters as a function of different physical parameters and two different electrical configurations of the DBD plasma system.</p> <p>The data was acquired by connecting a capacitor in series with the DBD plasma source and measuring voltage across the electrodes and the capacitor. The electrical parameters of the discharge were derived from the charge and voltage data collected from Lissajous figures using Manley's equation.</p> <p>The values of the power, transported charge and duration time of discharges reported in this thesis agree well with those reported in literature using similar DBD plasma systems. In addition, a small power change between different systems was observed. Comprehensive characterisation of the electrical parameters of discharge allowed researchers at DIT to optimise the process conditions of their applications..</p>			
Keywords dielectric-barrier discharge, DBD, plasma, fresh-cut produce, Lissajous figure, Manley's equation			
public			

ESIPUHE

Tein opinnäytetyöni työharjotteluni ohessa Dublin Institute of Technologylle (DIT) Irlannin Dublinissa vuoden 2013 aikana. Työni aihe oli mielenkiintoinen ja antoi minulle monipuolisen katsauksen erilaisista kylmäplasmaa tuottavista järjestelmistä sekä niiden toiminnasta.

Haluan kiittää ohjaajiani PhD P. J. Cullenia ja PhD Vladimir Milosavljevicia mahdollisuudesta tämän opinnäytetyön tekemiseen, opinnäytetyöni ohjaajaa FT Mikko Laasasta hyvästä ohjauksesta sekä MSc N. N. Mishraa kaikista niistä neuvoista ja opastuksesta jota sinulta sain. Lisäksi haluan kiittää MSc Shashi Pankaj, PhD Carmen Buenoferrer sekä PhD Carl Sullivan teiltä saamastani tuesta ja kannustuksesta.

Erityiskiitokset vaimolleni Annille, ilman sinua tämä työ ei olisi ikinä valmistunut.

Vihdissä 2.3.2014

Olli-Pekka Antila

SISÄLTÖ

1	JOHDANTO	7
2	PLASMAAN LIITTYVÄ TEORIA.....	9
2.1	Plasma.....	9
2.2	Dielectric-barrier discharge -plasmajärjestelmä	9
3	MITTAUKSIIN LIITTYVÄ TEORIA	14
3.1	Kondensaattori ja kapasitanssi.....	14
3.2	Manleyn yhtälöt, Lissajous:n kuvio	15
3.3	Hajakapasitanssi.....	18
4	MITTAUKSISSA KÄYTETTY LAITTEISTO	19
4.1	DBD-plasmajärjestelmä	19
4.2	DBD-plasmajärjestelmän sähköinen kytkentä	22
4.3	Mittausinstrumentit.....	23
5	MITTAUSTEN SUORITUS.....	26
5.1	Mittausjärjestelyt	26
5.2	Mittaustilanteet.....	27
5.3	Mittausten suoritus	28
6	DATAN KÄSITTELY JA ANALYSOINTI	30
6.1	Tiedostojen järjestely.....	30
6.2	Mittausdatan käsittely	31
6.3	Dataan liittyvä laskenta	35
7	TULOKSIA.....	36
8	POHDINTA	42

SYMBOLIT, LYHENTEET JA MÄÄRITELMÄT

C_{cell}	Järjestelmän kokonaiskapasitanssi
C_d	Dielektrisen materiaalin/materiaalien kapasitanssi
C_{gap}	Purkausaukon kapasitanssi
C_{stray}	Hajakapasitanssi
P	Teho
ΔQ	Varauksen muutos
Δt	Purkaus aika puolikasta jännitesykliä kohden
V_b	Läpilyöntijännite
V_p	Käytetyn sinimuotoisen jännitteen piikkijännite
W	Jännitesyklin aikana kuljetettu energia
DBD	Dielectric-barrier discharge
DIT	Dublin Institute of Technology
NTP	Nonthermal plasma, kylmäplasma
ROS	Reactive oxygen species, happea sisältäviä, kemiallisesti reaktiivisia molekyylejä
TP	Thermal plasma, terminen plasma

Tämä opinnäytetyö tehtiin Dublin Institute of Technologylle (DIT) Irlannin Dublinissa. Viime vuosien aikana DIT:n BioPlasma-tutkimusryhmä on tutkinut mahdollisuutta käyttää dielectric-barrier discharge (DBD) –plasmajärjestelmää ruokaperäisten patogeenien inaktivointiin. Nämä tutkimukset ovat osa Euroopan Unionin Seventh Framework Programme –ohjelman kautta rahoitettua Safebag-projektia (<http://www.safebag-fp7.eu>), jonka tarkoituksena on kehittää jatkuvatoiminen dekontaminointijärjestelmä erilaisille tuoretuotteille, kuten hedelmille, marjoille ja vihanneksille.

Tuoretuotteiden sisältämien ja niihin käsittelyn aikana siirtyneiden patogeenien deaktivointi on elintarviketurvallisuuden kannalta merkittävää. Saatavuutensa, halvan hinnan ja helppokäyttöisyytensä vuoksi nykyisin laajasti käytetyn kloorin tehokkuus on kuitenkin kyseenalaistettu. Lisäksi kloorin on havaittu aiheuttavan terveyteen ja ympäristöön liittyviä riskejä saastumisen ja syöpää aiheuttavien karsinogeenien kautta. (Connolly, Valramidis, Byrne, Karatzas, Cullen, Keenr ja Mosnier 2012, 1-2) Tämä, yhdessä elintarvikkeiden kasvavan maailmankaupan kanssa, aiheuttaa uusia haasteita elintarviketurvallisuuden varmistamiseksi (Misra, Tiwari, Raghavarao ja Cullen 2011, 159-161).

Tutkimusten avulla on osoitettu plasmajärjestelmien tehokkuus lukuisten eri patogeenien inaktivointiin. Näitä ovat muun muassa kolibakteeri, erilaiset influenssavirukset sekä salmonella jotka ovat merkittäviä elintarvikkeiden kautta tarttuvia taudinaiheuttajia. (Connolly ym. 2012, 11) (Misra ym. 2011, 161-168).

Plasmajärjestelmien patogeenien inaktivointikyky perustuu kaasun ionisoitumisprosessissa tapahtuviin aineiden kemiallisiin muutoksiin. Emissiospektroskopiolla tehdyt tutkimukset ovat osoittaneet happea sisältävien, kemiallisesti reaktiivisten molekyylien olevan ratkaisevassa asemassa patogeenien deaktivoinnissa (ROS, Reactive oxygen species). (Connolly ym. 2012, 2-8)

DBD-plasmajärjestelmä ei vaadi toimiakseen erityisiä ääriolosuhteita ja tutkijoiden käyttämät, verrattaen pienet plasmajärjestelmät ovat suhteellisen helposti muunnettavissa myös teolliseen käyttöön sopiviksi. (Zhang, Shao, Yu, Niu, Yan ja Zhou 2010, 1)

Tässä opinnäytetyössä tutustutaan DIT:n käyttämään DBD-plasmajärjestelmään ja tehdään siitä sen toimintaa kartoittavat mittaukset mahdollisimman monen fyysisen parametrin suhteen, analysoidaan mittausaineisto sekä lasketaan aineistosta DBD-plasmajärjestelmän sähköistä toimintaa kuvaavat avaintekijät kuten teho, varauksen muutos ja purkaus aika. Lisäksi nämä mittaukset tehdään kahdella, sähköisen kytkentänsä perusteella hieman poikkeavasta DBD-plasmajärjestelmästä järjestelmien välisten eroavaisuuksien selvittämiseksi.

Tämän aineiston tuottamiselle on useita perusteluja. Aineisto mahdollistaa optimaalisten toimintapisteiden hakemisen erilaisille tutkimuksille (Yeahia ja Mizuno 2005, 98). Toisaalta aineiston mahdollistaa muiden DBD-plasmajärjestelmien vertailemisen keskenään ja aineiston ristiinajaminen aikaisempien tällä DBD-plasmajärjestelmällä tehtyjen tutkimusten kanssa sekä tarjoaa mahdollisesti selityksiä aiemmin havaituille ilmiöille. Lisäksi mittausten tekeminen kahdella, sähköiseltä kytkennältään erilaisella DBD-plasmajärjestelmällä antaa työkalut, joilla voidaan arvioida eri järjestelmillä tehtyjen tutkimusten vertailukelpoisuutta.

2 PLASMAAN LIITTYVÄ TEORIA

2.1 Plasma

Plasma-termillä tarkoitetaan kokonaan tai osittain ionisoitunutta kaasua, joka koostuu pääasiallisesti fotoneista, ioneista, vapaista elektroneista sekä atomeista. Neutraalista nettovarauksestaan huolimatta plasman ainesosat voivat olla joko perusmuodossaan tai varautuneita, sillä positiivisesti ja negatiivisesti varautuneiden varaustenkuljettajien lukumäärä kaasussa on sama. (Misra ym. 2011, 160)

Erikoislaatuisten ja uniikkien ominaisuuksiensa vuoksi plasmaa kutsutaan usein aineen neljänneksi olomuodoksi. Tällä havainnollistetaan aineen muuttumista kiinteästä nesteeksi, nesteestä kaasuksi ja lopulta plasmaksi. (Misra ym. 2011, 160). Lähteistä riippuen katsotaan, että jopa yli 99% maailman-kaikkeudesta koostuu plasmasta (Tendero, Tixier, Tristant, Desmaison ja Leprince 2006, 10).

Plasma luokitellaan yleisesti lämpötilansa mukaan kahteen eri kategoriaan: kylmäplasmaan (non-thermal, NTP) sekä termiseen plasmaan (thermal, TP). Luokittelu perustuu myös plasmassa esiintyvien elektronien sekä plasman raskaiden osien suhteelliseen energiatasoon. (Misra ym. 2011, 160)

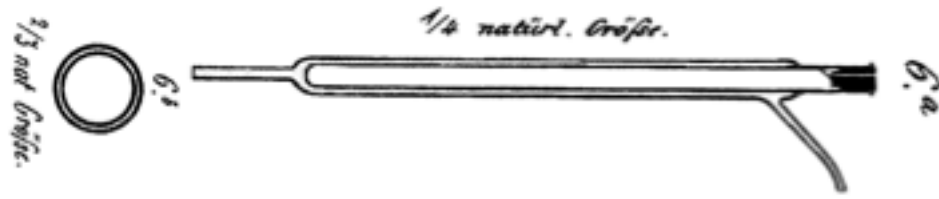
Kylmäplasmaa, joka lämpötilaltaan on lähellä ympäristönsä lämpötilaa (30 – 60°C), voidaan tuottaa joko ilmakehän paineessa tai sitä matalemmissa paineissa. Kylmäplasmaa voidaan luoda käyttäen joko sähköistä purkausta kaasussa tai mikroaaltojen avulla. Tyypillisesti kylmäplasmaa muodostetaan ilmakehän paineessa koronapurkausten (corona discharge), dielektrinen este purkausten (dielectric-barrier discharge), radiotaajuusplasman (radio frequency plasma) sekä kaaripurkausten (gliding arc discharge) avulla. (Misra ym. 2011, 160)

Terminen plasma puolestaan vaatii muodostuakseen suhteellisen korkeita paineita, huomattavan määrän energiaa sekä termisen tasapainon elektronien ja raskaiden osien välille. Termisen plasman luomiseen vaadittavat ääriolosuhteet rajoittavat monessa tapauksessa sen käyttöä. (Misra ym. 2011, 160)

2.2 Dielectric-barrier discharge -plasmajärjestelmä

Hiljaiseksi tai äänettömäksi plasmaksi kutsuttu Dielectric-barrier discharge –plasmajärjestelmä (DBD) on yksi kaikkein tehokkaimmista keinoista kaasumaisen plasman muodostamiseen skaalautuvuutensa ja hintansa vuoksi (Yeahia ja Mizuno 2005, 98) (Zhang ym. 2010, 1-2).

Werner von Siemens julkisti ensimmäiset tutkimuksensa otsonin muodostamisesta DBD-plasmajärjestelmällä jo vuonna 1857. Työssä työnnettiin happa ja huoneistoilmaa kahden vaihtosähköille altistetun koaksaalilasiputken muodostamasta, kapeasta, rengasmaisesta raosta (kuvio 1). (Kogelschatz 2003, 1)



KUVIO 1. Siemensin ensimmäinen otsonipurkausputki (Kogelschatz 2003, 2)

Myöhemmin 1970-luvulla alkoi intensiivinen ja kallis tutkimustyö modernien tutkimus- ja mallintamistyökalujen löytämiseksi. Tutkimusten alkuperäinen tarkoitus oli tuottaa parempaa ymmärrystä plasman fysiikasta ja plasman kemiallisesta prosessista otsonaattoreissa, mutta samalla kehittyi uusia otsonigeneraattoreita ja lukemattomia uusia käyttötarkoituksia DBD-järjestelmille- (Kogelschatz 2003, 2)

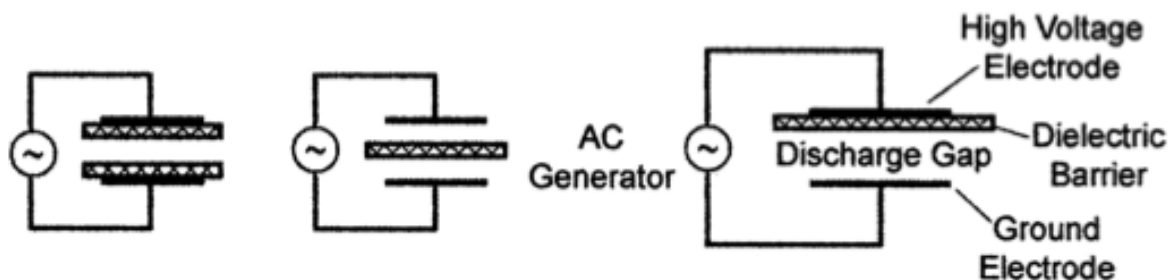
Otsonin muodostamisesta DBD-plasmajärjestelmän avulla tullut merkittävä teollinen sovellus, sillä nykyisin tuhansia DBD-plasmajärjestelmiä käytetään maailmanlaajuisesti jo pelkästään veden puhdistamiseen (Kogelschatz 2003, 2-3).

Veden puhdistamiseen käytetyt otsonaattorit mukailevat yhä edelleen malliltaan W. von Siemensin alkuperäistä otsonipurkausputkea. Tyypillisesti otsonaattorit sisältävät kymmenistä useisiin satoihin sylinterinmuotoista lasiputkea jotka toimivat järjestelmän dielektrisenä esteenä (halkaisija 20 – 50 mm, paksuus 0,5 – 2 mm). Lasiputken sisällä oleva metallipinnoite sekä ulkopuolelle aseteltu metalliputki ovat kytkettynä järjestelmän käyttöjännitteeseen. Otsonaattoreiden tyypillinen purkausaukko on yhdestä kolmeen millimetriin. (Yeahia ja Mizuno 2005, 98)

Alkuperäisen otsonin muodostamisen lisäksi plasmaa käytetään nykyisin myös muun muassa pintojen muokkaamiseen, saasteiden valvontaan, litteissä plasmanäytöissä (Kogelschatz 2003, 3) elintarvikeperäisten taudinaiheuttajien tuhoamiseen (Misra ym. 159-160) sekä lääketieteellisissä sovelluksissa (Falkenstein ja Coogan 1997, 817).

DBD-plasmajärjestelmän toiminta ja rakenne

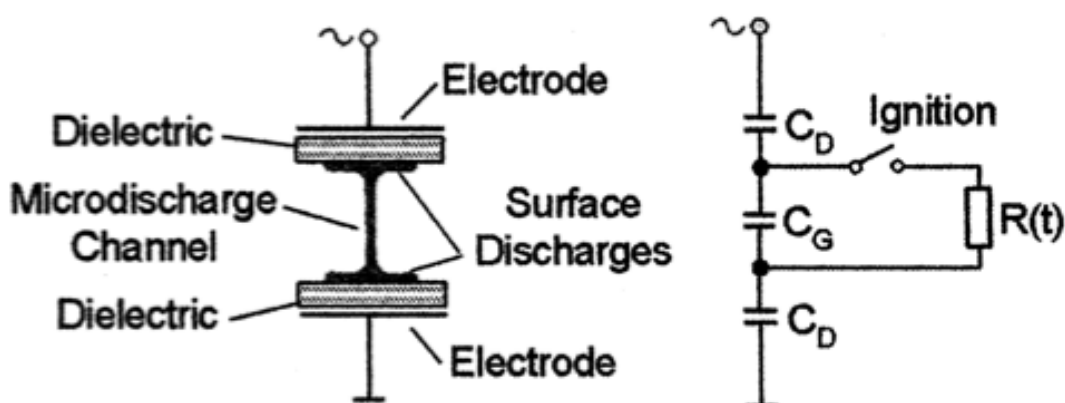
Tyypillisimmillään DBD-plasmajärjestelmä muodostuu kahden elektrodin, yhden tai kahden dielektrisen esteen sekä purkausaukon muodostamasta kokonaisuudesta (kuvio 2). Päällekkäisen rakenteen lisäksi DBD-plasmajärjestelmä voidaan muodostaa putkimaiseksi kahden sisäkkäisen putken ja niiden välissä olevan dielektrisen esteen avulla (Nehra, Kumar ja Dwivedi 2008, 62).



KUVIO 2. Tyypillisiä tapoja muodostaa DBD-plasmajärjestelmä kahden elektrodin, vaihtojännitteen ja yhden tai kahden dielektrisen esteen avulla (Kogelschatz 2003, 3)

Rakenteensa vuoksi DBD-plasmajärjestelmä vaatii toimiakseen aina vaihtojännitettä, sillä järjestelmässä eristeenä toimiva dielektrinen este ei läpäise lainkaan tasajännitettä. Dielektrisen esteen tai esteiden paksuus sekä dielektrinen vakio (aineen suhteellinen permittiivisyys) yhdessä käytetyn jännitteen aikaderivaatan kanssa määrittelevät järjestelmän läpi kuljetetun virran määrän. (Kogelschatz 2003, 3-8)

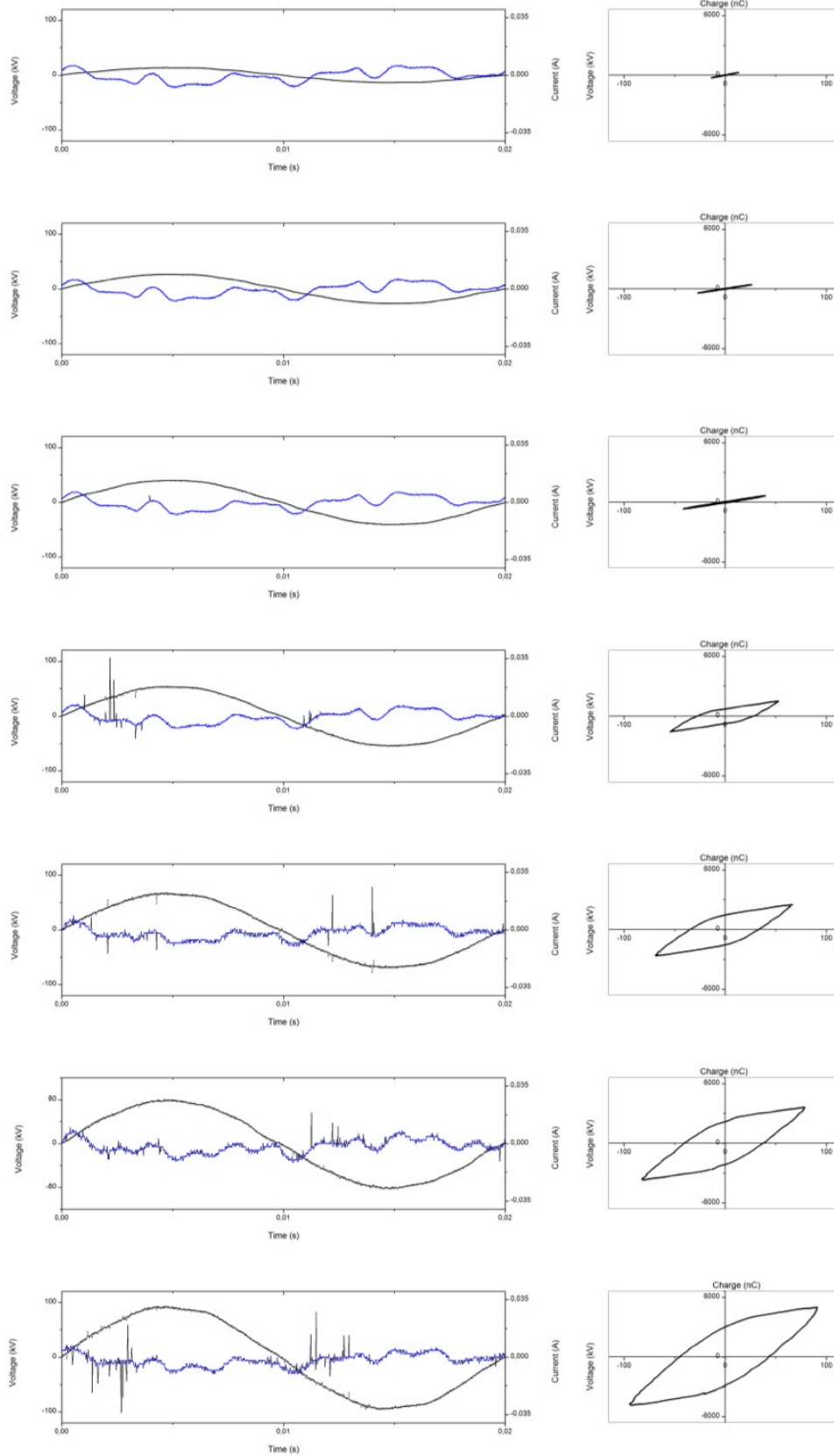
Ennen kuin virta voi kulkea purkausaukon yli, on kaasun vaihtojännitteestä muodostuneen sähkökentän oltava riittävän suuri täyttääkseen Paschenin lakina tunnetun läpilyöntiehdon (Nehra ym. 2008, 57-58). Kun käyttöjännitteen amplitudi nousee riittävän suureksi, läpilyöntiehto täyttyy ja virta kulkee purkausaukon läpi paikallisten mikrofilamenttien avulla. Virran kulkiessa purkausaukon läpi siellä oleva kaasu ionisoituu eli sinne muodostuu plasmaa (kuvio 3). (Kogelschatz 2003, 3-8)



KUVIO 3. DBD-plasmajärjestelmä voidaan mallintaa dielektrisen esteiden ja purkausaukon muodostamien kondensaattoreiden sarjaankytkentänä (Kogelschatz 2003, 6)

Sijaiskytkennässä purkausta kuvataan sulkemalla kytkin ja pakottamalla pieni määrä virtaa plasmafilamentin läpi. Mikrofilamenttia voidaan kuvata vastuksena jonka resistanssi $R(t)$ on voimakkaasti ajasta riippuvainen. (Kogelschatz 2003, 6-8)

Käyttöjännitteen amplitudin nousun vaikutusta esitellään kuviossa 4. Kuvio esittää DBD-plasmajärjestelmästä mitattuja jännitteen ja virran määriä sekä niistä muodostettuja varaus-jännite-kuvaajia 10 kv, 20 kv, 30 kv, 40 kv, 50 kv, 60 kv ja 70 kv käyttöjännitteillä.



KUVIO 4. Jännite-virta sekä varaus-jännite -kuvaajat 10 kV askelin 10 - 70 kV käyttöjännitteillä (22 mm aukko, 10 mm akryyli dielektrisenä esteenä, huoneilma)

3 MITTAUKSIIN LIITTYVÄ TEORIA

3.1 Kondensaattori ja kapasitanssi

Kondensaattori on tyypillinen elektroniikassa esiintyvä, itseensä energiaa varaava laite. Monimuotoisena ja mukautuvana komponenttina sitä käytetään energian varaamisen lisäksi mm. suodattamaan epätoivottuja taajuuksia tai osana resonanssiipiiriä. (Sen-Ben, Dourmashkin ja Belcher 2004, 3-4)

Kondensaattoriin varastoitunut varaus Q on lineaarisesti verrannollinen kondensaattorin yli vaikuttavaan jännitteeseen ΔV yhtälön 1 mukaisesti (Sen-Ben ym. 2004, 3-4).

$$Q = C \cdot |\Delta V| \quad (1)$$

Kondensaattorin kapasitanssia merkitään kirjaimella C , ja sen yksikkö on F, faradi. F = faradi = coulombi / voltti = C/V. Faradi, niin kuin coulombikin, on suhteellisen suuri yksikkö, sillä tyypillisesti kondensaattorien kapasitanssin suuruusluokka on pikofaradeista millifaradeihin. (Sen-Ben ym. 2004, 3-4)

Kondensaattorien rinnankytkentä

Kytettäessä useampia kondensaattoreita rinnakkain, voidaan kondensaattoreista muodostunut kokonaisvaraus laskea kaavalla 2 (Sen-Ben ym. 2004, 3-10).

$$C_{sum} = C_1 + C_2 + \dots + C_n = \sum_{i=1}^n C_i \quad (2)$$

Kondensaattorien sarjaankytkentä

Sarjaankytkettäessä kondensaattorien sisältämä varaus Q on sama kondensaattoreiden yli vaikuttavien jännitteiden erotessa toisistaan. Kokonaiskapasitanssi C_{sum} laskea seuraavalla kaavalla. (Sen-Ben ym. 2004, 10-12)

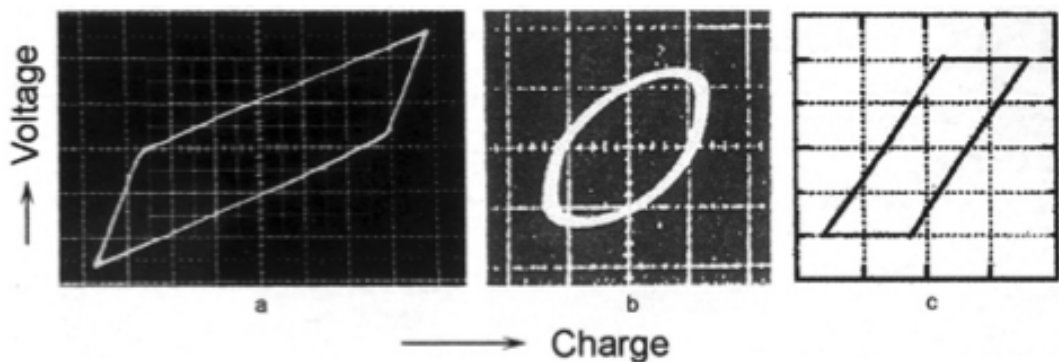
$$C_{sum} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_i} = \sum_{i=1}^n \frac{1}{C_i} \quad (3)$$

3.2 Manleyn yhtälöt, Lissajous:n kuvio

Manley käytti ensimmäisenä varaus-jännite -kuviota, josta hän johti keinoin laskea järjestelmän läpi kuljetetun varauksen määrän, järjestelmään tuodun energian sekä kaasuun jääneen osuuden geometrisellä analyysillä. Myöhemmin teoria ja laskenta alkuperäisen julkaisun pohjalta on jatkunut, kehittynyt ja muodostunut vakiintuneeksi ja yleisesti käytetyksi tavaksi plasmajärjestelmien sähköisten parametrien karakterisointiin (Falkenstein ja Coogan 1997, 817).

DBD-plasmajärjestelmän analysointi Lissajous:n kuvion ja Manleyn yhtälöiden avulla perustuu DBD-plasmajärjestelmän mallintamiseen kahden tai kolmen kondensaattorin sarjaankytkennäksi (kuvio 3, plasmajärjestelmän sijaiskytkentä). Koska kondensaattorin sisältämä varaus on verrannollinen kapasitanssin ja jännitteen muutoksen tuloon (yhtälö 1) ja toisaalta sarjaankytkettyjen kondensaattorien sisältämä varaus on sama, voidaan DBD-plasmajärjestelmän kanssa sarjaankytketyn kondensaattorin jännite- ja kapasitanssiarvojen avulla mallintaa plasmajärjestelmän sisältämiä varausarvoja.

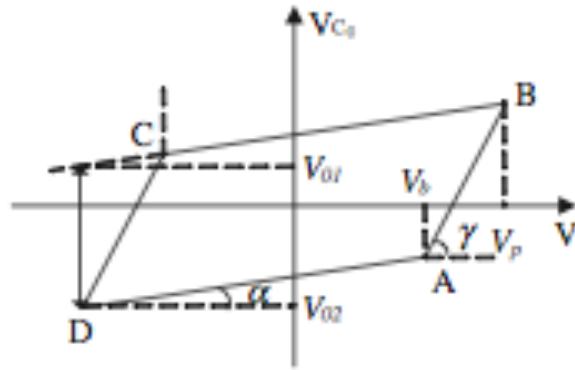
Kertomalla kondensaattorin yli vaikuttava jännite kondensaattorin kapasitanssilla, saadaan kondensaattorin sisältämä varaus ajan hetkellä t . Koska varausarvot kondensaattorissa ja DBD-plasmajärjestelmässä ovat samat, voidaan varaus ja elektrodien yli vaikuttava jännite yhdistää piirtämällä Lissajous:n kuvioksin kutsuttu kuvaaja (kuvio 5).



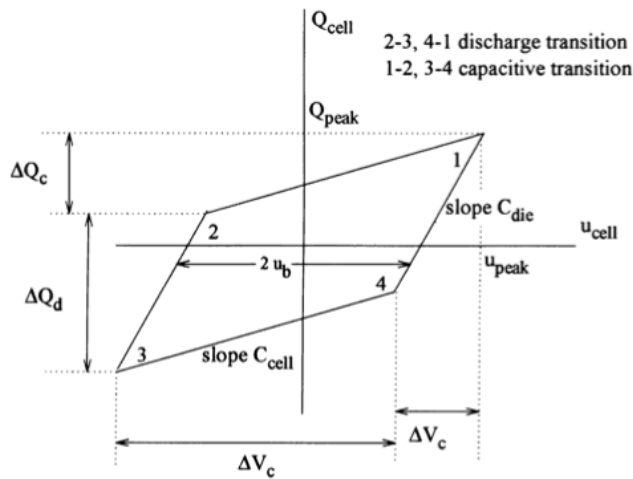
KUVIO 5. Tyypillisiä varaus-jännite -kuvioita eri DBD-plasmajärjestelmillä. Otsoniputki (a), CO₂ laser (b) ja plasmanäyttö (c) (Kogelschatz 2003, 13)

Näin muodostetusta kuvioista voidaan mitata ja laskea plasmajärjestelmän sähköisen toiminnan kanalta mielenkiintoisia parametreja kuten purkausteho, jännitesykin aikana kuljetettu varaus, purkausaika sekä läpilyöntijännite (Zhang ym. 2010, 3).

Laskennan helpottamiseksi kuvion oletetaan olevan symmetrinen ja sen ympärille sovitetaan mahdollisimman tarkasti sitä kuvaava suunnikas. Tällöin helpotetaan sekä kuvion analysointia, että sen matemaattista mallintamista. (Falkenstein 1997, 818). DBD-plasmajärjestelmästä muodostettujen Lissajous:n kuviota mittauspisteineen esitetään kuvioissa 6 ja 7.



KUVIO 6. DBD-järjestelmän Lissajous:n kuvio mittauspisteineen (Zhang ym. 2010, 3)



KUVIO 7. DBD-järjestelmän Lissajous:n kuvio mittauspisteineen (Falkenstein ja Coogan 1997, 820). Suunnikkaan kulmapisteiden koordinaateista voidaan laskea järjestelmän sähköistä toimintaa kuvaavia arvoja.

Kuviossa 7 näkyvässä suunnikkaan pistevälit B-C sekä D-A kuvaavat DBD-plasmajärjestelmässä tapahtuvaa purkausvaihetta, jolloin purkaus läpilyö kuljettaen varausta DBD reaktorin elektrodien välisen aukon, gapin yli. Pistevälit C-D sekä A-B kuvaavat plasmajärjestelmän varautumisvaihetta. Pistet B sekä D osoittavat positiivisen sekä negatiivisen jännitesyklin läpilyöntijännitteet kun vastavasti pisteet A ja C osoittavat purkauksen sammumisjännitteet. (Zhang ym. 2010, 3)

Myös DBD-reaktorin elektrodeihin liittyvät kapasitanssit voidaan laskea kuvaajaan merkittyjen kulmien α ja γ avulla. Tällöin voidaan sanoa, että

$$C_d = \tan(\gamma) \quad (4)$$

$$C_{cell} = \tan(\alpha) \quad (5)$$

kun C_d on dielektrisen materiaalin kapasitanssi ja C_{cell} on järjestelmän kokonaiskapasitanssi. Tässä työssä C_d ja C_{cell} , jotka ovat kuvioista nähtävien suorien BC sekä AB kulmakertoimien arvoja, lasketaan mitattujen pisteiden x- ja y –koordinaattien avulla kaavoilla 6 ja 7. (Zhang ym. 2010, 3-6)

$$C_d = \frac{y(C) - y(B)}{x(C) - x(B)} \quad (6)$$

$$C_{cell} = \frac{y(B) - y(A)}{x(B) - x(A)} \quad (7)$$

Koska dielektrisen materiaalin liittyvä kapasitanssi C_d on sarjassa purkausaukon kapasitanssin C_{gap} kanssa, voidaan C_{gap} laskea dielektrisen kapasitanssin C_d sekä kokonaiskapasitanssin C_{cell} avulla.

$$C_{gap} = \frac{C_d \cdot C_{cell}}{C_d - C_{cell}} \quad (8)$$

Lisäksi kuvion avulla voidaan laskea varakseen muutos ΔQ , purkausteho P sekä Δt joka on purkaus-aika puolikasta jännitesykliä kohden käyttämällä kaavoja 9, 10 sekä 11 (Zhang ym. 2010, 3-6).

$$\Delta Q = 2C_0 \cdot (V_{02} - V_{01}) \quad (9)$$

$$\Delta t = \frac{1}{2\pi f} \cdot \left(\frac{\pi}{2} - \sin^{-1}\left(\frac{V_b}{V_p}\right) \right) \quad (10)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T VI dt = \frac{C_0}{T} \int_0^T \frac{dV_{C_0}}{dt} dt = fC_0 S \quad (11)$$

Kaavoissa V_{c0} on jännite-ero mittauksessa apuna käytettävän kondensaattorin yli, f on käyttöjännitteen taajuus, T on käyttöjännitteen periodi, S kuvion rajoittama pinta-ala, V_{02} ja V_{01} ovat kuvaajan jännitteitä pisteessä x(D), V_b läpilyöntijännite, V_p piikkijännite sekä I virta. (Zhang ym. 2010, 3-6)

Kuitenkin Zhang ym. mukaan kaavoja voidaan ja niitä kannattaa approksimoida DBD-plasmajärjestelmän sähköisiä parametrien määrittäessä. Suosituksena he antavat seuraavat kaavat:

$$\Delta Q = 4 \left\{ C_d (V_p - V_m) - C_{gap} V_m \right\} \quad (12)$$

$$W = \Delta Q V_m = 4 \{ C_d (V_p - V_m) - C_{gap} V_m \} V_m \quad (13)$$

$$P = \frac{W}{T} = 4 f C_d \frac{C_d}{C_d + C_{gap}} V_m (V_p - V_m) \quad (14)$$

Jossa jännite V_m on alin kyseisessä tilanteessa mahdollinen läpilyöntijännite. Tällöin V_m on käytännössä V_b . Käyttämällä yhtälöitä 12 ja 13, voidaan nyt laskea varauksen muutos ja purkausteho ilman ylimääräistä graafista tulkintaa. (Zhang ym. 2010, 7) (Falkenstein ja Coogan 1997, 820-821)

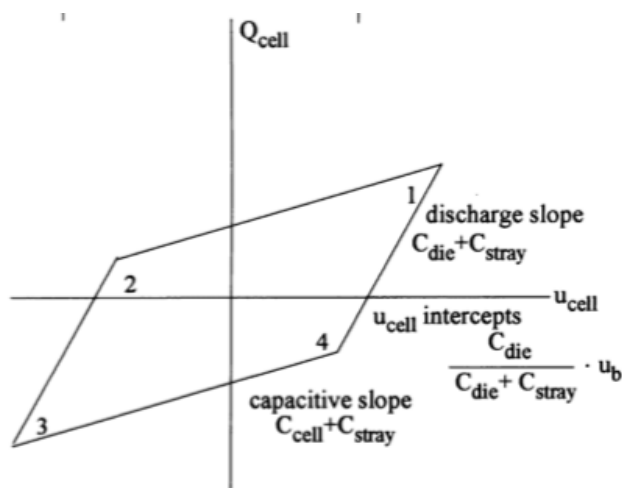
Lisäksi tiedoista voidaan laskea, usein tehon kontrollointiin käytettävä β -tekijä kaavalla 15 (Connolly ym. 2012, 5-6).

$$\beta = \frac{C_{gap}}{C_d} \quad (15)$$

3.3 Hajakapasitanssi

Manley ei kuitenkaan huomionut laskelmissaan hajakapasitanssin vaikutusta, sillä se ei varsinaisesti vaikuta varaus-jännite -kuvaajan muodostaman suorakaiteen pinta-alaan. Hajakapasitanssi kuitenkin vaikuttaa osaltaan kuvion muotoon. (Falkenstein ja Coogan 1997, 820). Tässä kappaleessa esitellään hajakapasitanssin vaikutusta ainoastaan kevyesti yleisellä tasolla. Laskennan yksinkertaistamiseksi varsinaiset tulokset ovat laskettu ilman sitä.

Jos hajakapasitanssi C_{stray} huomioitaisiin, muuttuisi tilanne osaltaan monimutkaisemmaksi (kuvio 8) (Falkenstein ja Coogan 1997, 820-821).



KUVIO 8. Hajakapasitanssin vaikutus laskentaan (Falkenstein ja Coogan 1997, 820).

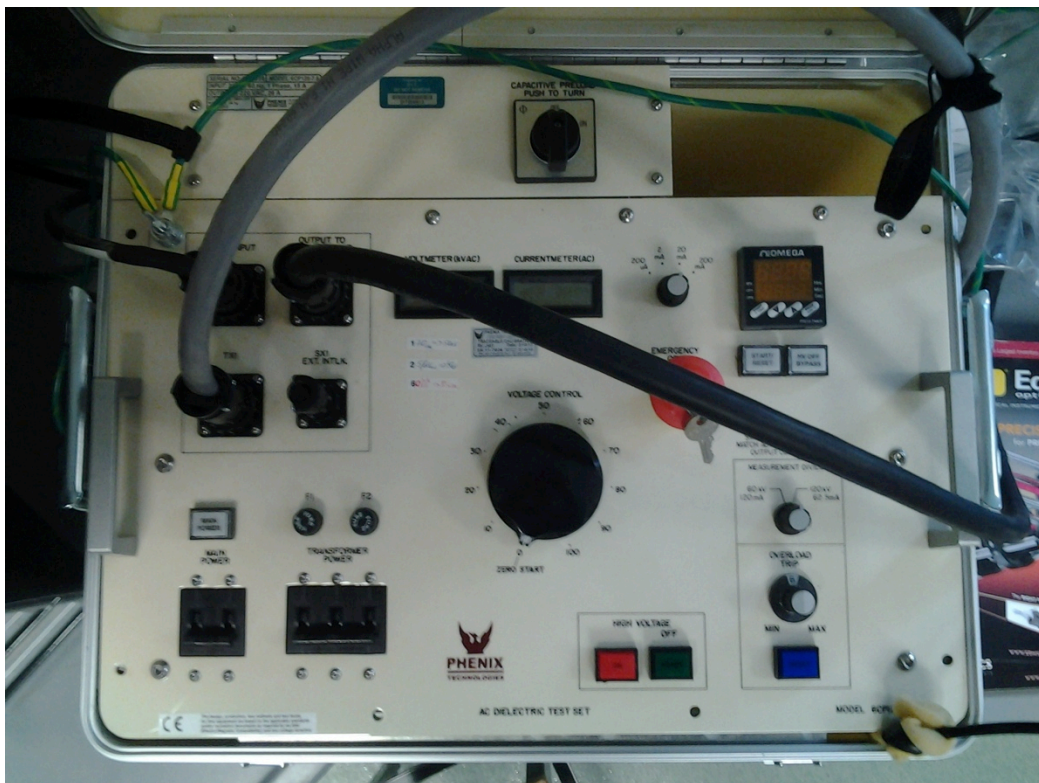
Koska hajakapasitanssi ei vaikuta kuvion rajoittamaan pinta-alaan, ei se myöskään vaikuta tehon laskentaan. Vaikutus näkyy suorien kulmakertoimien sekä x-akselin leikkauspisteiden muuttumisena. Tällöin voidaan todeta hajakapasitanssin vaikuttavan vain järjestelmästä laskettavien muiden kapasitanssien C_d , C_{cell} ja C_{gap} arvoihin. (Falkenstein ja Coogan 1997, 820-822)

4 MITTAUKSISSA KÄYTETTY LAITTEISTO

4.1 DBD-plasmajärjestelmä

Mittausten kohteena oleva laitteisto on luonteeltaan tyypillinen DBD-plasmajärjestelmä. Sen on suurilta osin valmistanut Phenix Technologies, joka on erikoistunut korkeita jännitteitä, virtoja ja tehoa käyttävien laitteistojen valmistukseen (Phenix 6CP120-7.5, Yhdysvallat, Maryland, Accident).

Järjestelmä jakaantuu kolmeen eri osaan: järjestelmän käyttöpaneeliin (kuva 1), suurjännitemuuntaajaan (kuva 2) sekä varsinaiset elektrodit sisältävään vetokaappiin (kuva 3).



KUVA 1. DBD-järjestelmän käyttö- ja hallintapaneeli

Käyttöpaneeli sisältää kaikki laitteen käyttöön tarvittavat säätimet, sulakkeet ja painikkeet. Laitteiston hallinta tapahtuu täysin käyttöpaneelin avulla. Lisäksi käyttöpaneeli sisältää jännitteen esimuuntimen sekä variakin. Näiden avulla hallitaan varsinaiselle suurjännitemuuntaajalle menevän jännitteen suuruutta.

Laitteiston käyttäminen on tehty äärimmäisen helpoksi: käännetään sulakkeet päälle, käynnistetään järjestelmä painikkeella ja nostetaan elektrodeille syötettävä jännite säätönupin avulla halutulle tasolle. Syötetyn jännitteen ja virran määrää voidaan seurata paneelissa olevista pienistä LCD-näyttöistä.



KUVA 2. Suurjännitemuuntaja (0-120 kV, 125 mA)

Järjestelmälle haluttu jännite muodostettiin KUVA 2 esitetyllä suurjännitemuuntajalla. Muuntajalla saadaan tuotettua, säädöistä riippuen joko 0 – 60 kVAC ja 125 mA tai 0 – 120 kVAC ja 62,5 mA. Mitauksia tehtäessä muuntaja kytkettiin jännitteeltään korkeampaan, 120 kVAC asentoon.

Fyysisesti muuntaja oli sijoitettuna huoneen kauimmaiseen nurkkaan ja suojattu vahvalla lasikaapilla.



KUVA 3. Elektrodit sisältävä vetokaappi (vasemmalla) ja elektrodien asemointi (oikealla)

Suurjännitemuuntajalta tuleva jännite yhdistettiin vetokaapissa (kuva 3, vasemmalla) olevaan elektrodiiin. Kytkevä tavasta riippuen pohjalektrodi kytkettiin suoraan sähköverkon maatasoon tai takaisin suurjännitemuuntajan paluulinjaan. Vetokaappi on DBD-plasmajärjestelmän kanssa ehdoton edellytys, sillä laitteistoa käytettäessä syntyy muun muassa terveydelle haitallista otsonia.

Kuvassa 3 oikealla näkyy elektrodien asemointi ja järjestelmän rakenne. Kuuma, suurjännitelinjaan kytketty elektrodi on sijoitettu keraamisen sylinterin pohjalle. Sylinterin alareuna on upotettuna pienen uraan dielektrisessä esteessä. Tämän jälkeen kuvassa näkyy 22 mm paksu muovirasia, joka edustaa elektrodien välistä aukkoa. Järjestelmää käytettäessä syntyvä plasma muodostuu tämän rasian sisälle. Maajohtimeen kytketty pohjalektrodi on suoraan muovirasian alapuolella. Lopulta alimmaisena paketissa on elektrodien välisen aukon säätämiseen tarkoitettu tunkki.

Kuvassa näkyvä PMMA-akryylilasi on kiinteä osa järjestelmän rakennetta ja toimii myös järjestelmän dielektrisenä esteenä elektrodien välillä. Luonteeltaan akryylilla on hyvät dielektriset ominaisuudet ja se soveltuukin käyttötarkoitukseensa hyvin. (Koleva 2012, 2-3). Polymetyylimetaakrylaatin (PMMA) sähköiset ominaisuudet ovat lueteltuna seuraavassa taulukossa.

TAULUKKO 1. PMMA:n sähköisiä ominaisuuksia (Koleva 2012, 3)

Ominaisuus	PMMA
Resistiivisyys (Ωcm)	1014 - 1015
Pintaresistanssi (Ω)	1014 - 1016
Hukkakerroin, 20°C, 100Hz, 60% RH	0,04
Dielektrinen vakio	2,8 - 4
Dielektrinen vakio, matala taajuus	3 - 4
Läpilyöntikestävyys (kV/mm)	17,7 - 60
Häviökerroin	0,03 - 0,55

Materiaalin valintakriteerinä on ollut aineen helpon muokattavuuden lisäksi suhteellisen korkea dielektrinen vakio sekä riittävän suuri läpilyöntikestävyys. Samoista syistä myös kuuma elektrodi on eristettynä kuvassa näkyvän keraamisen sylinterin sisälle. (Milosavljevic 2013)

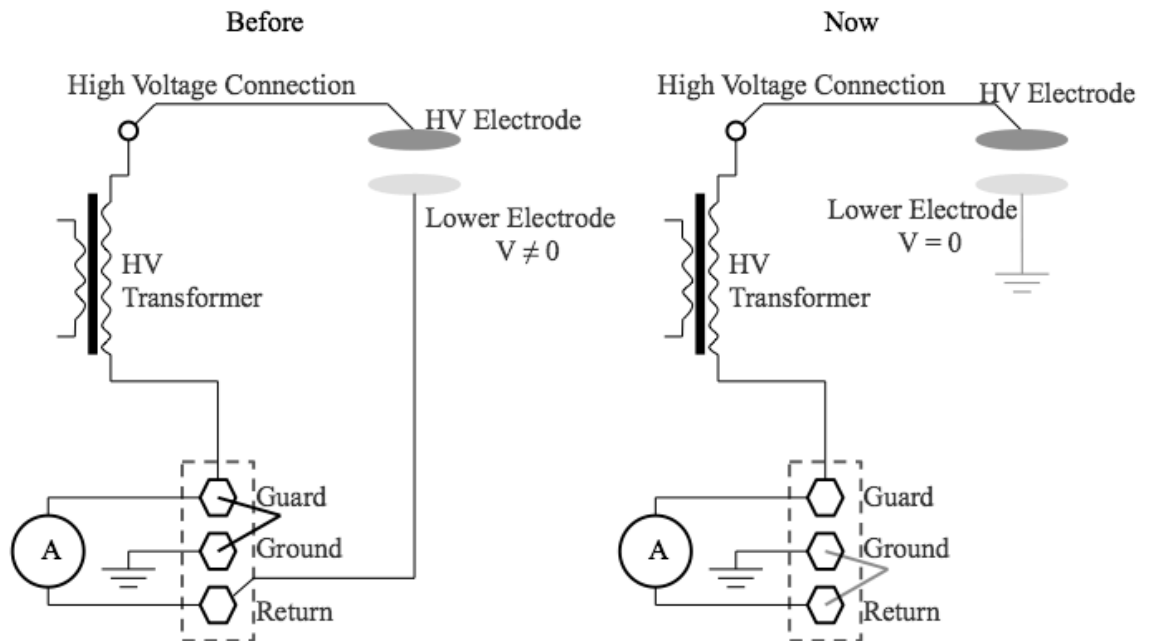
Molemmat elektrodit ovat rakenteeltaan identtiset: pyöreät, reunoilta sisäänpäin käännetyt alumiiniekot. Elektrodien halkaisija on 158 mm ja korkeus 14 mm.

4.2 DBD-plasmajärjestelmän sähköinen kytkentä

DBD-plasmajärjestelmää käytettiin kahdella, hieman toisistaan poikkeavalla kytkennällä. Alkuperäisessä kytkentätavassa (kuvio 9, vasemman puoleinen kytkentä) järjestelmän pohjaelektrodi oli kytkettynä takaisin suurjännitemuuntajan paluulinjaan. Tällöin muuntajan Guard- ja Ground -liittimet olivat kytkettynä toisiinsa.

Kytchentätavassa oli omat etunsa, mutta myös haittansa. Jännitepotentiaali pohjaelektrodista maatasoon oli käyttöjännitteestä riippuen muutamasta sadasta voltista muutamaa tuhatta volttiin. Kuitenkin laitteistoa käytettäessä seurattiin ainoastaan suurjännitemuuntajalta lähtevää jännitettä, järjestelmän efektiivisen jännitteen ollessa kuitenkin tätä jännitettä pienempi.

Alkuperäistä kytkentätapaa perusteltiin sillä, että maatasoon päällä kelluvan pohjaelektrodin ylivaikuttava jännite on verrannollinen kuumen elektrodin ylivaikuttavaan suurjännitteeseen. Tällöin voidaan seurata pienempää jännitetasoa ilman tarvetta kalliille ja entistä tehokkaammalle suurjännitekoettimelle. Kytkentätapa kuitenkin hankaloittaa järjestelmän sähköistä ja matemaattista mallintamista, sillä kaikkia toimintaan vaikuttavia suureita ei tiedetä.



KUVIO 9. DBD-plasmajärjestelmän sähköiset kytkennät (Järjestelmän käyttöohjetta mukaillen, Milosavljevic, 2013)

Ensin kokeiltiin pohjalektrodin maadoittamista (kuvio 9, oikeanpuolinen kytkentä) Pohjalektrodin maadoittamisella saavutettiin monia etuja edelliseen kytkentään. Näistä selkeimmät ovat sähköisen toiminnan yksinkertaistuminen ja työturvallisuuden parantuminen. Lisäksi laitteiston käytettävyys parani, sillä nyt pohjalektrodin nostaminen kuumen elektrodin tasolle voitiin suorittaa metallisen nostimen avulla (kuva 3). Tämä kun ei ennen onnistunut pohjalektrodin jännitelleellisyyden vuoksi.

4.3 Mittausinstrumentit

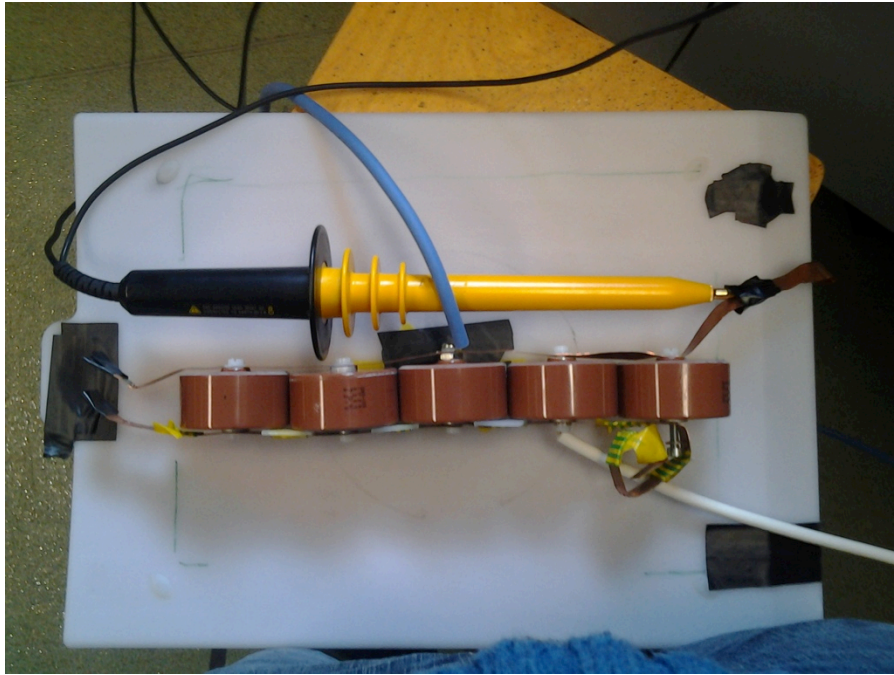
Mittausten suorittamiseen käytettiin seuraavia instrumentteja:

Testec 15 kV 1000:1 suurjännitekoetin

North Star PVM-6 60 kV 1000:1 suurjännitekoetin

Bergoz CT-E 1.0-S virtaanturi

Agilent Technologies DSO-X 2014A oskilloskooppi



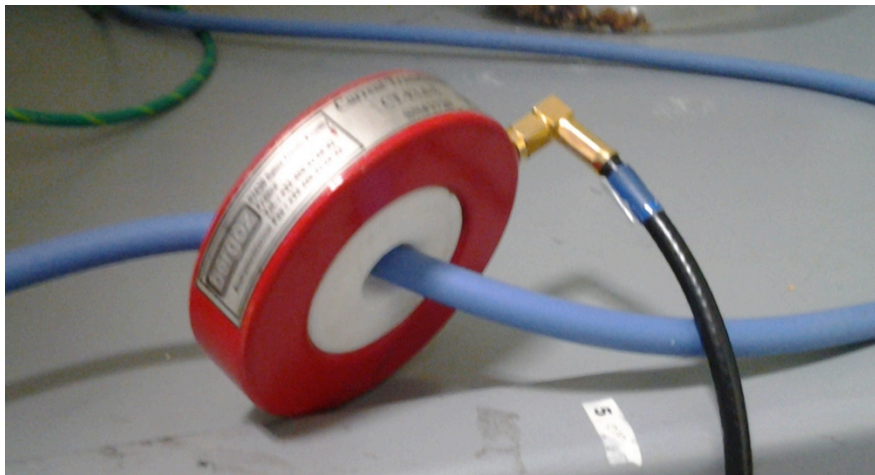
KUVA 4. Testec TT-HVP 15HF 1000:1 suurjännitekoetin kytkettynä kondensaattoriin

Testecin suurjännitekoetinta (TT-HVP 15HF, Testec Elektronik GmbH, Saksa, Frankfurt am Main) käytettiin mittaamaan järjestelmään kytketyn kondensaattorin ylivaikuttavaa jännitettä (kuva 4). Kyseisen koettimen valmistaja lupaa sen kestävän 15 kV tasajännitettä.



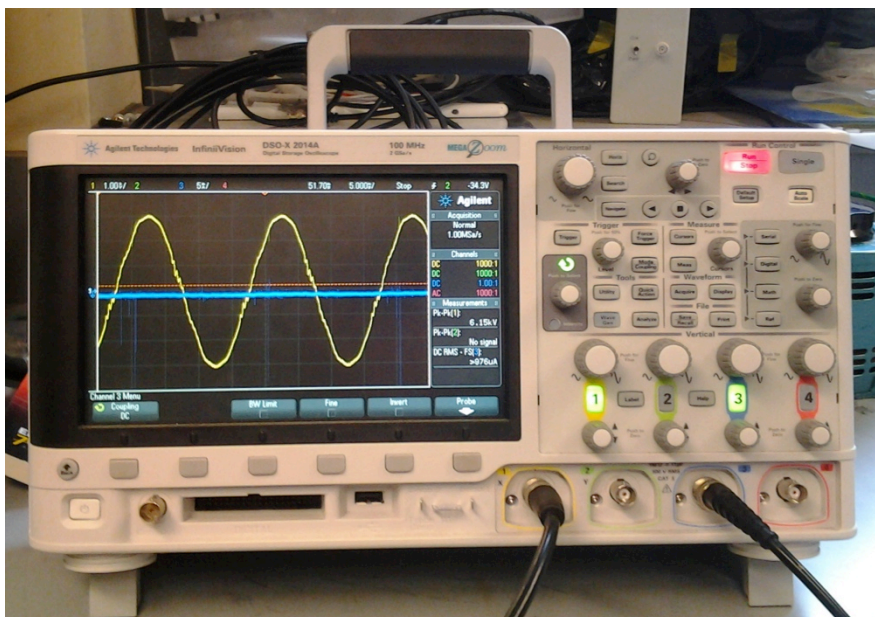
KUVA 5. North Star PVM-6 60 kV suurjännitekoetin

Jännitteen potentiaaliero kuumen ja kylmän elektrodin välillä mitattiin North Starin valmistamalla PVM-6 suurjännitekoettimella (kuva 5) (USA, Tucson). Valmistajan ilmoittama maksimaalinen jännitteenkesto koettimelle on 60 kV DC.



KUVA 6. Bergoz CT-E 1.0-S -virtamuuntaja

Virran mittaamiseen käytettiin Bergozin valmistamaa virtamuuntajaa (kuva 6) (CT-E 1.0-S, Bergoz Instrumentation, Ranska, Saint-Genis-Pouilly). Kyseinen muuttaja antaa 1 V/A vasteen kun se on kytkettynä oskilloskoopin 1 M Ω sisääntuloon, pienemmässä 50 Ω sisääntulossa vasteen ollessa 0,5 V/A. Valmistajan lupaama jatkuva maksimivirta on 11 A, mikä on enemmän kuin riittävästi mittausten suorittamiseen.



KUVA 7. Agilent Technologies DSO-X 2014A -oskilloskooppi

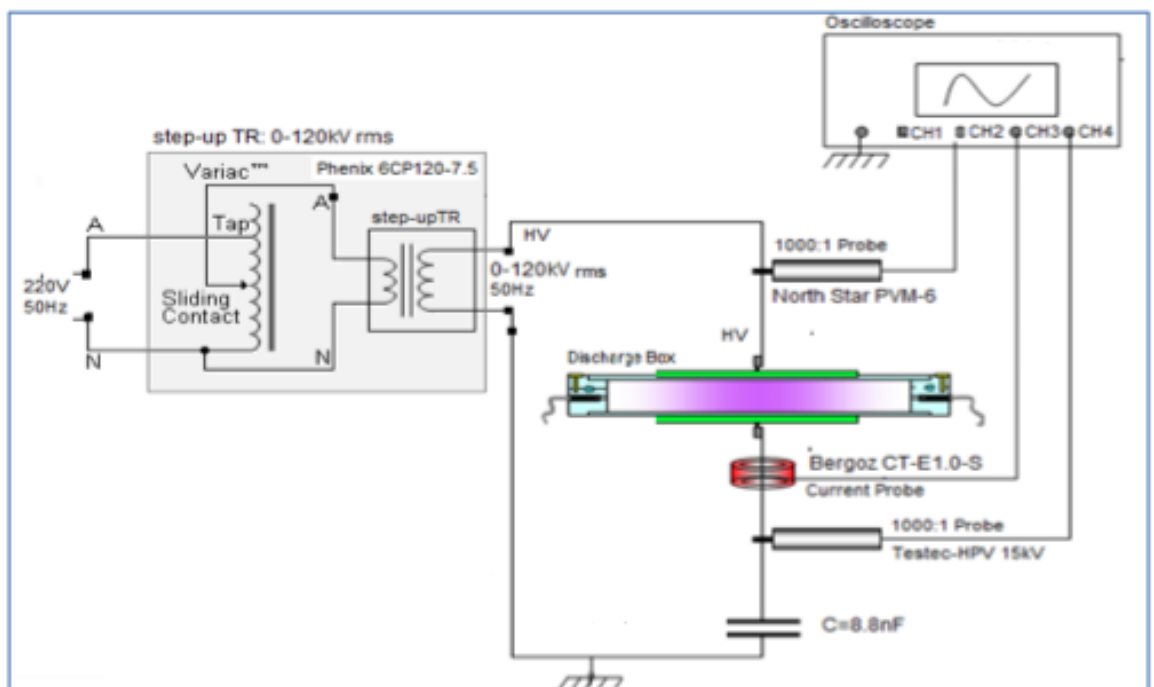
Mittauksissa oskilloskoopina, kuvassa 7, toimi Agilent Technologiesin valmistama DSO-X 2014A (Yhdysvallat, Kalifornia, Santa Clara). Tärkeimpinä ominaisuuksina oskilloskoopissa oli mm. 100 MHz näytteenottotaajuus, neljä kanavaa, automaattinen asteikon säätö ja ohjelmoitavia toimintoja helpottamaan mittausten suorittamista.

5 MITTAUSTEN SUORITUS

Tässä kappaleessa käydään läpi mittauksen suorittamiseen liittyvä prosessi kaikkine vaiheineen. Lisäksi kappaleessa käsitellään mittausinstrumenttien kytkennät järjestelmään, mitattavat suuret sekä erilaiset mittaustapahtumat.

5.1 Mittausjärjestelyt

Mittauksissa käytettävät virta- ja jännitekoettimet kytkettiin DBD-plasmajärjestelmään ja oskilloskooppiin kuvion 10 osoittamalla tavalla.



KUVIO 10. Mittausjärjestelyiden sähköinen kytkentä. Suurjännitemuuntajaan on kytkettyä elektrodeista, dielektrisestä esteestä ja purkausaukosta muodostettu DBD-plasmajärjestelmä

Virta mitattiin pohjalektrodilta maahan kulkevasta johtimesta ennen järjestelmään liitettyä kondensaattoria. Testecin koettimella mitattiin jännitettä kondensaattorin yli kun vastaavasti North Starin koetin, suuremman jännitteen kestonsa vuoksi, mittasi jännite-eroa kuuman elektrodin ja maan välillä.

Kuitenkaan North Starin jännitteenkesto ei ollut riittävä kaikkein suurimmille jännitteille. Suurimmat halutut jännitetasot olivat noin 85 kV, kun koettimen maksimijännitteeksi valmistaja kertoo 60 kV.

Ongelma ratkaistiin hallintapaneelin sisälle asennetun, suurjännitemuuntajan ohjausjännitettä mittaavan 1000:1 jännitekoettimen avulla. Tämän jännitteen todettiin olevan tasan kahdeskymmenesosa todellisesta kuuman elektrodin ja maan välisestä jännitteestä. Tämä mahdollisti mittauksen suorittamisen ja helpotti niiden tekemistä: North Starin suurjännitekoetin kun fyysisiltä mi-

toiltaan oli suhteellisen suurikoinen ja hankalan mallinen sijoitettavaksi kiinni kuumaan elektrodiin ilman riskiä toiminnan häiriintymisestä tai jopa oikosulusta.

Vaihtoehtoisena tapana mittausten suorittamiseen tutkittiin jännitteen jakajan asentamista järjestelmän rinnalle. Teknisesti valmiudet riittävän jännite- ja tehokestoisuuden omaavien vastusten löytämiseksi ja asentamiseksi olisivat olleet, mutta ylimääräisen, järjestelmän sähköistä toimintaa häiritsevien osion käyttämistä ei pidetty järkevänä.

5.2 Mittaustilanteet

Työn tarkoituksena oli määrittää laitteiston toimintaan liittyviä sähköisiä parametrejä mittaamalla. Tutkimuksen haasteena oli seuraavia tekijöitä: jokaisen fyysisen parametrin muuttaminen muuttaa myös järjestelmän sähköisiä parametrejä: aukon koon, jännitteen, kytkennän, kaasun, aukon sisälön ja jopa lämpötilan ja ilmankosteuden muuttaminen vaikuttavat mittaustuloksiin.

Mittaukset päädyttiin suorittamaan 5 kV askelluksella kahdella eri aukolla, kahdella eri dielektrisellä esteellä, kahdella kaasulla sekä kahdella eri kytkentäjärjestelyllä. Mittauksia tehtiin tyhjän rasian lisäksi myös erilaisilla sisällöillä. Lisäksi jokaisesta mittaustapahtumasta otettiin kustakin vähintään kolme eri mittausta näytettä. Kaiken kaikkiaan näytteitä kerättiin analysoitavaksi noin 500 kappaletta.

Mittaukset suoritettiin 5 kV jänniteaskelluksen välein päättyen kunkin mittausjärjestelyn maksijänniteeseen. Jännitettä nostettiin mittausten aikana hiljalleen ylöspäin ja pyrittiin lopettamaan ennen kuin liiallinen jännite-ero aiheutti suoranaista kipinäoimintaa elektrodien välille. Suurimmat mitatut jännitteet olivat noin 85 kV.

Aukoiksi määräytyivät DIT:n tutkijoiden omissa tutkimuksissaan käyttämät 22 mm ja 42 mm paksut ohutmuovista valmistetut rasiat. Dielektrisinä esteinä käytettiin KUVA 3 näkyvää 10 mm akryylilevyä sekä akryylilevyn ja 2 mm paksun polypropyleenistä (PP) valmistetun levyn yhdistelmää.

DBD-plasmajärjestelmän kytkentöihin tehdyn muutoksen oletettiin vaikuttavan myös laitteiston sähköisiin parametreihin (tammikuu 2013). Tämän vuoksi kaikki mittaukset tehtiin sekä uudella maadoitetulla pohjalektrodilla sekä vanhalla, maatason päällä kelluvalla pohjalektrodilla.

Koska elektrodien välisessä aukossa olevan kaasun koostumus vaikuttaa olennaisesti tuloksiin, päädyttiin mittaukset suorittaa sekä huoneilmalla että helium-kaasulla täytetyillä rasioilla. Heliumilla tehdyissä mittauksissa rasian sisälle laitettiin heliumilla täytetty ja ilmatiivisti suljettu pussi.

Lisäksi mittauksia tehtiin kahdella eri 42 mm rasiolla joista toinen sisälsi mansikoita, toinen saksanpähkinöitä. Tämän aineiston ajatuksena oli mahdollistaa tyhjän ja täyden rasian vertailemisen toisiinsa, sekä kuivan (saksanpähkinä) ja märän (mansikka) tuotteen vertailemisen keskenään.

5.3 Mittausten suoritus

Varsinaiset mittaukset järjestelmästä tehtiin touko- ja kesäkuun 2013 aikana Dublin Institute of Technologyn Dublinin Marlborough Streetillä sijaitsevassa laboratoriossa. Laitteistoa ei voitu varata yksinomaan mittauksia varten, vaan työt täytyi suorittaa yhteistyössä muiden tutkijoiden kanssa. Eri-tyisen paljon tämä hankaloitti kelluvalla pohjalektrodilla tehtäviä mittauksia, sillä tutkijat halusivat käyttää uutta maadoitettua pohjalektrodiä käyttävää järjestelmää. Tästä johtuen mittausprosessin aikana kytkettiin ja purettiin mittausinstrumentit ja järjestelmä useita kertoja.

Käytännön syistä johtuen laitteistosta tehtiin ensin kaikki mittaukset niin, että järjestelmä kytkettiin käyttämään kelluvaa pohjalektrodiä. Tämän jälkeen mittaukset toistettiin maadoitetulla pohjalektrodilla.

Aluksi mittaustilanne muodostettiin tarkoituksen mukaiseksi: säädettiin elektrodien välinen aukko rasiolla, valittiin dielektrinen este, rasiain sisältö ja kaasu. Tämän jälkeen jännitettä nostettiin mahdollisimman tarkasti 5 kV askelluksin ylöspäin. Jokaisen askelluksen jälkeen säädettiin oskilloskoopin vertikaalinen V/div –suhde sopivaksi ja otettiin oskilloskooppiin kytketyiltä jännite- ja virtakoettimilta muistitikulle vähintään kolme erillistä näytettä. Tätä toistettiin kunnes liiallinen jännite-ero elektrodien välillä uhkasi aiheuttaa suoranaista kipinäointiä. Kun viimeinenkin näyte mittaustilanteesta oli tallennettu, tehtiin järjestelmä jännitteettömäksi ja sammutettiin laitteisto. Lopulta tuuletuksen ja mahdollisesti elektrodeihin ja/tai näytteeseen jääneen varauksen purkamisen jälkeen mittaustilannetta muutettiin muuttamalla jotakin edellä mainituista asioista ja aloittamalla alusta.

Viiden kilovoltin askellus luettiin järjestelmän käyttö- ja hallintapaneeliin kytketystä pienestä LCD-näytöstä. Valmistajan mukaan kyseisen jännitemittarin tarkkuuden pitäisi olla $\pm 1\%$. Tarkkaan 5 kV askellukseen ei mittauksia suoritettaessa kuitenkaan päästy. Tämä johtui käyttö- ja hallintapaneeliin sijoitun jänniteensäätimen epätarkkuudesta. Pienikin säätimen muutos tarkoitti satojen volttien muutosta.

Jokaisen jännitteen muutoksen jälkeen täytyi oskilloskoopin vertikaalinen voltia/ruutu (V/div) –suhde säätää niin, että kaikki informaatio saatiin talteen mahdollisimman tarkalla resoluutiolla.

Oskilloskooppiin tehtiin halutut asetukset kerran, jonka jälkeen yhdellä painalluksella oskilloskooppi tallensi siihen sijoitetulle muistitikulle halutut tiedostot. Ensimmäisessä, .cvs-tyyppisessä tiedostossa oli varsinaiset, pilkulla erotetut mittausarvot jokaisesta kanavasta ajan suhteen. Toisessa, txt-tyyppisessä tekstitiedostosta löytyvät oskilloskoopin asetukset.

Oskilloskooppi nimesi datatiedostot scope_ -etuliitteellä. Etuliitteen jälkeen tiedoston loppuun lisättiin juokseva järjestestysnumero. Mittauksia tehdessä mittauspöytäkirjaan merkittiin LCD-näytöstä luetut jännite- ja virta –arvot, sekä mittaustiedoston järjestysnumero. Tämä tehtiin helpottamaan aineiston käsittelyä ja järjestelyä myöhemmissä vaiheissa. Mittauspöytäkirjaan merkittiin myös aina päivämäärä, sisälämpötila sekä sisäilmankosteus.

Kelluvaa pohjalektroodia käyttäessä lisävaaraa järjestelmän käyttäjälle toi elektrodieihin, rasiaan tai näytteisiin mahdollisesti jäävä sähköinen varaus. Jopa varautuneiden mansikoiden tiedetään aiheuttaneen ongelmia. Mahdollinen varaus purettiin sähköverkon maatasoon kytketyn, n. 40 cm pitkän, muovisen tangon avulla (kuva 8).



KUVA 8. Mahdollisten varausten purkamiseen käytetty tanko

6 DATAN KÄSITTELY JA ANALYSOINTI

6.1 Tiedostojen järjestely

Mittausten jälkeiset toimenpiteet aloitettiin aineiston järjestelemisellä. Satojen scope_ -alkuisten, varsin samankaltaista sisältöä olevien tiedostojen pitäminen yhdessä nipussa ei tuntunut enää järkevältä. Ratkaisuksi otettiin tiedostojen uudelleen nimeäminen ja kansiointi.

Tiedostot nimettiin niin, että jo yksittäisen tiedoston nimestä pystyi päättelemään kaiken tarvittavan ja uutta informaatiota olisi tiedoston sisällä. Tiedostojen rakenteeksi muodostui seuraava:

AAA_B_CCmm_Xb_DDD.cvs

AAA_B_CCmm_Xb_DDD.txt

Tiedostojen nimirakenne voidaan avata taulukon 2 osoittamalla tavalla. Tämän jälkeen, kaikissa myöhemmissä vaiheissa, oli helppo työskennellä, sillä yhdestä rivistä näkyi kaikki mahdollinen informaatio mitä siitä oli tarpeellista saada. Aikanaan tiedoston nimi seurasi mittausaineiston mukana kaikissa työn vaiheissa.

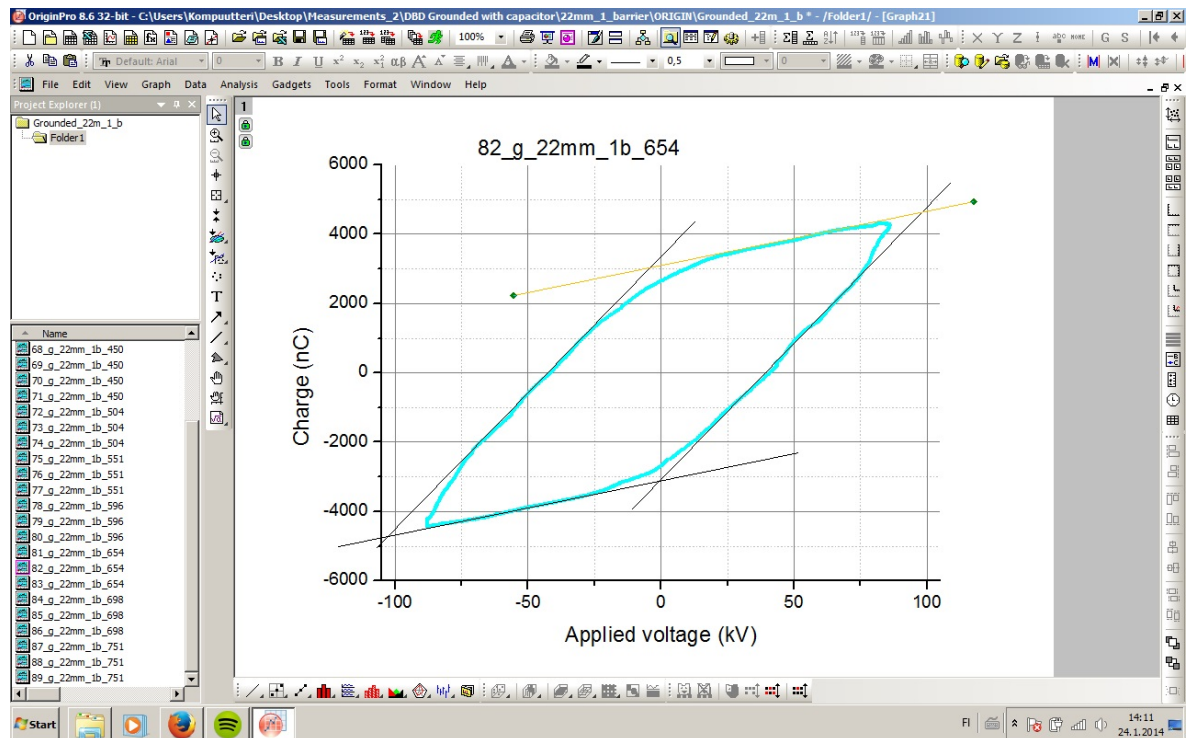
TAULUKKO 2. Mittaustiedostojen nimirakenne

Lyhenne	Tarkoitus
AAA	Oskilloskoopin antama alkuperäinen tunnistenumero
B	Pohjaelektrodin kytkentä. G = Grounded, F = Floating
CC	Purkausaukon paksuus, 22 mm tai 42 mm
X	Dielektristen esteiden lukumäärä. Joko 1 tai 2.
DDD	Jännite yhdellä desimaalilla ilman pilkkua Esim. 75,1 kV = 751

Samalla mittaustiedostot jaoteltiin kansioittain helposti saataville. Myöhemmissä vaiheissa kaikki kyseiseen aineistoon viittaavista tiedostoista sijoitettiin samalla kansioon.

6.2 Mittausdatan käsittely

Varsinainen mittausdatan käsittely hoidettiin OriginPro-ohjelmistolla (9.1, OriginLab, USA, Massachusetts, Northampton). OriginPro on datan analysointiin ja graafiseen esittämiseen erikoistunut ohjelma (kuvio 11).

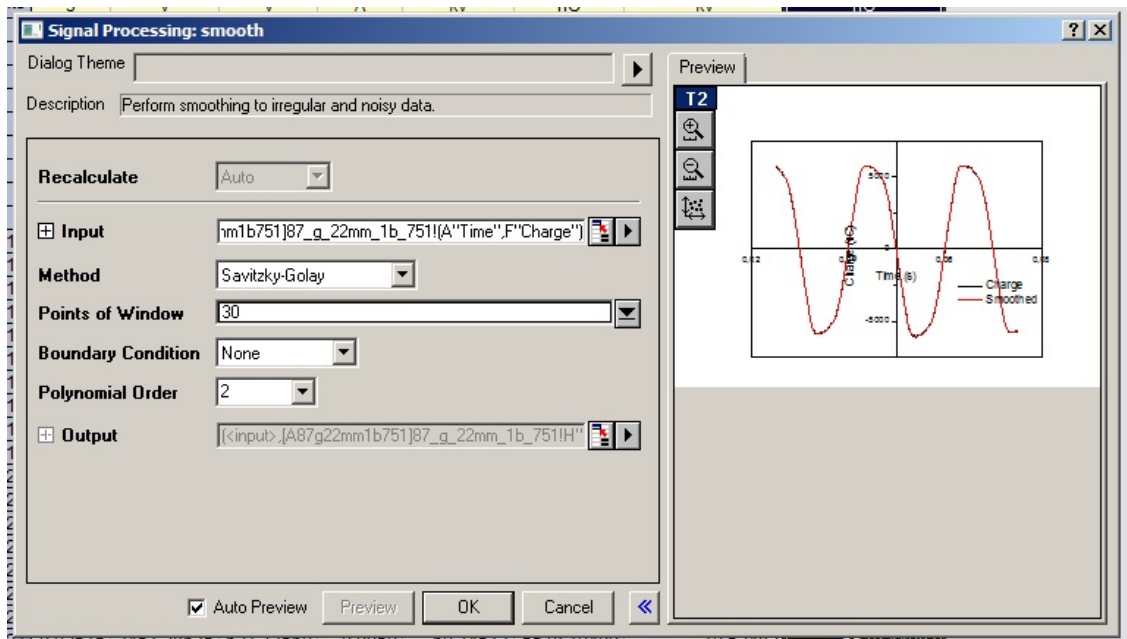


KUVIO 11. OriginPro-ohjelmistolla muodostettu varaus-jännite –kuvaaja (näyte 82, maadoitettu pohjajaelektrodi, yksi dielektrinen este ja 65,4 kV käyttöjännite)

OriginPro:n tehokkuus suurten aineistojen ja datamäärien käsittelyssä perustuu helppokäyttöisyyteen ja käsittelyn automatisointiin. Yhteen malliin, "templateen", määriteltiin ne toimenpiteet mitä haluttiin OriginPro:n suorittavan automaattisesti sen jälkeen kun mittauksien tiedosto on siirretty ohjelmistoon Import-toiminnon avulla.

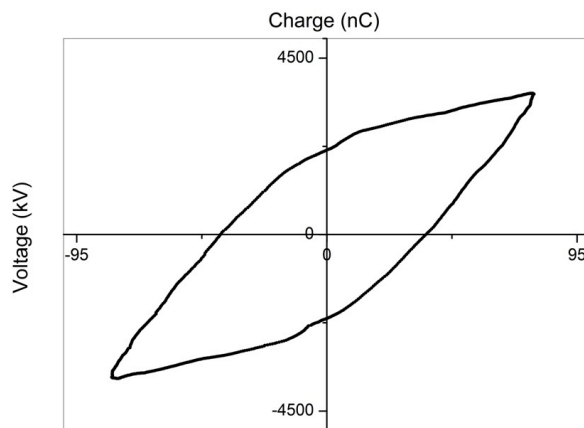
Tässä työssä se tarkoitti seuraavia toimenpiteitä:

- 1) Ohjausjännite muutettiin todelliseksi, elektrodien yli vaikuttavaksi jännitteeksi
- 2) Kondensaattorin yli vaikuttava jännite muutettiin varaukseksi kertomalla jännite kondensaattorin kapasitanssin arvolla 8,8 pF
- 3) Sekä jännite-, että varausarvoja siloiteltiin Golansky-Gray –suodatuksella mahdollisesti datassa olevien yksittäisten virhepisteiden poistamiseksi (kuvio 12)



KUVIO 12. Savitzky-Golay -suodattimen asetukset

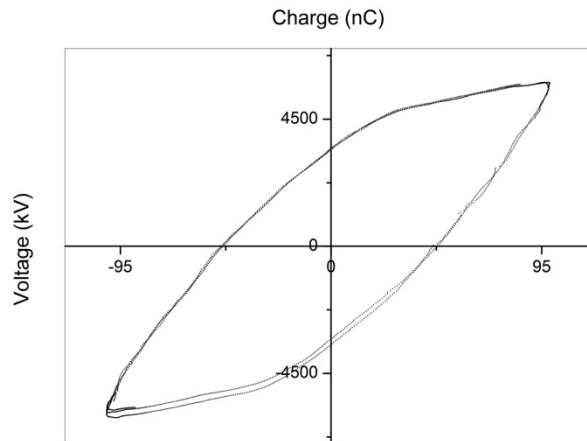
Näin syntyneistä jännite- ja varausarvoista muodostettiin Central Scatter -tyyppinen kuvaaja tulkittavaksi (kuvio 13).



KUVIO 13. OriginPro:lla muodostettu varaus-jännite -kuvaaja

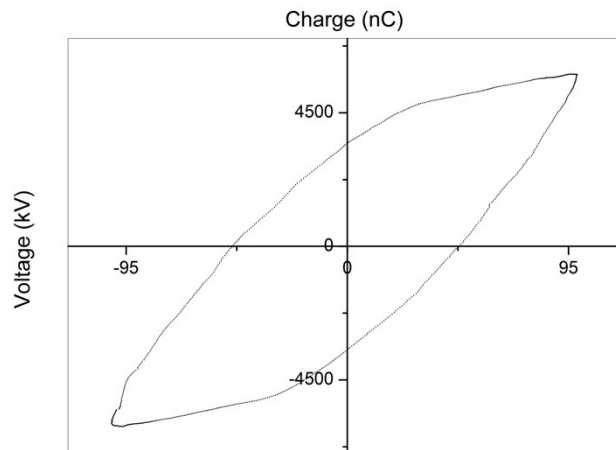
Kuvaajan luontivaiheessa OriginPro:ssa kuvaaja nimettiin samalla mittaustilanteeseen viittaavalla nimikointitavalla. Lisäksi nimi lisättiin tekstinä kuvaajan vasempaan yläreunaan, mistä se oli aina helposti luettavissa (kuvio 11).

Plasmassa esiintyvät mikrofilamentit nostavat aukon yli kulkevan virran määrää piikikkäästi ja virran kasvu luonnollisesti laskee jännitettä. Tästä seurauksena on se, että kuvaaja ei välttämättä pääty alkamispiisteeseensä. Tämä havainnollistuu kuviossa 14.



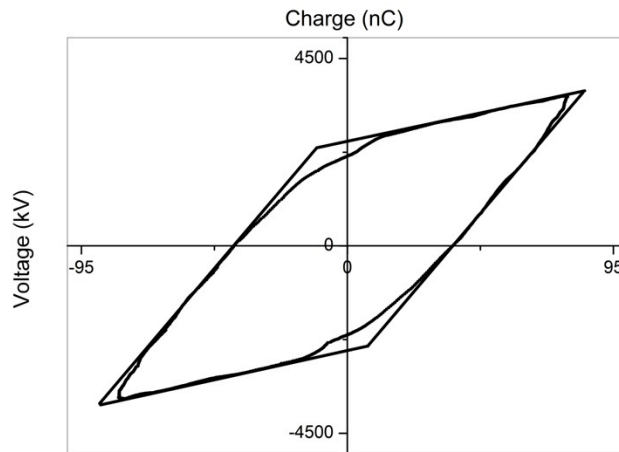
KUVIO 14. Virran nopea vaihtelu aiheuttaa häiriötä jännite-varaus –kuvaajan tulkintaan

Ongelma ratkaistiin rajoittamalla kuvioon piirrettyjen mittauspisteiden arvoaluetta. Jokainen näyte sisältää 50 ms ja 2000 mittauspistettä, mikä vastaa kahta ja puolta täyttä aaltoa 50 Hz taajuudella. Rajoittamalla piirrettävä alue 800 mittauspisteeseen ja hakemalla sopiva lähtö- ja loppupiste saatiin lähes jokaisesta näytteestä etsittyä analysointiin kelvollinen täysi siniaalto (kuvio 15).



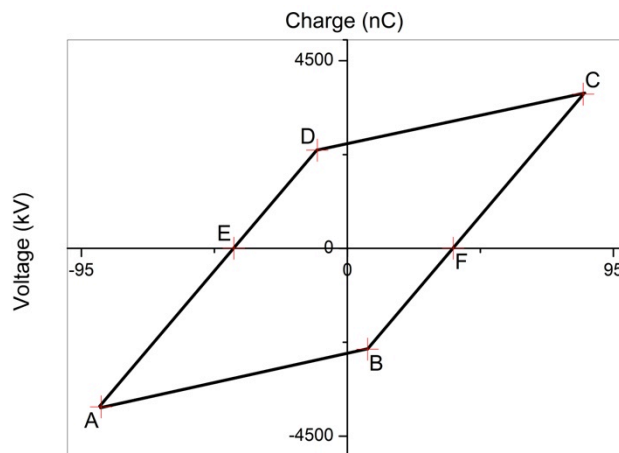
KUVIO 15. Varaus-jännite –kuvaajasta saadaan tulkintakelpoinen rajoittamalla mittauspisteiden arvoaluetta

Tämän jälkeen kuvaajaan sommiteltiin sopiva suunnikas. Kuvion kahdelle sivulle sovitetaan mahdollisimman tarkasti kuviota mukailevat suorat, ja kopioimalla suorat kuvion toisille reunoille, muodostuu täydellinen suunnikas analysointia varten. (kuvio 16).



KUVIO 16. Analysointikelpoinen kuvaaja

Johtuen järjestelmän resistiivisistä osista mittauksista muodostettu Lissajous:n kuvio ei ole täydellinen suunnikas, vaan kulmistaan pyöristynyt. Mittausdataa analysoidessa kuvio kuitenkin oletetaan ideaaliseksi suunnikkaaksi (kuvio 17). (Connolly ym. 2012, 5)



KUVIO 17. Kuvaajasta poimittavien kordinaattien pisteet A-F

Lopulta kuvaajasta poimitaan x- ja y-akselien kordinaatit suunnikkaan kaikista neljästä kulmasta sekä x-akselin leikkauspisteistä. Kuvaajan nimi sekä kerätyt kordinaattiarvot kopioitiin tekstitiedostoon jokainen kuvaaja omalle rivilleen. Myöhemmin tekstitiedostot siirrettiin Exceliin aineiston jatkokäsittelyä varten.

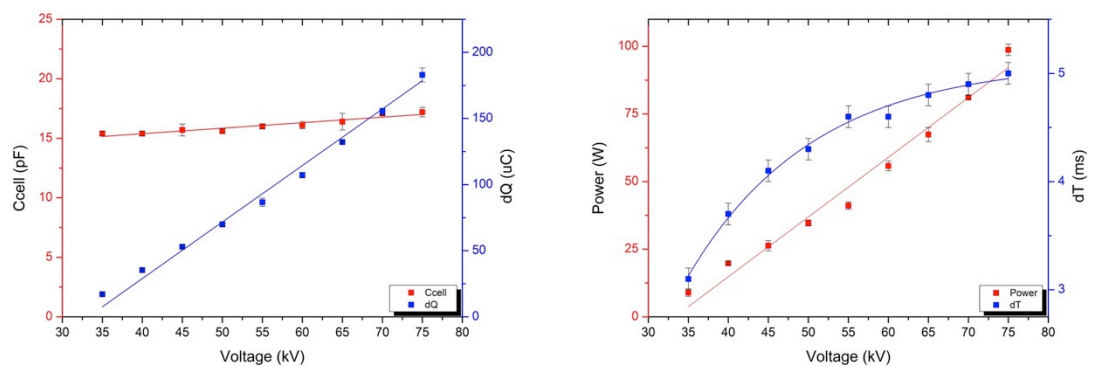
6.3 Dataan liittyvä laskenta

Aineistoon liittyvä laskenta tehtiin Microsoft Excelin (Excel for Mac, 14.3.4, Microsoft Corporation, USA, Washington, Redmond) avulla. Datapisteet sisältävät tiedostot siirrettiin Excelin käyttöön Import-toiminnolla. Datapisteistä kerättiin piikkijännite V_p sekä läpilyöntijännite V_b . Lisäksi aineistosta laskettiin kapasitanssiarvot C_{cell} , C_d ja C_{gap} , varausarvot Q ja ΔQ , purkausaika Δt , β -tekijä sekä teho P kaavojen 6 - 15 –avulla.

Koska kaikista mittaustilanteista otettiin kolme erillistä näytettä, laskettiin aineistosta sekä keskiarvo, että keskihajonta average- ja stdev –kaavoja käyttämällä. Tämän jälkeen aineisto taulukoitiin työn tilaajalta tulleiden ohjeiden mukaisesti erillisiin taulukoihin. Lisäksi aineistosta piirrettiin joukko tulosten analysointia helpottavia kuvaajia joista osa on esitelty Tuloksia-kappaleessa.

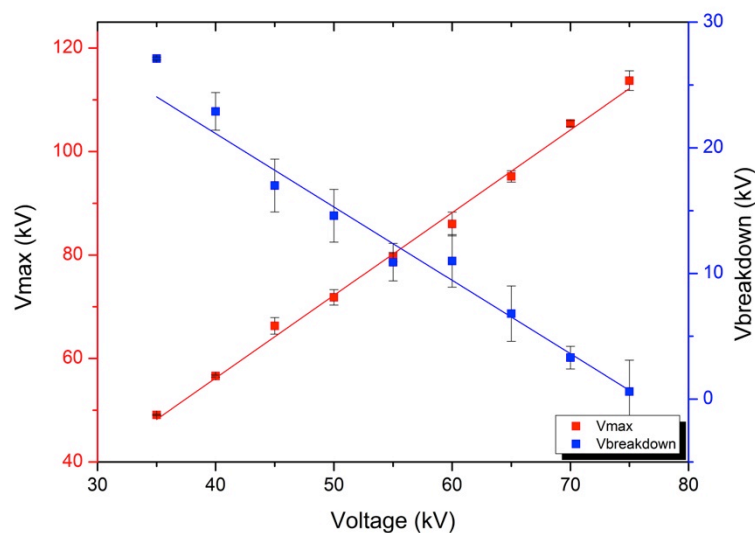
Järjestelmästä lasketut arvot ovat suuruusluokaltaan linjassa muiden rakenteeltaan samankaltaisten DBD-plasmajärjestelmien kanssa. Aukon koon ja/tai dielektrisen esteen kokonaispaksuuden muuttaminen vaikuttavaa järjestelmästä mitattuihin arvoihin aikaisempien, vastaavan kaltaisten tutkimusten mukaisesti.

Varauksen muutos ΔQ ja teho P kasvavat järjestelmän käyttöjännitteen suhteen tehon ollessa muutamasta watista reiluun sataan wattiin (kuvio 18).



KUVIO 18. C_{cell} ja ΔQ (vasemmalla) sekä P ja Δt (oikealla) jännitteen funktiona (22 mm aukko, huoneilma)

Järjestelmään syötetyn jännitteen kasvaessa kasvaa myös mitattu maksimijännite V_{max} lineaarisesti. Saman aikaisesti purkauksen alkamista kuvaava läpilyöntijännite V_b pienenee samassa suhteessa (kuvio 19).

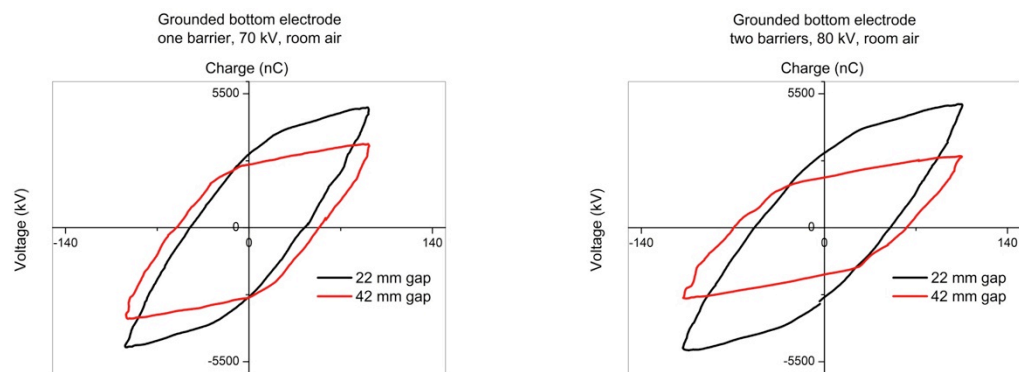


KUVIO 19. Maksimi- ja läpilyöntijännite korreloivat käänteisesti (22 mm aukko, huoneilma)

β -tekijän arvoalue on $0,12 \leq \beta \leq 0,38$ mikä on suuruusluokaltaan täysin tyyppillinen DBD-järjestelmille (Connolly ym. 2012, 5).

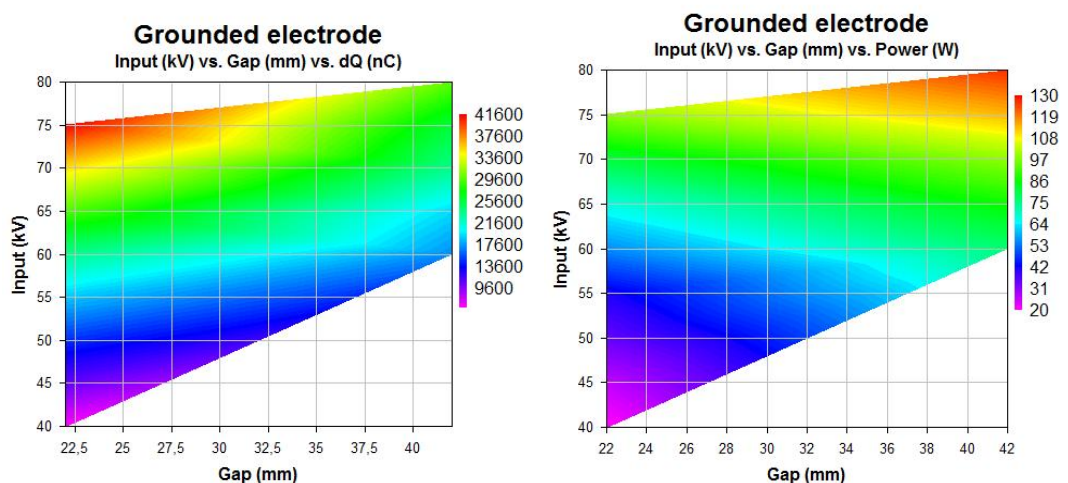
Aukon ja dielektrisen esteen kasvattamisen, kaasun sekä aukon sisällön vaikutus

Aukon kasvattaminen mahdollistaa suuremman tehon kuljettamisen järjestelmän läpi. Kuitenkaan varauksen määrä ja varauksen muutos eivät kasva samassa suhteessa. Odotusten mukaisesti pienempi aukko mahdollistaa suuremman tehon samalla käyttöjännitteellä (kuvio 20). (Zhang ym. 2010, 6) (Radmilović-Radjenović, Radjenović, Matejčik ja Klas 2014, 57-63)



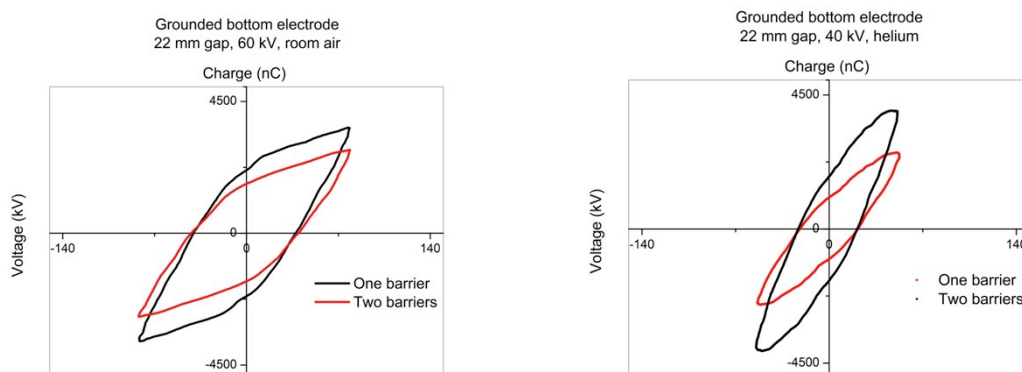
KUVIO 20. Aukon kasvattamisen vaikutus kahdella eri jänniteellä ja dielektrisellä esteellä. Yksi dielektrinen este, 70 kV käyttöjännite, huoneilma (vasemmalla) ja kaksi dielektristä estettä, 80 kV käyttöjännite, huoneilma (oikealla)

Lisäksi aukon kasvattaminen johtaa nopeasti käytännön syistä mahdottomiin jännite- ja tehoarvoihin (kuvio 21). Tästä syystä yleisesti purkausaukko pidetäänkin mahdollisimman pienenä. Esimerkiksi otsonigeneraattoreiden sisältämien purkausputkien aukot ovat tyyppillisesti 0,5 – 2 mm. (Kogelschatz 2003, 16).



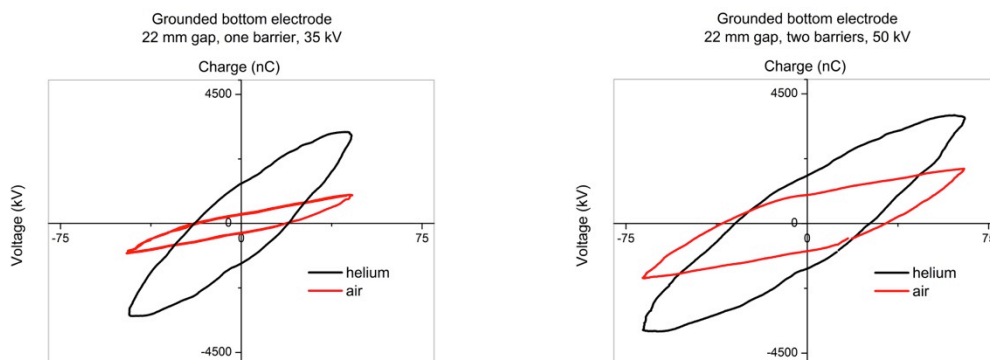
KUVIO 21. ΔQ (vasemmalla) ja P (oikealla) jännitteen ja aukon koon funktiona

Toisen dielektrisen esteen lisääminen järjestelmään vaikutti kuvaajan muotoon ja järjestelmästä mitattuihin arvoihin saman suuntaisesti kuin elektrodien välisen aukon kasvattaminen, mikä myös oli odotettavissa (Zhang ym. 2010, 7) (Iqbal 2009, 99-101). Tämä havainnollistuu kuviossa 22.



KUVIO 22. Dielektrisen esteen vaikutus kuvion muotoon. 22 mm purkausaukko, 60 kV käyttöjännite, huoneilma (vasemmalla) ja 22 mm purkausaukko, 40 kV käyttöjännite, helium (oikealla)

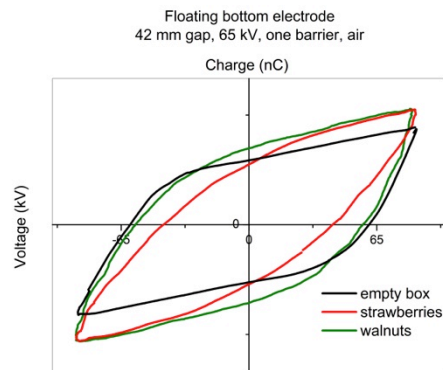
Järjestelmän ominaisuudet muuttuvat radikaalisti vaihtamalla elektrodien välisen kaasun huoneilmasta heliumiin (kuvio 23). Tämä ilmiö on selitettävissä heliumin huoneilmaa paremmista ionisoitumisominaisuuksista (Kogelschatz 2003, 7-8).



KUVIO 23. Järjestelmän ominaisuudet riippuvat myös käytettävästä kaasusta. 22 mm purkausaukko, yksidielektrinen este, 35 kV käyttöjännite (vasemmalla) ja 22 mm purkausaukko, kaksi dielektristä estettä, 50 kV käyttöjännite (oikealla)

Kaiken kaikkiaan heliumilla, hieman tilanteesta riippuen, huomattiin selkeää plasman muodostumista jo 25 – 35 kV pienemmillä jännitteillä kuin vastaavilla koejärjestelyillä huoneilmaa käytettäessä. Vastaavasti myös käyttöjännitteen maksimiarvot tulivat vastaan aiemmin.

Mittaukset tehtiin, paitsi tyhjällä rasiolla, myös mansikoita ja saksanpähkinöitä sisältävillä rasioilla, 42 mm aukkokokoilla ja kelluvaa pohjalektroodia käyttävällä järjestelmällä. Mittauksien ajatuksena oli todentaa aukon sisällä olevan materiaalin mahdollista vaikutusta järjestelmän sähköisiin parametreihin (kuvio 24).



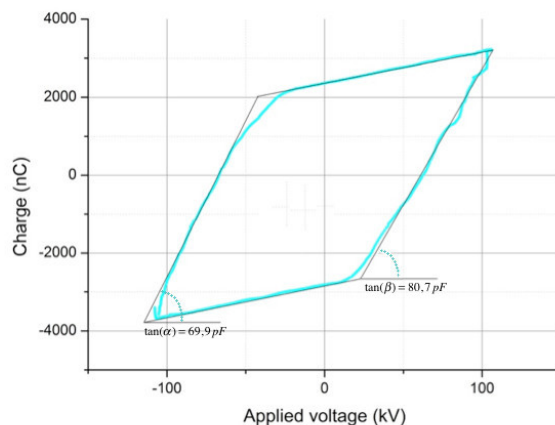
KUVIO 24. Aukon sisällön vaikutus kuvion muotoon

Kuitenkin jo suhteellisen nopeat mittaukset ja tutkimukset osoittivat, että rasiassa sisällä olevan materiaalin tyyppi, määrä ja jopa sijainti rasiassa vaikuttivat mittaustuloksiin näkyvästi. Tällöin todettiin, ettei tarkempia analyysejä aineistosta ole järkevää tehdä.

Kapazitanssilaskelmiin liittyviä huomioita

Aiemmissa tutkimuksissa on todettu Lissajous:n kuviosta tehtävien kapasitanssilaskelmien olevan suhteellisen ylimalkaisia. Kaltevuuden mittauksen virhe arvioidaan, tutkimuksesta riippuen, olevan jopa $\pm 10\%$.

Osaltaan virhe johtuu kuvion epäideaalisesta suunnikasmuodosta, joka johtuu mm. järjestelmän resistiivisestä käyttäytymisestä sekä hajakapasitanssista. (Connolly ym. 2012, 5) (Falkenstein ja Coogan 1997, 821-822). Tämä luonnollisesti aiheuttaa epätarkkuutta ja hajontaa mittauksiin (kuvio 25).



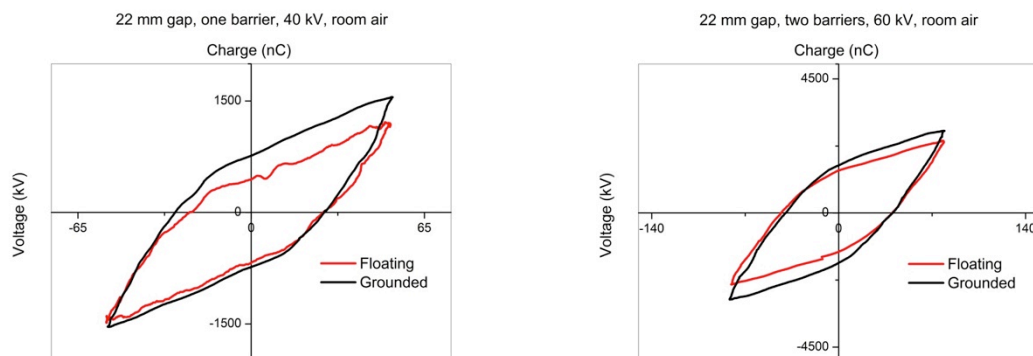
KUVIO 25. Epäideaali suunnikas aiheuttaa epätarkkuutta ja hajontaa

Edellä esitellyistä mittaustilanteista saadun aineiston keskiarvojen perusteella voidaan sanoa, että huoneilmassa, 22 mm aukolla ja yhdellä dielektrisellä esteellä kyseisen järjestelmän purkausaukon

kapasitanssin olevan 21 pF tietämissä, kokonaiskapasitanssin ollessa noin 16 pF ja dielektrisen materiaalin kapasitanssin ollessa 75 pF.

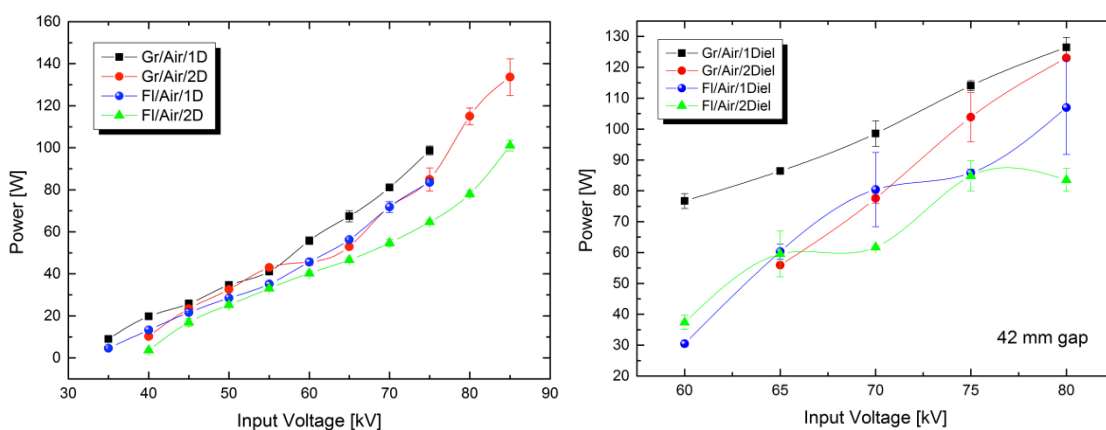
Maadoitettua ja kelluvaa pohjاءlektrodiä käyttävien järjestelmien ero

Kelluvaa elektrodiä käytettäessä, aiheutuu muuntajan paluulinjasta häiriötä järjestelmään ja mittauksiin. (kuvio 26, vasemmalla). Joissain tilanteissa tarkan, ehdottomasti tulkittavissa olevan kuvan muodostaminen ja suunnikasmuodon hakeminen oli hyvinkin haastavaa.



KUVIO 26. Maadoitetun ja maadoittamattoman pohjاءlektrodin vaikutus kuvion muotoon ja kokoon.

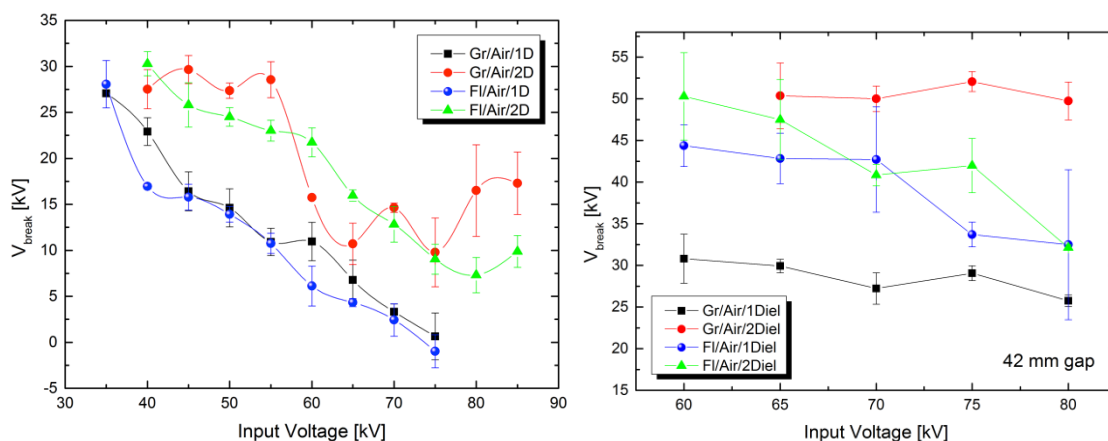
Tämä luonnollisesti vaikeuttaa ehdottoman tarkkojen, matemaattisten johtopäätösten tekemisen maadoittamatonta ja maadoitettua pohjاءlektrodiä käyttävien järjestelmien eroista. Voidaan kuitenkin todeta, että aukon paksuudesta riippumatta maadoitettua pohjاءlektrodiä käyttävän järjestelmän kuljettaa prosessin läpi enemmän tehoa kuin kelluvaa pohjاءlektrodiä käyttävä järjestelmä (kuvio 26 oikealla sekä kuvio 27).



KUVIO 27. Ero järjestelmien välillä muuttuu vähemmän selkeäksi mikäli aukon kokoa kasvatetaan ja/tai käytetään yhden dielektrisen esteen sijasta kahta estettä.

Kuitenkaan ero maadoitetun ja kelluvan pohjاءlektrodin välillä ei näy järjestelmästä mitatuissa läpilyöntijännitteissä (kuvio 28, vasemmalla). Odotusten mukaisesti läpilyöntijännite kasvaa dielektrisen esteen kokonaispaksuuden kasvaessa riippumatta aukon paksuudesta (Radmilović-Radjenović ym.

2014, 57-63). Hyvin suurilla jännitteillä (>75 kV, joilla järjestelmästä tulee suhteellisen epävakaa), näyttäisi maadoitettu järjestelmä kuitenkin olevan hieman tehokkaampi (kuvio 28, oikealla).



KUVIO 28. Läpilyöntijännite käyttöjännitteen funktiona 22 mm aukolla (vasemmalla) ja 42 mm aukolla (oikealla)

Järjestelmän "tehokkuus" ei kuitenkaan ole näin yksinkertaisesti arvioitavissa. Kuitenkin näiden mitaustulosten ja esimerkiksi otsonin muodostumiseen liittyvien tutkimusten ristiin ajaminen aikaisempien, vaikkapa tuoretuotteiden säilyvyyttä koskevien tutkimusten kanssa tulee varmasti olemaan mielenkiintoista.

Tämän päättötyön tarkoituksena oli tuottaa aineisto DBD-plasmajärjestelmän sähköisistä avainparametreista järjestelmästä tehtyjen mittausten avulla ja vertailla sähköiseltä kytkennältään toisistaan eroavia DBD-plasmajärjestelmiä näiden avainparametrien avulla. Molemmat tavoitteet saavutettiin ja aineisto on nyt DIT:n tutkijoiden saatavilla.

Plasmajärjestelmästä lasketut arvot kuten teho P , varauksen muutos ΔQ sekä purkausaika Δt muikailevat ja ovat suuruusluokaltaan johdonmukaisia muiden samankaltaisen DBD-plasmajärjestelmien kanssa. Myös järjestelmän toimintaan vaikuttavien suureiden (dielektrinen este, aukon koko, aukossa oleva kaasu ja materiaali) vaikutukset sekä niistä tehdyt havainnot ovat perusteltavissa ja yhdenmukaiset muiden DBD-plasmajärjestelmistä tehtyjen tutkimusten kanssa. (Connolly ym. 2012, 4-6) (Falkenstein ja Coogan 1997, 822-824) (Zhang ym. 2010, 4-8) (Iqbal 2009, 99-101) (Yeahia ja Mizuno 2005, 2-7)

Eri järjestelmistä (maadoitettua ja kelluvaa pohjaelektrodia käyttävät järjestelmät) lasketuista arvoista voidaan havaita selkeä tehoero. Maadoitettua pohjaelektrodia käyttävä järjestelmä kuljettaa järjestelmän läpi enemmän tehoa aukon koosta tai dielektrisen esteen paksuudesta riippumatta. Järjestelmän kytkentään tehtyjä muutoksia voidaan siis pitää onnistuneina.

Tässä työssä tuotettu aineisto ei kuitenkaan vielä ole loppuun käsitelty, sillä DIT:n tutkijoiden suorittama aineiston jatkoanalysointi on vasta alussa. Materiaali antaa mahdollisuuden plasmajärjestelmän sähköisten parametrien vertailemisen tällä laitteistolla tehtyjen muiden tutkimusten kanssa sekä erilaisten DBD-plasmajärjestelmien vertailemisen keskenään. Lisäksi materiaalin avulla on mahdollista vertailla aikaisempia ja uusia tutkimustuloksia keskenään.

LÄHTEET JA TUOTETUT AINEISTOT

- CONNOLLY, J., VALRAMIDIS, V. P., BYRNE, E., KARATZAS, K. A., CULLEN, P. J., KEENER, K. M., MOSNIER, J. P. 2012. Characterization and antimicrobial efficacy against E. Coli of a helium/air plasma at atmospheric pressure created in a plastic package. *Journal of Physics D: Applied Physics* Volume 46, Number 3.
- FALKENSTEIN, Zoran, COOGAN, John J. 1997. Microdischarge behaviour in the silent discharge of nitrogen-oxygen and water-air mixtures. *Journal of Physics D: Applied Physics* Volume 30, Number 5.
- IQBAL, Muhammad Munawar 2009. *Computational Investigations of Atmospheric Pressure Discharges*. Dublin City University. School of Physical Sciences. Väitöskirja.
- KOGELSCHATZ, Ulrich 2003. Dielectric-barrier Discharges: Their History, Discharge Physics, and Industrial Applications. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Volume 23, Issue 1.
- KOLEVA, Milena 2012. Polymetyylimetakrylaatti (PMMA) (Suom. Sanna Nykänen). Valuatlas yrityksen internet-sivut. [PDF-dokumentti] 2012. [viitattu: 21.1.2014]. Saatavissa: http://www.valuatlas.fi/tietomat/docs/plastics_PMMA_FI.pdf
- MILOSAVLJEVIC, Vladimir 2013-4. Fysiikan tohtori. [suullinen tiedonanto]. Dublin: Dublin City University
- MISRA, N. N., TIWARI, B. K., RAGHAVARAO, K. S. M. S., CULLEN, P. J. 2011. Nonthermal Plasma Inactivation of Food-Borne Pathogens. *Food Engineering Reviews*, Volume 3, Issue 3-4.
- NEHRA, Vijay, KUMAR, Ashoy ja DWIVEDI, H. K. 2008. Atmospheric Non-Thermal Plasma Sources. *International Journal of Engineering*, Volume 2, Issue 1.
- RADMILOVIĆ-RADJENOVIĆ, M., RADJENOVIĆ, B., MATEJČIK, Š., KLAS, M. 2014. The Breakdown Phenomena in Micrometer Scale Direct-Current Gas Discharges. *Plasma Chemistry and Plasma Processing*, Volume 34, Issue 1.
- SEN-BEN, L., DOURMASHKIN, P., BELCHER, J. W. 2004. Visualizing E&M, Chapter 5, Capacitans and dielectrics. [PDF-dokumentti]. [Viitattu 21.1.2014]. Saatavissa: <http://web.mit.edu/viz/EM/visualizations/notes/modules/guide05.pdf>
- TENDERO, Claire, TIXIER, Christelle, TRISTANT, Pascal, DESMAISON, Jean ja LEPRINCE, Philippe 2006. Atmospheric pressure plasmas: A review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy* Volume 61, Issue 1.
- YEHIA, Ashraf ja MIZUNO, Akira 2005. Calculation of the electrical power dissipated in silent discharge reactors. *Journal of Applied Physics* 98.
- ZHANG, Chen, SHAO, Tao, YU, Yuang, NIU, Zheng, YAN, Ping ja ZHOU, Yuanxiang 2010. Comparison of experiment and simulation on dielectric barrier discharge driven by 50 Hz AC power in atmospheric air. *Journal of Electrostatics*, Volume 68, Issue 5.