



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

OLLI HYTÖNEN
RADIOSIGNAALIN LÄPÄISYN OPTIMOINTI LASIRAKENTEISSA

Diplomityö

Tarkastajat:
Professori Mikko Valkama
Tutkijatohtori Joonas Sæe
Tarkastajat ja aihe hyväksyty
8. elokuuta 2018

TIIVISTELMÄ

OLLI HYTÖNEN: Radiosignaalin läpäisyn optimointi lasirakenteissa

Tampereen teknillinen yliopisto

Diplomityö, 92 sivua, 5 liitesivua

Marraskuu 2018

Sähkötekniikan diplomi-insinöörin tutkinto-ohjelma

Pääaine: Elektroniikka

Tarkastajat: Professori Mikko Valkama ja tutkijatohtori Joonas Sæe

Avainsanat: lasirakenteet, ikkunat, radiosignaali, läpäisy, taajuusselektiiviset rakenteet, matalaemissiviteettilasi

Euroopan unionin sekä ympäristöministeriön asettamat tiukentuneet energiatehokkuusmääräykset ovat johtaneet tilanteeseen, jossa uusia rakennuksia rakennettaessa käytetään enemmän metallia sisältäviä rakennusmateriaaleja. Ikkunarakenteissa on siirrytty käyttämään metallipinnoitteisia eristyslaseja lämpösäteilyn läpäisyn estämiseksi, jolla tavoitellaan lämmitykseen tai jäähdytykseen tarvittavan energiamäärän vähentämistä. Nämä niin kutsutut matalan emissiviteetin lasit ovat optisesti läpinäkyviä ja heijastavat hyvin lämpösäteilyä, mutta muodostavat huomattavan esteen radiosignaalien etenemiselle. Erityisesti asukkaan päivittäiseen elämään vaikuttava tekijä on matkaviestinsignaalien heikentyneisyys. Kuuluvuutta voidaan parantaa usein eri tavoin, joista eräitä ovat esimerkiksi toistimet ja sisäverkot. Näillä ratkaisuilla rakennuksen ulkopuolella toimivan matkaviestinverkon kuuluvuus saadaan siirrettyä sisätiloihin, mutta haittoina voivat olla verkon lisääntynyt kompleksisuus ja kustannukset. Julkisissa kohteissa tai suurissa rakennuksissa tällaiset ratkaisut voivat tosin olla perusteltuja.

Eräs mahdollisuus kuuluvuusongelmien ratkaisuun on käyttää laseissa taajuusselektiivisiä pintoja, jotka ovat erilaisista geometrisistä muodoista koostuvia jaksollisia rakenteita. Erilaiset geometriat toimivat eri tavoin ja mahdollistavat esimerkiksi ylipäästö-, alipäästö-, sekä kaistanesto- tai kaistanpäästötyyppisiä rakenteita. Taajuusselektiivinen rakenne voidaan valmistaa kuvioimalla johdinmateriaaliin aukkoja eli poistamalla pinnoitetta halutuista kohdista tai tämän komplementtina, jolloin kuviointi muodostuu johtavista elementeistä. Taajuusselektiivisyys ikkunarakenteessa saavutetaan poistamalla lasin kokonaispinta-alan nähden varsin pieni osa pinnoitteesta, jolloin lasin lämmöneristävyys ei merkittävästi huonone, mutta lasirakenne päästää haluttuja taajuusalueita paremmin lävitseen.

Diplomityössä esitellään keskeisiä taajuusselektiivisen kuvioinnin suunnitteluperiaatteita keskittyen matalaemissiviteettilasin pintaan valmistettavan kuvioinnin ominaisuuksiin. Erityiseksi tutkimuskohteeksi työssä valikoitiin kuusikulmion ja neliön muotoisten renkaiden tyyppiset geometriat, joiden mitoitus ja toimintaa tarkastellaan teorian, tietokonesimulaatioiden ja käytännön läpäisyvaimennusmittausten kautta. Kuvioinnit todettiin simulointien ja mittauksien perusteella toimiviksi. Niillä saavutettiin mittauksissa matkaviestintaajuuksilla parhaimmillaan noin 15 dB parannus signaalin läpäisyyn, jos vertailukohtana käytetään yksittäistä metallipinnoitettua ruutua, jonka vaimennukseksi mitattiin keskimäärin noin 23 dB. Kokonaisen kolminkertaisen matalan emissiviteetin laseilla toteutetun rakenteen osalta vaimennuksen voidaan arvioida olevan noin 30–40 dB, jolloin korvattaessa lasit kuvioituilla laseilla, voidaan myös odottaa merkittävää parannusta.

ABSTRACT

OLLI HYTÖNEN: Optimization of radio signal transmission in glass structures

Tampere University of Technology

Master of Science Thesis, 92 pages, 5 Appendix pages

November 2018

Master's Degree Program in Electrical Engineering

Major: Electronics

Examiners: Professor Mikko Valkama and Postdoctoral researcher Joonas Sää

Keywords: glass structures, windows, frequency selective surfaces, radio signal, transmission, low emissivity glazing

More demanding energy efficiency regulations set by the European Union and Finnish Ministry of the Environment have led into a situation in which newly constructed or renovated buildings utilize more construction materials containing metals. Window structures have been developed to make use of metal coated energy saving glazing to prevent the escape of thermal radiation through the glazing, which in turn aims to reduce the need of energy used for heating or cooling. This so called low emissivity glazing is optically transparent and a good reflector for thermal radiation, but causes a notable obstacle for radio signal propagation through the window structure. Modern mobile communication technologies make use of radio signals and degraded cell phone reception or a poor signal quality can affect resident's daily life. Reception may be improved for example by utilizing repeaters, external antennas or a dedicated small cells inside buildings. However, there may be an increase in network complexity or financial costs. In public or larger buildings solutions like those may be reasonable.

One solution for reception issues is to utilize frequency selective surfaces (FSS), which are periodic structures consisting from certain geometrical shapes. Differently shaped geometries function in different ways and make possible to construct high-pass, low-pass, band-pass or band-stop structures. A frequency selective surface can be constructed into a sheet of conducting material by removing the metal from certain locations which results in an aperture-type structure. FSS can also be constructed from conducting elements which can be seen as a complement of the aperture-type. If some conducting material is removed from the surface of the glazing, the window structure allows some frequency ranges, depending on the designed pattern and its dimensions, to pass through the glazing. This way the quality of signal inside the building can be improved, but thermal insulation properties of the glazing are not significantly deteriorated. Conducting material can be removed for example by laser-light.

The thesis introduces frequency selective surface design principles with a focus to patterns to be manufactured to the surface of low emissivity glazing. A particular topic of research are different hexagonal and rectangular ring shaped geometries which are inspected with the help of existing literature, computer simulations and practical radio signal penetration loss measurements. Patterns were found to be functioning and an increase of approximately 15 dB in radio signal penetration was observed on mobile frequencies. For a comparison, attenuation of a single layered non-patterned low emissivity glass unit was measured to be 23 dB on average. For a conventional non-patterned three-layered low emissivity window structure, an attenuation of 30–40 dB can be estimated. If glazing were to be replaced by patterned glazing units, some improvement could be expected.

ALKUSANAT

Tämä diplomityö on kirjoitettu vuonna 2018 Tampereen teknillisen yliopiston elektronikan ja tietoliikennetekniikan laitoksella Alavudella toimivan lasivalmistaja Finnglass Oy:n toimeksiannosta.

Tahdon kiittää työni tarkastajia ja ohjaajia tutkijatohtori Joonas Säeä ja professori Mikko Valkamaa asiantuntevasta ja yksityiskohtaisesta ohjauksesta, kommenteista työni sisällön kehittämiseksi ja tarvittavista järjestelyistä projektin edistämiseksi. Kiitän myös tohtori-koulutettava Ari Aspia mittaustilaan, mittajärjestelyyn ja läpäisyvaimennukseen liittyvistä kommenteista ja opastuksesta, lehtori Jari Kangasta simulointiohjelmistoon liittyvissä kysymyksissä avustamisesta ja kollegaani Tuomo Hentilää mittauksissa avustamisesta. Erityiskiitokset kuuluvat myös Finnglass Oy:n toimitusjohtaja Timo Saukolle ja tuotantopäällikkö Markku Manniselle mielenkiintoisen ja ajankohtaisen aiheen tarjoamisesta, työssä tarvittavien lasikappaleiden valmistamisesta, näkemyksistään radiosignaalin läpäisyyn ja energiatehokkuuden tärkeydestä sekä tutkimusprojektin rahoittamisesta.

Kiitän myös perhettäni, ystäviäni sekä puolisoani Viiviä tuesta ja kiinnostuksesta työhöni liittyen.

Tampereella, 16.11.2018

Olli Hytönen

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	LASIRAKENTEET	4
2.1	Valmistaminen ja tasolasituotteet	4
2.2	Optinen läpäisy ja sähkömagneettisen säteilyn spektri.....	6
2.3	Lämmön siirtyminen.....	7
2.3.1	Emissiviteetti	8
2.3.2	Lämmönjohtavuus.....	9
2.3.3	Lämpöresistanssi.....	11
2.3.4	Lämmönläpäisykerroin eli U-arvo.....	11
2.4	Lämmön siirtyminen lasirakenteissa	13
2.5	Matalaemissiviteettilasit	14
2.5.1	Off-line- eli pehmeäpinnoite	15
2.5.2	On-line- eli kovapinnoite.....	15
2.6	Matalan emissiviteetin ikkunoiden vaikutus radiosignaalin läpäisyyn	16
2.7	Lasin sähköiset materiaaliparametrit	17
3.	RADIOSIGNAALIT	19
3.1	Maxwellin yhtälöt.....	19
3.2	Aaltoyhtälö ja radiosignaalin eteneminen.....	21
3.2.1	Radiosignaalin eteneminen tyhjiössä	22
3.2.2	Radiosignaalin eteneminen häviöllisessä materiaalissa	24
3.2.3	Radiosignaalin eteneminen johtimessa	25
3.2.4	Radiosignaali materiaalirajapinnassa	26
3.3	Poyntingin teoreema	28
3.4	Polarisaatio	29
3.5	Heijastuminen.....	30
3.6	Sironta.....	33
3.7	Diffraktio.....	34
3.8	Signaalin eteneminen käytännön olosuhteissa	34
3.9	Lähikenttä ja kaukokenttä	36
3.10	S-parametrit ja läpäisyvaimennus.....	37
3.11	Matkaviestinverkot	38
3.12	Matkaviestinverkkojen taajuusalueet Suomessa	40
4.	SIGNAALIN LÄPÄISYN OPTIMOINTI	43
4.1	Aktiiviset ja passiiviset toistimet.....	43
4.2	Sisäverkot.....	45
4.3	RF-aukot.....	46
4.4	Taajuusselektiiviset rakenteet	46
4.4.1	Jaksolliset rakenteet	48
4.4.2	Jaksollisen rakenteen pää- ja sivukeilat	49
4.4.3	Taajuusselektiiviset kuvioinnit	50

4.4.4	Resonanssitaaajuus ja kaistanleveys.....	54
4.4.5	Rakenteiden sijoittelu ja suorituskyky	56
5.	LASIRAKENTEIDEN MALLINNUS JA SIMULOINTI.....	59
5.1	Ohjelmisto	59
5.2	Simulointimallit ja parametrit	59
5.2.1	Metallipinnoitteen johtavuus ja tunkeutumissyvyys.....	61
5.2.2	Yksikkösolun määrittely	62
5.2.3	Kuvioiden kokoluokan määrittely	63
5.2.4	Rakenteiden dimensiot	64
5.3	Simulointitulokset.....	66
5.3.1	Lasin pintaan suorassa kulmassa saapuva aalto.....	66
5.3.2	Tulokulman ja polarisaation vaikutus	68
6.	KOEJÄRJESTELYT, MITTAUSTULOKSET JA SUORITUSKYKY.....	71
6.1	Koejärjestelyt ja mittalaitteet	71
6.2	Mittaustulokset	74
6.3	Virheanalyysi.....	76
6.3.1	Epävarmuustekijät.....	77
6.3.2	Todellisen kolminkertaisen ikkunarakenteen läpäisykyky	78
6.3.3	Kokonaisuus	82
6.4	Arvio kuviointien vaikutuksesta lasirakenteen U-arvoon.....	82
6.5	Kuvioinnin näkyvyys.....	83
7.	YHTEENVETO.....	85
	LÄHTEET	88

LIITE A: Suunnitellut taajuusselektiiviset kuvat

LIITE B: Simulointituloksia eri tulokulmilla

KUVALUETTELO

<i>Kuva 2.1: Tasolasin valmistus float-menetelmällä. [6, s.16].....</i>	5
<i>Kuva 2.2: Havainnollistava esitys sähkömagneettisen säteilyn spektristä.</i>	7
<i>Kuva 2.3: Esimerkkejä lämmön siirtymisestä ikkunarakenteessa. (1) Lämpösäteily. (2) Johtuminen lasien ja konvektio ilmapälin läpi. (3) Vuoto tiivisteessä tai rakenteessa. (4) Johtuminen karmien ja/tai välilevyrakenteen kautta.....</i>	13
<i>Kuva 3.1: Z-suuntaan nopeudella v etenevän taso-aallon aaltorintamat.</i>	22
<i>Kuva 3.2: Z-suuntaan etenevän sinimuotoisen taso-aallon toisiinsa nähden kohtisuoraan olevat sähkö- ja magneettikentät.</i>	23
<i>Kuva 3.3: Sähkömagneettinen aalto rajapinnassa. Kuvassa n on materiaalirajapinnan normaalivektori.....</i>	26
<i>Kuva 3.4: Pinnan S rajaama tilavuus V, jonka sisällä sähkökenttä E, magneettikenttä H sekä virtalähde J_s. Vektori n on pinnan normaalivektori. [muokaten lähteestä 18, s.26].....</i>	28
<i>Kuva 3.5: Eri polarisaatioita. (a) Elliptinen polarisaatio. (b) Pyöröpolarisatio. (c) Lineaarinen polarisaatio. Z-suunta osoittaa kohti katsojaa.</i>	29
<i>Kuva 3.6: Taso-aallon heijastuminen ja taittuminen (läpäisy) sen kohdatessa rajapinnan. [muokaten lähteestä 19, s.445].....</i>	31
<i>Kuva 3.7: Pinnan karkeuden vaikutus sirontaan ja heijastukseen. [muokaten lähteestä 21, s.46].....</i>	33
<i>Kuva 3.8: Diffraktion avulla aaltorintamat voivat edetä aallon etenemisen tiellä olevan esteen taakse. Tarkasteltu yläpuolelta.</i>	34
<i>Kuva 3.9: Tukiaseman ja päätelaitteen välisen välillä signaali voi kulkea montaa eri reittiä sekä kokea useita eri ilmiöitä edetessään.</i>	35
<i>Kuva 3.10: Lähikentän ja kaukokentän välinen etäisyys antennille, jonka halkaisija on D.</i>	36
<i>Kuva 3.11: Soluihin jaettu matkaviestinverkko, jossa (a) jokaisessa solussa tukiasema (b) tukiasemat suuntaavilla antennilla solujen reunoilla. [24], [25, s.56–57].....</i>	39
<i>Kuva 4.1: Toistinta voidaan käyttää parantamaan signaalin kuuluvuutta esimerkiksi sisätiloissa.</i>	43
<i>Kuva 4.2: Säteilevän kaapelin rakenne.....</i>	44
<i>Kuva 4.3: Passiiviantennijärjestelmä.</i>	44
<i>Kuva 4.4: Sisäverkkoratkaisuja. (a) Yksi solu. (b) Yksi solu säteilevillä kaapeleilla. (c) Yksi solu hajautetulla antennijärjestelmällä. (d) Usean solun strategia isossa rakennuksessa.....</i>	45
<i>Kuva 4.5: Taajuusselektiivisen ikkunallasin toimintaperiaate. [muokaten lähteestä 16].....</i>	47
<i>Kuva 4.6: Z-suunnassa jaksollinen äärettömän suuri yksiuotteinen rakenne. Harmaa edustaa kuviointia.</i>	48

<i>Kuva 4.7: Z-suuntaan jaksollisen FSS-pinnan elementtien etäisyyden d vaikutus sivukeiloihin.</i>	49
<i>Kuva 4.8: Aukkotyyppisen (vas.) ja levytyyppisen taajuusselektiivisen rakenteen läpäisykaistat. [muokaten lähteestä 32], [22, s.2–4], [40, s.4]</i>	51
<i>Kuva 4.9: Levytyyppisiä FSS-rakenteita. [37, s.28], [39, s.651]</i>	51
<i>Kuva 4.10: Pysty- ja vaakasuuntaiset dipolit (vas.) sekä keskeltä yhdistettyjä FSS-rakenteita: tripoli, ankkuri, ristikkäinen dipoli, Jerusalemin risti ja hakaristi-tyyppinen rakenne. [22, s.4], [37, s.28], [39, s.649]</i>	52
<i>Kuva 4.11: Silmukkatyyppisiä FSS-rakenteita: kolmijalkainen elementti (vas.), nelijalkainen elementti, neliörengas, kuusikulmio, ympyrä ja halkaistu ympyrä (engl. split-ring, SR). [22, s.4], [37, s.28], [39, s.647], [41]</i>	53
<i>Kuva 4.12: Esimerkkejä sisäkkäisistä silmukkarakenteista: neliörengaat (DSL), ympyrät (DR) ja halkaistut ympyrät (SR). [20], [22, s.113–138], [32]</i>	53
<i>Kuva 4.13: Esimerkkejä yhdistelmätyyppisistä FSS-rakenteista. [37, s.28], [39, s.651]</i>	54
<i>Kuva 4.14: Dielektrisen substraatin vaikutus resonanssitaajuuteen. (a) Äärettömän paksu substraatti. (b) Äärellisen paksuinen substraatti. Paksuus voi olla esimerkiksi suuruusluokkaa $d \sim 0,05\lambda$. [muokaten lähteestä 37, s.12]</i>	54
<i>Kuva 4.15: Aalto voi saapua pintaan eri kulmista. Kulma θ on xy-tasossa olevan pinnan normaaliin nähden vertikaalinen kulma ja φ horisontaalinen kulma. Kuvioinnin suorituskyky voi muuttua tulokulman muuttuessa.</i>	56
<i>Kuva 4.16: Esimerkkejä kuvioiden limittämisestä. [37, s.33, s. 40]</i>	57
<i>Kuva 4.17: Erilaisia tapoja taulukoida elementtejä. (a) Suorista palasista koostuva asettelu. (b) Suorakulmainen ruudukko. (c) Kuusikulmainen ruudukko. (d) Tiiliseinä. Harmaat kuviot eivät edusta mitään erityistä geometriaa vaan havainnollistavat yleisiä muotoja. [22], [37]</i>	57
<i>Kuva 5.1: Simulointimalli ja yksikkösolu ilman FSS-kuviointia. Aallon etenemissuunta mallissa on negatiiviseen z-suuntaan.</i>	60
<i>Kuva 5.2: Ei-neliskulmaisen yksikkösolun muodostus. Symmetrinen, mutta eri dimensiot x- ja y-suunnissa omaava solu muodostuu harmaan alueen sisälle jäävästä alasta.</i>	63
<i>Kuva 5.3: Simulointitulokset. Vapaaseen tilaan PEC-kerrokselle noin taajuudelle 3500 MHz suunniteltu kuvio resonoi lasisubstraatin lisäämisen jälkeen noin taajuudella 1700–1800 MHz. Substraatti vaikuttaa myös kaistanleveyteen. $S(2,1)$ kuvaa sitä, kuinka hyvin rakenne läpäisee sähkömagneettista aaltoa (lähempänä nollaa = parempi).</i>	64

<i>Kuva 5.4: Eristyslaseielementin simulointitulokset TM-polarisoituneelle aallolle. Aalto saapuu lasin pintaan nähden kohtisuorassa.</i>	66
<i>Kuva 5.5: Eristyslaseielementin simulointitulokset TE-polarisoituneelle aallolle. Aalto saapuu lasin pintaan nähden kohtisuorassa.</i>	67
<i>Kuva 5.6: Yksinkertaisen kuusikulmio-kuvion läpäisy x-suuntaisella aallolla tulokulman θ muuttuessa (TM-polarisaatio).....</i>	69
<i>Kuva 5.7: Yksinkertaisen kuusikulmio-kuvion läpäisy y-suuntaisella aallolla tulokulman θ muuttuessa (TE-polarisaatio).....</i>	69
<i>Kuva 6.1: Mittaustilan pohjapiirros.</i>	71
<i>Kuva 6.2: Mittaustila ilman mitattavia materiaaleja. Kuvattu huoneen 1 suunnasta kohti mittaaukkoa. Mittaustila on vuorattu seinän toiselta puolelta kuvan keskellä näkyvällä alumiinipeitteisellä eristelevyillä ja kulkuaukon kohdalla eristelevyä on asetettu kaksi kerrosta päällekkäin siten, että aukko peittyi. Lähettävä antenni sijaitsee etu-alalla.</i>	72
<i>Kuva 6.3: Mittaus- ja datankeruujärjestely läpäisyvaimennusmittaukselle (kappale 3.10).</i>	73
<i>Kuva 6.4: Metallinen eristesukka lasin reunassa yksittäisen eristyslasipaketin mittauksessa (vas.). Kolminkertainen lasirakenne paikallaan (oik.).....</i>	73
<i>Kuva 6.5: Simuloidut ja mitatut eristyslasipaketit. Katkoviiva esittää simuloidut ja yhtenäinen viiva mitatut tulokset.</i>	75
<i>Kuva 6.6: Yksittäisten kuvioitujen off-line -pinnoitettujen lasien mittaustulokset.</i>	76
<i>Kuva 6.7: Havainne kuva kolminkertaisesta ikkunarakenteesta mittauksessa.</i>	78
<i>Kuva 6.8: Eristyslasi ja tavallinen kirkas lasi etäisyydellä 100 mm.</i>	79
<i>Kuva 6.9: Eristyslasi ja vastaavalla kuviolla kuvioitu yksittäinen lasi etäisyydellä 100 mm.</i>	79
<i>Kuva 6.10: Kaksinkertaisen kuusikulmio-kuvioinnin vaimennus eristyslasipaketin ja yksittäisen kuvioidun lasin etäisyyden muuttuessa.</i>	80
<i>Kuva 6.11: Läpäisy ja heijastuminen kerroksittaisessa dielektrisessä rakenteessa. [muokaten lähteestä 37, s. 389–390] Alkuperäisen lähteen kuvassa kaikki materiaalikerrokset ovat kiinteitä kerroksia, mutta peruseräatteen voidaan olettaa olevan vastaava tässä tilanteessa.</i>	81
<i>Kuva 6.12: Valokuva yksittäiseen on-line -pinnoitettuun lasiin valmistetusta kuvioinnista ulkotiloissa (kaksinkertainen kuusikulmio). Tarkennus on kohdistettu lasin pinnalla nähtäviin vesipisaroihin, tausta on tarkoituksella epätarkka. Kuusikulmaiset, tiheästi asetellut, toisistaan irti olevat kuvioinnit ovat havaittavissa.</i>	84

LYHENTEET JA MERKINNÄT

2G	engl. Second generation, toisen sukupolven matkaviestinjärjestelmä, GSM
3G	engl. Third generation, kolmannen sukupolven matkaviestinjärjestelmä, UMTS
3GPP	engl. 3rd Generation Partnership Project, useista telekommunikaatiotahoista koostuva organisaatio, joka kehittää ja hallinnoi matkaviestinteknologiaihin liittyviä järjestelmäspesifikaatioita
4G	engl. Fourth generation, neljännen sukupolven matkaviestinjärjestelmä, LTE
5G	engl. 5th generation wireless systems, viidennen sukupolven matkaviestinjärjestelmästä käytetty nimitys
COMSOL	COMSOL Multiphysics, simulointiohjelmisto
CDMA	engl. Code-division Multiple Access, koodijakokanavointi
SR	engl. split-ring, eräs tajuusselektiivisen kuvioinnin tyyppi
BSS	engl. Base Station Subsystem, tukiasemajärjestelmä
dB	desibeli, logaritmisen asteikon dimensioton yksikkö tehojen tai jännitteiden suhteiden esittämiseen
dB _i	engl. decibel isotropic, antennivahvistus verrattuna ideaaliseen isotrooppiseen antenniin
dB _m	teho desibeleinä suhteutettuna yhteen milliwattiin
DR	engl. double ring, eräs taajuusselektiivisen kuvioinnin tyyppi
DSL	engl. double square-loop, eräs taajuusselektiivisen kuvioinnin tyyppi
EDGE	engl. Enhanced Data Rates for GSM Evolution, pakettikytkentäisen tiedonsiirron teknologia GSM-verkossa
EU	Euroopan unioni
FDD	engl. Frequency Division Duplex, taajuusjakodupleksi
FR	engl. frequency range, taajuusalue
FSS	engl. frequency selective surface, tajuusselektiivinen pinta
GPRS	engl. General Packet Radio Service, pakettikytkentäisen tiedonsiirron teknologia GSM-verkossa
GSM	engl. Global System for Mobile communication, matkaviestinteknologia
HSPA	engl. High Speed Packet Access, parannettu UMTS-teknologia
IN	engl. Intelligent Network Subsystem, GSM-verkon lisäpalveluja tarjoava osa
IR	engl. infrared, infrapuna
low-e	engl. low emissivity, matala emissiviteetti, matalan emissiviteetin lasi
LHCP	engl. left-hand circularly polarized, vasenkätinen pyöröpolarisaatio
LTE	engl. Long Term Evolution, matkaviestinteknologia
LTE-A	engl. Long Term Evolution Advanced, matkaviestinteknologia
MATLAB	numeerisen laskennan tietokoneohjelmisto
NSS	engl. Network Subsystem, GSM-verkon puheluiden ja käyttäjien hallintaan liittyvä palvelu
off-line-lasi	pehmeäpinnoitettu matalan emissiviteetin lasi
on-line-lasi	kovapinnoitettu matalan emissiviteetin lasi
PEC	engl. perfect electric conductor, ideaalijohdin

R-arvo	konvektion ja lämpösäteilyn huomioiva lämpöresistanssi [$\frac{m^2 \cdot K}{W}$]
RF	engl. radio frequency, radiotaajuus, radiotaajuinen
RHPC	engl. right-hand circularly polarized, oikeakätinen pyöröpolarisaatio
RX	engl. receiving, vastaanottava (esimerkiksi antenni)
S-matriisi	engl. Scattering matrix, verkkoa kuvaavien S-parametrien matriisi
TBC	engl. transition boundary condition, siirtymäreunaehto
TDD	engl. Time Division Duplex, aikajakodupleksi
TE	engl. transverse electric, kohtisuora polarisaatio
TM	engl. transverse magnetic, rinnakkaispolarisaatio
TX	engl. transmitting, lähettävä (esimerkiksi antenni)
U-arvo	lämmönläpäisykertoimesta [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$] käytetty termi
UMTS	engl. Universal Mobile Telecommunication System, matkaviestinteknologia
UV	ultravioletti
WLAN	engl. wireless local area network, langaton lähiverkko
A	pinta-ala [m^2]
\bar{B}	magneettivuon tiheys [T]
c	valonnopeus [$\frac{m}{s}$]
\bar{D}	sähkövuon tiheys [$\frac{C}{m^2}$]
d	etäisyys [m]
\bar{E}	sähkökentän voimakkuus [$\frac{V}{m}$]
E_z, E_x, E_y	sähkökentän komponentit karteesisessa koordinaatistossa
E^+	aallon etenemissuuntainen sähkökenttä [$\frac{V}{m}$]
E^-	aallon etenemissuunnalle vastakkainen sähkökenttä [$\frac{V}{m}$]
f	taajuus [Hz]
g	johtavuus [$\frac{S}{m}$]
G_{RX}	vastaanottavan antennin teho [dBi]
G_{TX}	lähettävän antennin teho [dBi]
h	korkeus [m]
\bar{H}	magneettikentän voimakkuus [$\frac{A}{m}$]
H_z, H_x, H_y	magneettikentän komponentit karteesisessa koordinaatistossa
H	lämpövirta [W]
\bar{J}	virrantiheys [$\frac{A}{m^2}$]
\bar{J}_s	virtalähde, varaustiheys
k	aaltoluku [$\frac{1}{m}$]
k_{zn}	jaksollisen funktion vaihetta kuvaava termi
k_h	lämmönjohtavuus [$\frac{W}{m \cdot K}$]
L	pituus, paksuus [m]
L_0	etenemisvaimennus [dB]
L_M	muu häviö tai vaimennus [dB]
L_{MAT}	mitattavan materiaalin vaimennus [dB]
L_{RX}	vastaanottavan laitteen häviö [dB]
L_{TX}	lähettävän laitteen häviö [dB]

\bar{n}	pinnan normaalivektori
n	taitekerroin
n_1	taitekerroin materiaalissa 1
n_2	taitekerroin materiaalissa 2
P_{MAT}	mitattu teho materiaali paikallaan [dBm]
P_V	mitattu teho vapaassa tilassa [dBm]
P_{RX}	vastaanotettu teho [dBm]
P_{TX}	lähetetty teho [dBm]
Q	lämpö [J]
R	etäisyys [m]
R_{ff}	kaukokentän etäisyys [m]
R_{th}	lämpöresistanssi [$\frac{m^2 \cdot K}{W}$]
R_{tot}	kokonaislämpöresistanssi [$\frac{m^2 \cdot K}{W}$]
R_i	yksittäisen rakennekerroksen lämpöresistanssi [$\frac{m^2 \cdot K}{W}$]
S	pinta [m ²]
\bar{S}	Poyntingin vektori
S_{11}	S-parametri (1,1), portin 1 heijastuskerroin
S_{21}	S-parametri (2,1), myötäsuuntainen vahvistus
S_{12}	S-parametri (1,2), vastakkaisuuntainen vahvistus
S_{22}	S-parametri (2,2), portin 2 heijastuskerroin
T	lämpötila [°C, K]
T_H	lämpötila, kuuma [°C, K]
T_C	lämpötila, kylmä [°C, K]
U	U-arvo, lämmönläpäisykerroin [$\frac{W}{m^2 \cdot K}$]
\bar{v}	nopeusvektori [$\frac{m}{s}$]
v_p	aallon etenemisnopeus [$\frac{m}{s}$]
V	tilavuus [m ³]
V_1^+	2-porttisen järjestelmän porttiin 1 syötetty aalto [V]
V_1^-	2-porttisen järjestelmän portista 1 heijastunut aalto [V]
V_2^+	2-porttisen järjestelmän porttiin 2 syötetty aalto [V]
V_2^-	2-porttisen järjestelmän portista 2 heijastunut aalto [V]
\hat{x}	x-suuntainen vektori
\hat{y}	y-suuntainen vektori
α	vaimennusvakio
β	vaihevakio
γ	kompleksinen etenemisvakio
Γ	heijastuskerroin
Γ_{TE}	heijastuskerroin TE-polarisoituneelle aallolle
Γ_{TM}	heijastuskerroin TM-polarisoituneelle aallolle
δ	tunkeutumissyvyys [m]
ϵ	permittiivisyys [$\frac{F}{m}$]
ϵ_0	tyhjiön permittiivisyys [$\frac{F}{m}$]
ϵ_{eff}	efektiivinen permittiivisyys [$\frac{F}{m}$]
ϵ_r	suhteellinen permittiivisyys

ϵ	emissiviteetti
η	aaltoimpedanssi [Ω]
θ	nousukulma (engl. elevation angle) [$^\circ$]
θ_1	saapuvan aallon kulma [$^\circ$]
θ_2	läpäisevän aallon kulma [$^\circ$]
θ_3	heijastuvan aallon kulma [$^\circ$]
θ_B	Brewsterin kulma [$^\circ$]
λ	aallonpituus [m]
μ	permeabiliteetti [$\frac{H}{m}$]
μ_0	tyhjiön permeabiliteetti [$\frac{H}{m}$]
μ_r	suhteellinen permeabiliteetti
ρ	varaustiheys [$\frac{C}{m^3}$]
ϱ	ominaisvastus [$\Omega \cdot m$]
σ	Stefanin-Bolzmännin vakio [$\frac{W}{m^3 \cdot K^4}$]
τ	läpäisykerroin
τ_{TE}	läpäisykerroin TE-polarisoituneelle aallolle
τ_{TM}	läpäisykerroin TM-polarisoituneelle aallolle
φ	horisontaalinen kulma (engl. azimuth angle) [$^\circ$]
ϕ	vektorikenttä
ϕ_1	heijastuneiden aaltojen vaihe-ero [$^\circ$]
ϕ_G	FSS-rakenteen sivukeilojen sijainti [rad]
ω	kulmataajuus [$\frac{rad}{s}$]

1. JOHDANTO

Ilmastonmuutos tarkoittaa maapallon lämpötilan kasvua ihmisen toiminnan seurauksena. Ilmastonmuutos aiheutuu hiilidioksidin, metaanin ja muiden kasvihuonekaasujen määrän lisääntymisen aiheuttamasta voimistuneesta kasvihuoneilmapiöistä. Kasvihuoneilmapiössä aurinkosta saapuva säteily läpäisee ilmapiöhen, mutta kasvihuonekaasut rajoittavat lämpösäteilyn poistumista planeetalta, mikä johtaa lämpötilan nousuun planeetan ilmapiöhässä ja pinnalla. [1, s.1–4] Ihminen voi kuitenkin omalla toiminnallaan vaikuttaa kasvihuoneilmapiön voimakkuuteen esimerkiksi vähentämällä kasvihuonekaasujen tuottamista. Energian säästämiseksi ja energiatehokkuudelle onkin viranomaisten toimesta asetettu voimakkaita vaatimuksia eri toimialoilla muutoksen hillitsemiseksi. Euroopan unioni (EU) on asettanut tavoitteeksi parantaa energiatehokkuutta sekä vähentää unionin kasvihuonepäästöjä 20 % alle vuoden 1990 tason vuoteen 2020 mennessä ja 40 % vuoteen 2030 mennessä. [2] Näillä energian säästämiseksi asetetuilla tavoitteilla pyritään unionin ja valtiotasolla vaikuttamaan ihmisen toimintaan ja hillitsemään siten ilmastonmuutosta. Tavoitteet ovat realisoituneet myös kotimaiseen lainsäädäntöön ja rakentamismääräyksiin.

Vuonna 2016 Suomen kasvihuonekaasupäästöistä noin 75 % tuotettiin energiasektorin toimesta, johon kuuluvat sähkön ja lämmön tuotto [3]. Kokonaisenergian loppukäyttö rakennusten lämmitykseen vuonna 2016 oli puolestaan noin 26 %, eli hieman yli neljännes kaikesta käytetystä energiasta [4]. EU:n asettamat vaatimukset energian säästämiseksi vaikuttavat rakennusalaan, jossa uusia rakennuksia pyritään rakentamaan mahdollisimman energiatehokkaasti. Rakennusten energiatehokkuutta on pyritty parantamaan muun muassa käyttämällä paksumpia ja paremmin lämpöä eristäviä ja heijastavia materiaaleja, jolloin lämmityskauden aikana lämmityksen tarve vähenee ja vastaavasti kesäkuukausien aikana rakennuksen jäähtytystarve on pienempi. Erityisesti seinä- ja kattorakenteissa rakenteiden paksuntaminen, eristyksen lisääminen ja lämpösäteilyn karkaamisen estäminen metallisilla rakenteilla ovat suoraviivaisia keinoja.

Ikkunoissa on perinteisesti käytetty rakenteita, joissa on esimerkiksi yksilasiset useampikertaiset ikkunat, kaksi- tai kolmilasinen kaasutäytteinen eristyslasi tai jonkinlainen edellisten yhdistelmä. Lämpöeristävyyden parantamiseksi ikkunarakenteissa on siirrytty käyttämään niin kutsuttuja matalaemissiviteettilaseja. Nämä ovat lasirakenteita, joissa perinteisen kirkkaan ikkunalasin sijaan käytetään lasia, jossa lasin pinnalla on ohut metalli- tai metallioksidikerros. Metallikerros toimii hyvänä lämpösäteilyn heijastajana ja on optisesti läpinäkyvä, eli ei vaikuta juurikaan ikkunan kykyyn päästää valoa lävitseen. Radiosignaalit (engl. radio frequency, RF) kuitenkin läpäisevät osittain metallista koostuvaa

ikkunarakennetta varsin heikosti. Metallioksidikerroksia käyttävien ikkunoiden vaimennus voi nykyisillä sekä lähitulevaisuuden matkaviestintaajuuksilla olla suuruusluokaltaan noin 30-40 desibeliä (dB) eli signaalin voimakkuus lasin toisella puolella voi olla vain noin yksi tuhannesosa verrattuna ikkunan ulkopuoliseen tasoon [5]. Perinteisemmillä ikkunarakenteilla lasin vaimennus matkaviestintaajuuksilla on muutamia desibelejä, joten vastaavan luokan ongelmia läpäisyn suhteen ei ole ollut ja ikkunat ovatkin tähän asti olleet radiosignaalien esteettömin tie rakennuksiin [5].

Nykyisin suurin osa matkaviestintaajuisesta puhelin-, viesti- ja dataliikenteestä tapahtuu sisätiloista. Huono kuuluvuus tiloissa, joissa mobiililaitteita käytetään eniten, on hyvin valitettavaa loppukäyttäjän kannalta. Mobiilitiedonsiirtoa käytetään nykyisin useisiin vapaa-alan aktiviteetteihin, joihin lukeutuu esimerkiksi videopelaaminen, sekä televisiolähetysten, elokuvien ja musiikin suoratoistaminen internetistä. Televisio-ohjelmien, sarjojen ja elokuvien katselun siirtyminen yhä enenevässä määrin erilaisiin suoratoistopalveluihin motivoi edelleen hakemaan asiaan ratkaisua käyttäjän mukavuutta silmällä pitäen.

Mobiilitiedonsiirron jatkuva kasvu ja tarve saavuttaa nopeat yhteydet käyttöpaikasta riippumatta on myöskin yhteiskunnan etujen mukaista. Useiden yhteiskunnan tarjoamien peruspalveluiden, kuten esimerkiksi asumiseen ja rakentamiseen, viranomaisten toimintaan, työssäkäyntiin, toimeentuloon, verotukseen sekä oikeuteen ja turvallisuuteen liittyvien palvelujen siirtyminen verkkoon luo käyttäjille pakottavan tarpeen päästä näihin palveluihin käsiksi. Myös valtaosa pankkien tarjoamista rahoitus- ja vakuutuspalveluista hoidetaan nykyisin verkkopankkipalveluiden kautta. Kotoaan käsin kokonaan tai osittain työskentelevät ihmiset ovat myös useissa eri töissä riippuvaisia hyvistä internet-yhteyksistä, jolloin huono mobiiliverkon kuuluvuus voi vaikuttaa työntekoon ja tuottavuuteen. Näiden lisäksi, yhtenä tärkeimmistä yksittäisistä asioista, on käyttäjän välttämätön tarve tavoittaa pelastuspalvelut sijainnistaan riippumatta. Heikko kuuluvuus voi aiheuttaa terveyden tai turvallisuuteen liittyvän uhan, jos käyttäjä ei kykene tavoittamaan poliisi-, pelastus- tai sairaanhoitohenkilöstöä sisätiloista. Rakennuksen koosta riippuen ulkotiloihin siirtyminen voi terveyden ollessa kyseessä maksaa kalliita sekunteja tai käyttäjä voi olla itse estynyt liikkumaan sijaintiin, jossa on parempi kuuluvuus.

Aukottoman ja täydellisen kuuluvuuden saavuttaminen jokaisessa tilassa tuskin on koskaan mahdollista, mutta sitä kohti on luontevaa pyrkiä. Tämän diplomityön tavoitteena on etsiä keinoja sisätilan kuuluvuuden parantamiseen soveltamalla matalaemissiviteettilasien pinnalle valmistettuun metallikerrokseen kuvioituja taajuusselektiivisiä rakenteita. Taajuusselektiiviset rakenteet ovat erimuotoisia ja -kokoisia geometrisia kuvioita, joilla voidaan toteuttaa elektroniikan suotimien kaltaista toimintaa, eli esimerkiksi ali- tai ylipäästösuotimia. Toteuttamalla tietyille taajuusalueelle optimoitu taajuusselektiivinen rakenne voidaan sallia tämän taajuusalueen läpäisy vaikuttamatta merkittävästi muiden taajuuksien läpäisyyn ja sitä kautta matalaemissiviteettilasien metallikerroksen lämpöä heijastaviin ominaisuuksiin. Työssä toteutettiin teoreettiseen tarkasteluun pohjautuva malli

taajuusselektiivisestä kuvioinnista simulointi-ohjelmisto COMSOL Multiphysicsiin. Simulointi-ohjelmistossa mallia voitiin muokata ja hakea kuvioinnille ja niiden asettelulle optimaalisia mittasuhteita samalla tutkien kunkin kuvioinnin läpäisyä. Simulointien pohjalta valmistettiin kuviointia hyödyntäviä käytännön ikkunarakenteita, joiden toiminta varmennettiin käytännön materiaalivaimennusmittauksella.

Diplomityö on jaettu seitsemään lukuun, joissa käsitellään aiheeseen liittyvä teoria sekä työn tulokset. Luvussa 2 esitetään lasirakenteiden valmistaminen ja niiden työn kannalta keskeisimmät ominaisuudet sekä lämmön siirtymisen perusteet. Luku 3 keskittyy sähkömagneettiseen teoriaan ja matkaviestinsignaaleihin esittelemällä radiosignaaliin ja sen etenemiseen vaikuttavia tekijöitä. Myös suomalaisten matkaviestinverkkojen ominaisuuksia ja taajuusalueita käsitellään. Luku 4 esittelee keinoja signaalin läpäisyn optimointiin. Toistimien, passiiviantennien ja sisäverkkojen keskeisimmät ominaisuudet esitellään, mutta pääpaino on taajuusselektiivisten rakenteiden ominaisuuksissa. Luvussa 5 perehdytään taajuusselektiivisten rakenteiden mallinnukseen ja simulointiin käytettyyn ohjelmistoon sekä esitellään keskeisimmät parametrit, mallit ja simulointitulokset. Luvussa 6 käydään läpi koejärjestelyt ja mittalaitteet, mittaustulokset sekä vertaillaan saatuja tuloksia simulointeihin. Luku sisältää myös lyhyen arvion taajuusselektiivisten kuviointien vaikutuksesta lasin lämpöominaisuuksiin sekä virheanalyysin. Yhteenveto on esitetty luvussa 7.

2. LASIRAKENTEET

Lasirakenteet ovat keskeinen osa rakentamista. Ikkunat voivat itsessään olla merkittävä esteettinen elementti, mutta eräs niiden merkittävimmistä tehtävistä on kuitenkin sallia luonnonvalon hyödyntäminen rakennuksen sisätiloissa. Energiataloudellisesta näkökulmasta ikkunarakenteet ovat kuitenkin ongelmallisia varsinkin alhaisen lämmöneristävyytensä johdosta, jos rakennetta verrataan ikkunan vieressä oleviin seinärakenteisiin. Lasirakenteiden lämmöneristävyyden parantamisessa on siirrytty käyttämään ratkaisuja, jotka eristävät hyvin lämpöä, mutta toisaalta vaikuttavat haitallisesti matkaviestinverkkojen kuuluvuuteen sisätiloissa. Tässä luvussa esitellään tyypillisten lasirakenteiden ominaisuuksia, lasien lämmöneristävyyttä ja lyhyesti näiden vaikutuksia signaalien läpäisyyn.

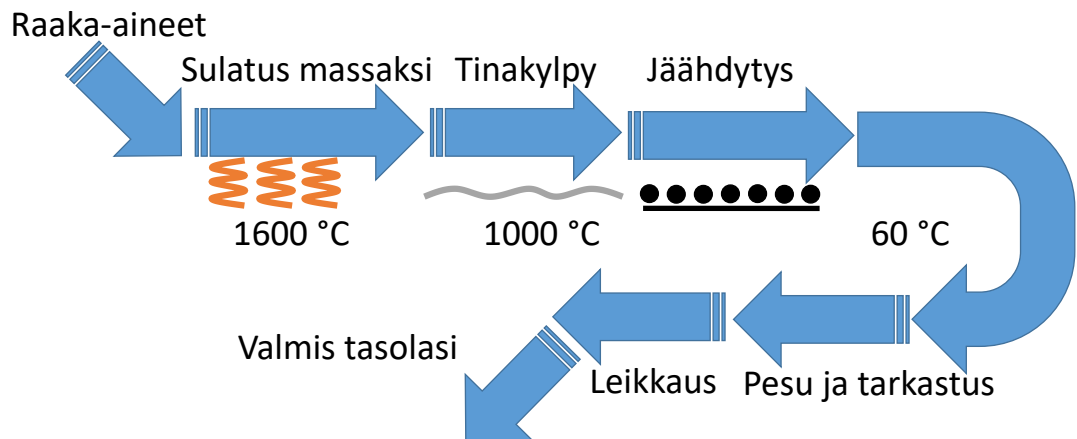
2.1 Valmistaminen ja tasolasituotteet

Lasi on kiinteässä muodossa oleva amorfinen kiteytymätön aine, jonka valmistaminen ja käsittely lopulliseksi tuotteeksi on monivaiheinen prosessi, jossa sovelletut menetelmät riippuvat hyvin paljon halutusta lopputuotteesta ja -tuloksesta. Ikkunoissa käytettävien lasien pääraaka-aineita ovat esimerkiksi kvartsihiekkä (55–60%), sooda (15–20%), dolomiitti (13–18%), kalkki (2–6%) ja maasälpä (2–6 %). Materiaaleja hankitaan kaivamalla maaperästä. Kemiällisenä koostumuksena lasi koostuu puolestaan pääosin piidioksidista (SiO_2 , 69–74%), natriumoksidista (Na_2O , 12–16%), kalsiumoksidista (CaO , 5–12%), magnesiumoksidista (MgO , 0–6%) ja alumiinioksidista (Al_2O_3 0–3%). Näiden ohessa muita lasissa esiintyviä aineita voivat olla esimerkiksi hiili tai rautaoksidi. Lisäksi lasissa voidaan käyttää muita aineita, jotta saavutetaan erityistä haluttuja ominaisuuksia, kuten tiettyä väriä. [6, s.13–14]

Historian ensimmäiset lasit valmistettiin puhaltamalla, joka on menetelmänä edelleen käytössä esimerkiksi lasisten koriste-esineiden valmistuksessa. Myöhemmin puhaltamalla valmistettiin myös tasolaseja avaamalla puhallettu kappale litteäksi levyksi. 1900-luvun alussa koneellinen valmistus yleistyi niin kutsutun koneellisen vetomenetelmän myötä. Menetelmässä sulatettu lasimassa vedetään pois uunista, valssataan ja asetetaan jäähdytyskuiluun, jossa lasista saadaan leikattua levyjä. [6, s.15]

Nykyiset ikkunoissa käytetyt tasolasit valmistetaan useimmiten nk. float-menetelmällä. Float-menetelmässä lasin raaka-aineet (kansanomaisesti hiekka) sulatetaan korkeassa, noin 1600 °C lämpötilassa lasimassaksi, joka johdetaan vaakatasossa sulan tinakerroksen päälle ohueksi kerrokseksi. Tinakylvyllä varmistetaan lasipinnan tasaisuus. Tämä lasikerros jäähdytetään edelleen tasaisesti tason päällä lasissa esiintyvien sisäisten jännitystilojen aiheuttamien virheiden minimoimiseksi. Kun lasi on saavuttanut noin 60 °C lämpötilan, on levy valmis pestäväksi, tarkastettavaksi ja leikattavaksi. Float-menetelmän etuja

ovat muun muassa kapasiteetti, tasainen laatu ja lasin virheettömyys. [6, s.15–17] Menetelmällä valmistettuja tavallisia kirkkaita tasolaseja kutsutaan joskus float-laseiksi.



Kuva 2.1: Tasolasin valmistus float-menetelmällä. [6, s.16]

Määrämittaan leikattuja lasilevyjä voidaan edelleen jälkikäsitellä useilla eri tavoilla. Jotakin työvaiheita voivat olla esimerkiksi uudelleenleikkaus, hionta ja erilaiset termiset käsittelyt, kuten karkaisu. Termisissä käsittelyissä lasi kuumennetaan sovelluksen vaatimaan lämpötilaan, jonka seurauksena lasia voidaan esimerkiksi taivuttaa haluttuun muotoon. Lämmittämisen jälkeen lasi jäähdytetään nopeasti ilmavirtauksen avulla. [6, s.14–16] Karkaisu lisää mm. lasien iskun- ja taivutuskestävyyttä ja sen avulla on myös mahdollista valmistaa nk. turvalaseja, jotka hajoavat rikkoutuessaan hyvin pieniksi rakeiksi. Turvalasi-ominaisuutta edellytetään erityisesti kohteissa, jossa ihmisen on mahdollista tulla vartalollaan kontaktiin lasin kanssa. Jotakin käyttökohteita karkaistulle lasille ovat esimerkiksi julkisivulasit, kattoikkunat, parveke- ja kaidelasit sekä lasiovet. [6, s.85–86]

Lasin pintaan voidaan valmistusvaiheessa lisätä erilaisia metallipinnoitteita tai -kalvoja. Yleisimmät menetelmät metallipinnoitteiden lisäämiseksi ovat nk. off-line- ja on-line-menetelmät, joilla saavutetaan kestävyydeltään, paksuudeltaan ja muilta ominaisuuksiltaan hieman erilaisia kerroksia. Metallipinnoite on usein esimerkiksi hopeaa tai tinaoksidia ja tällaisen pinnoitteen omaavia laseja kutsutaan matalan emissiviteetin laseiksi (engl. low emissivity, low-e) tai selektiivilaseiksi. Tällaisia laseja käsitellään tarkemmin kappaleessa 2.5. Metallinen pinnoite mahdollistaa myös sähkölämmitteiset lasit, jossa metallipinnoitteeseen johdetaan sähkövirta ja pinnoite toimii lämmitysvastuksena. [6, s.27–29, 107] Mikäli pinnoite on lisätty, voidaan sitä poistaa mekaanisesti tai kuvioida esimerkiksi lasertekniikalla pinnoitteen poistamiseksi halutuilta alueilta.

Lasin valmistaminen ikkunaksi kattaa lisäksi myös karmi- ja tiivisterakenteiden kiinnittämisen itse lasiin. Usein ikkuna koostuu useasta tasolasilevystä, joiden väliin jätetään tyhjä tila, joka jätetään joko ilmaväliseksi tai tiivistetään hermeettisesti ja täytetään jalokaasulla. Hermeettisesti suljettuja rakenteita kutsutaan eristyslaseiksi [6, s.99]. Lasilevyjä

voidaan myös laminoida yhteen ja muodostaa näin paksumpia lasi- ja ikkunarakenteita. Myös eristyslaseja, matalaemissiviteettilaseja ja sähkölämmitteisiä laseja voidaan yhdistää samaan ikkunatuotteeseen saavuttaen näin jokaisen rakenteen tarjoamat hyödyt.

Muita tasolasituotteita voivat olla esimerkiksi näkyvää valoa ja lämpöä paremmin heijastava heijastavapintainen lasi, osaksi hälytysjärjestelmää integroitava hälytyslasi, auringsuojalasi, palonsuojalasi tai radioaktiivisuudelta suojaava säteilynsuojalasi. Tasolaseista valmistettaviin tuotteisiin lukeutuvat myös hiekkapuhalletut tai maalatut eli niin kutsutut pintakäsitellyt lasit, erilaiset värilliset lasit, peilit, muulla menetelmällä kuin karikaisella lujitetut lasit sekä monia muita tuotteita. [6, s.18–23]

2.2 Optinen läpäisy ja sähkömagneettisen säteilyn spektri

Jotta ikkuna täyttäisi tarkoituksensa luonnonvalon välittävänä elementtinä, tulee rakenteen olla läpinäkyvä näkyvän valon spektrin alueella. Läpinäkyvyyden lisäksi lasirakenteen optisten ominaisuuksien tulee olla muiltakin osin hyvät. Käytännössä siis esimerkiksi lasipinnan puhtaus, tasaisuus, väri tai väritysmuutos ja heijastusominaisuudet ovat merkitseviä hyvän lasituotteen kannalta. Muun muassa haitallisia taitto-ominaisuuksia tai poikkeavia värisävyjä ei tavallisissa ikkunalasituotteissa yleensä hyväksytä.

Näkyvä valo on eräs sähkömagneettisen säteilyn tyyppi. Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituus λ , eli aallon kahden peräkkäisen maksimin etäisyys toisistaan, määritellään tyhjiössä tai approksimoiden hyvin harvassa väliaineessa (esimerkiksi ilmassa) yhtälöllä

$$\lambda = \frac{c}{f}, \quad (2.1)$$

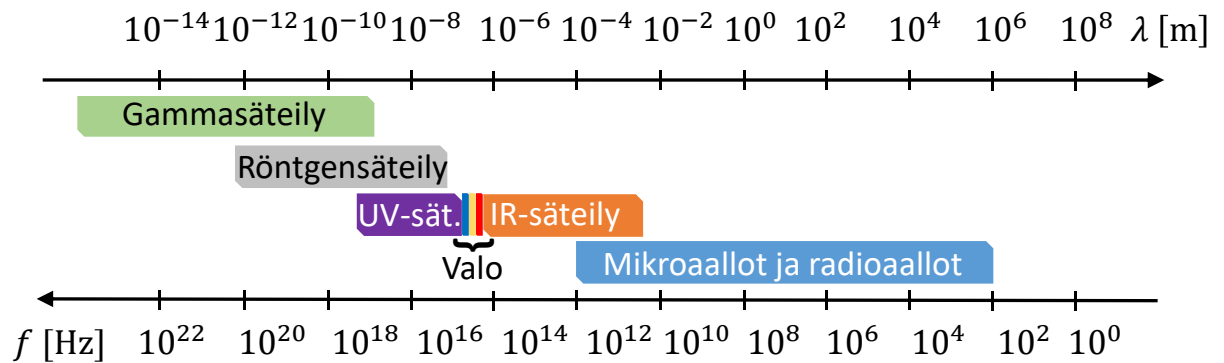
jossa c on valonnopeus ja f taajuus. Näkyvän valon aallonpituudet ja taajuudet on esitetty taulukossa 2.1.

Taulukko 2.1: Näkyvän valon spektri [7, s.87].

Väri	Aallonpituus λ [nm]	Taajuus f [THz]
Violetti	~ 400 - 450	~ 750 - 670
Sininen	~ 450 - 490	~ 670 - 600
Vihreä	~ 490 - 560	~ 600 - 540
Keltainen	~ 560 - 590	~ 540 - 510
Oranssi	~ 590 - 630	~ 510 - 480
Punainen	~ 630 - 700	~ 480 - 430

Lasirakenteen tulee siis olla läpinäkyvä vähintään aallonpituuksilla 400–700 nm. Käytännössä läpinäkyvyys kuitenkin saavutetaan reilusti näkyvää valoa laajemmalla alueella. Hieman lyhyempiä aallonpituuksia kutsutaan ultraviolettisäteilyksi (UV-säteily) ja sen

alue kattaa noin aallonpituudet 100–400 nm. Tätä lyhyempiaaltoisia säteilyn tyyppejä ovat vielä röntgensäteily ja gammasäteily.



Kuva 2.2: Havainnollistava esitys sähkömagneettisen säteilyn spektristä.

Hieman näkyvää valoa pidempiä aallonpituuksia kutsutaan puolestaan infrapunasäteilyksi eli IR-säteilyksi (engl. infrared) ja se kattaa aallonpituudet n. 700 nm - 1 mm. Lämpösäteily on suurilta osin infrapunasäteilyä, mutta lämpö voi tietyissä tilanteissa siirtyä myös näkyvän valon spektrin alueella. Infrapunasäteitä pidempiä, mutta osittain myös infrapuna-alueelle osuvia aaltoja kutsutaan mikroaalloiksi ja tätä pidempiä aaltoja radioaalloiksi. Mikro- ja radioaallot kattavat noin aallonpituutta 0,1 mm pidemmät aallot. [7, s.87]

2.3 Lämmön siirtyminen

Lämpö voi siirtyä paikasta toiseen kolmella eri menetelmällä: johtumalla (konduktio), konvektiolla (kuljettuminen) tai lämpösäteilynä (emissio). Johtumisessa lämpö siirtyy kiinteässä aineessa materiaalin sisällä lämpöliikkeen aiheuttamien törmäysten seurauksena. Kappaleen atomeilla, jotka ovat lämpimämpiä kuin naapurinsa, on enemmän liike-energiaa ja ne värähtelevät enemmän. Värähtelyn avulla liike-energiaa siirtyy atomeista toiseen. Metalleissa myös niin kutsutut vapaat elektronit voivat kuljettaa lämpöä, joka on atomien värähtelyä tehokkaampi lämmönsiirtomekanismi. Kappaleen sisällä tapahtuvan johtumisen lisäksi lämpöä voi johtua myös suorassa kontaktissa kappaleesta toiseen.

Konvektiossa lämpö kulkeutuu väliaineena toimivan fluidin, eli nesteen tai kaasun, liikkeen mukana. Konvektio voi tapahtua luonnollisesti tai pakotetusti. Pakotetussa konvektiossa lämmön siirtymistä tehostetaan esimerkiksi puhaltimen avulla, siinä missä luonnollinen konvektio tapahtuu itsekseen lämpötila- ja paine-erojen ansiosta. [8, p. 663–670]. Huomionarvoista on, että konvektio ei voi tapahtua kiinteissä aineissa, joten jo pelkkä lasi- tai muun rakenteen asentaminen rajoittamaan tilan ilmavirtojen kulkua käytännössä rajoittaa konvektiota.

Lämpösäteily on lämmön siirtymistä sähkömagneettisena säteilynä. Noin 20 °C lämpötiloissa, eli normaaleissa asumislämpötiloissa, lähes kaikki lämpösäteily on ihmissilmälle

näkymätöntä infrapunasäteilyä, mutta yli 800 °C lämpötilassa oleva kohde voi lähettää lämpösäteilyä myös näkyvän valon aallonpituuksilla näyttäen tällöin punertavalta. Lämpösäteily ei tarvitse siirtyäkseen väliainetta, toisin kuin konvektio, joka vaatii fluidin tai johtuminen, joka vaatii kiinteän aineen. [8, p. 663–670]

Lämmön Q siirtymiseen liittyviä suureita ja käsitteitä ovat esimerkiksi lämpövirta, emissiviteetti, lämmönjohtavuus, lämpöresistanssi ja lämmönläpäisykerroin eli U -arvo. Lämpövirta H määritellään eri lämmönsiirtymismekanismeille eri tavoin. Lämpösäteilyn tapauksessa lämpövirralle voidaan soveltaa yhtälöä

$$H = \frac{dQ}{dt} = A\epsilon\sigma T^4, \quad (2.2)$$

jossa A on kappaleen poikkipinta-ala (m^2), ϵ materiaalikohtainen emissiviteetti, σ Stefanin–Boltzmannin vakio ($\sigma = 5,670400 \cdot 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}^4}$) ja T lämpötila (K). [8, s.668–669] Jos taas lämpö siirtyy kappaleessa johtumalla, voidaan homogeeniselle kappaleelle soveltaa yhtälöä (2.3)

$$H = \frac{dQ}{dt} = k_h A \frac{T_H - T_C}{L}, \quad (2.3)$$

jossa k_h on kappaleen lämmönjohtavuus ($\frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{K}}$), termi $(T_H - T_C)$ on kappaleessa vallitsevan kuumemman ja kylmemmän lämpötilan erotus ja L on kappaleen pituus.

Konvektiolle vastaavia yksinkertaisia yhtälöitä ei ole, koska konvektio itsessään on edellisiä monimutkaisempi prosessi, jota voidaan havainnoida vain kokeellisesti. Lämpövirran H yksikkö on J·s eli watti (W). [8, s.664–665, 668]

2.3.1 Emissiviteetti

Emissiviteetti ϵ on yksikötön materiaalikohtainen vakio ja se vaihtelee välillä 0 ... 1,0. Emissiviteetti kuvaa sitä, miten paljon kappale säteilee energiaa verrattuna teoreettiseen mustaan kappaleeseen, joka absorboi kaiken säteilyn itseensä. Mikäli kappale on termisessä tasapainossa ympäristöönsä nähden, tulee sen lähettää saman verran säteilyä, kuin se absorboi, ja näin ollen mustalle kappaleelle emissiviteetti $\epsilon = 1,0$. Mitä korkeampi materiaalin emissiviteetti on, sitä enemmän kappale absorboi energiaa, säteilee sitä ympäristöönsä ja vastaavasti sitä vähemmän se heijastaa kohtaamastaan säteilyä takaisin. [6, s.115], [8, s.668–669] Taulukossa 2.2 on esitetty muutamia yleisimpien rakennusmateriaalien emissiviteettejä. [9, F33.3]

Taulukko 2.2: *Materiaalien emissiviteettejä huoneenlämmössä [9, F33.3].*

Materiaali	Emissiviteetti ϵ
Alumiini, folio	0,09
Hopea, kiillotettu	0,02
Kipsi, tasaisena levynä	0,903
Laasti, karkea	0,91
Lasi, tasainen	0,94
Maa, kuiva ja tiivistetty	0,41
Marmori, kiillotettu	0,931
Paperi	0,92
Puu, höylätty tammi	0,90
Tiili, rakennus	0,93
Tina, kirkas	0,06

Tavalliselle float-lasille emissiviteetti on noin 0,9. Lasi siis kykenee absorboimaan ja säteilemään hyvin lämpösäteilyä heijastamatta sitä juurikaan takaisin. Korkeasta emissiviteetistä voidaan päätellä, että varsin merkittävä osa lasin läpi tapahtuvasta lämpövirrasta tapahtuu lämpösäteilyn muodossa. Taulukosta 2.2 nähdään, että myös muilla yleisesti käytössä olevilla rakennusmateriaaleilla, kuten puulla, tiilellä tai kivellä on myös varsin korkea emissiviteetti, mutta näiden rakenteiden osalta lämpöeristystä rajoittavana tekijänä ei ole rakenteen läpinäkyvyys. Rakenteista voidaan siten tehdä paksumpia tai niissä voidaan käyttää useita eristekerroksia tai muita lämpösäteilyä heijastavia materiaalikerroksia. Näin ollen kokonaisuutena tarkastellen näistä materiaaleista valmistetun käytännön rakenteen lämmöneristävyys on parempi kuin ikkunamateriaalilla.

Metalleilla, kuten esimerkiksi tinalla, hopealla ja alumiinilla, on varsin pieni emissiviteetti, joten ne heijastavat suuren osan niihin osuvasta lämpösäteilystä pois. Vaikka metallit ovatkin vapaista elektroneistaan johtuen varsin hyviä lämmönjohtimia, käyttämällä tällaisia materiaaleja rakentamisessa voidaan oleellisesti pienentää lämmön karkaamista lämpösäteilynä.

2.3.2 Lämmönjohtavuus

Lämmönjohtavuus k_h on materiaalikohtainen vakio, joka kuvaa miten eri materiaalit johtavat lämpöä. Materiaalit, joilla k_h on suuri, johtavat hyvin lämpöä. Vastaavasti alhaisemman lämmönjohtavuuden omaavat materiaalit ovat hyviä lämmönjohtumisen eristeitä. [8, s.664] Taulukossa 2.3 on esitetty muutamia yleisimpien rakennusmateriaalien lämmönjohtavuuksia. [9, F33.3]

Taulukko 2.3: Kiinteiden materiaalien lämmönjohtavuuksia huoneenlämmössä [9, F33.3].

Materiaali	Lämmönjohtavuus k_h $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
Alumiini, folio	221
Hopea, kiillotettu	424
Kipsi, tasaisena levynä	0,43
Laasti, karkea	0,74
Lasi, tasainen	1,0
Maa, kuiva ja tiivistetty	0,064
Marmori, kiillotettu	2,6
Paperi	0,13
Puu, höylätty tammi	0,176
Tiili, rakennus	0,7
Tina, kirkas	64,9

Lämmönjohtavuuden numeerisista arvoista nähdään, että tavallinen lasi johtaa lämpöä jonkin verran, mutta kuitenkin merkittävästi vähemmän kuin metallit ja vain hieman enemmän kuin muut rakentamisessa yleisesti käytetyt materiaalit kuten tiilet tai laasti. Lasien osalta lämmöneristävyyttä on perinteisesti parannettu käyttämällä kaksin- tai kolminkertaisia ikkunarakenteita ja välitilakaasuja. Tällöin ikkunalasien välitilan täyteenä käytetty kaasu vaikuttaa suoraan rakenteen lämmöneristävyyteen. Taulukossa 2.4 on esitetty eri kaasujen tyypillisiä lämmönjohtavuuksia normaalissa ilmanpaineessa ja 0 °C lämpötilassa.

Taulukko 2.4: Kaasujen lämmönjohtavuuksia paineessa 101.325 kPa ja lämpötilassa 0 °C [9, F33.1, F1.15].

Materiaali	Lämmönjohtavuus k_h $\left[\frac{W}{m \cdot K}\right]$
Argon	0,016
Helium	0,142
Hiilidioksidi	0,015
Ilma, kuiva	0,025
Typpi	0,024
Vety	0,168

Kokonainen ikkunalarakenne koostuu itse lasilevyistä sekä niistä tulevista rakenteista, kuten esimerkiksi puisista karmeista sekä alumiiniprofiileista. Kaksin- tai useampikertaisissa eristyslaseissa välitila on tiivistetty ja se voi olla täytetty ilman sijaan esimerkiksi jalokaasuilla kuten argonilla tai kryptonilla. Esimerkiksi argonin lämmönjohtavuus on huomattavasti ilmaa pienempi, joten ikkunan läpi johtuvan lämmön määrä vähenee.

2.3.3 Lämpöresistanssi

Rakenteiden lämmöneristävyyden laskennassa käytetään lämpöresistanssin käsitettä mallintamaan sitä, miten kappale pinta-alaansa suhteutettuna vastustaa lämmön johtumista. Lämpövirta H kappaleen läpi voidaan määrittellä yhtälöllä

$$H = A \frac{T_H - T_C}{R_{th}}, \quad (2.4)$$

jossa A on poikkipinta-ala (m^2), termi T_H on kappaleen kuumemmalla puolella oleva lämpötila, T_C kylmemmällä puolella oleva lämpötila ja R_{th} lämpöresistanssi. Yhtälöistä (2.3) ja (2.4) voidaan nyt määrittää lämpöresistanssiksi

$$R_{th} = \frac{L}{k_h}, \quad (2.5)$$

jossa L on kappaleen paksuus ja k_h lämmönjohtavuus. Mitä suurempi lämpöresistanssi on, sitä huonommin lämpö johtuu kappaleessa.

Lämpöresistanssi on analoginen sähkötekniikassa käytetyille resistanssille siten, että lämpöresistanssille voidaan soveltaa samoja laskusääntöjä kuin virtapiirien laskennassa, tärkeimpinä lämpöresistanssien sarja- ja rinnankytkentä. Näin ollen esimerkiksi kerroksista koostuvan seinärakenteen, jossa ei ole lämpövuotoja, lämpöresistanssi R_{tot} voidaan ratkaista yhtälöstä

$$R_{tot} = \sum_{i=1}^n R_i = R_1 + R_2 + \dots + R_n, \quad (2.6)$$

jossa R_i on jokaisen kerroksen lämpöresistanssi ja n kerrosten lukumäärä. [8, s.665] Saatuaan lämpöresistanssiin tulee myös lisätä kerroksittaisen rakenteen sisä- ja ulkopinnoilla olevien materiaalien pintavastukset, jotka ovat vakioita. Jos rakenteessa puolestaan olisi lämpövuotoja, jouduttaisiin soveltamaan lämpöresistanssien rinnankytkentää, joka toisaalta on analoginen sähkötekniikan vastusten rinnankytkennälle.

Jos yhtälössä (2.5) lämmönjohtavuuteen k_h sisällytetään myös konvektion ja lämpösäteilyn vaikutukset, kutsutaan näin määriteltyä lämpöresistanssia usein *R-arvoksi*. Lämpöresistanssin yksikkö on $\frac{m^2 \cdot K}{W}$ [8, s.665].

2.3.4 Lämmönläpäisykerroin eli U-arvo

Rakennustekniikassa käytetään usein lämpöresistanssin sijaan lämmönläpäisykerrointa eli U-arvoa kuvaamaan rakenteen tai rakenneosan lämmöneristävyyttä. Lämmönläpäisykerroin U määritellään R-arvon käänteislukuna

$$U = \frac{1}{R_{th}} = \frac{k_h}{L} = \frac{H}{A(T_H - T_C)}, \quad (2.7)$$

eli se kuvaa kuinka suuri lämpövirta tarvitaan, jotta tietyn pinta-alan omaavan rakenteen vastakkaisilla puolilla on halutun suuruinen lämpötilaero. Mitä pienempi U-arvo rakenteosalla on, sitä paremmin se eristää lämpöä. U-arvon yksikkö on $\frac{W}{m^2 \cdot K}$. U-arvot ilmoitetaan yleensä standardien määrittelemissä olosuhteissa, joka mahdollistaa rakenteiden lämmöneristävyysarvioinnin ja vertailun. Todellisuudessa U-arvo ei kuitenkaan ole vakio, sillä se riippuu vallitsevista olosuhteista esimerkiksi pinnan tai rakenteen eri puolilla vallitsevan lämpötilaeron kautta. U-arvosta on käytetty aiemmin myös merkintää *k-arvo*. [6, s.26]

Eri rakenteille on annettu tarkkoja vaatimuksia lämmöneristävyyksistä vuoden 2017 ympäristöministeriön asetuksessa uuden rakennuksen energiatehokkuudesta. Käytännössä vaatimukset koskevat esimerkiksi uusia asuinrakennuksia. Rakenteosien määräysten mukaisia U-arvoja on poimittu taulukkoon 2.5 lämpimälle tai jäähdytettävälle kylmän tilan rakennukselle. [10, luku 3]

Taulukko 2.5: Ympäristöministeriön asettamat lämmönläpäisykertoimen vertailuarvot. [10, luku 3].

Rakenneosa	U-arvo $\left[\frac{W}{m^2 \cdot K}\right]$
Seinä	0,17
Massiivipuuseinä, 180 mm	0,40
Yläpohja	0,09
Maahan rajoittuva rakenneosa	0,16
Ikkunat, kattoikkunat ja ovet	1,0

Normaalille kaksinkertaiselle ikkunalasille, jossa on kaksi ilmapäällystä erotettua lasiruutua on U-arvo noin $2,9 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. Eristyslasilla, jossa ilmapäälly on korvattu argonilla, päästään noin U-arvoon $1,1 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. [6, s.28–29] Käyttämällä lisäksi matalaemissiviteettilasia voidaan saavuttaa U-arvo $1,0 \frac{W}{m^2 \cdot K}$. Yleisesti mataliin U-arvoihin päästäänkin rakenteilla, joissa välitilan kaasuna käytetään argonia tai kryptonaa ja lasina käytetään matalan emissiviteetin lasia, jonka emissiviteetti on esimerkiksi luokkaa 0,04 [6, s.28–29].

U-arvoa voidaan alentaa myös kasvattamalla lasikerrosten lukumäärää, mutta käytännössä tällöin tullaan heikentäneeksi näkyvän valon läpäisyä, eivätkä tällaiset rakenteet tavanomaisen paksuisia laseja käytettäessä ole välttämättä mielekkäitä kokonsa tai painonsa puolestaan. U-arvo on likimääräisesti yleisesti käytössä oleville, kirkkaita float-laseja käytettäville ilmapäällyisille rakenteille

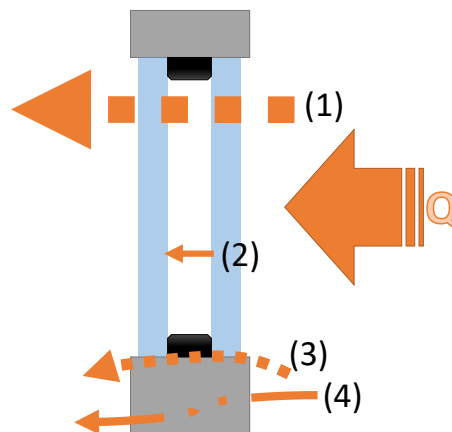
$$U \approx \frac{6}{\text{lasikerrosten lkm}}, \quad (2.8)$$

jolloin lähelle U-arvoa $1,0 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ päästäkseen tulisi käyttää melko massiivista 5- tai 6-ker- taista lasirakennetta. [6, s.26]

U-arvo voidaan määrittää rakenteille laskennallisesti lämpöresistanssin ja materiaalien ominaisuuksien kautta tai se voidaan mitata. Eräs menetelmä lasien U-arvon mittaami- seen laboratorio-olosuhteissa on niin sanottu ”calibrated and guarded hot box”-mene- telmä, jossa tutkittava rakenne asetetaan kahden toisistaan eristetyn kammion väliin. Toi- nen kammio on niin kutsuttu lämmin kammio, jonka lämmitystehoa voidaan säätää ja toinen on kylmäkammio. U-arvo voidaan laskea tarvittavan lämmitystehon eli materiaa- lin läpäisseen lämpöenergian avulla. [6, s.32] U-arvon mittaamiseen on olemassa myös kenttätestauslaitteita, joilla jo olemassa olevan rakenteen U-arvo voidaan mitata paikan päällä ja rakennetta avaamatta tai irrottamatta.

2.4 Lämmön siirtyminen lasirakenteissa

Lasirakenteissa tapahtuu lämmönsiirtymistä eri tavoin. Kuva 2.3 esittää yksinkertaistet- tua lasirakennetta, jossa on kaksikerroksinen lasirakenne ilma- tai jalokaasuvälillä asen- nettuna karmeihin. Lasien välissä on pidikkeitä, profiileja ja tiivisteitä pitämässä lasit pai- kallaan, niiden etäisyyden vakiona ja mahdollisen jalokaasun lasien välissä. Lasin eri puolilla on lämpötilaero siten, että lämpövirta saapuu kuvassa oikealta.



Kuva 2.3: Esimerkkejä lämmön siirtymisestä ikkunarakenteessa. (1) Lämpösäteily. (2) Johtuminen lasien ja konvektio ilmapälin läpi. (3) Vuoto tiivisteessä tai rakenteessa. (4) Johtuminen karmien ja/tai välilevyrakenteen kautta.

Lämpö voi siirtyä lasirakenteen läpi suoraan lämpösäteilynä (1) tai johtumalla lasin sekä lämpötila- ja paine-eroista aiheutuvalla konvektiolla lasien ilmapälin läpi (2). Osa läm- pösäteilystä myös absorboituu itse lasiin, jolloin tämä lämpö voi jatkaa etenemistään edellä kuvatusti esimerkiksi konvektiolla ja johtumalla. [6, s. 26] Myös lasien asennuksen

epätiiveydestä aiheutuvat ilmavuodot (3) aiheuttavat lämmön siirtymistä tai lämpö voi siirtyä johtumalla karmi- ja välilevyrakenteen kautta (4).

Lasien suhteellisen alhaisen lämmönjohtavuuden $k_h \approx 1 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ vuoksi lasien itsensä läpi johtuu varsin vähän lämpöä. Johtumista rajoittaa myös kaksinkertaisen lasirakenteen välissä oleva ilma- tai argonkaasutila ($k_h \approx 0,025 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$ tai $k_h \approx 0,016 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$), joiden lämmönjohtavuus on alhaisempi kuin itse lasin. Ilmatilassa lämpö voi kuitenkin siirtyä lasin eri osiin mahdollisten paine- ja lämpötilaerojen vaikutuksesta ja lopulta absorboitua uloimpaan lasiin ja säteillä ulkopuolelle. Lasin korkean emissiviteetin $\epsilon \approx 0,94$ johdosta lasi absorboikin hyvin paljon lämpösäteilyä ja vastaavasti säteilee sitä pois alhaisemman lämpötilan puolelle. Näin ollen valtaosa lasin läpi siirtyvästä lämpövirrasta siirtyy lämpösäteilynä. Kokonaisuutena voidaan arvioida, että tavallisesta kirkkaasta lasista rakennetun eristyslasi-ikkunan ruudun alueen lämpöhäviöstä noin 1/3 tapahtuu johtumalla ja konvektiolla ja 2/3 säteilemällä. [6, s.28] Pienentämällä lämpösäteilyn osuutta voidaan vaikuttaa merkittävästi ikkunan kokonaislämpöhäviöön.

Karmirakenteen ja mahdollisten epätiiveyksien aiheuttamien vuotojen vaikutukset riippuvat karmeissa käytetyistä materiaaleista ja asennustekniikoista, eikä näitä käsitellä työssä tarkemmin.

2.5 Matalaemissiviteettilasit

Matalaemissiviteettilasi on lasirakenne, jossa lasin pintaan valmistetaan metalli- tai metallioksidipinnoite. Pinnoitteen omaavia lasirakenteita kutsutaan myös low-e-laseiksi tai joskus myös selektiivilaseiksi. Metallipinnoite tai -kalvo päästää valtaosan näkyvästä valosta läpi, mutta vähentää lämpösäteilyn pääsyä rakenteen sisäpuolelta ulos tai ulkopuolelta sisään. Matalaemissiviteettilaseja käytetään usein osana kaksin- tai useampikertaista eristyslasiä, joissa pinnoitettu puoli asennetaan valmiissa ikkunarakenteessa usein eristyslasin välitilan puolelle. Näin vältetään vaurioittamasta pinnoitetta mitenkään esimerkiksi asennusvaiheessa tai jos lasia tarvitsee pestä.

Matalaemissiviteettilasin toiminta perustuu metalli- tai metallioksidipinnoitteeseen, jolla on matala emissiviteetti ϵ . Matalan emissiviteetin pinnoite absorboi heikosti sähkömagneettista säteilyä ja heijastaakin sitä tehokkaasti takaisin sisätiloihin. Koska valtaosa (noin 66 %) ikkunarakenteen läpi tapahtuvasta lämpöhäviöstä tapahtuu juuri säteilemällä, voidaan matalaemissiviteettilasia käyttämällä merkittävästi vähentää ikkunan läpi tapahtuvaa häviötä. Tehokas matalan emissiviteetin rakenne voi vähentää lämpösäteilyn läpäisyä jopa 90 %. [6, s.27–29] Tällaisen rakenteen kokonaislämpöhäviö voi siten pudota jopa noin 40 %:iin alkuperäisestä. Käyttämällä matalan emissiviteetin pinnoitteita päästään siis merkittävään parannukseen energiatehokkuudessa ja yhdessä muun energiatehokkaan rakentamisen kanssa lämpöhäviötä rakennuksen ulkoseinien läpi kyetään hillitsemään ja saavuttamaan säästöjä.

Pinnoitteiden materiaaleina käytetään yleensä metalleja tai puolijohhteita, joilla on paitsi matala emissiviteetti, myös vähäinen vaikutus lasin optisiin ominaisuuksiin ja jotka ovat hinnaltaan kilpailukykyisiä. Metalleista esimerkiksi kulta, hopea ja kupari omaavat matalan emissiviteetin, mutta kulta on karkeasti arvioituna noin tuhat kertaa hopeaa kalliimpaa [11] ja sekä kullalla että kuparilla on heijastus- ja väriominaisuuksia, jotka ovat haitallisia sekä hankalasti neutraloitavissa. Muita käytettyjä materiaaleja ovat alumiini- ja titaanioksidi, tinaoksidi ja indiumoksidi. Näistä erityisesti indiumoksidilla olisi hyvät ominaisuudet lasien pinnoitukseen, mutta materiaali on kallis. Yleisimmät käytetyt materiaalit ovatkin metalleista hopea ja puolijohhteista tinaoksidi. [6, s.27–28], [12]

Pinnoitteita voidaan valmistaa lasiin off-line- tai on-line -menetelmillä. Matalan emissiviteetin pinnoitteen lisääminen lasiin voi tehdä lasista lievästi värillisen, mutta ei muuten vaikuta lasin ulkonäköön tai läpinäkyvyyteen. Lasiin voidaan kuitenkin lisätä muitakin kerroksia, jotka ovat yleensä puolijohdemateriaaleja. Näillä kerroksilla lasien optisiin ominaisuuksiin voidaan vaikuttaa ja erityisesti metallikerroksen optista läpinäkyvyyttä voidaan parantaa ja värillisyyttä vähentää. [6, s.27–28]

2.5.1 Off-line- eli pehmeäpinnoite

Off-line -pinnoite valmistetaan lasiin tyhjiöpinnoitusmenetelmällä, jossa lasin pintaan rakennetaan puolijohde- ja metallikerrosten avulla matalaemissiviteetipinnoite. Suoraan lasin pintaan kiinnitetään puolijohdeoksidikerros, jonka tehtävänä on toimia sitovana ja kiinnittävänä kerroksena varsinaiselle hopeakerrokselle. Hopeakerroksen paksuus on noin 10 nm. Off-line -pinnoitetuissa lasissa käytetään lisäksi muita kerroksia vaikuttamaan lasin optisiin ominaisuuksiin, kuten parantamaan läpinäkyvyyttä tai neutralisoidaan värivirheitä. Nämä kerrokset ovat usein puolijohhteita, kuten alumiini-, titaani- tai tinaoksidia. Muita kerroksia voi olla useita ja kerrosten vahvuus voi vaihdella välillä noin 3–50 nm per kerros. Pinnoite itsessään on varsin herkkä vaurioitumaan ja lasia käytetäänkin usein osana eristyslasirakennetta siten, että pinnoitettu puoli on suunnattu lasirakenteen kaasutäytteiseen väliin päin. Off-line-pinnoitetun lasin emissiviteetti yleensä varsin alhainen, noin 0,02–0,12. [6, s.28], [12]

2.5.2 On-line- eli kovapinnoite

On-line -pinnoitetussa lasissa matalaemissiviteetikerros valmistetaan suoraan lasiin osaksi lasin rakennetta. Valmistus tapahtuu suoraan tuotantolinjalla, jossa osana float-lasin valmistusta toteutetaan pyrolyysireaktio, jossa tinaoksidikerros muodostuu kiinteästi ja pysyvästi lasin pintakerrokseen. Tinaoksidikerroksen paksuus on noin 400–600 nm, eli huomattavasti paksumpi kuin off-line-pinnoitetun lasin metallikerros. Muodostettu tinaoksidikerros on lähestulkoon täysin optisesti läpinäkyvä ja varsin kova. Lasityyppiä

voidaan käyttää tästä syystä myös yksittäislasina, mutta yleisin sovelluskohde on eristyslasin osana. On-line -pinnoitetun lasin emissiviteetti yleensä 0,16–0,20, eli hieman heikompi kuin off-line -pinnoitetuilla lasilla. [6, s.28], [12]

2.6 Matalan emissiviteetin ikkunoiden vaikutus radiosignaalin läpäisyyn

Rakennuksissa on EU:n ilmastonmuutoksen hillitsemisen vuoksi asettamien vaatimusten [2] vuoksi siirrytty käyttämään sekä paksumpia että yhä enemmän metallia sisältäviä rakenteita paremman energiatehokkuuden saavuttamiseksi. Tällaiset rakenteet saattavat vaikuttaa radiosignaalin etenemiseen merkittävästi. Taulukossa 2.6 on esitetty joitakin rakentamisessa käytettyjen rakenneosien läpäisyvaimennuksia eri taajuuksilla. [5]

Taulukko 2.6: Lähteestä [5] poimuttuja rakenneosien läpäisyvaimennuksia (dB) eri taajuuksilla.

Rakenneosa, Taajuus [MHz] / Läpäisyvaimennus [dB]	500	1000	2000	3500
Tiili (180 mm)	4	5,5	8	20
Tiili (180 mm) ja betonielementti (203 mm)	21	25	33	60
Tiili (180 mm) ja kevytlekaharkko	8	11	10	29
Kevytlekaharkko (2 x 203 mm)	13	17	18	25
Betonielementti (208 mm)	20	23	29	47
Raudoitettu betonielementti (203 mm) 70 mm x 70	26	30	37	53
Ikkunalasi (13mm)	1	2	3	0,5
Kuiva puu (152 mm)	5	6	9	19

Taulukosta 2.6 nähdään, että aiemmin tavalliset kirkkaat float-ikkunat ovat olleet radiosignaalin esteettömin tie rakennukseen, koska signaalin vaimennus esimerkiksi 2000 MHz:n taajuudella on ollut vain noin 3 dB. Tavallinen ikkunalasi siis aiheuttaa hieman vaimennusta, mutta muihin yleisesti käytettyihin rakennusmateriaaleihin verrattuna se on varsin pientä. Lisäksi voidaan nähdä, että radiosignaalin kyky läpäistä erilaisia materiaaleja riippuu voimakkaasti materiaalin ominaisuuksista. Esimerkiksi metallia sisältävien rakenteiden läpäisy on yleisesti heikompi kuin monien muiden materiaalien: [5] metallipinnoitteiset lasit eivät myöskään käyttäydy radiosignaalin kannalta samoin kuin tavallinen float-lasi. Eri tutkimuksissa suoritettujen mittausten mukaan matalaemissiviteettilaseja käyttävien ikkunoiden vaimennus on merkittävää, jopa 30-35 dB alle 3,5 GHz:n taajuuksilla ja jopa lähes 45 dB tätä korkeammilla taajuuksilla [5, s.17]. Vaikka pinnoite onkin suunniteltu heijastamaan lämpösäteilyä, on sen radioaaltoille aiheuttama vaimennus epätoivottu lieveilmiö.

Tyypillisimmin matalaemissiviteettilaseja käytetään osana eristyslasirakennetta, joka muodostuu kahdesta tai kolmesta yhteen liitetystä lasista, joiden välitilassa voi olla esi-

merkiksi jalokaasua. Tässä rakenteessa ainakin yhden lasin välitilaan päin olevalla pinnalla on matalan emissiviteetin pinnoite. Tätä konfiguraatiota voidaan käyttää joissain kohteissa sellaisenaan. Usein esimerkiksi omakotirakentamisessa rakenteeseen kuitenkin lisätään yksinkertainen ulkolasi esimerkiksi noin 10-15 cm:n etäisyyden päähän kaksinkertaisesta sisälaserakenteesta [5, s.11]. Myös niin kutsutun nelinkertaisen rakenteen käyttäminen on mahdollista, tässä ratkaisussa lasi muodostuu kahdesta eristyslasipaketista [5, s.12]. Ikkunoissa voidaan käyttää sekä pehmeäpinnoitteisia ja kovapinnoitteisia matala-emissiviteettilaseja yhdessä tavallisten kirkkaiden lasien kanssa. Käytetyt lasit vaihtelevat sovelluskohteen ja halutun U-arvon mukaan, mutta mitä enemmän metallia sisältäviä lasseja käytetään, sitä heikommaksi signaalin läpäisy lähtökohtaisesti muuttuu.

Kun lasien aiheuttamaan vaimennukseen yhdistetään muu rakennustekniikka, voidaan todeta, että mikäli rakenteissa käytetään voimakkaasti vaimentavia materiaaleja (betonielementit, erilaiset metallirakenteet, harkot, alumiinipinnoitteiset eristelevyt) ja tavallisen kirkkaista lasista muodostetun ikkunarakenteen sijaan käytetään matalaemissiviteettilaseja, tullaan rakennuksen sisällä todennäköisesti kärsimään heikenneestä RF-kuuluvuudesta [5, s.17–18]. Nykyisin valtaosa matkaviestinliikenteestä tapahtuu sisätiloista [5] ja tulevaisuudessa tämä osuus tulee mitä ilmeisimmin edelleen kasvamaan, joten heikennyt kuuluvuus on oikeasti olemassa oleva ongelma.

Käytännössä ikkunarakenteet eivät kuitenkaan koostu pelkästä lasista vaan eräänä oleellisena tekijänä niin signaalin- kuin lämmönläpäisyssä ovat puitteet, johon lasi on kiinnitetty sekä ikkunan karmit, joilla koko rakenne on kiinnitettynä rakennuksen seinässä olevaan aukkoon. Näissä ratkaisuissa käytetään usein erilaisia puu- ja metallirakenteita. [6, s.110–] Tässä työssä on keskitytty arvioimaan signaalinläpäisyä puhtaasti ikkunan *lasiin* kannalta. Vaikka todellisessa rakenteessa puitteet ja karmit ovatkin mukana, ei niihin keskitytä tässä tarkemmin.

2.7 Lasin sähköiset materiaaliparametrit

Tavallisen kirkkaan float-lasin sähköiset materiaaliparametrit ovat oleellisia tekijöitä analysoitaessa sitä, kuinka lasirakenteet vaikuttavat sähkömagneettiseen säteilyyn. Matala-emissiviteettilasia tarkasteltaessa lasin voidaan katsoa muodostuvan tavallisesta kirkkaasta lasista muodostetusta substraatista ja metallisesta kerroksesta. Lasin tärkeimmät sähköiset materiaaliparametrit ovat permittiivisyys ϵ , permeabiliteetti μ ja johtavuus g . Permittiivisyys ϵ kuvaa sitä, miten materiaali käyttäytyy sähkökentässä. Aineille ilmoitetaan yleensä suhteellinen permittiivisyys ϵ_r , jonka avulla materiaalin käyttäytymistä voidaan verrata tyhjiön permittiivisyyteen $\epsilon_0 \approx 8,85418 \cdot 10^{-12} \frac{F}{m}$. Permittiivisyyden käsite yhdistetään usein dielektrisiin materiaaleihin eli eristemateriaaleihin, joihin tavallinen lasikin lukeutuu.

Lasin permittiivisyys on materiaaliominaisuus, joka riippuu lasin koostumuksesta. Yleisen piidioksidista (SiO_2) ja natriumoksidista (Na_2O) koostuvan ikkunalasin suhteellinen permittiivisyys on erilainen eri lämpötiloissa, eri koostumuksella ja taajuuksilla. Esimerkiksi lämpötilassa $17\text{ }^\circ\text{C}$ permittiivisyys vaihtelee eri koostumuksille noin 10 kHz :n taajuudella välillä $\epsilon_r = 5,9 \dots 9,1$ siten, että pienemmällä piidioksidin määrällä permittiivisyys kasvaa. Alempi arvo saavutetaan koostumuksella $11,9\% \text{ Na}_2\text{O}$, $88,1\% \text{ SiO}_2$ ja ylempi raja koostumuksella $27,2\% \text{ Na}_2\text{O}$, $72,8\% \text{ SiO}_2$. [13, s.455–458] Eri kirjallisuuslähteissä tyypillisen ikkunalasin permittiivisyydelle on käytetty tai mitattu esimerkiksi arvoja $\epsilon_r = 6,9$ [14], $\epsilon_r = 7,0 \pm 0,05$ ja $\epsilon_r = 6,9 \pm 0,15$ [15]. Myös arvoa $\epsilon_r \approx 4$ on käytetty [16]. Työhön liittyen tilattiin lasin permittiivisyydelle myös varmentavia mittauksia, joissa saatiin useita edellä mainittuja arvoja tukevia tuloksia suhteellisen permittiivisyyden ollessa 5 GHz :n taajuudella noin $\epsilon_r \approx 7$. Mittauskaistoina olivat taajuuskaistat $4,5\text{ GHz} - 19\text{ GHz}$ ja $26\text{ GHz} - 40\text{ GHz}$. Paksuudeltaan 4 mm olevalle lasille permittiivisyyden suurin vaihteluväli näillä kaistoilla oli $6,90 - 7,43$ ja paksuudeltaan 6 mm lasille $6,78 - 7,24$. Yleisesti permittiivisyys näytti pienenevän hieman taajuuden kasvaessa.

Permeabiliteetti μ kuvaa materiaalien magneettisia ominaisuuksia. Kuten permittiivisyydenkin tapauksessa, aineille ilmoitetaan usein suhteellinen permeabiliteetti μ_r , joka kertoo miten aine käyttäytyy tyhjiöön verrattuna. Useimmille ei-magneettisille materiaaleille, joihin lukeutuvat lasin lisäksi monet kiinteät materiaalit ja kaasut, suhteellinen permeabiliteetti $\mu_r \approx 1,0$. Tyhjiön permeabiliteetti on puolestaan $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$ $\approx 12,57 \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$.

Kirkkaan lasin ei-ideallisesta dielektrisyydestä ja erityisesti sen mahdollisesti sisältämistä metalleista johtuen materiaali on myös varsin heikko sähköjohdin, eli sillä on pieni johtavuus g . Johtavuudelle on kirjallisuudessa esitetty eri menetelmin mitattuina esimerkiksi arvoja $g < 10^{-4} \frac{\text{S}}{\text{m}}$ tai $g < 5 \cdot 10^{-4} \frac{\text{S}}{\text{m}}$ [15]. Myös arvoa $g = 10^{-12} \frac{\text{S}}{\text{m}}$ on käytetty [16]. Johtavuus on toisaalta myös materiaalin ominaisvastuksen ρ eli resistiivisyyden käänteisarvo, joka ilmoitetaan usein monissa taulukkokirjoissa eri materiaaleille johtavuuden sijaan.

3. RADIOSIGNAALIT

Sähkömagneettinen aalto koostuu toisiinsa nähden kohtisuoraan värähtelevistä sähkö- ja magneettikentistä. Radiosignaaleilla tai radioaalloilla tarkoitetaan taajuudeltaan noin 30 kHz - 300 GHz olevia sähkömagneettisia aaltoja [7, s.87]. Radioaaltoja hyödynnetään tänä päivänä esimerkiksi matkaviestimissä, radio- ja televisiolähetyksissä, satelliittipainnuksessa ja useissa muissa sovelluskohteissa. Tässä luvussa esitellään sähkömagneettisten aaltojen ja radiosignaalien ymmärtämisen kannalta merkityksellisiä asioita, kuten Maxwellin yhtälöt, sähkömagneettiset kentät, taso-aallot, aallon eteneminen, heijastuminen, diffraktio ja sironta, jotka kaikki jollain tasolla liittyvät radiosignaalin läpäisevyyden analysointiin matalan emissiviteetin lasissa. S-parametreja ja materiaalivaimennuksia käsitellään, koska ne ovat rakenteiden simuloinnin ja mittausten kannalta oleellisia suureita. Lisäksi esitellään matkaviestinverkkojen perusteet ja Suomessa käytössä olevat taajuusalueet.

3.1 Maxwellin yhtälöt

James Clerk Maxwellin (1831–1879) mukaan nimetyt, Maxwellin yhtälöinä tunnetut neljä yhtälöä kuvaavat sähkömagneettiset aallot ja niiden ominaisuudet. Yhtälöt esitettiin alun perin jo vuonna 1861, mutta nykyisen muotonsa yhtälöt saivat vuonna 1884 Oliver Heavisiden (1850–1925) muotoiltua yhtälöt vektorimuotoon. Maxwellin yhtälöt tunnetaan nimillä Faradayn induktiolaki, Ampère-Maxwellin laki, Gaussin laki sähkökentille ja Gaussin laki magneettikentille. Yhtälöt on esitetty differentiaalimuodoissaan kaavoissa (3.1) – (3.4). [17], [18]

Faradayn laki kuvaa sähkömagnetismin ominaisuuden, jossa muuttuva magneettikenttä luo sähkökentän. Faradayn laki esitetään muodossa

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}, \quad (3.1)$$

jossa \vec{E} on sähkökentän voimakkuus ($\frac{V}{m}$) ja \vec{B} on magneettivuon tiheys (T).

Ampère-Maxwellin laki kuvaa sähkövirran ja sähkökentän ominaisuutta luoda magneettikenttä. Laki ilman ensimmäistä termiä ($\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$) on niin kutsuttu Ampèren laki, mutta Maxwell huomasi että siirrosvirran $\frac{\partial \vec{D}}{\partial t}$ huomioimien on välttämätöntä, jotta laki pätee myös ajan suhteen muuttuvassa tilanteessa. Ampère-Maxwellin laki esitetään muodossa

$$\nabla \times \bar{H} = \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} + \bar{J}, \quad (3.2)$$

jossa \bar{H} on magneettikentän voimakkuus ($\frac{A}{m}$), \bar{D} on sähkövuon tiheys ($\frac{C}{m^2}$) ja \bar{J} on virran tiheys ($\frac{A}{m^2}$).

Gaussin laki sähkökentille kuvaa suljetun pinnan läpi olevan sähkövuon yhtä suuri kuin varaustiheys, eli sen, kuinka sähkövaraus tuottaa ympärilleen sähkökentän. Tätä sähkökenttää voidaan havainnollistaa kenttäviivoin, jotka kulkevat positiivisesta sähkövarauksesta kohti negatiivista varausta. Gaussin laki sähkökentille on

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho, \quad (3.3)$$

jossa \bar{D} on sähkövuon tiheys ($\frac{C}{m^2}$) ja ρ on varaustiheys ($\frac{C}{m^3}$).

Gaussin laki magneettikentille kertoo suljetun pinnan läpi kulkevan magneettikentän olevan nolla, jonka seurauksena on, että magneettisia monopoleja ei ole olemassa. Kenttäviivoin visualisoituna kentät muodostavat suljettuja käyriä. Gaussin laki magneettikentille on

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0. \quad (3.4)$$

jossa \bar{B} on magneettivuon tiheys (T).

Sähkömagneettiset kentät riippuvat toisistaan lineaarisessa väliaineissa väliaine yhtälöiden (3.5) - (3.7) kuvaamalla tavalla:

$$\bar{D} = \varepsilon \bar{E}, \quad (3.5)$$

$$\bar{B} = \mu \bar{H}, \quad (3.6)$$

$$\bar{J} = g \bar{E}, \quad (3.7)$$

joissa ε on väliaineen permittiivisyys ($\frac{F}{m}$), μ on väliaineen permeabiliteetti ($\frac{H}{m}$) ja g väliaineen johtavuus ($\frac{S}{m}$). Jos aalto etenee tyhjiössä, on permittiivisyys $\varepsilon = \varepsilon_0$, permeabiliteetti $\mu = \mu_0$ ja johtavuus $g = 0$. Ideaalijohteessa puolestaan $g \rightarrow \infty$.

Jos Maxwellin yhtälöitä sovelletaan tilanteessa, jossa signaalin aikariippuvuus on muotoa $e^{j\omega t}$, voidaan Faradayn laki ja Ampère-Maxwellin laki esittää osoitinmuodossa

$$\nabla \times \bar{E} = -j\omega \bar{B}, \quad (3.8)$$

$$\nabla \times \bar{H} = j\omega \bar{D} + \bar{J}, \quad (3.9)$$

joissa j on imaginääriyksikkö ja $\omega = 2\pi f$ on kulmataajuus ($\frac{\text{rad}}{\text{s}}$). Gaussin lait sähkö- ja magneettikentille ovat kuin yhtälöissä (3.3) ja (3.4). [18, s.6–10]

3.2 Aaltoyhtälö ja radiosignaalin eteneminen

Sijoittamalla väliaine yhtälöt (3.5) ja (3.6) yhtälöihin (3.8) ja (3.9) sekä soveltamalla vektorilaskennan identiteettiä $\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \nabla(\nabla \cdot \vec{A}) - \nabla^2 \vec{A}$ [18, s.715], voidaan Maxwellin yhtälöt esittää lineaarisessa, isotrooppisessa, homogeenisessa ja lähteettömässä väliaineessa sähkökentälle muodossa

$$\nabla^2 \vec{E} + \omega^2 \mu \varepsilon \vec{E} = 0, \quad (3.10)$$

ja magneettikentälle muodossa

$$\nabla^2 \vec{H} + \omega^2 \mu \varepsilon \vec{H} = 0. \quad (3.11)$$

Yhtälöitä (3.10) ja (3.11) kutsutaan aaltoyhtälöiksi. Määrittelemällä väliaineelle ominainen aaltoluku k ($\frac{1}{\text{m}}$) siten, että

$$k = \omega \sqrt{\mu \varepsilon}, \quad (3.12)$$

jossa ω on kulmataajuus, ε on väliaineen permittiivisyys ja μ on väliaineen permeabiliteetti, voidaan aaltoyhtälöt sähkö- ja magneettikentille kirjoittaa muotoihin

$$\nabla^2 \vec{E} + k^2 \vec{E} = 0 \quad (3.13)$$

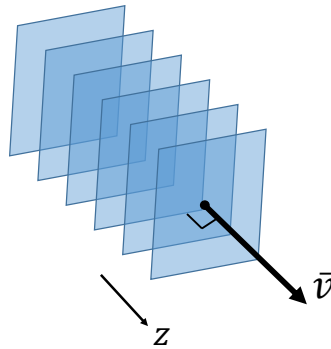
ja

$$\nabla^2 \vec{H} + k^2 \vec{H} = 0. \quad (3.14)$$

Siinä missä aallon taajuus f ($\frac{1}{\text{s}}$ eli Hz) voidaan ajatella yhteen aikayksikköön mahtuvien aaltojen lukumääränä, voidaan aaltoluku k ($\frac{1}{\text{m}}$) mieltää yhteen pituuden yksikköön mahtuvien aaltojen määränä. Ratkaisemalla aaltoyhtälöt (3.13) ja (3.14) eri väliaineille voidaan tutkia sekä magneettikentän että sähkökentän etenemistä eri tilanteissa. Seuraavassa esitetään esimerkit tyhjiölle, jollaisena ilmaa voidaan varsin hyvällä tarkkuudella approksimoida, sekä häviölliselle väliaineelle, johtimelle ja materiaalirajapinnoille. Matalaemisiviteettitasien ja signaalin läpäisyn kannalta oleellista onkin tutkia aallon käyttäytymistä erityisesti dielektrisessä materiaalissa ja johdinväliaineissa sekä toisaalta tarkastella tilannetta, jossa ilmassa etenevä aalto kohta metallisen tai dielektrisen rajapinnan. [18, s.15–16]

3.2.1 Radiosignaalin eteneminen tyhjiössä

Taso-aalto on tapa kuvata sähkömagneettista-aaltoa, joka etenee tyhjiössä tai vapaassa tilassa. Taso-aaltoja voidaan käyttää esittelemään sähkömagneettisten aaltojen ominaisuuksia tai joissain tilanteissa approksimoimaan todellista aaltoa. Esimerkiksi tarkasteltaessa ilmassa etenevää aaltoa kaukana sen lähteestä, voidaan sitä mallintaa taso-aaltona. Taso-aalto on vakiotaajuinen ja sen aaltorintamat etenevät niin, että ne ovat kohtisuorassa aallon etenemissuuntaan. Kuva 3.1 esittää havainne kuvan z -suuntaan nopeudella v etenevästä taso-aallosta. [18]



Kuva 3.1: Z-suuntaan nopeudella v etenevän taso-aallon aaltorintamat.

Häviöttömässä väliaineessa, kuten tyhjiössä tai approksimoiden ilmassa, voidaan sähkökentän aaltoyhtälö kirjoittaa yksinkertaiselle z -suuntaan etenevälle taso-aalolle

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} + k^2 E_x = 0, \quad (3.15)$$

jossa E_x on aallon x -suuntainen komponentti.

Linearisessa homogeenisessa tilanteessa toisen asteen differentiaaliyhtälön ratkaisut ovat verrannollisia termiin e^{kz} , jossa k on vakio. Yhtälölle (3.15) löytyy yhtälön (3.16) muotoa oleva ratkaisu

$$E_x(z) = E^+ e^{-jkz} + E^- e^{jkz} \quad (3.16)$$

jossa E^+ ja E^- ovat vakioita, jotka kuvastavat aallon etenemissuuntaista sekä sille vastakkaisista amplitudia. Ratkaisun oikeellisuus voidaan varmentaa sijoituksella. Eulerin lauseen $e^{j\varphi} = \cos(\varphi) + j \sin(\varphi)$ avulla tulos voidaan esittää aikatasossa

$$E_x(z, t) = E^+ \cos(\omega t - kz) + E^- \cos(\omega t + kz), \quad (3.17)$$

josta aaltorintaman etenemisnopeus v_p saadaan matkan z aikaderivaattana

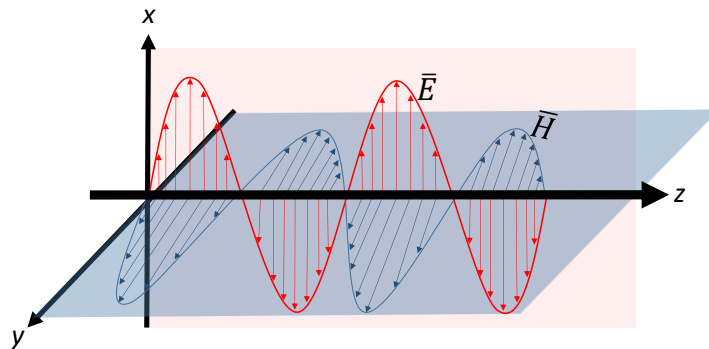
$$v_p = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{k} = \frac{\omega}{\omega\sqrt{\mu\varepsilon}} = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}}. \quad (3.18)$$

Sijoittamalla tyhjiön permeabiliteetti $\mu_0 \approx 12,57 \cdot 10^{-7} \frac{\text{H}}{\text{m}}$ ja tyhjiön permittiivisyys $\varepsilon_0 \approx 8,85418 \cdot 10^{-12} \frac{\text{F}}{\text{m}}$ saadaan $v_p \approx 2,998 \cdot 10^8 \frac{\text{m}}{\text{s}} \approx c$ eli valonnopeus.

Aallonpituus λ on määritelty kahden peräkkäisen maksimin etäisyytenä toisistaan ja se saadaan ratkaistua yhtälöiden (3.17) ja (3.18) avulla

$$\lambda = \frac{2\pi}{k} = \frac{2\pi \cdot v_p}{\omega} = \frac{v_p}{f}. \quad (3.19)$$

Maxwellin yhtälöiden mukaan sähkökenttä muodostaa aina myös magneettikentän, joka voidaan ratkaista, kun sähkökenttä tunnetaan. Kuva 3.2 havainnollistaa yhtälön (3.17) mukaisesti aikatasossa z -suuntaan etenevän tasoallon sähkökenttää sekä tähän nähden kohtisuoraan syntyneitä magneettikenttää.



Kuva 3.2: Z -suuntaan etenevän sinimuotoisen tasoallon toisiinsa nähden kohtisuoraan olevat sähkö- ja magneettikentät.

Muodostuva magneettikenttä on kohtisuorassa sähkökenttään nähden, eli z -suuntaan etenevä, vain x -suuntaisen komponentin omaava sähkökenttä E_x tuottaa magneettikentän H_y

$$\begin{aligned} H_y &= \frac{j}{\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{j}{\omega\mu} \frac{\partial}{\partial z} (E^+ e^{-jk \cdot z} + E^- e^{jk \cdot z}) \\ &= \frac{k}{\omega\mu} (E^+ e^{-jk \cdot z} - E^- e^{jk \cdot z}) \\ &= \frac{1}{\eta} (E^+ e^{-jk \cdot z} - E^- e^{jk \cdot z}), \end{aligned} \quad (3.20)$$

joten magneettikentän z - ja x -suuntaiset komponentit $H_z = H_x = 0$. Yhtälössä (3.20) termi η

$$\eta = \frac{\omega\mu}{k} = \frac{\omega\mu}{\omega\sqrt{\mu\epsilon}} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \quad (3.21)$$

on aaltoimpedanssi. Sijoittamalla μ_0 ja ϵ_0 yhtälöön (3.21) saadaan aaltoimpedanssiksi $\eta \approx 377 \Omega$. Tätä approksimaatiota voi käyttää myös ilmalle, koska ilmalle suhteellinen permittiivisyys $\epsilon_r \approx 1$ sekä suhteellinen permeabiliteetti $\mu_r \approx 1$. [18, s.16–17]

3.2.2 Radiosignaalin eteneminen häviöllisessä materiaalissa

Häviöllisessä materiaalissa osa etenevästä sähkömagneettisesta aallosta absorboituu itse materiaaliin. Tämän taustalla on materiaalin osittainen johtavuus g , joka aiheuttaa häviöihin johtavia virtoja. Tässä johtavuuden aiheuttamien virtojen oletetaan olevan pieniä verrattuna koko materiaalissa vallitsevaan kenttään eli $g < \omega\epsilon$. Sijoittamalla väliaine-yhtälöt (3.5) - (3.7) yhtälöihin (3.8) ja (3.9) saadaan yhtälöt

$$\nabla \times \bar{E} = -j\omega\mu\bar{H}, \quad (3.22)$$

$$\nabla \times \bar{H} = j\omega\epsilon\bar{E} + g\bar{E}, \quad (3.23)$$

joista saadaan sähkökentälle aaltoyhtälöksi

$$\nabla^2 \bar{E} + \omega^2\mu\epsilon \left(1 - j\frac{g}{\omega\epsilon}\right) \bar{E} = 0. \quad (3.24)$$

Tästä voidaan tyhjiössä etenevän aallon tapauksessa esitellyn aaltoluvun kaltaisesti määrittellä aallon kompleksinen etenemisvakio γ

$$\gamma = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{\mu\epsilon} \left(\sqrt{1 - j\frac{g}{\omega\epsilon}}\right), \quad (3.25)$$

jossa α on vaimennusvakio ja β vaihevaki. Jos aaltoa tarkastellaan jälleen tilanteessa, jossa z -suuntaan etenevällä aallolla on vain x -suuntainen komponentti, saadaan aaltoyhtälö muotoon

$$\frac{\partial^2 E_x}{\partial z^2} - \gamma^2 E_x = 0, \quad (3.26)$$

joka on jälleen toisen asteen differentiaaliyhtälö, jolla on ratkaisu muotoa

$$\begin{aligned} E_x(z) &= E^+ e^{-\gamma z} + E^- e^{\gamma z} \\ &= E^+ e^{-\alpha z} e^{-j\beta z} + E^- e^{\alpha z} e^{j\beta z}. \end{aligned} \quad (3.27)$$

Yhtälö (3.27) voidaan edelleen esittää aikatasossa muodossa

$$E_x(z, t) = E^+ e^{-\alpha z} \cos(\omega t - \beta z) + E^- e^{\alpha z} \cos(\omega t + \beta z). \quad (3.28)$$

Yhtälöstä (3.28) nähdään, että se muistuttaa huomattavasti yhtälöä (3.17), mutta nyt sekä positiiviseen että negatiiviseen suuntaan eteneviä aaltoja vaimennetaan eksponentiaalisella kertoimella, jolloin osa aallon kantamasta energiasta siirtyy itse materiaaliin. Sähkökenttään nähden kohtisuoraan vaikuttava magneettikenttä voidaan puolestaan esittää muodossa

$$\begin{aligned} H_y &= \frac{j}{\omega\mu} \frac{\partial E_x}{\partial z} = \frac{j}{\omega\mu} \frac{\partial}{\partial z} (E^+ e^{-\gamma z} + E^- e^{\gamma z}) \\ &= \frac{-j\gamma}{\omega\mu} (E^+ e^{-\gamma z} - E^- e^{\gamma z}) \\ &= \frac{1}{\eta} (E^+ e^{-\gamma z} - E^- e^{\gamma z}), \end{aligned} \quad (3.29)$$

josta voidaan määrittää aaltoimpedanssiksi η

$$\eta = \frac{j\omega\mu}{\gamma}. \quad (3.30)$$

Huomataan, että häviöllisessä materiaalissa aaltoimpedanssi on kompleksinen termin γ vuoksi. Lisäksi, mikäli häviöllisyys poistetaan, eli materiaalista poistetaan johtavuus määrittelemällä $g = 0$, on kompleksinen etenemisvakio $\gamma = \alpha + j\beta = jk$, joka vastaa häviöttömän tilanteen aaltoyhtälön tapausta. Tästä seuraa myös, että aaltoimpedanssi olisi sama kuin aiemmin yhtälössä (3.21) häviöttömälle tilanteelle. [18, s.17–18]

3.2.3 Radiosignaalin eteneminen johtimessa

Aallon etenemistä häviöllisessä materiaalissa voitiin mallintaa yhtälön (3.25) mukaisella kompleksisella etenemisvakioilla, jossa on huomioitu materiaalissa oleva johtavuus. Häviöllisessä materiaalissa johtavuuden g kuitenkin oletettiin olevan pieni, jolloin Ampère-Maxwellin laissa johtavuusvirran \bar{J} osuus on pieni verrattuna siirrosvirtaan $\frac{\partial \bar{D}}{\partial t}$. Hyvä johdin on puolestaan on tapaus, jossa johtavuusvirta on merkittävästi siirrosvirtaa suurempi, eli $g \gg \omega\epsilon$ yhtälössä (3.23). Metallisia rakenteita voidaan hyvällä tarkkuudella mallintaa hyvinä johteina. Hyvän johtimen tapauksessa etenemisvakio voidaan määrittellä muodossa

$$\begin{aligned} \gamma &= \alpha + j\beta \cong j\omega\sqrt{\mu\epsilon} \sqrt{\frac{g}{\omega\epsilon}} \\ &= (1 + j) \sqrt{\frac{g\omega\mu}{2}} = \sqrt{\frac{g\omega\mu}{2}} + j\sqrt{\frac{g\omega\mu}{2}}, \end{aligned} \quad (3.31)$$

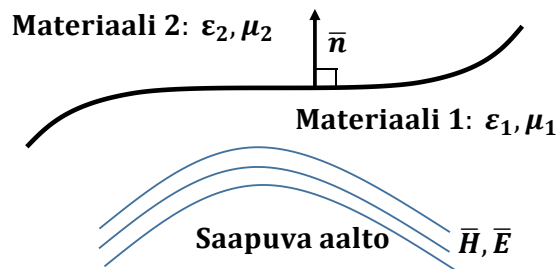
eli jättämällä yhtälössä (3.23) tai (3.24) siirrosvirta huomiotta. Hyvälle johtimelle voidaan lisäksi määritellä tunkeutumissyvyys δ

$$\delta = \frac{1}{\alpha} = \sqrt{\frac{2}{g\omega\mu}}. \quad (3.32)$$

Tarkastelemalla tunkeutumissyvyyttä eri materiaaleille huomataan, että metalleilla tunkeutumissyvyys on korkeilla taajuuksilla varsin pieni, eli sähkömagneettinen säteily ei pysty tunkeutumaan materiaaliin tätä varsin pientä tunkeutumissyvyyttä pidemmälle. Esimerkiksi taajuudella $f = 1,8$ GHz hopealle, jonka johtavuus on suuruusluokkaa $g \approx 6,30 \cdot 10^7 \frac{\text{S}}{\text{m}}$ [7, s.93] tai $g_{\text{Ag}} = 6,173 \cdot 10^7 \frac{\text{S}}{\text{m}}$ [18, s.19] saadaan käytetystä johtavuuden arvosta riippuen tunkeutumissyvyudeksi $\delta = 1,495 \dots 1,509 \mu\text{m}$. Hyvin ohut kappale riittää toimimaan erinomaisena johteena signaalille ja erityisesti korkeammilla taajuuksilla valtaosa signaalin virrasta kulkee johteen pintakerroksissa. [18, s.19–20] Yhtälöstä (3.32) voidaan lisäksi nähdä, että ideaalijohteelle ($g \rightarrow \infty$) tunkeutumissyvyys $\delta = 0$.

3.2.4 Radiosignaali materiaalirajapinnassa

Aiemmassa tarkasteltiin tilannetta, jossa sähkömagneettinen aalto etenee jatkuvuustilassa häviöttömässä materiaalissa, dielektrisessä materiaalissa ja hyvässä johtimessa. Usein on kuitenkin tarve tarkastella tilannetta, jossa sähkömagneettinen aalto etenee materiaalissa ja kohtaa toisen materiaalin ja näin muodostuvan rajapinnan. Rajapintaehdot tarvitaan Maxwellin yhtälöiden yksikäsitteiseen ratkaisemiseen.



Kuva 3.3: Sähkömagneettinen aalto rajapinnassa. Kuvassa \bar{n} on materiaalirajapinnan normaalivektori.

Integraalimuotoisista Maxwellin yhtälöistä voidaan johtaa yhtälöt sähkömagneettisille kentille eri materiaalirajapinnoissa. Yleisen materiaalirajapinnan tapauksessa nämä niin kutsutut rajapintaehdot voidaan esittää vektorimuotoisesti

$$\bar{n} \cdot (\bar{D}_2 - \bar{D}_1) = \rho_s, \quad (3.33)$$

$$\bar{n} \cdot (\bar{B}_2 - \bar{B}_1) = 0, \quad (3.34)$$

$$\bar{n} \times (\bar{E}_2 - \bar{E}_1) = 0, \quad (3.35)$$

$$\bar{n} \times (\bar{H}_2 - \bar{H}_1) = \bar{J}_s, \quad (3.36)$$

joissa ρ_s on pintavaraustiheys rajapinnassa ja \bar{J}_s on virrantiheys rajapinnassa. Yhtälö (3.33) ilmaisee sähkövuon tiheyden \bar{D} normaalikomponentin olevan yhtä suuri kuin pinnalla vallitseva pintavaraustiheys ja (3.34) ilmaisee magneettivuon tiheyden \bar{B} normaalikomponentin olevan jatkuva rajapinnassa ($\bar{n} \cdot \bar{B}_2 = \bar{n} \cdot \bar{B}_1$). Yhtälö (3.35) määrittelee sähkökentän voimakkuuden \bar{E} tangentialisen komponentin jatkuvuuden rajapinnassa ja (3.36) magneettikentän voimakkuuden \bar{H} tangentialisen komponentin olevan yhtä suuri kuin rajapinnan virrantiheyden. Tangentiaaliset ja normaalivektorin suuntaiset komponentit ovat pääteltävissä vektorioperaattoreista. Pistetulot kentän ja normaalivektorin välillä tuottavat rajapinnan normaalivektorin suuntaisen komponentin ja ristitulot puolestaan rajapinnalle tangentialisen komponentin. [18, s.10–15]

Kahden häviöttömän dielektrisen aineen muodostamassa rajapinnassa rajapintaehdot voidaan esittää

$$\bar{n} \cdot \bar{D}_2 = \bar{n} \cdot \bar{D}_1, \quad (3.37)$$

$$\bar{n} \cdot \bar{B}_2 = \bar{n} \cdot \bar{B}_1, \quad (3.38)$$

$$\bar{n} \times \bar{E}_1 = \bar{n} \times \bar{E}_2, \quad (3.39)$$

$$\bar{n} \times \bar{H}_1 = \bar{n} \times \bar{H}_2. \quad (3.40)$$

Yhtälöistä nähdään, että dielektrisessä rajapinnassa sekä \bar{D} :n ja \bar{B} :n normaalimuotoiset komponentit että \bar{E} :n ja \bar{H} :n tangentialiset komponentit ovat jatkuvia rajapinnassa. [18, s.10–15]

Hyvän johtimen rajapinnassa, joka oletetaan tässä ideaaliseksi ($g \rightarrow \infty$), rajapintaehdot voidaan esittää

$$\bar{n} \cdot \bar{D} = \rho_s, \quad (3.41)$$

$$\bar{n} \cdot \bar{B} = 0, \quad (3.42)$$

$$\bar{n} \times \bar{E} = 0, \quad (3.43)$$

$$\bar{n} \times \bar{H} = \bar{J}_s. \quad (3.44)$$

Yhtälöistä nähdään, että tällaisessa tilanteessa \bar{H} :n tangentialinen komponentti on yhtä suuri kuin virrantiheys, \bar{D} :n normaalikomponentti yhtä suuri kuin pintavaraustiheys ja että \bar{B} :n normaalikomponentti on nolla. Lisäksi havaitaan, että johtimen pinnalla sähkökentän voimakkuuden \bar{E} tangentialinen komponentti on nolla. [18, s.10–15] Ilmiö johtuu

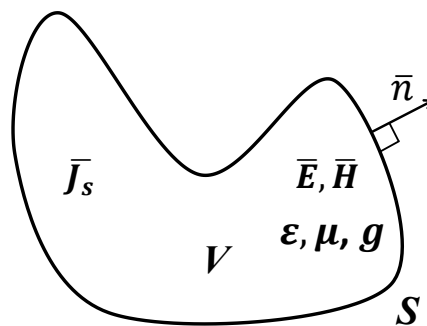
siitä, että ideallisen johtimen tapauksessa materiaalilla ei ole varausten liikettä vastustavaa voimaa, jolloin positiiviset tai negatiiviset varaukset voivat liikkua vapaasti pinnalla kumoten välittömästi saapuvan sähkökentän. Näin ollen pinnalle tangentialisen kenttäkomponentin täytyy kadota. Tällaista johtavan materiaalin käyttäytymistä voidaan käytännössä hyödyntää esimerkiksi Faradayn häkissä, eli metallisessa rakenteessa, jonka sisäpuolella vaikuttava sähkömagneettinen kenttä ei voi vaikuttaa häkin ulkopuolelle, eikä ulkopuolella vaikuttava kenttä rakenteen sisäpuolelle.

Yllä esitetylle ideaalijohdinrajapinnalle analogisena voidaan pitää teoreettisena käsitteenä esiintyvää ideaalisen magneettijohtimen muodostamaa rajapintaa, jossa magneettikentän voimakkuuden \vec{H} tangentialiset komponentit katoavat. Näiden lisäksi voidaan tarkastella niin kutsuttu säteilyehto, jossa sähkömagneettinen aalto on äärettömän kaukana lähteestään. Tällaisessa tapauksessa kenttien tulee olla äärettömän pienet tai edetä lähteestä poispäin. [18, s.15]

Työn kannalta oleelliset käsitteet ovat kuitenkin johdinrajapinta ja dielektriset rajapinnat. Matalaemissiviteettitasin voidaan ajatella muodostuvan tavallisesta dielektrisestä lasista, jonka pinnalla on metallista muodostuva johdinkerros. Tässä rakenteessa on ilman ja johtimen muodostaman rajapinnan lisäksi myös johtimen ja dielektrisen materiaalin muodostaman rajapinta sekä myös dielektrisen materiaalin ja ilman muodostama rajapinta rakenteen toisella puolella. Aalto kohtaa näitä rajapintoja edetessään rakenteen läpi kumpaankin suuntaan tahansa.

3.3 Poyntingin teoreema

Sähkömagneettinen säteily kantaa mukanaan energiaa sähkö- ja magneettikenttien muodossa. H. J. Poyntingin (1852–1914) mukaan nimetty Poyntingin teoreema kuvaa energian säilymistä sähkömagneettisen aallon mukana siirtyneelle teholle. Kuva 3.4 esittää suljetun pinnan S , jonka rajoittamassa tilavuudessa V sijaitsevalle sähkökentälle \vec{E} ja magneettikentälle \vec{H} sekä virtalähteelle \vec{J}_s voidaan johtaa yhtälön (3.45) mukainen tulos [19, s.390–394]



Kuva 3.4: Pinnan S rajaama tilavuus V , jonka sisällä sähkökenttä \vec{E} , magneettikenttä \vec{H} sekä virtalähde \vec{J}_s . Vektori \vec{n} on pinnan normaalivektori. [muokaten lähteestä 18, s.26]

$$\int_V \nabla \cdot (\bar{E} \times \bar{H}) dv = -\frac{d}{dt} \int_V \frac{1}{2} (\bar{E} \cdot \bar{D} + \bar{B} \cdot \bar{H}) dv - \int_V (\bar{J}_s \cdot \bar{E}) dv \Rightarrow$$

$$\oint_S \bar{E} \times \bar{H} \cdot \mathbf{n} da = -\frac{d}{dt} \int_V \frac{1}{2} (\bar{E} \cdot \bar{D} + \bar{B} \cdot \bar{H}) dv - \int_V (\bar{J}_s \cdot \bar{E}) dv. \quad (3.45)$$

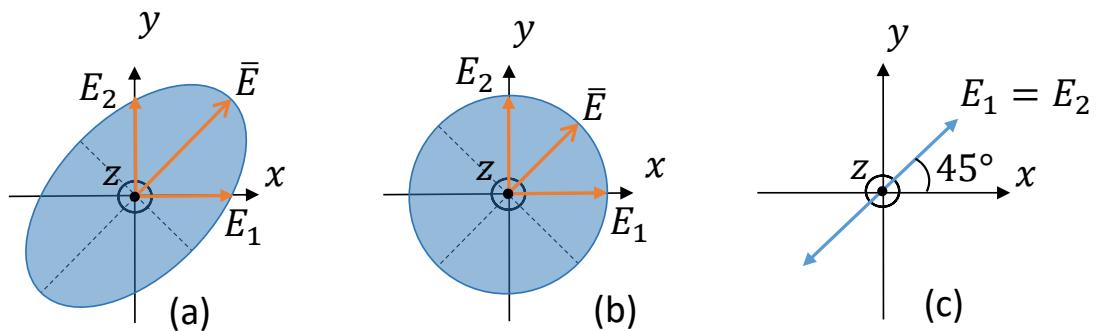
Yhtälön oikea puoli koostuu sähkö- ja magneettikenttiin varastoituneen kokonaisenergian määrän aikaderivaatan sekä tilavuudessa V kulutetun energian erotuksesta. Tämän täytyy olla yhtä suuri kuin tilavuudesta V pinnan S läpi poistuva teho. Termiä $\bar{S} = \bar{E} \times \bar{H}$ kutsutaan Poyntingin vektoriksi. [18, s.26] Yhtälö (3.45) voidaan esittää myös differentiaali-muodossa

$$\nabla \cdot \bar{S} = -\frac{d}{dt} \frac{1}{2} (\bar{E} \cdot \bar{D} + \bar{B} \cdot \bar{H}) - \bar{J}_s \cdot \bar{E}. \quad (3.46)$$

Poyntingin vektorin \bar{S} suunta ilmaisee sunnan, johon teho siirtyy ja se on aina kohtisuorassa sähkö- ja magneettikenttiä vastaan. [19, s.392–394]

3.4 Polarisaatio

Polarisaatio kuvaa sähkökenttävektorin suuntaa. Aiemmin tarkastellut taso-aallot olivat lineaarisesti polarisoituneita aaltoja kaukana lähteestään ja joiden sähkökenttävektori osoitti koko ajan samaan suuntaan. Laajemmin taso-aallon polarisaatiolla tarkoitetaan sähkökenttävektorin suuntaa, joka voi osoittaa koko ajan samaan suuntaan tai muuttua aallon edetessä. Yleisesti polarisaatio on elliptistä, mutta sen erikoistapaukset ovat pyöröpolarisaatio ja aiemmissa tapauksissa oletettu lineaarinen polarisaatio. Kuva 3.5 esittää eri polarisaatioita: elliptinen, pyöröpolarisaatio ja kallistettu lineaarinen polarisaatio.



Kuva 3.5: Eri polarisaatioita. (a) Elliptinen polarisaatio. (b) Pyöröpolarisaatio. (c) Lineaarinen polarisaatio. Z-suunta osoittaa kohti katsojaa.

Yleisesti polarisaation kokonaissähkökenttä voidaan määrittellä z-suuntaan etenevälle taso-aallolle yhtälöllä

$$\bar{E} = (E_1 \hat{x} + E_2 \hat{y}) e^{-jkz} \quad (3.47)$$

jossa $E_1\hat{x}$ on x -suuntaisen kentän suuruus ja $E_2\hat{y}$ vastaavasti y -suuntaisen kentän suuruus. Lineaarinen polarisaatio saavutetaan, jos $E_1 = E_2$. Lineaarinen polarisaatio voi olla myös y -suuntaista, jolloin $E_1 = 0$ ja $E_2 \neq 0$ tai x -suuntaista, jolloin $E_2 = 0$ ja $E_1 \neq 0$. Tällöin puhutaan pysty- tai vaakapolarisaatiosta. Jos puolestaan $E_1 = E_2$ siten, että

$$\bar{E} = (E_1\hat{x} + jE_2\hat{y})e^{-jkz}, \quad (3.48)$$

on kyseessä vasenkätinen pyöröpolarisaatio (engl. left-hand circularly polarized, LHCP). Vastaavasti, jos $E_1 = E_2$ ja

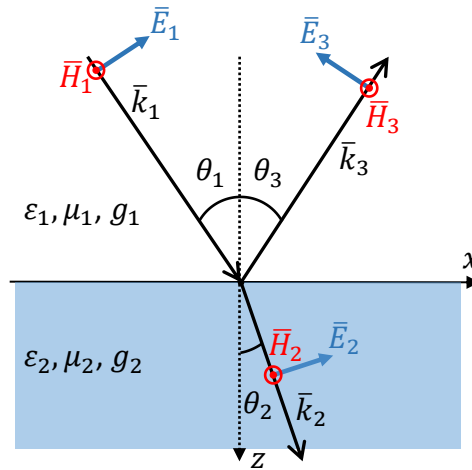
$$\bar{E} = (E_1\hat{x} - jE_2\hat{y})e^{-jkz}, \quad (3.49)$$

on kyseessä oikeakätinen pyöröpolarisaatio (engl. right-hand circularly polarized, RHCP). Jos $E_1 \neq E_2$ yhtälön (3.36) tai (3.37) tapauksessa on kyseessä elliptinen polarisaatio. Vastaava tarkastelu voidaan suorittaa myös magneettikentille, mutta yleensä polarisaatiolla tarkoitetaan nimenomaan sähkökenttävektorin suuntaa. [18, s.24–25]

3.5 Heijastuminen

Heijastuminen on radiosignaalin *läpäisyn* kannalta varsin merkittävä ilmiö, sillä se vaikuttaa merkittävästi siihen kuinka suuri osa saapuvan aallon *tehosta* kohteen tai rakenteen toisella puolella nähdään. Radioaallon heijastumisessa aalto kohtaa aallonpituutta merkittävästi suuremman kohteen, jolla on erilaiset sähköiset ominaisuudet, jolloin osa aallon energiasta siirtyy kohteeseen ja osa heijastuu takaisin. Koska esimerkiksi matkaviestintukiasemat sijaitsevat ulkona ja päätelaitteita käytetään usein sisätiloissa, täytyy signaalin läpäistä ensin seinät tai ikkunat ja muita mahdollisia esteitä.

Kuva 3.6 esittää taso-aallon heijastumista ja läpäisyyä. Aalto etenee vektorin \bar{k}_1 osittamassa suunnassa, jolloin sen sähkökenttä \bar{E} ja magneettikenttä \bar{H} ovat kohtisuorassa etenemissuuntaa ja toisiaan vastaan. Kulma θ_1 on saapumiskulma. Vektori \bar{k}_2 kuvaa kulmassa θ_2 läpäisevää taittunutta aaltoa ja \bar{k}_3 kulmassa θ_3 takaisin heijastuvaa aaltoa. Kulmat luetaan pinnan normaaliin nähden. Vakiot ε_1, μ_1 ja g_1 sekä ε_2, μ_2 ja g_2 edustavat eri materiaalien sähköisiä ja magneettisia ominaisuuksia, eli permittiivisyyttä, permeabiliteettia ja johtavuutta. [19, s.441–451]



Kuva 3.6: Taso-aallon heijastuminen ja taittuminen (läpäisy) sen kohdatessa rajapinnan. [muokaten lähteestä 19, s.445]

Aallon läpäisyä rajapinnassa määrittää Snellin laki

$$n_1 \sin(\theta_1) = n_2 \sin(\theta_2), \quad (3.50)$$

jossa n_1 ja n_2 ovat materiaalien taitekertoimet. [19, s.447] Taitekerroin n voidaan määrittellä väliaineelle aaltojen etenemisnopeuksien suhteena yhtälön (3.18) avulla

$$n = \frac{c}{v_p} = \frac{1/\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}{1/\sqrt{\mu \epsilon}} = \frac{\sqrt{\mu \epsilon}}{\sqrt{\mu_0 \epsilon_0}}, \quad (3.51)$$

jossa c on valonnopeus tyhjiössä, v aallon etenemisnopeus väliaineessa, μ väliaineen permeabiliteetti ja ϵ väliaineen permittiivisyys. Näin ollen Snellin laki voidaan kirjoittaa yleisesti myös muodossa

$$\sqrt{\mu_1 \epsilon_1} \sin(\theta_1) = \sqrt{\mu_2 \epsilon_2} \sin(\theta_2), \quad (3.52)$$

jossa μ_1 ja ϵ_1 ovat materiaalin 1 materiaaliparametrit ja μ_2 ja ϵ_2 materiaalin 2 materiaaliparametrit.

Dielektristä materiaalia kohdatessaan osa aallon energiasta tunkeutuu materiaaliin ja osa heijastuu takaisin. Ideaalijohtimen tapauksessa kaikki energia puolestaan heijastuu takaisin ilman häviöitä. Käytännön rakennuksissa käytetään usein metallikehikoita tai muita metallirakenteita, jotka ovat signaalin kannalta haitallisia. Signaali ei heijastu tällaisesta rakenteesta kokonaan, mutta läpäisee sitä kuitenkin huonosti.

Heijastuminen ja läpäisy riippuvat paitsi Snellin lain mukaan väliaineiden permittiivisyydestä ja permeabiliteetista, myös polarisaatiosta. Kuvan 3.6 mukaisessa tilanteessa sähkökenttä voi olla joko rinnakkaispolarisoitunut eli p-polarisoitunut (engl. transverse mag-

netic, TM tai engl. parallel, rinnakkainen), eli rinnakkainen xz -tasoon nähden tai kohtisuoraan polarisoitunut eli s-polarisoitunut (engl. transverse electric, TE tai saks. senkrecht, kohtisuora), eli kohtisuorassa xz -tasoon nähden. Läpäisykerroin τ voidaan määrittellä läpäisseen aallon E_2 suhteena saapuvaan aaltoon E_1 ja heijastuskerroin Γ heijastuneen aallon E_3 suhteena saapuvaan aaltoon. Nämä voidaan johtaa rajapintaehdoista (kappale 3.2.4) apuna käyttäen ja ovat Reitzin, Milfordin ja Christyn kirjan ”*Foundations of Electromagnetic Theory*” mukaan rinnakkaispolarisaatiolle (p-polarisaatiolle)

$$\tau_{TM} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{2\eta_1 \cos(\theta_1)}{\eta_2 \cos(\theta_1) + \eta_1 \cos(\theta_2)}, \quad (3.53)$$

$$\Gamma_{TM} = \frac{E_3}{E_1} = \frac{\eta_2 \cos(\theta_1) - \eta_1 \cos(\theta_2)}{\eta_2 \cos(\theta_1) + \eta_1 \cos(\theta_2)}, \quad (3.54)$$

ja kohtisuoralle polarisaatiolle (s-polarisaatiolle)

$$\tau_{TE} = \frac{E_2}{E_1} = \frac{2\eta_1 \cos(\theta_1)}{\eta_1 \cos(\theta_1) + \eta_2 \cos(\theta_2)}, \quad (3.55)$$

$$\Gamma_{TE} = \frac{E_3}{E_1} = \frac{\eta_1 \cos(\theta_1) - \eta_2 \cos(\theta_2)}{\eta_1 \cos(\theta_1) + \eta_2 \cos(\theta_2)}, \quad (3.56)$$

joissa η_1 ja η_2 ovat materiaalien materiaaliparametrit [19, s.449] eli aaltoimpedanssit. Näitä neljää yhtälöä kutsutaan Fresnel-yhtälöiksi Augustin-Jean Fresnel’n (1788–1826) mukaan.

Brewsterin kulmalla tarkoitetaan kulmaa θ_B . Sähkömagneettisen säteilyn saapuessa materiaalien rajapintaan Brewsterin kulmassa, muodostavat heijastunut ja taittunut aalto suoran kulman.

$$\theta_B = \tan^{-1}\left(\frac{n_2}{n_1}\right), \quad (3.57)$$

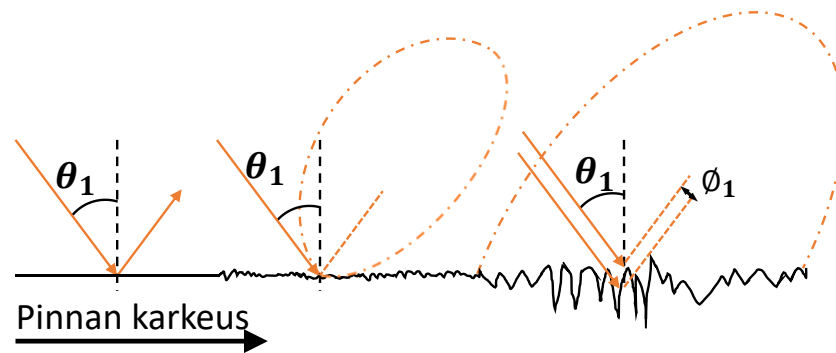
jossa n_1 ja n_2 ovat materiaalien taitekertoimet. Brewsterin kulmassa saapuva satunnaisesti polarisoitunut säteily heijastuu kauttaaltaan kohtisuorassa polarisaatiossa eikä yhtään rinnakkaisen polarisaation omaavaa säteilyä heijastu. Toisin ilmaistuna aallon polarisaatio ei välttämättä säily heijastuksessa ja tietyillä kulmilla aalto voi kokea jopa 180° vaihesiirron eli esimerkiksi elliptisesti polarisoituneen tai pyöröpolarisoituneen aallon kiersuunta voi muuttua. Näkyvän valon tapauksessa ilmiötä on sovelluttu muun muassa polarisoiviin aurinkolaseihin. [19 s.451–454], [21, s.43–44]

Radiosignaalien lähetyksen ja vastaanoton, sekä tajuusselektiivisten pintojen kannalta polarisaatio ja sen muuttuminen voi olla ratkaisevaa. Usein antennit toimivat lähettäessään ja vastaanottaessaan vain niille suunnitellussa polarisaatiossa, jolloin väärässä polarisaa-

tiossa saapuva signaali saattaa jäädä kokonaan vastaanottamatta. Taajuusselektiiviset rakenteet ovat puolestaan eri tavoin kuvioituja jaksollisia rakenteita, joiden kyky estää tai sallia tiettyjen taajuuksien läpäisy riippuu rakenteen kuvioinnista. Eri tavoin kuvioitujen rakenteiden ominaisuudet voivat riippua polarisaatiosta hyvin paljon, kun taas toiset rakenteet sallivat hieman laajemmalla skaalalla polarisoituneen signaalin läpäisyn [20]. [22]

3.6 Sironta

Sironta on aallon heijastumiseen liittyvä ilmiö, jossa aallon kohtaavan pinnan karkeus vaikuttaa siihen, kuinka aalto ja sen energia siirtyvät ympäristöön. Tasaisen pinnan tapauksessa kaikki energia suuntautuu yhteen suuntaan. Pinnan karkeuden muuttuessa karkeammaksi osa saapuvasta aallosta heijastuu kuitenkin eri kohdista eri tavalla, jolloin aalto siroaa ja sen kantama energia hajautuu eri suuntiin.



Kuva 3.7: Pinnan karkeuden vaikutus sirontaan ja heijastukseen. [muokaten lähteestä 21, s.46]

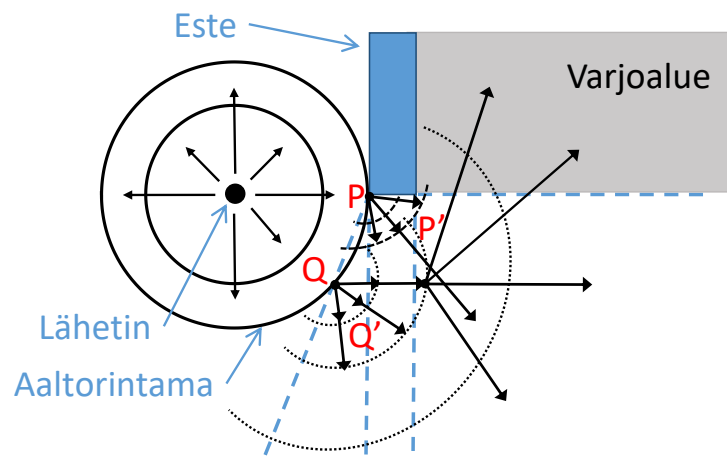
Pinnan karkeuden kasvaessa pinnasta heijastuneiden aaltojen vaihe-ero ϕ_1 alkaa kasvaa. Tasaisella pinnalla vaihe-eroa ei juurikaan ole, mutta käytännössä pinta voidaan olettaa tasaiseksi, jos heijastuneiden aaltojen vaihe-ero on alle 90° . Pinnan karkeutta voidaan näin arvioida niin kutsutun Rayleighin ehdon avulla

$$\Delta h < \frac{\lambda}{8 \cos \theta_1}, \quad (3.58)$$

jossa Δh on pinnan muotojen korkeusero, λ aallonpituus ja θ_1 aallon tulokulma. Jos pinnan Δh on pienempi kuin aallonpituudesta ja tulokulmasta riippuva termi, on pinta tasainen. Tutkittaessa heijastusta karkean pinnan tapauksessa tulisi huomioida myös aallon amplitudin pienentyminen, koska energia hajautuu eri suuntiin. [21, s.45-47] Ikkunalasit voidaan olettaa radiotaajuuksien signaalien kannalta tasaisiksi pinnoiksi, koska lasin pinnanmuotojen vaihteluiden tulisi olla vähintään useita millimetrejä esimerkiksi signaalille, jonka taajuus on 2600 MHz. Siroaminen on kuitenkin yleisesti merkityksellinen ilmiö, sillä aalto kohtaa matkallaan siroamista aiheuttavia pintoja ja esteitä, jolloin sen kantama energia luonnollisesti hajoaa hieman eri suuntiin.

3.7 Diffraktio

Diffraktio on aallon muodon muuttumista silloin, kun aalto kohtaa omaa aallonpituuttaan suuremman esteen, jossa on teräviä kulmia, rakoja tai muita pintoja. Käytännöllisesti tarkasteltuna on diffraktion ansiota, että sähkömagneettinen aalto kykenee etenemään läpäisemättömien esteiden, kuten mäkien tai korkeiden rakennusten varjostamalle alueelle. Diffraktio perustuu Christiaan Huygensin (1629-1695) mukaan nimettyyn Huygensin periaatteeseen, jossa aaltoiltaman jokainen yksittäinen piste toimii uuden aallon lähteenä. Etenevän aallon reunan pisteistä lähtee liikkeelle uusia alkeisaaltoja, jotka summautuaan luovat uuden aaltorintaman ja aalto jatkaa näin etenemistään.

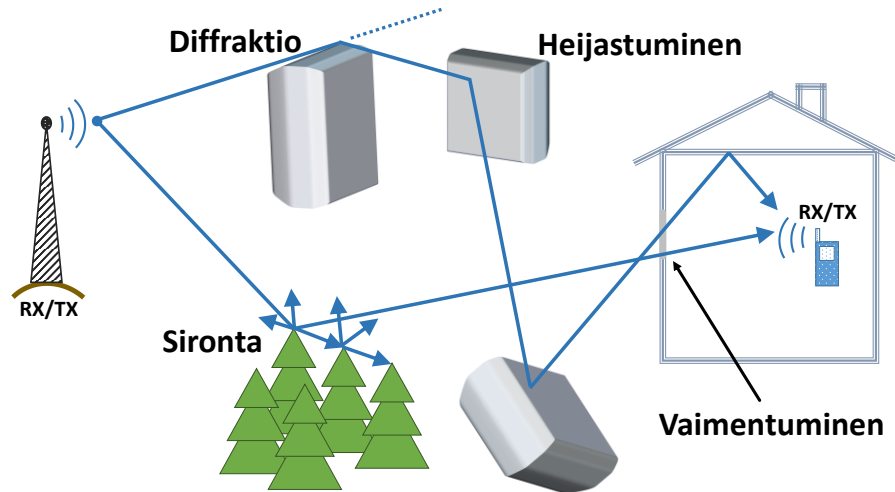


Kuva 3.8: Diffraktion avulla aaltorintamat voivat edetä aallon etenemisen tiellä olevan esteen taakse. Tarkasteltu yläpuolelta.

Kuva 3.8 näyttää Huygensin periaatteen. Aaltorintaman kohdatessa esteen reunan pisteessä P , lähettää tämä piste matkaan uuden aaltorintaman P' . Samaan aikaan piste Q on lähettänyt aaltorintaman Q' . Kun nämä kaksi aaltorintamaa edelleen summautuvat ja luovat uusia alkeisaaltoja, voidaan havaita aaltorintaman etenemisen jatkuminen myös esteen varjostamalle alueelle. Esteiden aiheuttamat varjoalueet eivät siis ole aaltorintaman kannalta täysin teräviä, vaan osa säteilyn kantamasta tehosta siirtyy myös esteen taakse. [21, s 50–54]

3.8 Signaalin eteneminen käytännön olosuhteissa

Tukiaseman (TX) ja päätelaitteen (RX) välisessä kommunikaatiossa ei aina ole suoraa näköyhteyttä. Lähetetty signaali voi edetä kohteeseensa useita eri reittejä pitkin, pääosin heijastumisen, sironnan ja diffraktion ansiosta. Signaali myös vaimentuu kulkiessaan objektien läpi.



Kuva 3.9: Tukiaseman ja päätelaitteen välillä signaali voi kulkea montaa eri reittiä sekä kokea useita eri ilmiöitä edetessään.

Kuva 3.9 esittää käytännön tilannetta monitie-etenemisestä (engl. multipath propagation), jossa sama signaali voi saapua eri mekanismien vaikutuksesta kohteeseensa eri aikoihin eri pituisista reiteistä johtuen. Saapuvien signaalien vaiheet, amplitudit tai polarisaatiot voivat olla erilaisia, jolloin esimerkiksi täysin vastakkaisissa vaiheissa olevat signaalit voivat kumota toisensa. Vastaavasti samassa vaiheessa saapuvat signaalit voivat vahvistaa toisiaan. [18, s.673-674], [21] Signaalit ovat usein jollain tavalla jakautuneita siten, että yksi signaali on hieman muita voimakkaampi ja pidempää reittiä saapuneet ”kopiot” saapuvat hyvin pian tämän voimakkaimman signaalin jälkeen.

Matkalla tukiasemalta käyttäjän päätelaitteelle signaali kokee myös häviöitä diffraktion, heijastumisen ja sironnan lisäksi. Pelkästä etenemisestä vapaassa tilassa aiheutuva etenemisvaimennus L_0 voidaan määrittellä

$$L_0(\text{dB}) = 20 \log \left(\frac{4\pi R}{\lambda} \right) > 0, \quad (3.59)$$

jossa R on lähettävän ja vastaanottavan antennin välinen etäisyys. [21, s.97] Kokonaisuutena signaalin vaimentumista sen kulkiessa päätelaitteen ja tukiaseman välillä voidaan tarkastella desibeleinä linkkibudjettianalyysin avulla esimerkiksi siten, että

$$P_{\text{RX}} = P_{\text{TX}} + G_{\text{TX}} - L_{\text{TX}} - L_0 - L_M + G_{\text{RX}} - L_{\text{RX}}, \quad (3.60)$$

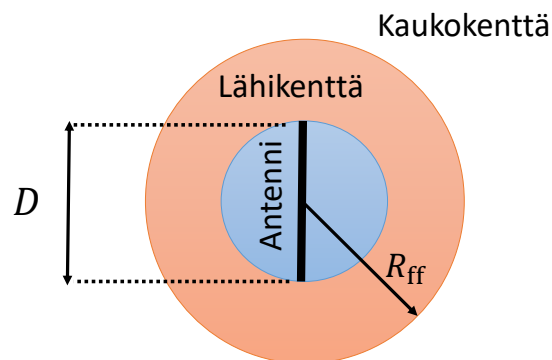
jossa P_{RX} on vastaanotettu teho, P_{TX} lähetetty teho, G_{TX} lähettävän antennin vahvistus, L_{TX} lähettimen häviöt, L_0 etenemisvaimennus, L_M muut häviöt, G_{RX} vastaanottavan antennin vahvistus ja L_{RX} vastaanottimen häviöt. [21, s.101–103] Materiaalien aiheuttamat vaimennukset voidaan linkkibudjettianalyysissä niputtaa esimerkiksi muiden häviöiden osuuteen, mutta näin suuren yksittäisen lisävaimennuksen (esimerkiksi 20-30 dB) ottaminen huomioon analyysissä johtaa väistämättä siihen, että vastaanotettu teho pienenee

huomattavasti. Suoraa seurausta tästä on, että lähetystehoja ja tukiasematiheyttä tulee kasvattaa moninkertaiseksi, joista kumpikaan ei välttämättä ole luonteva tai kustannustehokas ratkaisu [5 s. 27–29].

3.9 Lähikenttä ja kaukokenttä

Esimerkiksi kuvassa 3.9 esitetty tukiaseman ja käyttäjän päätelaitteen välinen kommunikaatio tapahtuu niin kutsutussa kaukokentässä, eli päätelaitteen ja tukiaseman antennien välinen etäisyys on suuri. Mikäli päätelaite olisi hyvin lähellä antennia puhuttaisiin lähikentästä.

Antennin säteillä energiaa ympäristöönsä, muuttuu kenttä antennin läheisyydessä hyvin voimakkaasti. Tällä lähialueella kenttä muodostuu kahdesta komponentista: säteilevästä energiasta ja reaktiivisesta energiasta. Säteilevää energiaa kantava kenttä jatkaa kauas lähteestään ja riittävän kaukana antennista tätä kenttää voidaankin approksimoida aiemmin kuvatulla taso-aallolla. Säteilemisen sijaan reaktiiviset kentät puolestaan vain varastoivat energiaa värähdellen antennin ympäristössä. Lähikentän alueella olevat esteet tai esineet vaikuttavatkin voimakkaasti koko antennin kenttään juurikin näistä reaktiivisista komponenteista johtuen. Kaukokentässä reaktiivisten kenttien osuus on olematon tai ainakin merkittävästi pienempi. [21, s.62–63]



Kuva 3.10: Lähikentän ja kaukokentän välinen etäisyys antennille, jonka halkaisija on D .

Kaukokentän etäisyys R_{ff} antennista voidaan määrittellä yhtälöllä

$$R_{ff} = \frac{2D^2}{\lambda}, \quad (3.61)$$

jossa D on antennin halkaisija [m]. Antenneille tehtävät mittaukset suoritetaan usein kaukokentässä, jotta vältetään hankalammilta lähikenttämittauksilta. Myös lähikentässä tehtävät mittaukset ovat kuitenkin mahdollisia. [21, s.62–63]

3.10 S-parametrit ja läpäisyvaimennus

S-parametrit (engl. scattering parameters) kuvaavat lineaarisen verkon toiminnan jatkuvassa tilanteessa. S-parametreja käytetään yleisesti RF-mittauksissa ja simuloinneissa. Ne voidaan esittää kompleksisina, jolloin tiedetään sekä suuruus että vaihe tai desibeleinä. Kaksiporttiselle järjestelmälle S-parametrit ovat matriisimuodossa

$$\begin{bmatrix} V_1^- \\ V_2^- \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \\ S_{21} & S_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1^+ \\ V_2^+ \end{bmatrix}, \quad (3.62)$$

jossa V_1^- on portista 1 heijastuneen aallon amplitudi, V_2^- portista 2 heijastuneen aallon amplitudi, V_1^+ porttiin 1 saapuva aalto ja V_2^+ porttiin 2 saapuva aalto. Tämä niin kutsuttu S-matriisi voidaan laajentaa myös n -porttiselle järjestelmälle. [18, s.178–188]

Eri S-parametrit voidaan esittää syötettyjen ja heijastuneiden aallojen keskinäisinä suhteina. S-parametri S_{11} kertoo kuinka aalto heijastuu takaisin syöttösuuntaan, jos verkkoa syötetään portista 1 ja S_{22} kuvaa vastaavan tilanteen, mikäli verkkoa syötetään portista 2. Näitä kahta kutsutaan myös jännitteen heijastuskertoimiksi. Parametrit S_{21} ja S_{12} kertovat kuinka signaali läpäisee verkon: käytännön tilanteessa S_{21} mitattaisiin niin, että mittaus suoritettaisiin portista 2 samalla kun verkkoa syötetään portista 1 ja päinvastoin S_{12} :n tapauksessa. Aktiivisen verkon tapauksessa S_{21} olisi siis myötäsuuntainen vahvistus ja S_{12} vastakkasuuntainen vahvistus, passiivisen verkon tapauksessa parametreja voidaan luonnehtia yksinkertaisesti läpäisykertoimiksi. Jos rakenne on symmetrinen, niin parametrien S_{21} ja S_{12} tulisi olla yhtä suuret.

Tämän työn kannalta merkityksellisimmät parametrit ovat kuitenkin S_{11} ja S_{21} , jotka siis kuvaavat miten lasirakenne heijastaa sähkömagneettista säteilyä ja kuinka suuri osuus siitä läpäisee rakenteen. Simuloinneissa nämä esitetään desibeleinä, jolloin läpäisyn teoreettisena maksimiarvona voidaan pitää tilannetta, jossa $S_{21} = 0$ dB. Läpäisyn heiketessä vaimennus kasvaa vastaavasti.

Siinä, missä S-parametreja voidaan soveltaa verkkojen sekä materiaalien ominaisuuksien yksityiskohtaiseen analysointiin, käytetään materiaalien mittauksessa myös niin kutsuttua läpäisyvaimennuksen käsitettä. Läpäisyvaimennus tarkoittaa sitä, miten signaalin etenemisen tielle asetettu kappale vaikuttaa signaalin läpäisyyn, kun tilannetta verrataan vapaan tilan etenemiseen. Läpäisyvaimennus on luontevaa mitata signaaligeneraattorin ja spektrianalysaattorin avulla, jolloin lähetetty ja vastaanotettu teho saadaan mitattua. Nämä tehot ilmoitetaan desibeleinä (dBm). Kun tilannetta verrataan vapaan tilan mittauksiin, eli tulokset normalisoidaan vapaan tilan referenssimittauksen avulla, saadaan selville kuinka paljon materiaalikappale vaimentaa signaalia kyseisessä tilanteessa, eli

$$L_{\text{MAT}} = P_{\text{MAT}} - P_{\text{V}}, \quad (3.63)$$

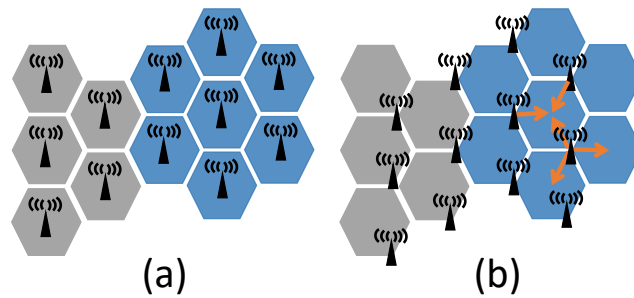
jossa L_{MAT} on materiaalin vaimennus, P_{MAT} on mitattu teho materiaali paikallaan ja P_V on mitattu teho vapaassa tilassa, eli materiaali poistettuna. Tämä suhde ilmoitetaan desibeleinä (dB). Työn käytännön mittaussuosus suoritettiin läpäisyvaimennusmittauksena. Mittausjärjestely on kuvattu tarkemmin luvussa 6.

Sekä läpäisyvaimennuksen käsitettä, että S-parametria S_{21} voidaan käyttää materiaalissa tapahtuvan vaimennuksen ilmaisuun.

3.11 Matkaviestinverkot

Matkaviestinverkoilla tarkoitetaan tukiasema-päätelaite arkkitehtuuria, joka mahdollistaa radioaaltoihin perustuvan langattoman puhelin-, viesti- ja dataliikenteen verkon peittoalueella. Nykyisin käytössä olevia digitaalisia verkkoteknologioita ovat Global System for Mobile communication (GSM), Universal Mobile Telecommunication System (UMTS) sekä Long Term Evolution (LTE). Suunnitteilla ja kehityksessä olevia tulevaisuuden verkkoteknologioita ovat esimerkiksi 5G-verkot (engl. 5th generation wireless systems). Nykyään matkaviestinteknologioihin liittyviä järjestelmäspesifikaatioita kehittää ja hallinnoi useista telekommunikaatitahoista koostuva organisaatio 3rd Generation Partnership Project (3GPP).

Matkaviestinverkot ovat soluverkkoja (engl. cellular network). Soluverkossa tietoliikenneverkko on jaettu soluihin, jotka verkon *tukiasemat* luovat. Sama tukiasema voi palvella yhtä tai useampaa solua, mutta käyttäjien päätelaitteet muodostavat yhteyden siihen tukiasemaan, jonka solussa ne sijaitsevat. Kuvassa 3.11 on esitetty havainne kuva soluverkosta. Verkon soluja voidaan mallintaa esimerkiksi ympyrällä, kuusikulmiolla tai muilla monikulmiomuodoilla, mutta käytännön tilanteessa solujen muoto voi olla muunkin muotoinen. Joka solussa sijaitsevan yhden tukiaseman sijaan voidaan käyttää rakennetta, jossa tukiasemat sijaitsevat solujen nurkissa ja lähettävät suuntaavilla antennilla esimerkiksi kolmen eri kuusikulmion sisälle. Jokaiselle tukiasemalle on määrätty tietyt taajuusalueet, joita se lähettää soluunsa. Viereisen solun tukiasemat eivät voi käyttää näitä taajuuksia ylikuulumisen takia, sillä samalla taajuudella toimivat tukiasemat häiritsisivät toisiaan. Samoja taajuuksia voidaan kuitenkin käyttää kauempana verkossa. Verkon kapasiteetin tarpeen kasvaessa soluja voidaan edelleen jakaa pienempiin soluihin. [23]



Kuva 3.11: Soluihin jaettu matkaviestinverkko, jossa (a) jokaisessa solussa tukiasema (b) tukiasemat suuntaavilla antenneilla solujen reunoilla. [24], [25, s.56–57]

GSM on toisen sukupolven (2G) matkaviestinteknologia. GSM-järjestelmä koostuu kolmesta pääkomponentista, jotka ovat Base Station Subsystem (BSS), Network Subsystem (NSS) ja Intelligent Network Subsystem (IN). BSS-järjestelmä vastaa radioliikenteen hoitamisesta ja verkon käyttäjien liikenteen yhdistämisestä radioverkon yli. NSS-järjestelmän tehtävänä on puheluiden käsittely, hallinta ja mahdollinen siirtäminen muihin verkoihin, käyttäjien hallinta ja paikannus verkon palvelujen tarjoamista varten sekä muita keskeisiä palveluita. IN-komponentti tarjoaa muita kuin verkkoon itseensä liittyviä palveluita verkon käyttäjälle, joista yksi esimerkki on prepaid-palvelu. [25, s.36]

Puhelut ja viestit ovat kiinteä osa GSM-verkkoa. Datapalveluista GSM-verkossa vastaavat General Packet Radio Service (GPRS) sekä tämän laajennus Enhanced Data rates for GSM Evolution (EDGE). EDGE-teknologialla on mahdollista päästä kirjoitushetken vaatimustason mukaan melko vaatimattomaan 270 kbit/s lähetysopeuteen [25, s.123]. GSM-verkon käytettävissä ovat Suomessa taajuusalueet 900 MHz, 1800 MHz ja 2000 MHz. Muualla maailmassa on käytössä muitakin taajuuksia, esimerkiksi Pohjois-Amerikassa taajuusalueet 850 MHz ja 1900 MHz [25, s.54].

UMTS on kolmannen sukupolven (3G) matkaviestinteknologia, joka toi mukanaan uusia teknologioita, kuten Code-division Multiple Access:n (CDMA) ja High Speed Packet Access:n (HSPA). Näillä teknologioilla saavutetaankin huomattavia parannuksia datanopeuksiin. HSPA-teknologian ensimmäisillä parannuksilla voidaan saavuttaa yhdellä kanta-aallolla käytännön olosuhteissa 3-4 Mbit/s [25, s.276] ja HSPA-teknologian myöhemmät parannukset nostavat tätä nopeutta entisestään. Suomessa UMTS-verkot käyttävät samoja taajuuskaistoja kuin GSM-verkot.

LTE on neljännen sukupolven (4G) teknologia, jonka tärkeimpiä parannuksia ovat GSM ja UMTS-teknologioita kehittyneemmät Frequency Division Duplex- (FDD) ja Time Division Duplex (TDD) –tekniikat, joilla voidaan erottaa verkosta laitteelle ja laitteelta verkkoon tapahtuvat lähetykset. LTE-verkolle on määritelty useita eri kanavan kaistanleveyksiä, jotka on edelleen jaettu kapeakaistaisiin kanta-aaltoihin, joilla tiedonsiirtoa suoritetaan rinnakkain. LTE-verkoissa 20 MHz:n kaistanleveydellä voidaan saavuttaa yli 100 Mbit/s tiedonsiirtonopeudet [25, s.285–288]. Teknologian parannukset, kuten LTE-Advanced (LTE-A), parantavat tiedonsiirtonopeuksia entisestään. LTE:lle on varattu

Suomessa omina taajuusalueina 700 MHz, 800 MHz ja 2600 MHz taajuudet sekä lisäksi teknologia operoi osittain rinnakkaisilla taajuusalueilla UMTS- ja GSM-verkkojen kanssa (1800 MHz, 2000 MHz). Lisäksi on määritelty erillinen ja kirjoitushetkellä ei muihin taajuusalueisiin verrattuna kovin yleisessä käytössä oleva 450 MHz:n taajuuskaista.

Tukiasemasijoittelu ja käytetyt taajuusalueet eroavat hieman tiheästi asuttujen alueiden ja maaseutu-alueiden välillä. Maaseutualueilla käytetään usein matalampia taajuuksia, joiden etuna on muun muassa pidempi kantama, jolloin tukiasemilla voi olla pidemmät etäisyydet. Myös korkeammilla antennimastoilla voidaan saavuttaa huomattavasti pidempi kantama. Kaupunkialueilla on käytössä enemmän taajuuksia esimerkiksi suuremman kuorman takia. Kaupungin urbaanit katvealueet ja korkeampien taajuuksien lyhyempi kantama vaativat kuitenkin tieämmän tukiasemasijoittelun. Päätelaitteen kannalta oleellista on vastaanotettu hyöty- ja kohinateho, jonka perusteella voidaan arvioida, onko kuuluvuus riittävä. Kuuluvuuden ollessa heikko tietyllä taajuusalueella vaihdetaan toiseen verkkoteknologiaan (esimerkiksi 4G-verkosta 3G-verkkoon) tai saman teknologian toiseen soluun, joka kuuluu mahdollisesti toisesta tukiasemasta paremmin.

3.12 Matkaviestinverkkojen taajuusalueet Suomessa

Matkaviestinsignaalin läpäisyn optimointiin liittyvät oleellisesti matkaviestinsignaalien taajuudet. Suomessa toimii vuonna 2018 viisi mobiiliverkko-operaattoria, jotka ovat Elisa Oyj, DNA Oyj, Telia Finland Oyj, Ålcom / Ålands Mobiltelefon Ab (ÅMT) ja Ukkoverkot Oy. Taulukossa 3.1 on esitetty nykyiset matkaviestinverkkojen taajuuskaistat, jotka operaattorit jakavat keskenään. Taajuudet vaihtelevat operaattorikohtaisesti osuen kuitenkin aina taulukossa ilmoitetulle kaistalle. Ahvenanmaan maakunnassa taajuusjako on Manner-Suomen taajuuskaistoista poikkeava, mutta tätä ei ole erikseen eroteltu taulukossa. Elisa, DNA ja Telia Finland ovat valtakunnallisia verkko-operaattoreita, jotka operoivat kaikilla taajuuskaistoilla, poissulkien 450 MHz:n kaista. Ålcom toimii puolestaan vain osalla taajuuskaistoista ja ainoastaan Ahvenanmaan alueella. Ukkoverkot Oy:n verkkoa ei käytetä julkiseen dataliikenteeseen, sillä se on varattu ainoastaan yhtiön asiakkaina toimivien yritysten käyttöön. Ukkoverkot Oy liikennöi kirjoitushetkellä kaistoilla 450 MHz ja 2600 MHz.

Taulukko 3.1: *Matkaviestinverkkojen taajuuskaistat Suomessa. [26]*

Taajuuskaista	Teknologia	Taajuudet
450 MHz	LTE	452,425-456,925 MHz 462,425-466,925 MHz
700 MHz	LTE	703 - 733 MHz 758 - 788 MHz (parillinen taajuuskaista)
800 MHz	LTE	791 - 821 MHz 832 - 862 MHz (parillinen taajuuskaista)
900 MHz	GSM UMTS	880 - 915 MHz 925 - 960 MHz (parillinen taajuuskaista)
1800 MHz	GSM UMTS LTE	1710 - 1785 MHz 1805 - 1880 MHz (parillinen taajuuskaista)
2000 MHz	GSM UMTS LTE	1900 - 1920 MHz 2010 - 2025 MHz (pariton taajuuskaista) 1920 - 1980 MHz 2110 - 2170 MHz (parillinen taajuuskaista)
2600 MHz	LTE	2500 - 2570 MHz 2620 - 2690 MHz (parillinen taajuuskaista) 2570 - 2620 MHz (pariton taajuuskaista)

Kehitteillä olevalle 5G-verkolle on esitetty useita erilaisia taajuuskaistoja, jotka ovat huomattavasti korkeampia kuin nykyisin käytössä olevat alle 3 GHz:n taajuudet. Korkeampia esitettyjä taajuuksia ovat muun muassa 26 GHz, 28 GHz, 38 GHz ja 73 GHz, joiden lisäksi voitaisiin käyttää joitakin alle 6 GHz:n taajuuksia. [25, s.417–421] Varsinaisessa 5G-standardissa (Release 15) on teknologialle määritelty kaksi taajuusaluetta, FR1 ja FR2 (engl. frequency range, FR), jotka ovat 450 MHz – 6 GHz ja 24,25 GHz – 52,60 GHz. Määriteltyjen taajuusalueiden sisäpuolella käytettävissä olevat taajuudet on määritelty erikseen. [27], [28] Näistä taajuuksista ensimmäisenä tullaan Suomessa hyödyntämään niin kutsuttu *3,5 GHz:n taajuuskaista (3410–3800 MHz)*, jonka toimiluvat myönnetään

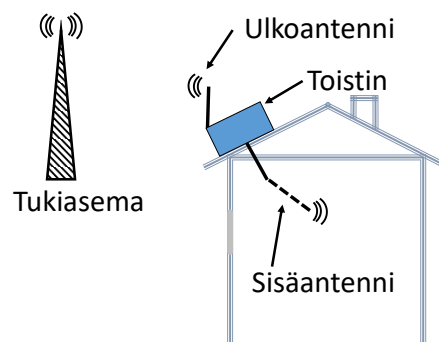
vuoden 2018 syksyn aikana järjestetyn taajuushuutokaupan perusteella. Taajuushuutokaupassa taajuuskaista jaettiin tasan Telia Finland Oyj:n, Elisa Oyj:n ja DNA Oyj:n kesken, huutokauppa oli yksi askel Viestintäviraston strategiassa tehdä Suomesta 5G-verkkojen ja 5G-tekniikan kärkimaa. [29] Tulevaisuudessa reilusti tätä noin 3,5 GHz:n taajuuskaistaa korkeammat taajuudet tulevat todennäköisesti muodostamaan pieniä soluja tai sisäverkkoja niiden varsin pienen kantaman ja tiheän tukiasemasijoittelun takia, mutta matalampia taajuuksia voidaan edelleen käyttää sisätiloista ulkotiloihin tapahtuvaan kommunikation nykyisten matkaviestinverkkojen tapaan.

4. SIGNAALIN LÄPÄISYN OPTIMOINTI

Valtaosa matkaviestinverkon kautta tapahtuvasta nykyisestä [5] ja tulevasta liikenteestä tapahtuu käyttäjän ollessa sisätiloissa [30]. Tukiaseman ja käyttäjän päätelaitteen välinen kommunikaatio tapahtuu radioteitse sähkömagneettisen aallon kantaman energian muodossa ja sisätilojen peiton on ajateltu tapahtuvan ulos sijoitettujen tukiasemien avulla. Vastaanotettuun tehoon vaikuttaa muun muassa ympäristön kohteet, jotka voivat aiheuttaa vaimentumista, heijastumista, diffraktiota ja siroamista. Nykyisin käytetyt rakennusmateriaalit ja metallipinnoitteita sisältävät matalaemissiviteettilasit aiheuttavat merkittäviä vaimennuksia [30] ja signaalin heijastumisia. Signaalin läpäisyä sisätiloihin voidaan parantaa muun muassa käyttämällä sisäverkkoja tai passiivisia ja aktiivisia toistimia. Lasisissa itsessään signaalin läpäisyyn voidaan puolestaan vaikuttaa käyttämällä taajuusselektiivisiä pintoja. Taajuusselektiiviset pinnat ovat jaksollisia rakenteita, jotka sallivat tai estävät tiettyjen taajuuksien läpäisyä. Taajuusselektiivisten lasirakenteiden suunnittelun tavoitteena on kehittää lasi, joka eristää hyvin lämpösäteilyä, mutta sallii matkaviestintaajuuksilla lähetettyjen RF-signaalien läpäisyn.

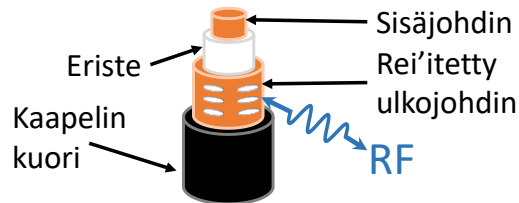
4.1 Aktiiviset ja passiiviset toistimet

Toistin toistaa ja vahvistaa ulkona sijaitsevalta tukiasemalta tulevan signaalin ja jakaa sen rakennuksen sisään parantaen kuuluvuutta rakennuksen sisällä. Vastaavasti kommunikaatio käyttäjän päätelaitteelta verkon suuntaan tapahtuu toistimen välityksellä. Sisäpuolen signaalin ja tukiaseman signaalit eivät saisi sekoittua keskenään hyvälaatuisen kommunikaation varmistamiseksi. Aktiivisen toistimen sijaan toistin voi olla myös passiivinen, jolloin se ei tarvitse sähkönsyöttöä eikä se myöskään vahvista signaalia. Passiivista toistinta voidaan nimittää tässä sovelluskohteessa myös yksinkertaisemmin passiiviantenniksi.



Kuva 4.1: Toistinta voidaan käyttää parantamaan signaalin kuuluvuutta esimerkiksi sisätiloissa.

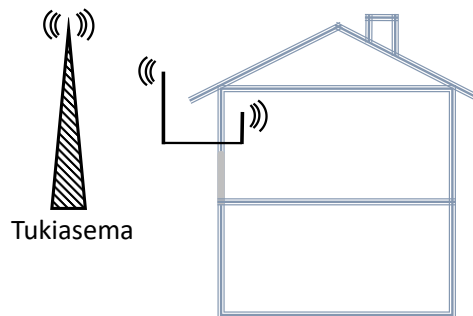
Toistin koostuu ulkoantennista, joka vastaanottaa ja lähettää signaalit tukiaseman suuntaan, toistin-yksiköstä, joka vahvistaa signaalia, sekä yhdestä tai useammasta sisäantennista. Sisäantenni voi olla toteutettu joko yksittäisillä antenneilla toteutetulla hajautetulla antennijärjestelmällä ja esimerkiksi niin kutsutulla säteilevällä kaapelilla.



Kuva 4.2: Säteilevän kaapelin rakenne.

Säteilevä kaapeli on antenniratkaisu, joka koostuu koaksiaalikaapelista, jonka ulommainen johdin on rei'itetty. Säteilevällä kaapelilla voidaan parantaa signaalin kuluvuutta esimerkiksi portaakoissa, käytävillä tai tunneleissa, koska se tarjoaa tasaisen kuuluvuuden lähellä kaapelia. [21, s.315–320] Näin voidaan tarjota hyvä ja luotettava kuuluvuus kohteissa, joissa yksittäistä antennia käyttämällä jouduttaisiin tulemaan toimeen useiden heijastuneiden ja eri aikoihin vastaanotettavien signaalikomponenttien kanssa.

Passiiviantennit ovat ulko- ja sisätilojen välillä toimivia toistimia, jotka ovat täysin passiivisia, eli ne eivät tarvitse sähkösyöttöä, eivätkä ne vahvista signaalia. Ideaalisessa tapauksessa passiivinen toistin välittäisi signaalin eteenpäin yksikkövahvistuksella, mutta käytännössä ratkaisussa tapahtuu aina hieman häviöitä toteutustavasta tai kaapeloinnista riippuen.



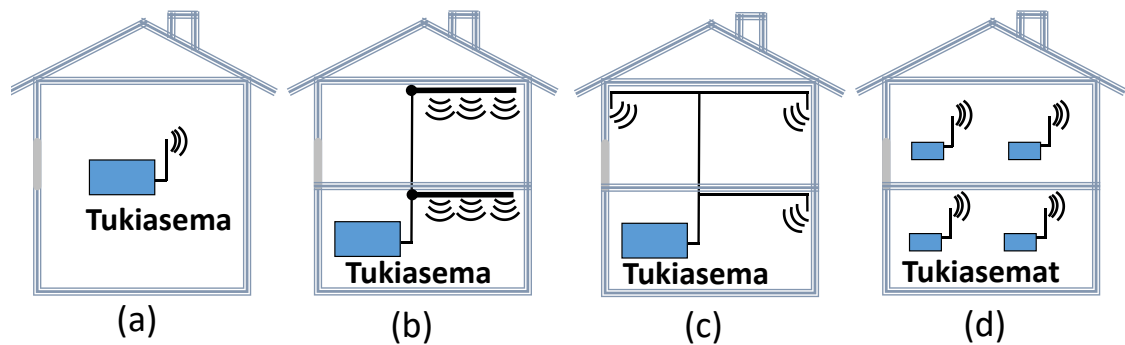
Kuva 4.3: Passiiviantennijärjestelmä.

Passiiviantenneja voidaan asentaa ikkunan rakenteisiin tai täysin ikkunasta erillään talon seinärakenteisiin [31, s.9–11]. Passiiviratkaisun etuna on sen yksinkertaisuus ja riippumattomuus sähkösyötöstä sekä itse ikkunarakenteesta. Ratkaisun haasteina on niiden tarjoama läpäisyn paraneminen, joka voi vaihdella merkittävästi toteutustavasta, materiaaleista ja sijainnista tai saapuvan signaalin polarisaatiosta riippuen. Lisäksi toistinstrategiasta riippumatta on huomioitava, ettei toistin voi parantaa signaalia alueella, jossa operaattorin tarjoaman verkon kuuluvuus on valmiiksi huono.

Passiiviantennijärjestelmäksi voidaan nimittää myös ratkaisua, jossa käyttäjän päätelaitteeseen, eli mobiiliverkkomodeemiin, kytketään dedikoidulla kaapeloinnilla erillinen ulkoantenni. Tämä ulkoantenni voi olla asennettuna esimerkiksi kiinteistön antennimastoon tai talon päätyseinään mahdollisimman korkealle, usein suunnattuna voimakkaimman signaalin tarjoavaa tukiasemaa kohti. Antennipaketteja on markkinoilla eri polarisaatioille, erilaisilla suuntaavuuksilla ja eri hintaluokissa, mutta näiden asennustyön vaativuus vaihtelee kohteittain. Kaapeloinnin läpiviennit ulkotiloista sisätiloihin on toteutettava vedenpitävästi ja joissain tilanteissa joudutaan työskentelemään paikoissa, jossa antennin jälkiasennus esimerkiksi talon päätyyn on turvallista vain henkilönostimella tai telineillä. Myöskin päätelaitteen sijainti ei saa olla liian kaukana antennista, jotta kaapeloinnista aiheutuvat häviöt voidaan minimoida. Tällaista ratkaisua ei myöskään voi suoraan järkevästi soveltaa puhelimelle tai muulle kannettavalle matkaviestinlaitteelle, mutta se palvelee mobiiliverkon läpi toteutetun internet-liikenteen kiinteästi sijoitetuille laitteille tai myös langattomille laitteille langattoman lähiverkon (WLAN) kautta.

4.2 Sisäverkot

Toistimen sijaan rakennusten sisään voidaan rakentaa pieniä soluja, jotka ovat käytännössä itsenäisiä yhtä rakennusta tai kohdetta varten asennettuja tukiasemia. Rakennuksen sisäverkko voi pienessä rakennuksessa koostua yhdestä tukiasemasta, jolla on yksi antenni, tai signaalia voidaan jakaa rakennukseen useamman antennin tai säteilevien kaapeleiden avulla. Suurissa rakennuksissa myös useamman solun käyttö voi tulla kyseeseen.



Kuva 4.4: Sisäverkkoratkaisuja. (a) Yksi solu. (b) Yksi solu säteilevillä kaapeleilla. (c) Yksi solu hajautetulla antennijärjestelmällä. (d) Usean solun strategia isossa rakennuksessa.

Sisäverkkojen haittapuolena on käyttäjän poistuminen tukiaseman kantaman alueelta, jolloin tukiasemaa tulee vaihtaa. Lisäksi jokainen operaattori tarvitsee oman laitteiston, eli mikäli halutaan käyttää useamman operaattorin verkkoja, tarvitaan rinnakkaista laitteistoa. Laitteistoilla ja antennijärjestelmällä on myös hankitakustannukset. Näiden tekijöiden lisäksi ulkoverkon ja sisäverkon välillä tulee olla riittävän suuri määrä isoalaista, joka tarkoittaa, ettei käyttäjä saisi sisätiloissa ollessaan olla sekä sisäverkon, että rakennuksen ulkopuolella olevan solun peiton alla. Toisin ilmaistuna sisäverkon signaalin tulee olla merkittävästi ulkoverkosta vuotavaa signaalia voimakkaampi. Käytännössä ongelmia

voi ilmetä, jos esimerkiksi hyvin signaalia vaimentavia matalaemissiviteettilaseja käyttäviä ikkunoita pidetään avoinna. Tällöin rakennuksen ulkopuolella olevan verkon signaali saattaa vuotaa rakennukseen aiheuttaen ongelmia. Riittävä isolaation määrä riippuu verkoteknologiasta, käytännössä GSM-tekniikka tarvitsee enemmän kuin 17 dB isolaatiota ja UMTS/HSPA-tekniikalla sisäverkon taso tulisi olla vähintään 10-15 dB korkeampi kuin ulkoverkon. [23, s.114–120] Usein sisäverkot ovat suurten rakennusten, kuten esimerkiksi erilaisten julkisten rakennusten tai oppilaitosten ratkaisuja.

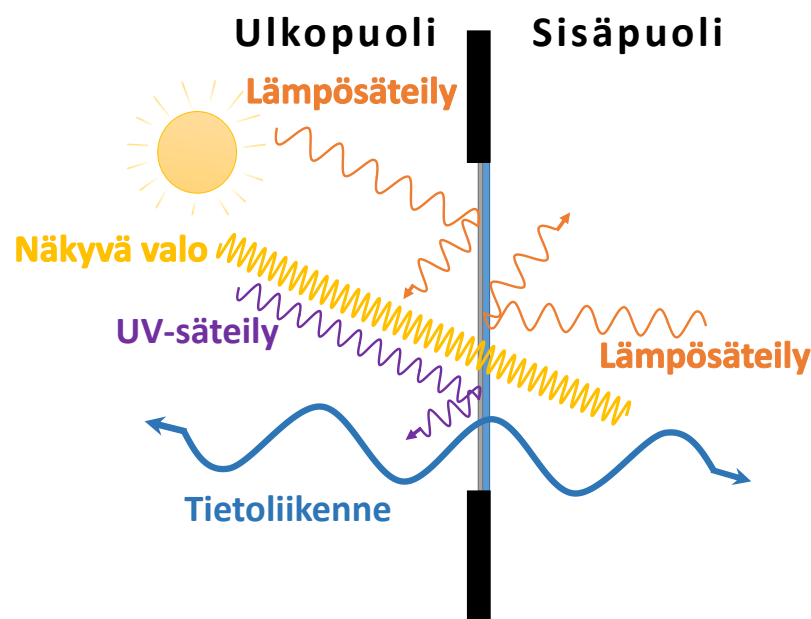
4.3 RF-aukot

Signaalin läpäisyä voidaan parantaa myös rakentamalla esimerkiksi ikkuna- tai seinärakenteisiin niin kutsuttuja RF-aukkoja. RF-aukkojen kohdilta metallinen, radiosignaalin läpäisyn heikosti salliva materiaali, on poistettu ja mahdollisesti korvattu muulla materiaalilla. [31, s.8–9] Ratkaisu vaikuttaa seinärakenteen energiatehokkuuteen, mutta rajoittavana tekijänä ei tässä ole rakenteen läpinäkyvyys. Tällöin muilla eristeratkaisuilla voidaan päästä kokonaisuuden kannalta varsin hyvään energiatehokkuuteen, vaikka paremmin lämpöä eristäviä ja heijastavia materiaaleja olisikin paikallisesti jätetty pois. Myös signaalin läpäisyn voidaan odottaa parantuvan, kunhan aukkoa ei peitetä millään muilla metallisilla rakenteilla tai esineillä. Ikkunarakenteen kannalta RF-aukko tarkoittaa metallipinnoitteen jättämistä pois tai sen osittaista poistamista tietyltä alueelta ikkunassa. Nämä ratkaisut eivät kuitenkaan ole tässä sovelluskohteessa optimaalisia, sillä näin tullaan heikentäneeksi ikkunan valmiiksi heikompa energiatehokkuutta merkittävästi. [31, s.11–12] Myös tajuusselektiiviset kuvioinnit nojaavat materiaalin poistoon, mutta näiden tapauksessa poistettu pinta-ala pystytään pitämään jaksollisen kuvioinnin ja sen sähköisten ominaisuuksien ansiosta merkittävästi pienempänä, kuin pelkän yksittäisen RF-aukon tapauksessa. RF-aukkojen mahdollinen haaste on myös toimivuus ja riittävyys aukon sijainnista katsoen viereisiin tiloihin tai huoneisiin.

4.4 Taajuusselektiiviset rakenteet

Taajuusselektiiviset rakenteet eli FSS-rakenteet (engl. frequency selective surfaces, FSS) ovat kaksiulotteisia jaksollisia rakenteita, jotka sallivat tai estävät sähkömagneettisen läpäisyn tietyllä taajuuskaistalla. [32] Taajuusselektiivisiä rakenteita voidaan käyttää esimerkiksi lautasantenneissa sallimaan vastaanoton useammalla eri taajuuskaistalla. Arkipäiväinen esimerkki taajuusselektiivisestä rakenteesta on puolestaan mikroaaltouunin luukku: metallinen verkko on mitoitettu niin, että se heijastaa 2,45 GHz:n taajuudella lähetetyn mikroaaltosäteilyn, mutta sallii valon läpäisyn. Näin ruuan valmistumista voidaan tarkkailla luontevasti luukun toiselta puolelta ilman, että mikroaaltosäteilyä vuotaa ympäristöön. [22 s, 14–18]

Metallipinnoitteiset matalaemissiviteettilasit on optimoitu olemaan läpinäkyviä näkyvän valon aallonpituuksilla, mutta heijastamaan hyvin infrapuna-alueella tapahtuvan lämpösäteilyn (IR-säteilyn) sekä näkyvää valoa hieman lyhytaaltoisemman – ja suurempina annoksina haitallisen – UV-säteilyn. UV-säteilyn osuus auringon lähettämästä säteilytehosta on kuitenkin näkyvään valoon ja lämpösäteilyyn verrattuna varsin pieni [33, s.20], eikä tämä ominaisuus ole välttämättä kovin mielenkiintoinen suunniteltaessa lämpösäteilyn kannalta energiatehokkaita ikkunoita. Lämpösäteilyn heijastamisen ohessa metallipinnoite luo matkaviestimille kuuluvuusongelmia, koska myös matkaviestintaaajuiset radiosignaalit vaimenevat merkittävästi. Toistimet, sisäverkot, antennit ja muut teknologiat ovat mahdollisia keinoja kiertää tätä ongelmaa, mutta ne eivät kuitenkaan ratkaise läpäisyongelmaa itse lasissa. [5], [30]



Kuva 4.5: Taajuusselektiivisen ikkunalasin toimintaperiaate. [muokaten lähteestä 16]

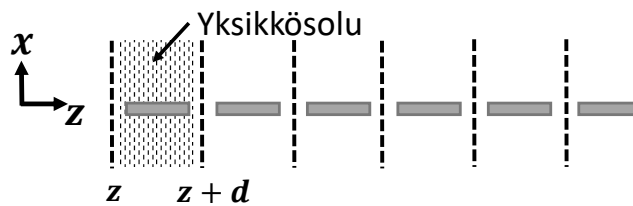
Kuva 4.5 esittää taajuusselektiivisen ikkunalasin toimintaperiaatteen. Toimintamalli on lopulta samankaltainen kuin aiemmin esitetty mikroaaltouunin luukku, mutta nyt yhden taajuusalueen estämisen sijaan halutaan sallia mielellään useampia matkaviestinkaistoja. Muilla taajuuksilla lasi toimisi edelleen kuten tavallinen matalaemissiviteettilasi, eikä sen lämpöä heijastavia ominaisuuksia ole tarkoitus heikentää merkittävästi. [14] Tärkeänä kriteerinä taajuusselektiivisen ikkunan toteutukselle on myös esteettisyys: kuvio ei saisi näkyä merkittävästi tai vaikuttaa muutenkaan haitallisesti ikkunan väriin tai optisiin ominaisuuksiin, kuten valonläpäisyyn.

Joskus korkeaa tietoturvaa haluttaessa valmistetaan myös rakenteita, jotka läpi päästämisen sijaan estävät tai vaimentavat tehokkaasti tietyt tai jopa kaikki radioliikenteen taajuuDET [34]. Tietyt taajuuDET sallivia tai estäviä taajuusselektiivisiä rakenteita valmistetaan yleensä kuvioimalla metallipinnoitteeseen jaksollisesti erilaisia kuvioita [32]. Kuviointi voidaan tehdä esimerkiksi laservaloa käyttäen, mutta myös esimerkiksi etsaaminen tai

pinnoitteen mekaaninen poistaminen voivat olla vaihtoehtoja, joskaan näiden muiden menetelmien tarkkuus ja lopputulos eivät ole välttämättä sopivia ikkunasovellukseen.

4.4.1 Jaksolliset rakenteet

Sähkömagneettisen aallon etenemiseen jaksollisessa rakenteessa liittyy olennaisesti Gaston Floquet'n (1847–1920) mukaan nimetty Floquet'n teoreema. Tarkastellaan kuvassa 4.6 esitettyä äärettömän suurta yksiulotteista z -suunnassa jaksollista rakennetta, joka on jaettu yksikkösoluihin.



Kuva 4.6: Z -suunnassa jaksollinen äärettömän suuri yksiulotteinen rakenne. Harmaa edustaa kuviointia.

Sähkö- tai magneettikentälle tällaisessa rakenteessa voidaan yleisesti kirjoittaa

$$\phi(x, y, z + d) = e^{-jk_{z0}d} \phi(x, y, z), \quad (4.1)$$

jossa termi k_{z0} kuvaa kompleksista vaihesiirtoa ja vaimennusta, ja d elementtien välistä etäisyyttä. Toisin ilmaistuna: kenttä ϕ paikkojen z ja $z + d$ välillä eroaa vain termin k_{z0} , eli aallon vaiheen verran. Kenttä $\phi(x, y, z)$ voidaan myös esittää

$$\phi(x, y, z) = e^{-jk_{z0}z} P(x, y, z), \quad (4.2)$$

johon määritellään $P(x, y, z) = P(x, y, z + d)$. Toisin ilmaistuna $P(x, y, z)$ on siis jaksollinen funktio, joka edettäessä z -suuntaan saa saman arvon aina etäisyyden d jälkeen. Osoittimien avulla ilmaistuna tämä tapahtuu 2π välein. Näin ollen $P(x, y, z)$ voidaan ilmaista Fourier'n sarjana

$$P(x, y, z) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_n(x, y) e^{-j\frac{2\pi n}{d}z}, \quad (4.3)$$

jossa $a_n(x, y)$ kuvaa yleisesti kentän x - ja y -suuntaista vaihtelua ja eksponenttifunktio jaksollisen vaihtelun z -suunnassa. Sijoittamalla edellinen yhtälöön (4.2) saadaan

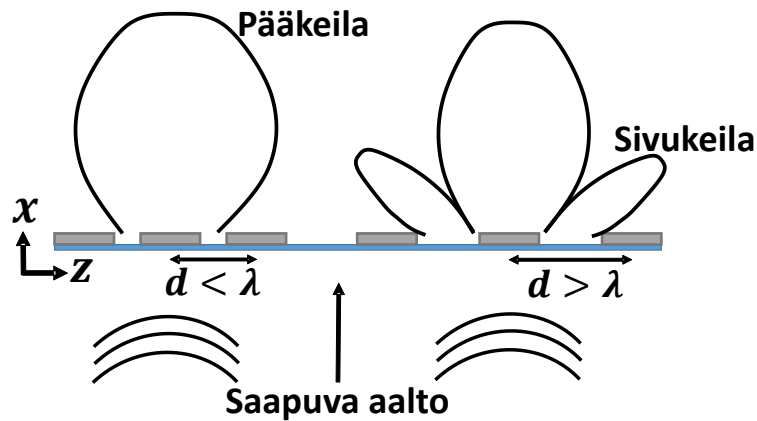
$$\phi(x, y, z) = \sum_{-\infty}^{\infty} a_n(x, y) e^{-jk_{zn}z}, \quad (4.4)$$

jossa $k_{zn} = k_{z0} + \frac{2\pi n}{d}$ ja n on kokonaisluku. Tämä analyysi johtaa lopulta siihen tulokseen, että kokonaiskenttä jaksollisessa rakenteessa voidaan ilmaista äärettömän monen niin kutsutun Floquet'n harmonisen komponentin summana. [35], [36], [37] Toisin ilmaistuna äärettömän suuressa jaksollisessa rakenteessa vaikuttavia kenttiä voidaan analysoida yksinkertaistetusti vain analysoimalla pientä osaa rakenteesta. Tätä osaa kutsutaan yksikkösoluksi, jota hyödynnetään yleisesti jaksollisten rakenteiden simuloinnissa.

Käytännön rakenteet ovat kuitenkin harvoin äärettömän suuria, sillä esimerkiksi ikkunalla on jokin äärellinen koko. Analyysissa pinnat voidaan kuitenkin olettaa äärettömän kokoisiksi, koska se yksinkertaistaa tilannetta. Äärellisessä rakenteessa esimerkiksi rakenteen reunat aiheuttavat heijastumisia, jota ei esiinny äärettömän suuressa rakenteessa, mutta käytännössä jo muutaman solun päässä reunasta rakenteen virtojen käyttäytyminen on hyvin samankaltaista äärettömän suuren rakenteen kanssa. Monissa tapauksissa äärellisen kokoinen rakenne käyttäytyy lähes samoin kuin teoreettinen äärettömän suuri rakennekin. [37, s.362–363]

4.4.2 Jaksollisen rakenteen pää- ja sivukeilat

Jaksollisten rakenteiden kuvioiden keskinäinen etäisyys vaikuttaa siihen minkälainen kenttä kuvioinnin toisella puolella nähdään. Jos kuvioiden välinen etäisyys ylittää yhden aallonpituuden ($1,0 \cdot \lambda$), nähdään rakenteen toisella puolella sivukeiloja (engl. grating lobe), jotka voivat vähentää pääkeilojen kenttää. Tällaista asettelua voidaan luonnehtia sähköisesti suureksi. [22, s.9–11], [37, s.23–]



Kuva 4.7: Z-suuntaan jaksollisen FSS-pinnan elementtien etäisyyden d vaikutus sivukeiloihin.

Sivukeilojen etäisyys radiaaneina voidaan määrittää yhtälöstä

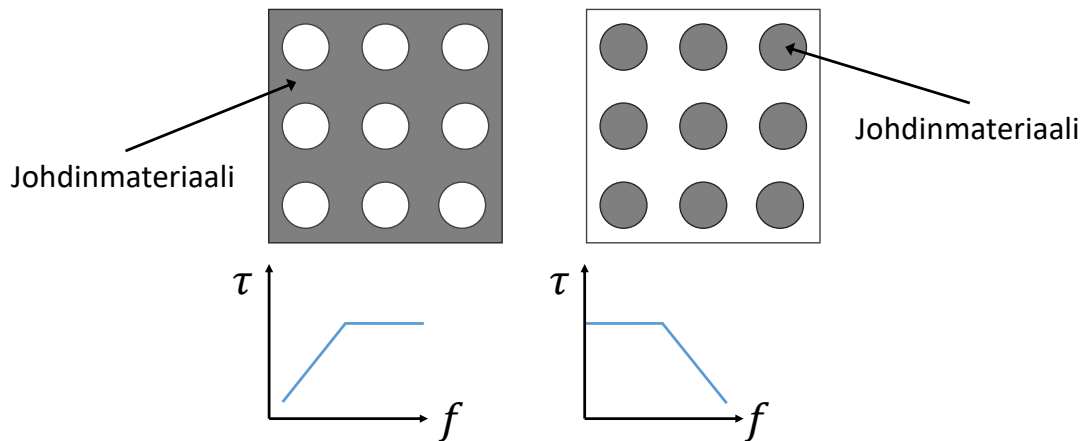
$$\phi_G = \sin^{-1} \frac{m}{d}, \quad (4.5)$$

jossa m on sivukeilan numero ($m = 1, 2, 3, \dots$) ja d on kuvioiden välinen etäisyys.

Sivukeilojen vähentämiseksi tulisi FSS-pinnan elementtien sijoittelu olla varsin tiheää, eli vähemmän kuin yksi vapaantilan aallonpituus halutulla toimintataajuudella tilanteessa, jossa aalto saapuu suorassa kulmassa FSS-pintaan nähden. [22, s.11], [39, s.520–521] Esimerkiksi laajakaistaiselle jaksolliselle antenni- tai FSS-rakenteelle voidaan elementtien etäisyyden ylärajana pitää noin $0,6\lambda$ [38, s.270]. T. K. Wu ilmaisee kirjassaan ”*Frequency selective surface and grid array*” elementtien taulukoinnin vaikuttavan sivukeilojen ilmestymiseen ja antaa maksimietäisyydet sivukeilojen välttämiseksi eri tavoille taulukoida FSS-elementtejä. Maksimietäisyydet vaihtelevat suorassa kulmassa saapuvalle aallolle välillä $1,0\lambda - 1,15\lambda$ ja 45° kulmassa saapuville aalloille $0,59\lambda - 0,67\lambda$ [22, s.9–11]. Suuremmille saapumiskulmille asettelun tiheyden maksimin pitäisi olla jopa alle $0,5\lambda$ [22, s. 11]. Tässä työssä kuvioiden väliset etäisyydet pidettiin näitä arvoja merkittävästi pienempinä, eikä yleensäkään tiheämmästä asettelusta pitäisi olla haittaa kuvion toiminnan kannalta. Matkaviestinsignaalit myös yleensä saapuvat pinnan normaalin suhteen hiukan yläviistosta, jolloin tiheämpi asettelu on perusteltu.

4.4.3 Taajuusselektiiviset kuvioinnit

Taajuusselektiiviset kuvioinnit voidaan jakaa kahteen päätyyppiin: aukkotyyppisiin ja planaari- eli levytyyppisiin. Aukkotyyppiset rakenteet muodostetaan kuvioimalla metallipinnoitteeseen aukkoja, joissa pinnoitetta ei ole ja levytyyppinen on edellisen komplementti, jossa on aukkojen sijan metallisia levyjä. Aukkotyyppinen on luonteeltaan yli- päästötyyppinen ja levytyyppinen alipäästösuodin, eli aukkotyyppisen heijastaessa tietyt taajuudet toimii sen komplementti samoilla taajuuksilla läpäisevänä. Tämä on käytännön esimerkki niin kutsutusta Babinet’n periaatteesta (Jacques Babinet, 1794–1872), jonka oletuksiin kuitenkin lukeutuvat dielektrisen substraatin puuttuminen, äärettömän ohut ideaalijohdinkerros ja yksi FSS-kalvo. [22, s.2–4], [32], [37, s. 1–] Kuvioinnin toimintaperiaate on myös hieman erilainen riippuen siitä, muodostuuko kuviointi johtavista elementeistä vai aukoista (”elementtien puutteesta”). Johtavan materiaalin tapauksessa syntyy metallisiin elementteihin sähkövirtoja aallon kohdatessa materiaalin, kun taas aukko- tapauksessa muodostuu kuvitteellisia ”magneettivirtoja” eli aukoissa vaikuttaa suoraan niihin syntyvästä jännitteenjakaumasta riippuva sähkökenttä. Tästä kenttä voi jatkaa etenemistään. [37, s. 1–]

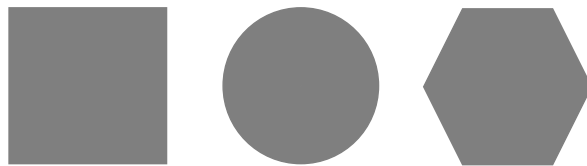


Kuva 4.8: Aukkotyypin (vas.) ja levytyypin taajuusselektiivisen rakenteen läpäisykaistat. [muokaten lähteestä 32], [22, s.2–4], [40, s.4]

Yhdistelemällä eri tyyppisiä voidaan rakentaa myös kaistanesto- ja kaistanpäästötyyppisiä FSS-pintoja. Kaistanesto- ja kaistanpäästö-tyyppiset rakenteet resonoi lähellä operointitaajuuttaan, toisin kuin ylipäästö- ja alipäästö-tyyppiset rakenteet, jotka eivät yleensä resonoi. Tarkemmin eri kuvioinnit voivat olla muun muassa ympyrän, neliön tai kuusikulmion muotoisia geometrioita, erilaisia dipolirakenteita tai silmukkatyyppisiä rakenteita [37, s.26–28]. Kuvioinnin suorituskykyä voidaan arvioida esimerkiksi päästökaistan muodon tai päästö- ja estotaajuuksien välinen erotuksen avulla sekä tarkastelemalla pinnan resonanssitaajuuden stabiiliutta tulokulman tai polarisaation funktiona. [32], [37], [40] Sovelluskohteesta riippuen seuraavassa esitellyt kuvioinnit on voitu toteuttaa joko niin, että harmaana esitetty alue sisältää johdinmateriaalia tai vaihtoehtoisesti tämän komplementtina. Komplementtina toteutetussa pinnassa johtava pinnoite on poistettu kuvion alueelta. [37]

Levytyypiset rakenteet

Levytyypiset rakenteet ovat yksinkertaisia geometrioita, joissa FSS-pinta koostuu esimerkiksi neliön, ympyrän tai kuusikulmion muotoisista johdinmateriaalikuvioista.

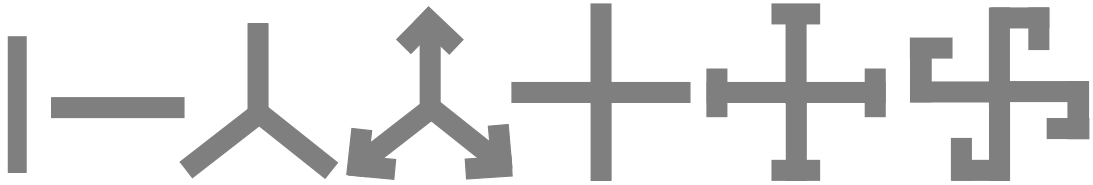


Kuva 4.9: Levytyyppisiä FSS-rakenteita. [37, s.28], [39, s.651]

Elementtien koko on suunnilleen yhden aallonpituuden luokkaa, eli ne ovat varsin suuri-kokoisia. Levytyypiset kuviot ovat helppoja valmistaa, mutta niitä ei suositella tarkkuustyöhön, koska ne eivät resonoi kovin helposti. [39]

Dipolirakenteet ja keskeltä yhdistetyt rakenteet

Keskeltä yhdistetyt (engl. center connected tai ”N-poles”) ovat rakenteita, jotka koostuvat toisiinsa keskeltä yhdistetyistä dipoleista. Dipolien pituus on noin $\lambda/2$, koska tällä pituudella dipoliantenni resonoi varsin hyvin. Dipoli on kuitenkin herkkä saapuvan aallon tulokulman muutoksille ja polarisaatiolle. Esimerkiksi vaakasuuntaan oleva dipolikuviointi ei resonoi juuri lainkaan, jos aalto saapuu väärässä kulmassa tai pystysuuntaan polarisoituneena dipoliin nähden.



Kuva 4.10: Pysty- ja vaakasuuntaiset dipolit (vas.) sekä keskeltä yhdistettyjä FSS-rakenteita: tripoli, ankkuri, ristikkäinen dipoli, Jerusalemin risti ja hakaristi-tyyppinen rakenne. [22, s.4], [37, s.28], [39, s.649]

Polarisaation ja tulokulman vaikutusta voidaan yrittää vähentää käyttämällä keskeltä yhdistettyjä elementtejä, joissa kahden vierekkäisen haaran yhdistetty pituus on noin $\lambda/2$. Kolmihaaraista dipolia muistuttavaa elementtiä kutsutaan tripoliksi. Asettamalla kaksi dipolia ristiin saadaan niin kutsuttu ristikkäinen dipoli. Ristikkäiset dipolirakenteet voivat olla kuitenkin ongelmallisia, koska niissä saattaa muodostua toinen resonanssitaajuus hyvin lähelle suunniteltua resonanssitaajuutta. Näiden taajuuksien välissä on lisäksi nollakohta jollain taajuudella, jolloin kuviointi ei päästä lävitseen juuri tätä tiettyä taajuutta lainkaan. Tällöin signaalin tulokulman tai polarisaation vähäinen muutos saattaa aiheuttaa täysin odottamattoman toiminnan, eikä ristikkäistä dipolia yleensä suositella käytettäväksi sellaisenaan [37, s.56], [39, s.648]. Edellä mainittua efektiä voidaan yrittää vähentää lisäämällä dipolien päihin ylimääräistä kapasitanssia, jolloin rakenne alkaa muistuttaa esimerkiksi Jerusalemin ristiä tai hakaristiä. Myös tripolin ominaisuuksia voidaan muuttaa tekemällä siitä ankkurin kaltainen. [37, s.26–38], [39, s.649]

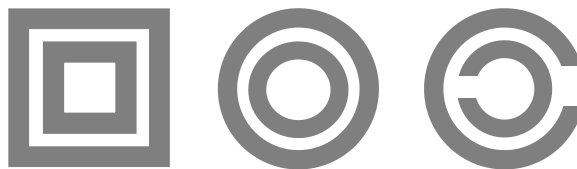
Silmukkatyyppiset rakenteet

Silmukkatyyppisillä rakenteilla, kuten suorakulmaisella, kuusikulmaisella ja ympyrällä resonanssi tapahtuu, kun elementin puolikkaan pituus on aallonpituuden puolikkaan kerannainen. Mitoittamalla elementin kehän pituus tarkalleen yhdeksi aallonpituudeksi saadaan kukin puolikas toimimaan dipolina, eikä säteilykuvioon muodostu ei-toivottuja nol-lakohtia. Elementin fyysinen koko on näin ollen noin kokoluokkaa $\lambda/3$ tai $\lambda/4$ eli huomattavasti pienempi kuin dipoli- tai levyrakenteilla. [22, s.4–6], [39] Jos silmukkaelementti valmistetaan dielektriselle materiaalille, silmukan pituuden tulee kuitenkin olla yksi efektiivinen aallonpituus, eli dielektrisen materiaalin permittiivisyys tulee huomioida rakenteen koossa. Tätä käsitellään tarkemmin kappaleessa 4.4.4. [32]



Kuva 4.11: Silmukkatyypisiä FSS-rakenteita: kolmijalkainen elementti (vas.), nelijalkainen elementti, neliörengas, kuusikulmio, ympyrä ja halkaistu ympyrä (engl. split-ring, SR). [22, s.4], [37, s.28], [39, s.647], [41]

Silmukkatyypisiä rakenteita voidaan asettaa myös sisäkkäin, jolloin saadaan käytännössä useammalla eri taajuuskaistalla toimiva FSS-rakenne [20], [22, s.113–145] [40, s.25–32]. Nämä esimerkiksi DSL- ja DR-tyyppiset rakenteet (engl. double square-loop, DSL; double ring, DR) tuottavat kaksi resonanssitaajuutta, toisen matalammalla taajuudella (suurempi rengas) ja toisen korkeammalla taajuudella (pienempi rengas). [22, s.127] Kuvion ominaisuuksia voidaan muuttaa kuten muillakin rakenteilla; renkaiden kokoa ja elementtien keskinäistä etäisyyttä vaihtelemalla.

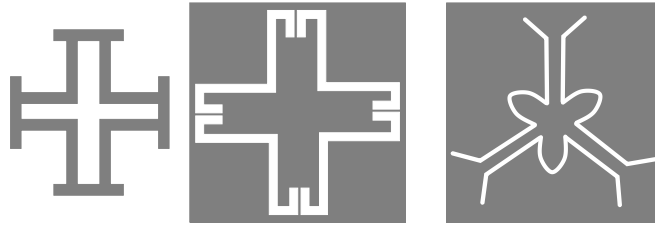


Kuva 4.12: Esimerkkejä sisäkkäisistä silmukkarakenteista: neliörengaat (DSL), ympyrät (DR) ja halkaistut ympyrät (SR). [20], [22, s.113–138], [32]

Silmukkatyypiset rakenteet pystyvät toimimaan varsin monella eri polarisaatiolla saapuvalla signaalilla. Ne ovat yhdistelmä aukkotyypisiä ja levytyypisiä eli ovat luonteeltaan kaistanpäästörakenteita. Yleisesti silmukoilla on hyvä kaistanleveys ja erityisesti kuusikulmion eli heksagonin muotoinen kuviointi suoriutuu muita paremmin tässä suhteessa [20], [39]. Silmukkarakenteita voidaan myös pakata tehokkaasti muita rakenteita tiuhempaan. Tämä korostuu erityisesti kuusikulmion tapauksessa valitsemalla elementtien aseteluun kuusikulmion muotoinen taulukko, joka muistuttaa mehiläiskennostoa. Tiheällä asettelulla on suotuisia ominaisuuksia, joista yksi on kaistanleveyden kasvaminen elementtien välisen etäisyyden pienentyessä [39, s.647–648].

Yhdistelmätyypit

Dipoli-, silmukka- ja levytyypisiä rakenteita voidaan yhdistellä keskenään lähes rajattomasti erilaisiin kombinaatioihin halutun toiminnallisuuden saavuttamiseksi. Tällaisia elementtejä kutsutaan yhdistelmätyypisiksi elementeiksi. [39, s.650–651]



Kuva 4.13: Esimerkkejä yhdistelmätyyppisistä FSS-rakenteista. [37, s.28], [39, s.651]

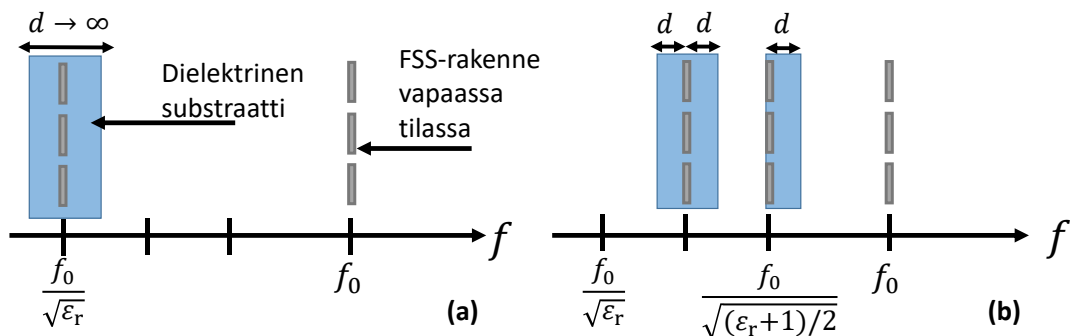
Yhdistelmätyyppien analysointi saattaa olla vaikeampaa geometrian monimutkaisuuden takia. Niille on kuitenkin käyttötarkoituksensa joissain sovelluskohteissa, jossa on tärkeää muokata kuvioinnin toimintaa hyvin tarkasti.

4.4.4 Resonanssitaajuus ja kaistanleveys

Taajuusselektiivisten kuvioinnin resonanssitaajuuden arviointi voi olla hankalaa. Resonanssitaajuus riippuu voimakkaasti itse kuvioinnin muodon ja dimensioiden lisäksi myös substraatista, jolle kuviointi on rakennettu. Vapaaseen tilaan asetettu äärettömän ohut ja hyvin johtava FSS-rakenne operoi taajuudella f_0 . FSS-rakenteelle, joka on kokonaan upotettuna äärettömän paksuun dielektriseen substraattiin, voidaan uuden resonanssitaajuuden f arvioida olevan noin $f_0/\sqrt{\epsilon_r}$, eli alkuperäinen resonanssitaajuus f_0 siirtyy alaspäin substraatin permittiivisyyden ϵ_r johdosta. Äärellisen paksuun substraattiin upotetun FSS-rakenteen resonanssitaajuuden muutos on hieman tätä pienempi. Äärellisen paksun substraatin pinnalle asetetun rakenteen resonanssitaajuus on puolestaan maksimissaan suuruusluokkaa

$$f = \frac{f_0}{\sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}}. \quad (4.6)$$

Näin ollen FSS-kuviointia ei voi suunnitella suoraan vapaaseen tilaan, ja olettaa että se toimii vastaavalla tavalla satunnaisen substraatin pinnalle asetettuna, vaan dielektrisen materiaalin vaikutus tulee aina huomioida. [37, s.12]



Kuva 4.14: Dielektrisen substraatin vaikutus resonanssitaajuuteen. (a) Äärettömän paksu substraatti. (b) Äärellisen paksuinen substraatti. Paksuus voi olla esimerkiksi suuruusluokkaa $d \sim 0,05\lambda$. [muokaten lähteestä 37, s.12]

Substraatin dielektristen ominaisuuksien vaikutusta resonanssitaajuuteen voidaan arvioida tarkemmin käyttämällä substraatin permittiivisyyden ϵ_r sijaan niin kutsuttua efektiivistä permittiivisyyttä ϵ_{eff} , jossa substraatin paksuuden vaikutus otetaan huomioon. [37, s.393–396] Tässä työssä käytettiin rakennetta, jossa taajuusselektiivinen kuvioniti on toisella puolella lasisubstraattia, jonka paksuus on d . Tällaiselle rakenteelle efektiivinen permittiivisyys $\epsilon_{\text{eff}} \rightarrow \frac{\epsilon_r + 1}{2}$, kun $d \rightarrow \infty$. Tässä tapauksessa kenttä muotoutuu johdinmateriaalin ympäristössä eri tavoin dielektrisessä materiaalissa ja vapaassa tilassa. Mikäli kuviointi olisi upotettu substraattiin siten, että sen molemmilla puolilla olisi yhtä paljon materiaalia seuraisi $\epsilon_{\text{eff}} \rightarrow \epsilon_r$, kun $d \rightarrow \infty$. Tällöin kenttä olisi johteen ympärillä koko ajan samassa materiaalissa. On kuitenkin huomioitava, että maksimiarvot saavutetaan jo hyvin alhaisilla paksuuden d arvoilla (suuruusluokka $\sim 0,05\lambda_0$) [37, s.393–396], joten esimerkiksi paksuudeltaan 4 mm tai 6 mm olevalle lasille voidaan olettaa, että maksimi-arvo työn taajuuksilla saavutetaan. Tämän oletuksen perusteella resonanssitaajuuden muutosta voidaan arvioida suoraan yhtälöllä (4.6).

Dielektrisen materiaalin ollessa vain toisella puolella FSS-rakennetta aiheutuu aukko-tyyppisille rakenteille epäsovitukselta johtuva häviö, ellei dielektrisen materiaalin paksuus ole puolikkaan aallonpituuden kerrannainen (joka matkaviestintaajuuksilla tarkoittaa varsin paksua rakennetta). Optimaalisen toiminnan kannalta ja häviöiden minimoimiseksi olisi hyvä, jos FSS-kerroksen molemmilla puolilla olisi yhtä paksu kerros dielektristä materiaalia. Tällöin heijastuksien ilma-substraatti -rajapinnoista pitäisi kumoutua resonanssissa. [22, s. 7] Yksittäisten ikkunalasien tapauksessa tälle asialle ei tosin todennäköisesti voi tehdä paljonkaan, koska metallinen kerros valmistetaan nimenomaan lasin pinnalle.

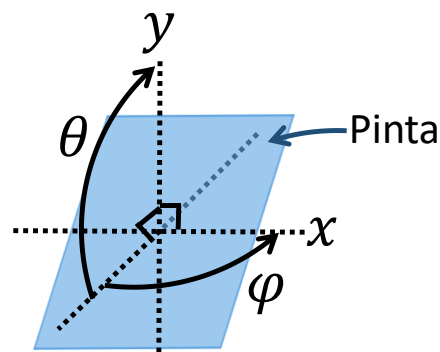
Kaistanleveyden määrittämisessä keskeisimmässä asemassa ovat kuviointien muoto ja niiden etäisyys toisistaan. Yleisenä sääntönä voidaan todeta elementtien etäisyyden kasvattamisen vaikuttavan vähentävästi kaistanleveyteen samassa suhteessa, eli kymmenen prosentin muutos etäisyydestä alentaa kaistanleveyttä saman verran [37, s. 396]. Silmukatyyppisten elementtien kaistanleveys voi vaihdella resonanssitaajuuden ympäristössä merkittävästi, kun niiden kehän sulkemaa pinta-alaa muutetaan. Joidenkin keskeltä yhdistettyjen, kuten Jerusalemin ristin muotoisten, elementtien puolestaan havaitaan muutuvan sekä kaistanleveyttään, että resonanssitaajuuttaan elementtien välisen etäisyyden muuttuessa [37, s.396]. Kuusikulmion muotoisella elementillä puolestaan on valmiiksi varsin suuri kaistanleveys, jota voidaan edelleen kasvattaa lähentämällä elementtejä.

Tarpeeksi lähellä toisiaan olevat elementit kuitenkin alkavat vaikuttaa toisiinsa. Tämä johtuu siitä, että elementtien ollessa aseteltuna erittäin tiheään, alkaa niiden keskinäinen kapasitanssi kasvaa merkittävästi. Keskinäinen kapasitanssi muuttaa resonanssitaajuutta matalammaksi, joten silmukatyyppisten elementtien kokoa (kehän pituutta) täytyy muuttaa pienemmäksi, jotta resonanssitaajuuden muutos saadaan kompensoitua. Käytännössä elementtien lähentäminen tarkoittaa siten elementtien mitoittamista korkeammille

taajuuksille, mutta seurauksena on kuitenkin toiminta halutulla taajuudella elementtien keskinäisestä läheisyydestä johtuen. Tyypillisiä arvoja kehän pienennykselle voivat olla esimerkiksi 20–30 %. [37, s.393–396]

4.4.5 Rakenteiden sijoittelu ja suorituskyky

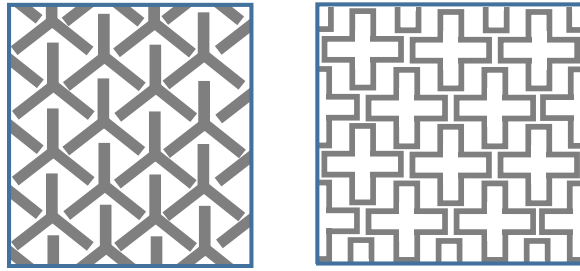
Taajuusselektiivisiä kuvioita voidaan taulukoida pinnalle erilaisiin ruudukoihin tai taulukkoihin. Yksinkertaisin tapa on koota rakenne suorista palkeista, jolloin saavutetaan korkea täyttösuhde, koska näitä palkkeja voidaan asettaa hyvin tiheään (Kuva 4.17a). Tällainen rakenne on kuitenkin herkkä signaalin tulokulman (Kuva 4.15) ja polarisaation muutoksille, joiden suhteen muut taulukkoratkaisut suoriutuvat paremmin.



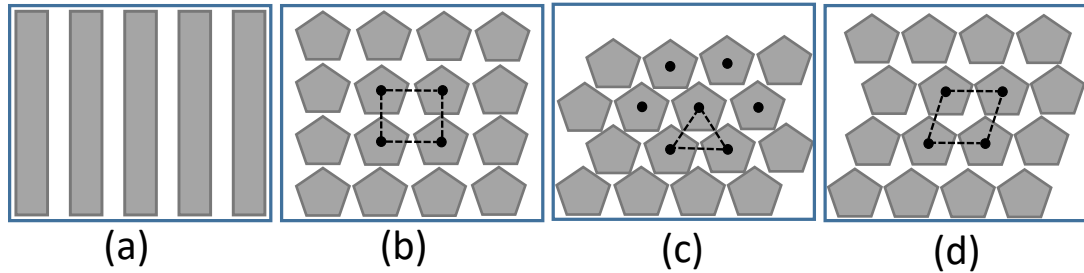
Kuva 4.15: Aalto voi saapua pintaan eri kulmista. Kulma θ on xy -tasossa olevan pinnan normaaliin nähden vertikaalinen kulma ja φ horisontaalinen kulma. Kuvioinnin suorituskyky voi muuttua tulokulman muuttuessa.

Suorakulmainen ruudukko (Kuva 4.17b) on suoraviivainen vaihtoehto ja siihen voidaan asettaa monia eri geometrioita. Kuusikulmaisella ruudukolla saavutetaan joillain geometrioilla suorakulmaista taulukkoa parempi täyttösuhde, eli sama määrä elementtejä voidaan pakata pienemmälle pinta-alalle vähentäen samalla elementtien välisiä etäisyyksiä. Elementtejä voidaan sijoitella myös tiiliseinän kaltaiseen asetteluun. [22], [37] Kuvassa 4.17 esitettyjen asettelujen lisäksi on olemassa muitakin asetteluja, sillä esimerkiksi tripoli-rakenteita tai muita useampijalkaisia kuviointeja voidaan limittää paremman täyttösuhteen aikaansaamiseksi ja kuvioinnin sähköisten ominaisuuksien muuttamiseksi. Käytännössä limittäminen tapahtuu niin, että toinen elementti tuodaan osittain jo olemassa olevan elementin ”omistamalle” alueelle (Kuva 4.16). [37]

Sopivaa asettelua valittaessa täytyy huomioida vielä suunniteltavan kuvion geometria. Suorakulmaiset kuviot sopivat luontevasti suorakulmaiseen taulukkoon, kun taas kuusikulmion tai ympyrän muotoiselle elementille kuusikulmainen taulukko saattaa olla edullisempi, koska näin elementtejä saadaan sijoiteltua tiheämpään. [37, s.56–60] Lopullinen päätös taulukoinnista valikoituu kuitenkin sovelluskohteen ja halutun toiminnallisuuden tuloksena.



Kuva 4.16: Esimerkkejä kuvioiden limittämisestä. [37, s.33, s. 40]



Kuva 4.17: Erilaisia tapoja taulukoida elementtejä. (a) Suorista palasista koostuva asettelu. (b) Suorakulmainen ruudukko. (c) Kuusikulmainen ruudukko. (d) Tiiliseinä. Harmaat kuviot eivät edusta mitään erityistä geometriaa vaan havainnollistavat yleisiä muotoja. [22], [37]

Eri kuvioilla on erilaiset ominaisuudet. Elementtejä voidaan karakterisoida esimerkiksi kuvioinnin kokoluokan, signaalin polarisaation tai tulokulman vaikutuksen, elementin kaistanleveyden ja myös täyttösuhteen eli elementtien asettelu tiheyden mukaan. Sähköisen toiminnan kannalta eri elementtejä voidaan arvioida esimerkiksi taulukossa 4.1 esitetyllä tavalla. Tulokulmalla tarkoitetaan sitä, kuinka hyvin elementti toimii eri tulokulmilla, eli miten aallon tulokulma vaikuttaa elementin resonanssitaajuuteen. [37] Vakaa toiminta tulokulman muuttuessa on tärkein yksittäinen ominaisuus, joka laadukkaalla toimivalla elementillä on [37, s.59]. Ristipolarisaation taso kuvaa sitä, kuinka polarisoitunut elementti on, eli kuinka tehokkaasti elementti hylkää vastakkaisesti polarisoituneen aallon ja kaistanleveydellä tarkoitetaan elementin laajakaistaisuutta. Päästökaistan ja estokaistan välinen ero kuvaa sitä, kuinka jyrkästi elementin vaste muuttuu päästökaistan ja estokaistan välillä. [37]

Taulukko 4.1: Eri FSS-geometrioiden ominaisuuksia. Asteikko: 1 = paras, 2 = toiseksi paras ja niin edelleen. [muokaten lähteestä 22, s.5], [20], [42]

Geometria	Tulokulman vaikutus resonanssiin	Ristipolarisaation taso	Suurempi kaistanleveys	Pieni esto- ja päästökaistan ero
Dipoli	4	1	4	1
Tripoli	3	3	3	2
Ristikkäinen dipoli	3	3	3	3
Jerusalemien risti	2	3	2	2
Ympyrät, renkaat	1	2	1	1
Neliörengas	1	1	1	1

Taulukosta nähdään, että neliörengas suoriutuu muita paremmin kaikissa kategorioissa, siinä missä dipolin toiminta riippuu huomattavan paljon kulmasta, jossa signaali saapuu. Ympyrät ja renkaat suoriutuvat yleisesti ottaen hyvin, mutta ne hyväksyvät myös hieman enemmän eri polarisaatioissa saapuvia signaaleita. [22, s.4–6], [42] Käytännön matkavies-tintoiminnan olosuhteissa signaalin polarisaatio ja tulokulma voi kuitenkin olla hyvin eri-lainen eri tilanteissa ja sijainneissa. Näin ollen taajuusselektiivistä ikkunarakennetta lä-päisyä parantavaan sovelluskohteeseen suunniteltaessa voitaneen kuvioinnin laajakaistai-suus, vakaus tulokulman muuttuessa sekä kyky hyväksyä *eri* polarisaatioita lukea jopa halutuiksi ominaisuuksiksi, toisin kuin taulukossa 4.1 on osittain esitetty.

Lisäksi B. A. Munk toteaa kirjassaan ”*Frequency Selective Surfaces: Theory and De-sign*” henkilökohtaisiksi suosikeikseen silmukka-tyyppiset rakenteet ja määrittelee kuu-sikulmion monipuoliseksi ja laajakaistaiseksi elementiksi. [37, s.59–60] Näillä elemen-teillä toteutuu useita haluttuja ominaisuuksia ja niitä voidaan asetella kattavasti eri tau-lukkoratkaisuihin lukuisin mahdollisuuksin. Silmukat ovat muodoltaan myös suhteellisen yksikertaisia ja muokattavia parametreja on kuvioinneissa vähän, tärkeimpinä niistä mai-nittakoon elementtien kehän pituus, keskinäinen etäisyys sekä kuvioinnin leveys. Leveys-kin voidaan sulkea ikkunasovelluksessa osittain pois muokattavien parametrien listalta, sillä kuvioinnista on tarkoitus tehdä mahdollisimman ohut, jolloin poistettu pinta-ala säi-lyy pienenä. Edellä mainittuihin seikkoihin perustuen tässä työssä valittiin pääasialliseksi tutkimuksen kohteeksi kuusikulmion tai muun silmukkatyyppin muotoiset kuvioinnit. Muista silmukkatyypeistä valikoitu tutkittavaksi lopulta neliö.

5. LASIRAKENTEIDEN MALLINNUS JA SIMULOINTI

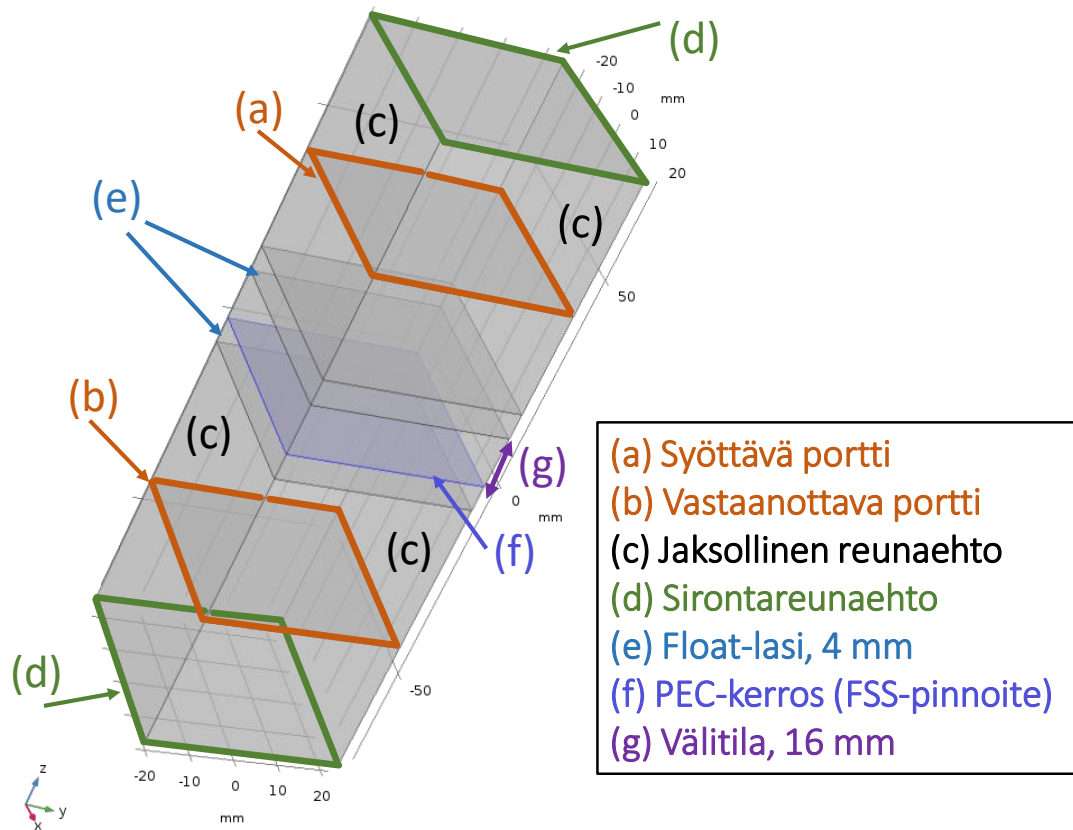
Tässä luvussa esitellään lasirakenteiden taajuusselektiivisten pinnoitteiden simulointiin käytetty ohjelmisto, simulointimalli, keskeisimmät simulointiin ja kuvioihin liittyvät parametrit sekä simulointitulokset.

5.1 Ohjelmisto

FSS-rakenteiden simuloinnissa käytettiin COMSOL Multiphysics 5.3a -ohjelmistoa. Ohjelmistolla pystytään simuloimaan hyvin useita fysikaalisia tilanteita ja ilmiöitä. Ohjelmisto soveltuu esimerkiksi sähkömagneettisten kenttien, lämpö- tai nestevirtausten sekä kuormitusten ja jännitysten mallintamiseen. Tässä työssä toteutetussa COMSOL-simulaatiossa hyödynnetään yksikkösolun käsitettä Floquet'n periaatteeseen nojaten. Yksikkösoluun voidaan rakentaa haluttu geometria sekä asettaa sille reunaehdot ja sen avulla voidaan mallintaa suuren FSS-rakenteen toimintaa. Simulaattorilla pystytään simuloimaan muun muassa sähkökentän voimakkuutta rakenteessa ja koko simulointialueella sekä esimerkiksi S-parametreja (kappale 3.11) taajuuden ja aallon saapumiskulman funktiona. [41], [43]

5.2 Simulointimallit ja parametrit

COMSOL-ohjelmistoon rakennettujen mallien pohjalla käytettiin taajuusselektiivisten rakenteiden simulointiin tarkoitettua applikaatiota ”*Frequency Selective Surface Simulator App*”. Applikaatio jakautuu kahteen osaan, jotka ovat niin kutsuttu simulaattori sekä simulaattoria ohjaava yksinkertaistettu käyttöliittymä. [43] Simulaattoria on mahdollista käyttää ilman yksinkertaistettua käyttöliittymää ja tässä työssä hyödynnettiinkin pääosin pelkkää simulaattoria. Yksinkertaistetun käyttöliittymän vahvuudet olisivat interaktiivisuudessa ja helppokäyttöisyydessä, mutta pelkkä simulaattori antaa käyttäjälle enemmän mahdollisuuksia mallin muokkaamiseen ja tulosten sekä datan esittämiseen. Lisäksi omien mallien luominen siten, että niitä voisi luontevasti operoida applikaationäkymästä koettiin työläemmäksi kuin pelkän simulaattorin käyttäminen. Simulointimalli ja yksikkösolu on esitetty kuvassa 5.1.



Kuva 5.1: Simulointimalli ja yksikkösolu ilman FSS-kuviointia. Aallon etenemissuunta mallissa on negatiiviseen z-suuntaan.

Simulointimallin yksikkösolu koostuu useista eri pinnoista ja ehdoista, joista tärkeimmät on esitetty seuraavassa: Simuloinnin syöttävä (a) ja vastaanottava portti (b) on määritelty täydellisesti sovitetuiksi (engl. perfectly matched condition) mallintamaan hyvää läheintä sekä vastaanotinta ja ne sijaitsevat mallin päissä. Näiden viereen on mallin jokaiselle sivulle määritetty pintoja, joille on asetettu jaksollinen reunaehto (engl. periodic boundary condition). Nämä pinnat määrittelevät Floquet'n periaatteen mukaisen jaksollisen rakenteen (c), joka ympäröi koko simuloitavan solun sivuseiniä jokaiselta puolelta. Solun päädyt on määritelty sirontaehdolla (engl. scattering boundary condition) (d). Työssä simuloitiin kaksikerroksista lasirakennetta, jossa toinen lasi on tavallinen 4 mm float-lasi [mallissa 3,84 mm] (e) ja toisen lasin pinnalla on lisäksi FSS-pinnoite (f), joka osoittaa lasikerrosten välissä sijaitsevaan kaasutäytteiseen 16 mm väliin (g).

Lasien väliin osoittavaa FSS-pinnoitetta mallinnettiin aluksi äärettömän ohuena ideaalijohdinkerroksena (engl. perfect electric conductor, PEC), koska myös käytännössä metallioksidipinnoite on ohut [6] ja sen johtavuus oletettiin hyväksi. Mikäli materiaalin johtavuus on heikompi, heikkenisi kuitenkin myös PEC-approksimaation tarkkuus [16]. Tälle PEC-kerrokselle voidaan ohjelmistoa hyödyntäen rakentaa haluttuja kuvioiteja. [41], [43] Käytännön mittaukset kuitenkin osoittivat, ettei pelkkänä PEC-kerroksena mallinnetulla rakenteella saavutettu vastaavia tuloksia kuin mittaamalla. Tätä asiaa sekä malliin liittyviä tarkennuksia käsitellään tarkemmin kappaleessa 5.2.1.

Lasin permittiivisyydelle päädyttiin simuloinneissa käyttämään arvoa $\epsilon_r = 6,85$ johtuen siitä, ettei tämä arvo ole aivan kappaleessa 2.7 esitetyissä eri lähteissä annettujen arvojen ylä- tai alapäässä. Simuloinneissa huomattiin, että lasin permittiivisyyden muutoksilla on vaikutusta FSS-kuvioinnin toimintaan. Permittiivisyyden muutos siirtää kuvioinnin resonanssitaajuutta ja vaikuttaa sitä kautta kuvion läpäisyyn tietyllä taajuusalueella kappaleessa 4.3.3 esitetyllä tavalla. Mikäli muutokset ovat kuitenkin vähäisiä (esimerkiksi $\epsilon_r = 6,85 \pm 0,15$) arvioitiin simulointien perusteella kuvioinnin toimivan edelleen varsin hyvin riippumatta siitä mikä lasin eksakti permittiivisyys on.

Permittiivisyyden lisäksi lasille määriteltiin simulointimalliin pieni johtavuus $g = 10^{-4} \frac{S}{m}$. Kappaleessa 2.7 esitettyjen lukuarvojen pohjalta voidaan yleisesti todeta, että lasin johtavuus on todella pieni, tästä syystä työssä katsottiin riittäväksi valita arvo, joka todennäköisesti edustaa suuruusluokkaa riittävällä tarkkuudella. Lasin suhteelliselle permeabiliteetille käytettiin arvoa $\mu_r = 1,0$.

Porttien ja lasilevyjen välinen alue on määritetty ilmaksi ja lasilevyjen välitila puolestaan argon-kaasuksi. Argonille suhteellinen permeabiliteetti $\mu_r = 1,0$ ja suhteellinen permittiivisyys $\epsilon_r = 1,00516$ [44]. Käytännössä kaasu vastaa näiltä ominaisuuksiltaan lähestulkoon ilmaa, jolle $\epsilon_r = 1,000589 \approx 1,0$ [45]. Kokonaisuutena näillä parametreilla rakennetun simulointimallin on tarkoitus mallintaa *kaksikerroksiseksi eristyslasiksi* rakennettua matalaemissiviteettilasikkunaa, joka koostuu yhdestä *kirkkaasta lasista* ja yhdestä *kuvioidusta off-line -pinnoitetusta lasista*.

5.2.1 Metallipinnoitteen johtavuus ja tunkeutumissyvyys

Todennäköiseksi syyksi siihen, mikseivät ensimmäiset simulointitulokset ja mittaustulokset alun perin vastanneet toisiaan, voidaan esittää simulointimalliin liittyvät oletukset. Alkuperäisten simulointitulosten käyrämuoto on nähtävissä kuvassa 5.3, joissa nähdään sinisellä käyrällä hyvin tarkasti määritelty kaista, kun PEC-pinnan alle on lisätty lasisubstraatti. Myös läpäisylle annetaan epärealistisilta vaikuttavat odotukset, jotka vastaavat lähestulkoon tilannetta, jossa lasia ei olisi signaalin edessä ollenkaan. Mallin tarkentamisen jälkeiset tulokset suunnitelluille kuvioinneille on esitetty kuvissa 5.4 ja 5.5.

Alun perin oletettiin, että metallikerroksella on niin hyvä johtavuus, että sen käyttäytymistä voitaisiin mallintaa äärettömän ohuena ideaalijohdinkerroksena. Kuten luvussa 2 on esitetty, koostuu käytännön lasin metallikerros kuitenkin esimerkiksi tinaoksidista tai hopeasta, joilla on äärellinen johtavuus ja myös paksuus. Lisäksi lasin pinnalla voi olla muitakin kerroksia eri materiaaleja, kuten puolijohteita. Mallia voidaan kuitenkin hieman yksinkertaistaa, jos nämä muut kerrokset jätetään huomiotta, ja oletetaan, että valtaosa lasin signaaliominaisuuksista liittyy nimenomaan metalliin.

Määrittelemällä PEC-kerroksen tilalle metallikerros, jonka johtavuus vastaa todellisen materiaalin johtavuutta ja paksuus kappaleessa 2.5.1 esitetyn pinnoitteen paksuutta, saadaan simuloineilla hyvin samankaltaisia tuloksia kuin käytännön mittauksilla. Metallikerroksen paksuutena käytettiin arvoa 15 nm, joka vastaa off-line -pinnoitetun matala-emissiviteettilasien johtavan kerroksen paksuuden suuruusluokkaa [6, s.28] ja kerroksen johtavuutena $g \approx 6,30 \cdot 10^7 \frac{S}{m}$ [7, s.93], joka vastaa hopean johtavuutta. Käytännössä metallikerros on niin ohut, että se alittaa hopean matkaviestintaajuisen tunkeutumissyvyyden $\delta \approx 1,5 \mu m$. Kappaleessa 3.2.3 esitetysti sähkömagneettinen säteily ei pysty tunkeutumaan materiaalissa tunkeutumissyvyyttä pidemmälle. Tässä tilanteessa materiaakerroksen paksuus on *kuitenkin noin 100 kertaa pienempi* kuin tunkeutumissyvyys, joten osa aallosta saattaa edetä suoraan metallikerroksen läpi. Tässä prosessissa myös osa aallon kantamasta energiasta hukkuu materiaaliin sähköisinä häviöinä ja mahdollisesti heijastuu ilma–metalli- tai metalli–lasi-rajapinnoista. Saattaa olla myös mahdollista, että aalto tunkeutuu kappaleen läpi kuvioinnin kohdalta eri aikaan kuin se tekee kuvioimattomalta kohdalta.

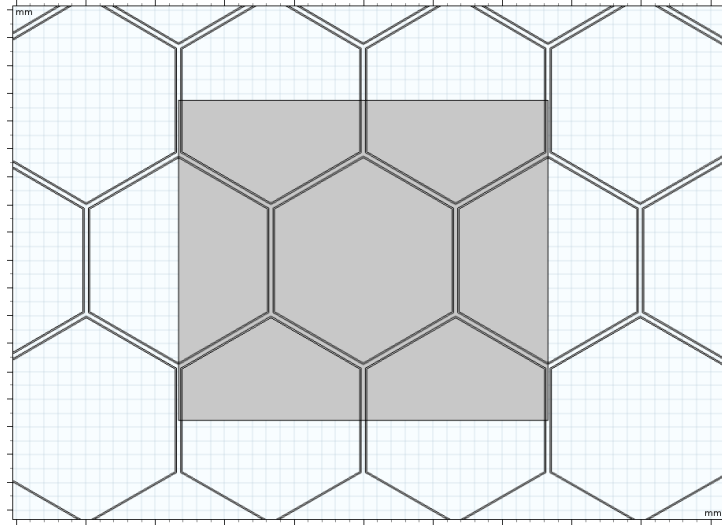
Siirryttäessä pois ideaalijohteesta oli edellä esitettyjen määrittelyjen lisäksi tarpeen muuttaa metallikerroksen PEC-reunaehdon tilalle niin kutsuttu siirtymäreunaehto tai TBC-ehto (engl. transition boundary condition), joka tässä tilanteessa kuvaa paremmin ideaalijohteesta poikkeavan ohuen materiaalin käyttäytymistä sähkömagneettisessa kentässä. TBC-ehto käyttää materiaalin ominaisuuksia ja paksuutta hyväkseen ja määrittelee materiaalille impedanssin, jolla simulaattori määrittää materiaalin pinnalla kulkevat virrat ja materiaalin läpäisevän kentän. Näillä tarkennuksilla malli antaa nyt samankaltaisia tuloksia kuin käytännön mittauksilla on saatu. Myös odotukset saavutetusta maksimiläpäisystä, sekä tuloskäyrien yleisestä muodosta ja jyrkkyydestä ovat huomattavasti maltillisempia kuin ideaalijohdetta käytettäessä.

Lasipinnan paksuus tarkennettiin myös arvosta 4,0 mm arvoon 3,84 mm. Pinnalle voitaisiin lisätä myös karheutta tai epätasaisuuksia, mutta niitä ei tässä mallissa huomioitu, koska epätasaisuuksien havaitseminen näin ohuesta kerroksesta olisi työn puitteissa ollut hankalaa ilman erikoisvälineitä.

5.2.2 Yksikkösolun määrittely

Simulaattorin yksikkösolu oli alun perin määritelty neliön muotoiseksi, jonka joka sivulle oli määritelty jaksolliset reunaehdot. Tällaiselle solulle koon määrittely on suoraviivaista neliön sivun pituuden mukaan. Näin kuvitteellisesta äärettömän kokoisesta FSS-rakenteesta muodostuisi pinta, jossa elementit on aseteltu suorakulmaiseen taulukkoon neliön sivun pituuden määrittämässä soluko'oissa. Työssä käytettiin kuitenkin myös muun muassa kuusikulmion muotoisia elementtejä, jotka haluttiin asetella mahdollisimman tiheään. Tällaiseen tilanteeseen kuusikulmion muotoinen taulukko olisi luonteva ratkaisu,

mutta kuusikulmion muotoista taulukkoa ei voi kuitenkaan sellaisenaan asettaa neliön muotoiseen yksikkösoluun.



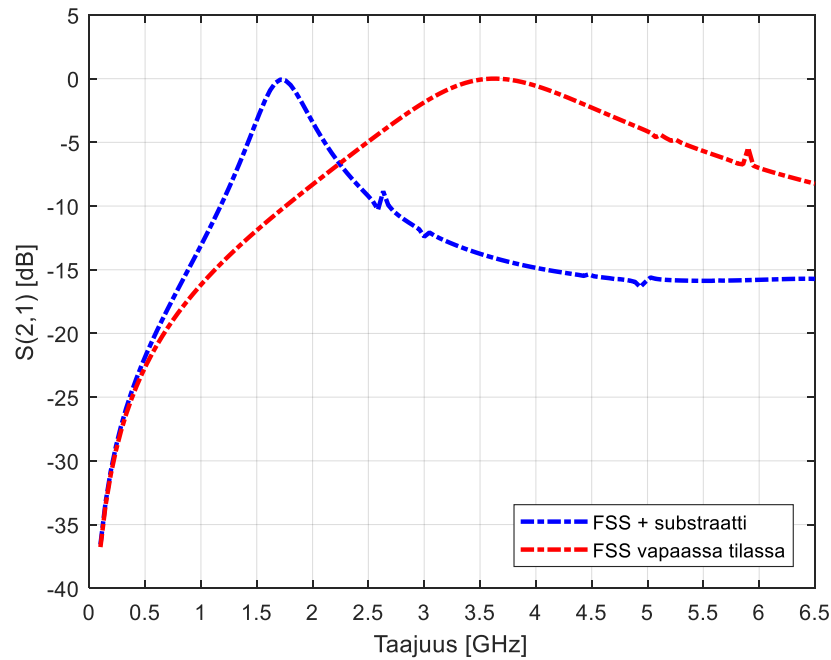
Kuva 5.2: Ei-neliskulmaisen yksikkösolun muodostus. Symmetrinen, mutta eri dimensiot x - ja y -suunnissa omaava solu muodostuu harmaan alueen sisälle jäävästä alasta.

Ongelma ratkaistiin kuvassa 5.2 esitetyllä tavalla. Simulaattoriin asetettiin kuusikulmiaisista elementtejä siten, että niiden väliin jäävä tila muodostaa mehiläiskennostoa muistuttavan rakenteen. Tämän jälkeen taulukon päälle määriteltiin suorakulmainen alue, jonka dimensiot x - ja y -suuntaan voitiin määrittellä erikseen. Vähentämällä (engl. difference) taustalle määritelty taulukkogeometria suorakulmiosta, poistuvat suorakulmion ulkopuolelle jäävät taulukon osat. Lisäksi suorakulmioon jää kuvioinnin muodostama ”varjo”, jonka läpäisyä ohjelmistolla simuloidaan. Suorakulmion sisään jäävä kuviointi on symmetrinen siten, että mikäli näitä suorakulmioita asetettaisiin jaksollisesti ja saumattomasti vierekkäin x - ja y -suunnissa, muodostuisi niistä kuusikulmioisista elementeistä muodostuva taulukko. Näin jaksollisen rakenteen ehdot ja halutut kuvioiden väliset etäisyydet kuusikulmaisessa taulukossa täyttyvät jokaiselle eri kokoiselle kuviolle erikseen määritellyn suorakulmaisen yksikkösolun avulla.

Mahdollisesti toinen ratkaisu ongelmaan olisi ollut yksikkösolun muodon muuttaminen kuusikulmion muotoiseksi, mutta yllä esitetty ratkaisu ajoi työn tulosten mukaan kiitettävästi saman asian.

5.2.3 Kuvioiden kokoluokan määrittely

Kun vapaaseen tilaan taajuudelle f_0 suunnitellun FSS-rakenteen asettaa dielektrisen substraatin pinnalle, sen resonanssitaajuus muuttuu matalammaksi maksimissaan termin $\sqrt{(\epsilon_r + 1)/2}$ määräämällä tavalla, kuten kappaleessa 4.3.4 on esitetty. Lasin suhteellisen permittiivisyyden ollessa noin $\epsilon_r = 6,85$, saadaan resonanssitaajuutta alentavaksi termiksi $1,981 \approx 2$.



Kuva 5.3: Simulointitulokset. Vapaaseen tilaan PEC-kerrokselle noin taajuudella 3500 MHz suunniteltu kuvio resonoi lasisubstraatin lisäämisen jälkeen noin taajuudella 1700–1800 MHz. Substraatti vaikuttaa myös kaistanleveyteen. $S(2,1)$ kuvaa sitä, kuinka hyvin rakenne läpäisee sähkömagneettista aaltoa (lähempänä nollaa = parempi).

Koska silmukkatyyppisille rakenteille kuvion kehän pituuden tulee olla noin $1,0 \cdot \lambda$ vapaassa tilassa, täytyy tietyille taajuuksille optimoidun kuvion koko suunnitella noin kaksi kertaa korkeamman taajuuden mukaan. Tämän jälkeen lasisubstraatti laskee resonanssitaajuuden noin puoleen tuottaen lopputuloksena kuvion, joka resonoi lasissa halutulla taajuudella tai sen tuntumassa. Näillä tiedoilla voidaan jokaiselle taajuusalueelle määrittää kuvion koolle jokin alkuarvo, jota optimoida simulointiohjelmistolla.

Kuvioiden resonanssitaajuuteen vaikuttaa lasisubstraatin ohella kuitenkin myös muita tekijöitä, kuten esimerkiksi kuvioiden etäisyys toisistaan, sillä lähekkäin olevat kuviot vaikuttavat sähköisesti toisiinsa. Haluttaessa pakata mahdollisimman paljon kuvioita samalle pinta-alalle, täytyy kuvioiden välistä etäisyyttä pienentää, kuten kappaleessa 4.4.4 on esitetty. Kuvioiden lopullinen koko määräytyykin asettelun tiheyden, substraatin permittiivisyyden, metallikerroksen ominaisuuksien ja halutun toimintataajuuden yhteisvaikutuksesta.

5.2.4 Rakenteiden dimensiot

Työssä simuloitiin ja mitattiin kirjallisuuslähteisiin perustuvia, mutta lasin ja materiaali-kerroksien ominaisuudet huomioimalla tarkennettuja kuvioita. Kuvioiden dimensiot on esitetty taulukossa 5.1 Kaikissa kuvioissa viivanleveys on 0,1 mm. Ulkokehän pituudella tarkoitetaan kuvion uloimman reunan kehän pituutta, pienempi lukema tarkoittaa puoles-

taan tämän kehän sisällä olevan erillisen pienemmän kehän ulkoreunan pituutta. Kuvioiden etäisyydet toisistaan kuusikulmioiden tapauksessa ovat 0,1 mm ja neliön tapauksessa 2 mm. Piirroksat rakenteista on esitetty liitteessä A.

Taulukko 5.1: Tutkittujen kuvioiden dimensiot.

Kuviointi	Ulkokehän pituus [mm]	Yksikkösolun pinta-ala [mm ²]	Kuvioinnin pinta-ala [mm ²]	Poistettava pinta-ala [%]
Yksinkertainen kuusikulmio	40 / -	469,9	15,90	3,384
Kaksinkertainen kuusikulmio	40 / 36	469,9	30,10	6,415
Kaksinkertainen neliö	80 / 40	484,0	11,92	2,463

Käytännössä simuloinneissa huomattiin, että reaali maailman materiaaliparametreilla tulostuskäyrästä tulee varsin laakeita. Tästä syystä suunnittelutalajuudeksi voitiin valita hieman odotettua korkeampi taajuusarvo ja läpäisykäyrän laakean muodon ansiosta onnistuttiin kattamaan useampi taajuuskaista. Kuusikulmioiden tapauksessa suunnittelutalajuudeksi valittiin $f_0 = 2,6$ GHz, jolloin lasin vaikutuksen takia kuviot tuli suunnitella noin taajuudelle $2f_0$ (kappale 5.2.3). Kuvion kehän pituudeksi saadaan tällöin noin 57,6 mm. Pienentämällä tätä arvoa noin 30 % (kappale 4.4.4) saadaan lopputulokseksi noin 40,3 mm. Kaksinkertaisen kuusikulmion sisemmän kehän suunnittelun lähtökohtana oli taajuus 3 GHz, joka on hieman ulomman kehän taajuutta hieman korkeampi. Vastaavalla menetelytavalla kuvion kehän pituudeksi saadaan 50 mm, jota pienentämällä 30 % päädytään arvoon 35 mm. Arvoja hienosäädettiin hieman simulaattorissa. Neliöiden tapauksessa haluttiin kokeilla suunnittelua matalammille taajuuksille, jolloin ulomman kehän lähtötaajuudeksi valittiin puolet kuusikulmioiden taajuudesta, $f_0 = 1,3$ GHz. Lasin vaikutus huomioiden kuvion kehän pituudeksi saadaan noin 115 mm. Vaikka asettelu tiheys on neliökuvioilla harvempi kuin kuusikulmiolla, pienennettiin arvoa edelleen 30 %, jolloin ulomman kehän pituudeksi saatiin noin 80 mm. Sisemmän kehän pituus muodostuu samoin kuin kuusikulmion tapauksessa.

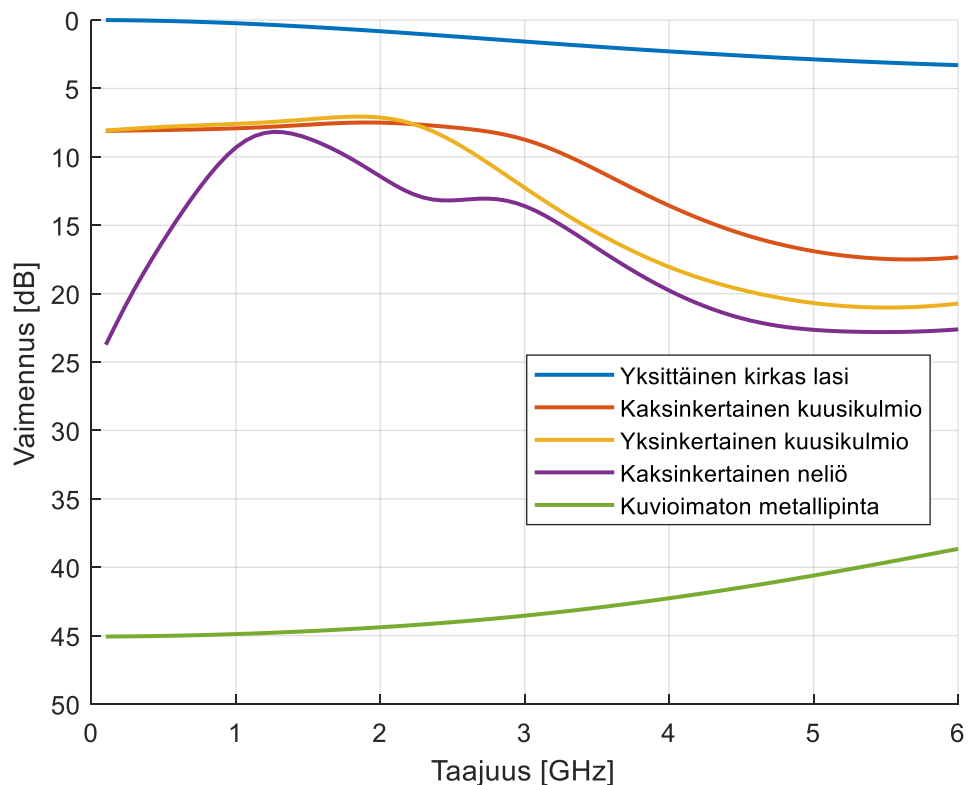
Yleisesti työssä suunnitellut rakenteet optimoitiin tiheämpään asetteluun kuin kappaleessa 4.4.2 esitellyllä menetelmällä päästäisiin suoraan. Keskeisenä periaatteena oli kuvioiden läpäisyn optimointi mahdollisimman korkealle tasolle mahdollisimman laajalla taajuuskaistalla. Toisin ilmaistuna, yksinkertaisella yksittäisellä kuviolla oli tarkoitus kattaa tyydyttävästi mahdollisimman monta eri matkaviestinkaistaa. Tätä määritelmää venytettiin useamman sisäkkäisen kehän tapauksessa, jossa tavoitteena oli jatkaa yhden kuvion kaistaa myös hieman korkeammille taajuuksille.

5.3 Simulointitulokset

Simuloitujen kuvioiden [Liite A] tulokset on esitetty tässä kappaleessa. Tulokset esitetään muodossa, jossa y -akselilla on esitetty vaimennus desibeleissä ja x -akselilla taajuus gigahertseinä. Merkkikäytäntönä sovelletaan tästä eteenpäin ajatusta siitä, minkälaista dataa esitetään: kasvava vaimennus on signaalin läpäisyn kannalta huono asia, jolloin se etenee käyrällä alaspäin. Näin ollen *läpäisyn huippu* nähdään, kun vaimennus on pienimmillään. Y -akselin suunta on tästä syystä valittu käänteiseksi. Mikäli vaimennus olisi nolla, kulkisi 100 % tehosta rakenteen ja ilmatien läpi vaimenematta. Simulointien tulokset vaikuttivat lupaavilta, vaikka täydelliseen läpinäkyvyyteen radiosignaalien osalta ei näyttäisi pääsevän. Simulointitulosten pohjalta voitiin odottaa varsin hyvää toiminnallisuutta myös käytännön mittauksissa. Simuloinnit on suoritettu eristyslasin mallille.

5.3.1 Lasin pintaan suorassa kulmassa saapuva aalto

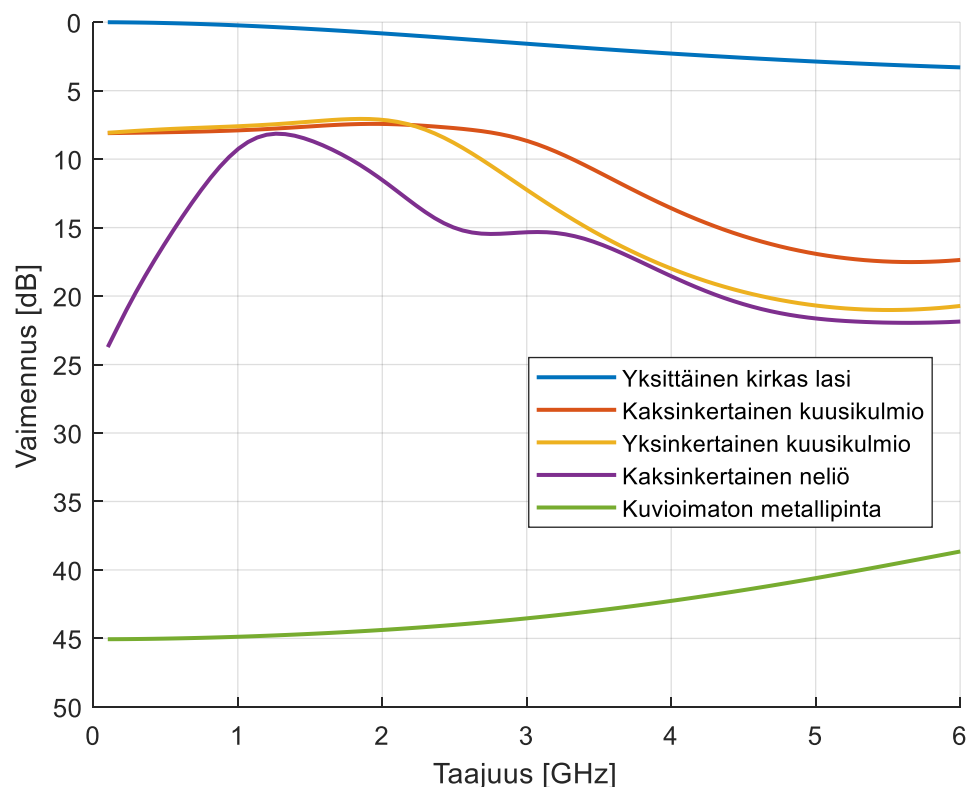
Pintaan nähden kohtisuorassa saapuvalla aallolla eri polarisaatioilla simuloitut tulokset on esitetty kuvissa 5.4 ja 5.5. Referenssitilanteina on käytetty käytännön kappaleita vastaavia malleja. Yksittäisen kirkkaan lasin malli luotiin määrittelemällä eristyslasin toinen lasi-elementti tilapäisesti ilmaksi ja poistamalla metallikerros simulaatiosta. Kuvioimattoman metallipinnan tulokset saatiin määrittelemällä lasin pinnalla olevan kuvioinnin jokainen kohta metalliksi ja määrittelemällä jälleen mallin toinen lasi-elementti ilmaksi.



Kuva 5.4: Eristyslasi-elementin simulointitulokset TM -polarisoituneelle aallolle. Aalto saapuu lasin pintaan nähden kohtisuorassa.

Kuvioimattoman metallipinnan tulosta 45... 39 dB voidaan pitää jokseenkin korkeana vaimennuksena, kun niitä verrataan myöhemmin esitettäviin mittaustuloksiin. Kuten kapaleessa 2.6 on esitetty, tällainen vaimennus saattaisi olla mahdollinen kokonaiselle ikkunarakenteelle korkeammilla taajuuksilla, mutta ei yksittäiselle matalaemissiviteettisille. Yksi mahdollisuus tulokseen on se, että simulaattori saattaa mallintaa yhtenäistä, vaikkakin epäideaalista, metallipintaa hieman ideaalisemmin kuin käytännön pinta sattuu olemaan.

TM-polarisaation simulointituloksista voidaan nähdä, että kuusikulmion muotoisilla kuvioinneilla päästään vaimennukseen, joka on noin 7–8 dB nykyisin käytössä olevilla matkaviestinkaistoilla. Kaksinkertaisen kuusikulmion huippu jatkuu laakeampana hieman pidempään, ennustetun vaimennuksen ollessa noin 12,5 dB taajuudella 3,8 GHz, joka on tulevan 5G-verkon ylin tiedossa oleva taajuus. Vastaavalla taajuudella yksittäisen kirkkaan lasin vaimennus olisi noin 2,1 dB. Kuusikulmioiden tapauksessa suunniteltujen resonanssitaajuuksien varmentamista on käytännössä hankala todentaa, koska kuvaajan muoto on niin laakea. Taajuudet näyttäisivät osuvan kohtiin, jossa käyrän muoto on jo alkanut loivasti laskea. Neliö-kuvion kohdalla suunnittelutaajuudet ovat toisaalta selvästi nähtävissä kuvaajassa näkyvien kumpujen keskipaikkeilla. Neliökuvion kaista on kuitenkin kapeampi ja vaimennus hieman suurempi kuin kuusikulmioiden tapauksessa. Vaimennus on vähemmän kuin 10 dB noin taajuuskaistalla 1–1,8 GHz.



Kuva 5.5: Eristyslaselementin simulointitulokset TE-polarisoituneelle aallolle. Aalto saapuu lasin pintaan nähden kohtisuorassa.

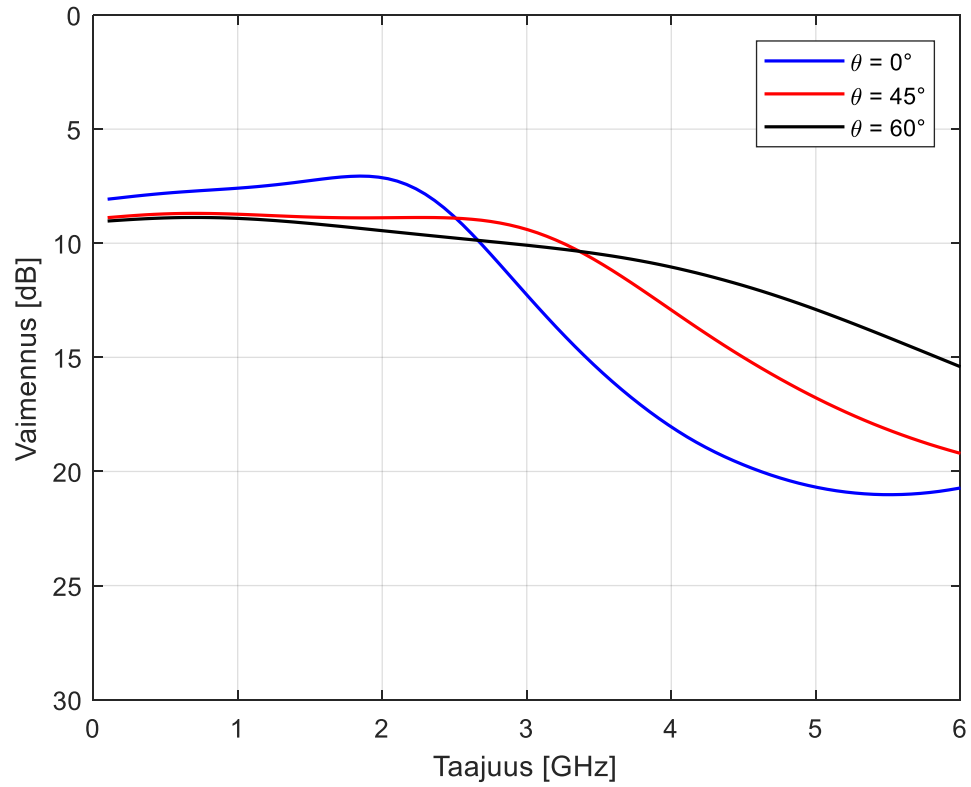
Simulointitulokset vastakkaiselle polarisaatiolle ovat käyrämuodoltaan hyvin saman kaltaisia. Neliö-kuvion läpäisy näyttäisi muuttuvan hieman heikommaksi korkeammilla taajuuksilla.

Kokonaisuutena tuloksista voidaan nähdä, että esimerkiksi taajuuskaistalla 800 MHz - 2 GHz kaksinkertaisella ja yksinkertaisella kuusikulmiolla saavutetaan noin 37 dB parannus, jos vertailukohtana käytetään simulointien kuvioimatonta metallipintaista lasia, jonka vaimennus näyttäisi olevan noin 45 dB. Neliöllä parannus vaihtelee, ollen noin 34 dB – 37 dB. Nämä tulokset vaikuttavat kuitenkin epärealistisilta.

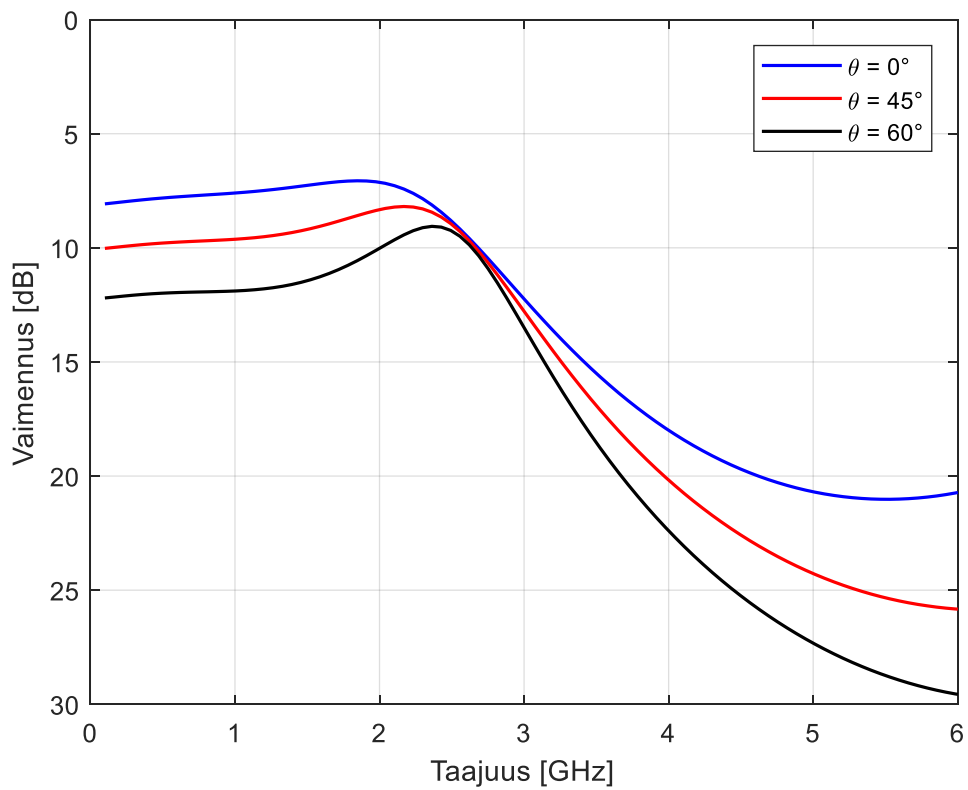
Käytännön mittaukset osoittivat, että *yksittäisen metallipinnoitetun lasin* vaimennus olisi noin 23 dB, jolloin kuusikulmioilla kuvioidulla *eristyslaselementillä* saavutettaisiin simulointien mukaan parannusta enimmillään noin 15 dB ja neliöllä noin 12–15 dB. Tulosten valossa valmistettu neliö näyttäisi toimivan hiukan kuusikulmion muotoisia kuvioita heikommin. Toisaalta kuvion koko oli suunniteltu matalampia taajuuksia silmällä pitäen ja sen asettelu ei ollut aivan yhtä tiheä kuin kuusikulmiolla, joka vaikuttaa kaistanleveyteen. Vaikka tässä kuusikulmioista jäädäänkin hieman, ei tulos kuitenkaan ole katastrofi.

5.3.2 Tulokulman ja polarisaation vaikutus

Edellä esitetyt simulointitulokset esittivät kuvioinneille tilanteet, joissa signaali saapuu kohtisuorassa lasipintaan nähden ohjelmistossa määritellyn x -suunnan mukaisesti (TM-polarisaatio) tai y -suuntaisesti (TE-polarisaatio). Kummassakin tilanteessa kuviot saattavat toimia eri tavalla. Toinen merkittävä tekijä, joka vaikuttaa läpäisyyn ja kuvioinnin toimivuuteen on signaalin tulokulma lasin pintaan nähden. Kuvissa 5.6 ja 5.7 esitetään vaimennuskäyrien muuttuminen yksinkertaisen kuusikulmion tapauksessa tilanteissa, joissa signaali saapuu lasin pinnan normaaliin nähden yläviistosta eri kulmissa (kulma θ kasvaa kappaleessa 4.4.5 esitetyllä tavalla). Muiden kuviointien osalta tulokset on esitetty liitteessä B.



Kuva 5.6: Yksinkertaisen kuusikulmio-kuvion läpäisy x -suuntaisella aallolla tulokulman θ muuttuessa (TM-polarisaatio).



Kuva 5.7: Yksinkertaisen kuusikulmio-kuvion läpäisy y -suuntaisella aallolla tulokulman θ muuttuessa (TE-polarisaatio).

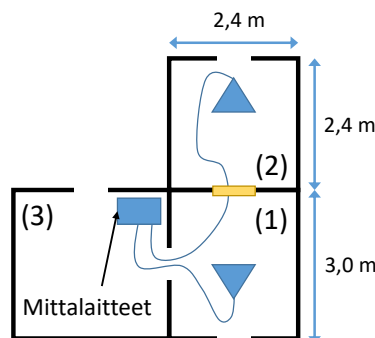
Kuvista nähdään suoraan, että käyrämuodot ovat erilaiset eri tulokulmille ja polarisaatioille – signaalin saapuminen vaikuttaa siis siihen, miten se vaimenee rakenteen läpi kulkiessaan. Tämän tyyppisten ilmiöiden olemassaolo on hyvä tiedostaa, sillä käytännön tilanteessa signaalin saapuminen voi tapahtua periaatteessa missä kulmassa vain (tukiasemien sijoittelusta johtuen usein kuitenkin enemmän tai vähemmän yläviistosta, vaikkakin sivuttaissuuntainen saapumiskulma φ voi myös muuttua). Erityisesti tälle kuvioinnille tuloksista nähdään, että tulokulmalla $\theta = 0$ vaimennuskäyrä on lähestulkoon identtinen saapuipa aalto x - tai y -akselin suuntaisesti. Näin ei kuitenkaan välttämättä ole kaikille eri kuviointityypeille. Lisäksi nähdään, että tulokulman kasvaessa läpäisy tyypillisesti heikkenee hieman nykyisillä matkaviestintaajuuksilla, mutta voi myös parantua korkeammilla taajuuksilla, jos tilannetta verrataan kohtisuoraan tilanteeseen. Olipa suoraan saapumiseen verrattuna muutos kumpaan suuntaan tahansa, läpäisy on näissäkin tilanteissa parempi kuin lasilla, jolle kuviointia ei olisi tehty laisinkaan.

6. KOEJÄRJESTELYT, MITTAUSTULOKSET JA SUORITUSKYKY

Tässä luvussa esitellään työssä mitatut lasirakenteet, mittausjärjestelyt ja tulokset. Tuloksia vertaillaan simuloituihin tuloksiin ja kirjallisuudessa esitettyihin tuloksiin. Mittausjärjestelyt koostuivat signaaligeneraattorista, spektrianalysointilaitteesta ja kahdesta A-IN-FOMW:n valmistamasta torvi-antennista (JXTXLB-880-NF), joiden valmistajan ilmoittama taajuuskaista oli 800 MHz – 8,0 GHz. Mittaukset kuitenkin suoritettiin taajuuskaistalla 680 MHz – 6,0 GHz, joka poikkeaa valmistajan ilmoittamasta kaistasta alemman taajuuden osalta. Tämän osalta tulee huomioida, että antenni ei lakkaa yllättäen toimimasta, kun sitä käytetään hieman luvattua alhaisemmilla taajuuksilla, mutta se ei toisaalta välttämättä *toimi täysin luvattulla tavalla*. Tässä työssä tavoitteena oli saada kuitenkin myös hieman suuntaa antavaa tietoa siitä, miten rakenteet toimivat LTE-verkkojen käytössä olevilla 700 MHz ja 800 MHz taajuuskaistalla, mutta tuloksia tulee tulkita varoen.

6.1 Koejärjestelyt ja mittalaitteet

Vaimennusmittaukset suoritettiin läpäisyvaimennusmittauksina (kappale 3.11) Tampereen teknillisen yliopiston Rakennustalon kellaritiloissa. Kellaritilojen teräsbetoniseinät ovat vahvuudeltaan noin 30 cm, ja tiloissa julkisen matkaviestinsignaalien kuuluvuus on erittäin heikko tai olematon, eli sienien vaimennus on hyvin suuri. Mittaustila koostuu kahdesta kammioista, jotka ovat kooltaan noin 2,4 m × 3,0 m ja korkeudeltaan noin 2 metriä. Mittaukset suoritettiin huoneissa 1 ja 2, ja mittauksessa tarvittavat muut laitteet olivat sijoitettuna huoneeseen 3. Huoneiden 1 ja 2 välinen betoniseinä on lisäksi vuorattu toiselta puolelta alumiinipinnoitteisilla polyuretaanieristelevyillä. Mitattavat lasikappaleet asetettiin alumiinista valmistettuun kehikkoon, joka on kiinnitetty betoniseinään kulmarauodoilla. Kehikkoon asetettavien lasien koko oli noin 87,5 cm × 83,5 cm. Kehikon ja betoniseinän väliset raot tiivistettiin alumiiniteipillä ja kehikko oli myös tämän teipin sekä ruuvien välityksellä kosketuksissa betoniraudotukseen.



Kuva 6.1: Mittaustilan pohjapiirros.

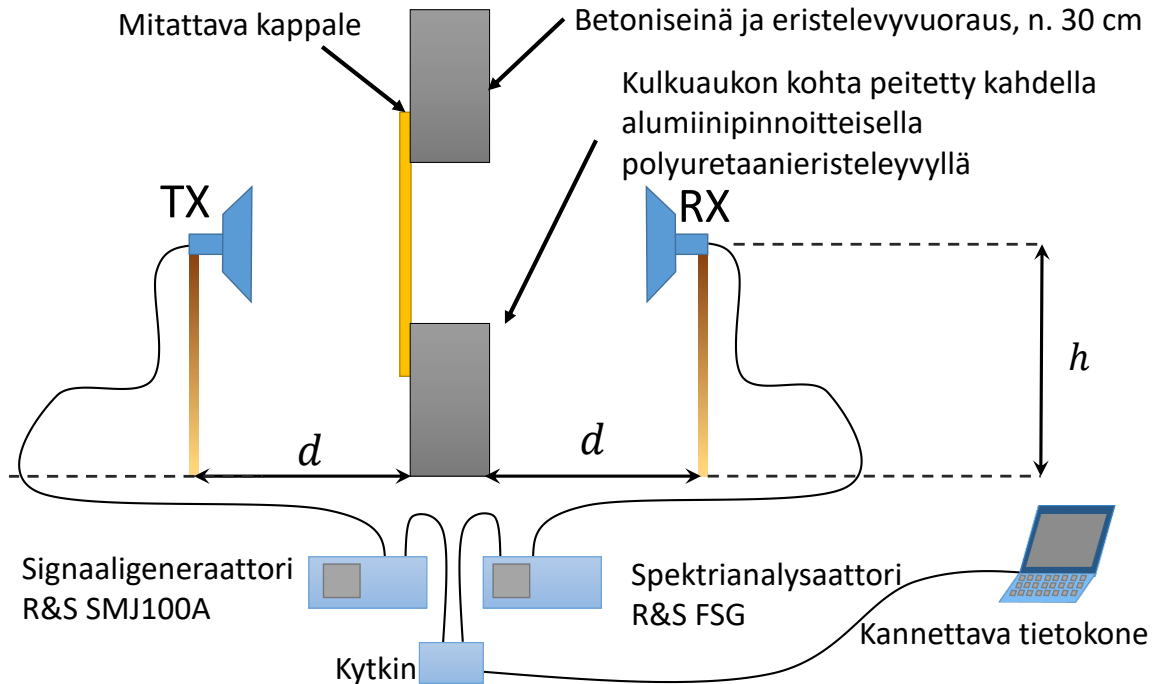
Ylimääräinen tila kulkuaukosta peitettiin kulkuaukkoa hieman suuremmiksi muotoilluilla alumiinipinnoitteisilla eristelevyillä. Eristelevyjen metallipinnoite rajoittaa tehokkaasti signaalin läpäisyä rakenteen toiselle puolelle tarjoten vaimennuksen, joka on noin 25–30 dB eristelevykerrosta kohden [30]. Kulkuaukkoa peittävien levyjen ja kehikon välinen rako tiivistettiin niin ikään alumiiniteipillä. Lasikappaleen reunat tiivistettiin metallista valmistetulla tiivistenauhalla mitattavan kappaleen ohi tapahtuvien radiovuotojen ehkäisemiseksi. Lisäturvaa vuotojen kannalta tarjosi myös, että kappale oli suurempi kuin mitaustilassa oleva aukko, jolloin mahdollisen vuoto-aukon takana on vielä paksu betoni-seinä. Lasien kulmissa tiivistenauhaa ei voinut asettaa parhaalla mahdollisella tavalla, joten kulmat peitettiin vielä kerroksella alumiiniteippiä.



Kuva 6.2: *Mittaustila ilman mitattavia materiaaleja. Kuvattu huoneen 1 suunnasta kohti mittaussaukkoa. Mittaustila on vuorattu seinän toiselta puolelta kuvan keskellä näkyvällä alumiinipeitteisellä eristelevyllä ja kulkuaukon kohdalla eristelevyä on asetettu kaksi kerrosta päällekkäin siten, että aukko peittyy. Lähettävä antenni sijaitsee etualalla.*

Mittauksessa käytetyt torviantennit sijoitettiin siten, että lasikappale oli lähettävään ja vastaanottavaan antenniin nähden kaukokentässä. Mittauksessa käytetyn antennin suurin halkaisija oli noin 28 cm ja lähettävä ja vastaanottava antenni on sijoitettu 155 cm päähän lasikappaleesta. Tällä etäisyydellä antennit ovat määritelmän (kaava 3.61) mukaan var-

masti kaukokentässä koko mitattavalla taajuusalueella. Antennit suunnattiin silmämääräisesti siten, että ne osoittivat toisiaan kohti mitattavan kappaleen keskikohdassa. Mittaukset suoritettiin antennit asetettuna kuvan 6.2 mukaiseen pysty-asentoon, jolloin tuotetaan x -suuntaan polarisoitunut aalto eli TM-polarisaatio. Mittalaitteina työssä käytettiin Rohde & Schwarz SMJ100A-signaaligeneraattoria ja Rohde & Schwarz FSG 9 kHz...8 GHz -spektrianalysaattoria. Mittalaitteita ohjattiin verkkokytkimen välityksellä kannettavalla tietokoneella MATLAB-ympäristössä toteutetulla mittausohjelmalla. Antennit kytkettiin mittalaitteisiin N-liittimin varustetuilla koaksiaalikaapeleilla.



Kuva 6.3: Mittaus- ja datankeruujärjestely läpäisyvaimennusmittaukselle (kappale 3.10).



Kuva 6.4: Metallinen eristesukka lasin reunassa yksittäisen eristyslasipaketin mittauksessa (vas.). Kolminkertainen lasirakenne paikallaan (oik.).

Mittaus suoritettiin pyyhkäisemällä mitattava taajuusalue noin 20 MHz välein. Lähetettävän signaalin tehoksi asetettiin +10 dBm ja mittauksella tutkittiin sitä, kuinka paljon signaalin tehosta läpäisi rakenteen. Referenssitilanteena käytettiin tilannetta, jossa RX- ja TX-antennin väliin ei ole asetettu mitään kappaletta. Tästä käytetään nimitystä ”vapaan tilan vaimennus”, kuten kappaleessa 3.10 on esitetty. Vähentämällä vapaan tilan vaimennus materiaalille suoritetusta mittauksesta, saadaan myös kaapeleiden aiheuttamat epäideaalisuudet kumottua mittausjärjestelystä.

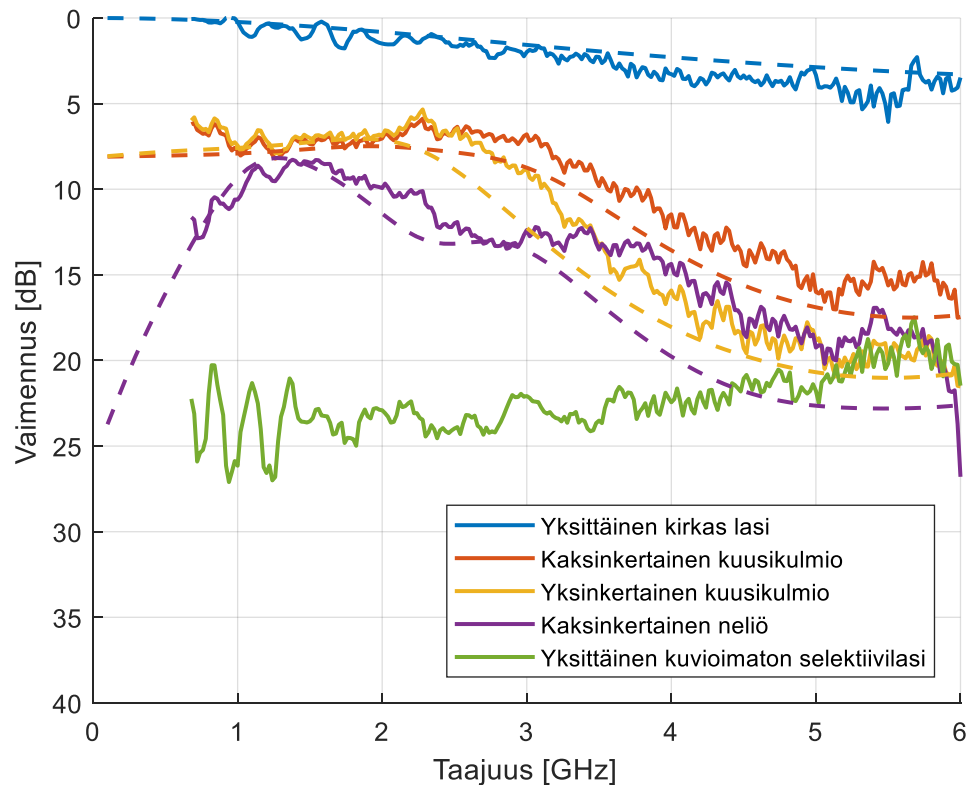
Työssä mitattiin eri kuvioinneilla seuraavat lasirakenteet:

1. yksittäiset lasirakenteet, jossa kuviointi on tehty on-line -pinnoitetulle lasille,
2. simuloitunut eristyslasiratkaisu, jossa toisen lasin kuviointi on tehty off-line -pinnoitetulle lasille ja toinen lasi on tavallinen kirkas lasi,
3. kolminkertainen lasirakenne, jossa yksittäinen kirkas lasi on asetettuna 100 mm päähän eristyslasipaketista,
4. kolminkertainen lasirakenne, jossa yksittäinen kuvioitu on-line -pinnoitettu lasi on asetettuna 100 mm päähän eristyslasipaketista,
5. yksittäinen kuvioimaton matalaemissiviteettilasi ja yksittäinen kirkas lasi vertailukohteeksi.

Mittaustuloksia verrataan simulointituloksiin eristyslasipakettien osalta, muutoin tuloksista esitetään ainoastaan mittaustulokset ja niistä johdettavat päätelmät.

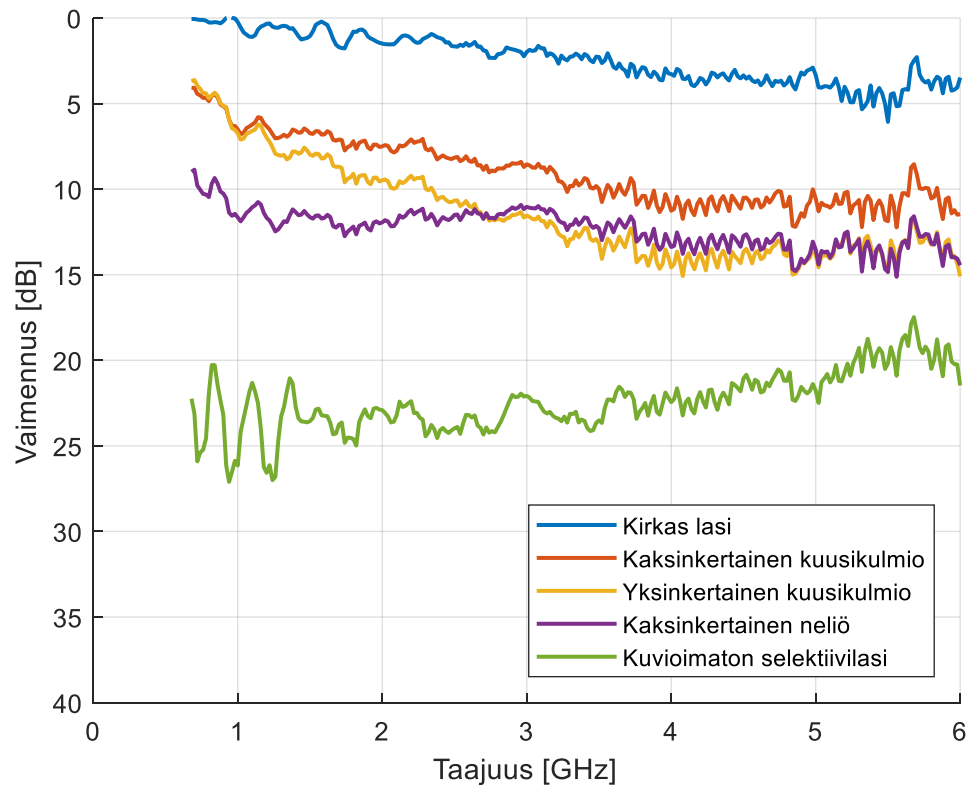
6.2 Mittaustulokset

Simulointien perusteella voitiin odottaa suhteellisen lupaavia mittaustuloksia ja tuloksissa oli myös havaittavissa selkeä korrelaatio, kunhan simulointimalli oli saatu tarkennettua vastaamaan todellisuutta kappaleessa 5.2.1 esitetysti. Mittaustuloksia on tasoitettu MATLAB-ohjelmiston (R2017b) funktiolla *smooth*(Y , 5), jossa datajoukolle Y suoritetaan viiden datapisteen liukuva keskiarvoistus. Kuvassa 6.5 on esitetty kootusti mitatut eristyslasit, sekä vertailut simulointituloksiin. Yhtenäisellä viivalla on esitetty tasoitettu mittaustulos ja vastaavan värisellä katkoviivalla kutakin lasia vastaava simulointitulos.



Kuva 6.5: Simuloidut ja mitatut eristyslasipaketit. Katkoviiva esittää simuloidut ja yhtenäinen viiva mitatut tulokset.

Tuloksista nähdään, että simuloinnit ja mittaustulokset vastaavat toisiaan käyrämuodoiltaan kohtalaisen tarkasti. Käytännön tulokset näyttävät olevan jopa hieman simulointituloksia parempia. Kaksinkertaisella kuusikulmiolla saavutetaan keskimäärin noin 7 dB vaimennus noin taajuuteen 3 GHz asti. Yksinkertainen kuusikulmio sukeltaa hieman nopeammin, vaimennus samalla taajuudella on noin dB. Neliö käyttäytyy kuten simuloinneissa, mutta vaimennus jatkuu noin tasolla 12 dB hieman korkeammille taajuuksille kuin simuloinneissa. Kokonaisuutena saavutetut parannukset vertailukohtana käytettyyn yksittäiseen kuvioimattomaan lasiin ovat näillä eristyslaseilla samaa luokkaa kuin simuloinneissa. Kaksinkertaisen kuusikulmion tuoma parannus matkaviestintaajuuksilla on parhaimmillaan noin 15 dB ja yksinkertaisella kuusikulmiolla päästään lähes samaan tulokseen, mutta hieman kapeammalla kaistalla. Neliön parannus vaihtelee noin välillä 10 dB – 15 dB. Vertailukohtana käytetyn yksittäisen kuvioimattoman lasin vaimennus näyttäisi olevan keskimäärin tasolla 23 dB.



Kuva 6.6: Yksittäisten kuvioitujen off-line -pinnoitettujen lasien mittaustulokset.

Eristyslasiensa mittausten lisäksi samat kuviot mitattiin myös yksittäiselle on-line -pinnoitetulle lasille valmistettuna. Kuvan 6.7 tulosten mukaan läpäisyssä saavutetaan parannusta myös tässä tilanteessa. Esimerkiksi kaksinkertaisen kuusikulmion tarjoama parannus vertailukohtaan nähden taajuudella 3 GHz on noin 14 dB ja taajuudella 1,8 GHz noin 15,5 dB. Yksinkertainen kuusikulmio sukeltaa jälleen hieman nopeammin ja neliö suoriutuu vähän heikommin. Huomionarvoista on, että kuvioinnit oltiin simuloitu osana eristyslaselementtiä, joka koostui yhden lasin sijaan kahdesta lasista ja jossa metallipinnoitettu lasi oli tyypiltään off-line -pinnoitettu. Yksittäislaseissa käytettiin kuitenkin on-line -pinnoitettua lasia, joka eroaa muun muassa metallikerroksen tyypin ja paksuuden osalta off-line -pinnoitetusta. Vaikka kuvioita ei oltukaan optimoitu tälle lasityypille, saavutettiin niillä kelvoinen läpäisy.

6.3 Virheanalyysi

Simulointien mittaustulosten välillä havaittiin aluksi merkittäviä eroavaisuuksia, jossa simulointitulokset ja mittaustulokset eivät vastanneet toisiaan laisinkaan. Huomioimalla simuloinneissa lasin metallipinnoitteen äärellinen paksuus ja johtavuus, sekä näiden yhteys materiaalin tunkeutumissyvyyteen, saatiin toisiaan muistuttavia tuloksia. Tuloksissa on tästä huolimatta joitakin eroavaisuuksia, ja mahdollisia epävarmuustekijöitä on käsitelty alla. Mallin tarkennuksiin liittyviä fysikaalisia perusteita käsiteltiin tarkemmin kappaleessa 5.2.1.

6.3.1 Epävarmuustekijät

Mittajärjestelyn oikeellisuus ja radiovuodot

Mittajärjestelyn oikeellisuutta varmennettiin useilla eri keinoilla pois sulkemalla mahdollisia virhelähteitä yksitellen. Mittausmenetelmän oikeellisuus varmistettiin muun muassa todentamalla mittaukset menetelmällä, jossa läpäisymittauksissa käytetyn signaaligeneraattorin ja spektrianalysointilaitteen muodostaman mittauskokonaisuuden tilalla käytettiin kannettavaa piirianalysointilaitetta. Molemmilla mittausmenetelmillä saatiin toisiaan vastaavat tulokset.

Mahdollisia radiovuotoja etsittiin asettamalla lasipinnan päälle metallinen peite ja mittaamalla läpäisy sekä metallilla peitetyn, että peittämättömän lasin läpi. Metallilla peitetyn lasin läpäisy todettiin erittäin heikoksi, josta voitiin päätellä valtaosan mittausjärjestelyn läpi kulkeutuneesta signaalista kulkeutuvan lasin pinta-alan läpi, eikä merkittäviä radiovuotoja tapahtunut todennäköisesti muualta koejärjestelystä.

Kuvioinnin valmistamisen onnistuminen

Kuvioinnin valmistuksen onnistuminen puolestaan tutkittiin mittaamalla yksittäisen (ei eristyslasipaketiksi valmistetun) lasin pinnalle muodostettujen kuvioinnin keskinäinen resistanssi yleismittarilla. Havaittiin, että kehän muotoisten kuvioinnin rajaama metallipinnoitettu alue ei koskettanut lainkaan kuvioinnin ulkopuolelle jäävää aluetta, eli kuvioinnin valmistaminen oli myös onnistunut. Mikäli kuvioinnit olisivat johtaneet poistetun alueen yli, ei kuvioinnin toiminnallisuudesta voitaisi saada täydellistä varmuutta, sillä tilanne ei vastaisi simuloitua. Mittaukset toistettiin mittaukseen toimitetuista lasista viidelle lasille kokeilemalla noin 5–10 eri kohtaa eri puolilta lasilevyä, eikä tässä otannassa havaittu yhtään viallista kuviointia. Yleismittarin päät vaurioittavat metallipinnoitetta näkyvästi, joten lasien tahallista vaurioittamista pyrittiin välttämään pitämällä otanta suhteellisen pienenä.

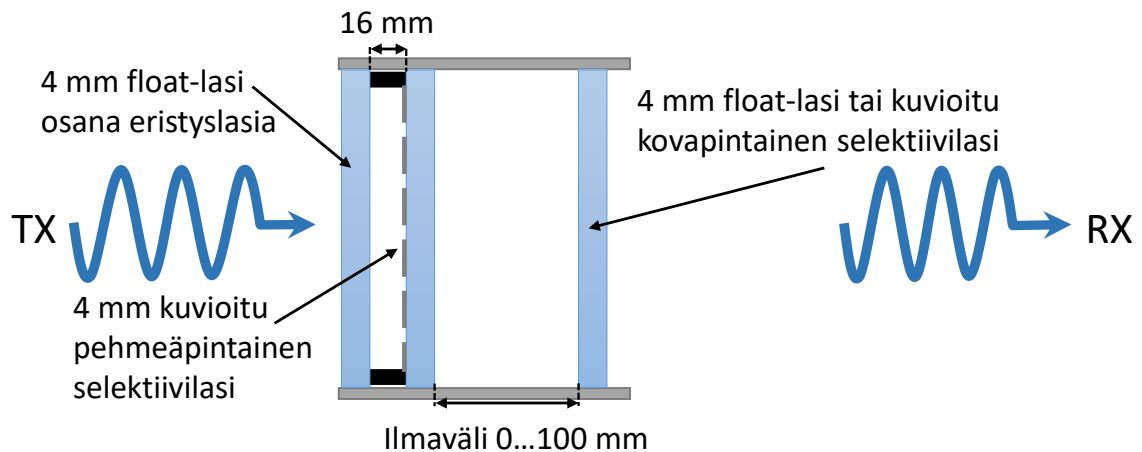
Metallikerroksen johtavuus, lasin permittiivisyys ja kuvioinnin äärellisyys

Muita epävarmuustekijöitä ovat mahdolliset vaihtelut lasin permittiivisyydessä, mutta työn osana hankittujen permittiivisyysmittausten tulosten perusteella voidaan permittiivisyyden kuitenkin olevan samaa kertaluokkaa sekä mittauksissa että simulointiparametrina. Metallikerroksen paksuus ja johtavuus, sekä mallissa huomioimatta jätetyt muut puolijohdekerrokset voivat vaikuttaa tulosten tarkkuuteen. Esimerkiksi pinnoitekerroksen mallinnuksessa tehtiin oletus, että pinnoite koostuu pelkästään 15 nanometriä paksusta metallikerroksesta, eikä muita pinnoitteen kerroksia huomioitu. Todellisuudessa pelkän metallikerroksen paksuus on tyypillisesti hieman pienempi. Simuloinneissa FSS-elementtien taulukoinnin myös oletettiin olevan äärettömän kokoinen, mutta mittauksissa

ikkunan lasipinnan koko oli puolestaan äärellinen (noin 87,5 cm × 83,5 cm), johon mahtui esimerkiksi vaakasunnassa suunnitellusta kuvioinnista riippuen alle sata kuviointia. Äärellisen koon vaikutuksia on käytännössä vaikeaa arvioida, mutta se on otettava kuitenkin huomioon erilaisia epävarmuustekijöitä analysoitaessa.

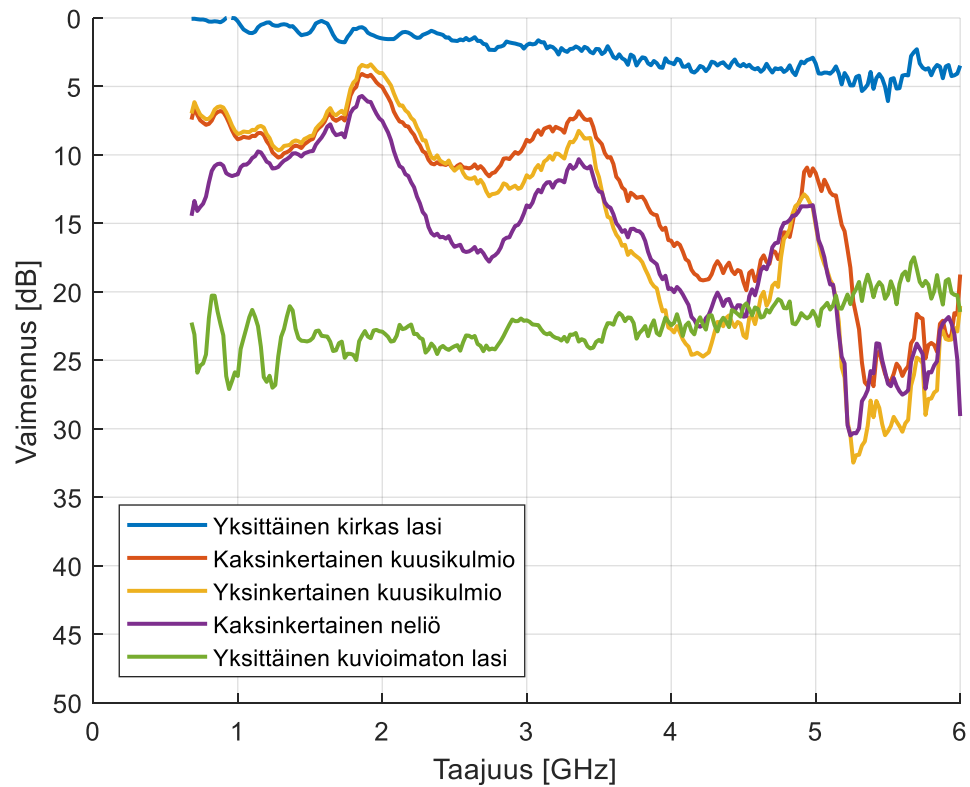
6.3.2 Todellisen kolminkertaisen ikkunarakenteen läpäisykyky

Kaikki työn simuloinnit suoritettiin eristyslasirakenteelle, jossa toisena elementtinä oli kuvioitu matalaemissiviteettilasi ja toisena elementtinä tavallinen float-lasi. Työn ohessa haluttiin kuitenkin suorittaa mittauksia myös käytännön ikkunarakenteelle. Kolminkertaiset ikkunarakenteet, jotka koostuvat matalaemissiviteettilasia käyttävästä eristyslasirakenteesta ja joko yksittäisestä kirkkaasta lasista tai yksittäisestä kovapintaisesta low-e -lasista ovat hyvin tyypillisiä ratkaisuja rakentamisessa [6, s.111], [46].

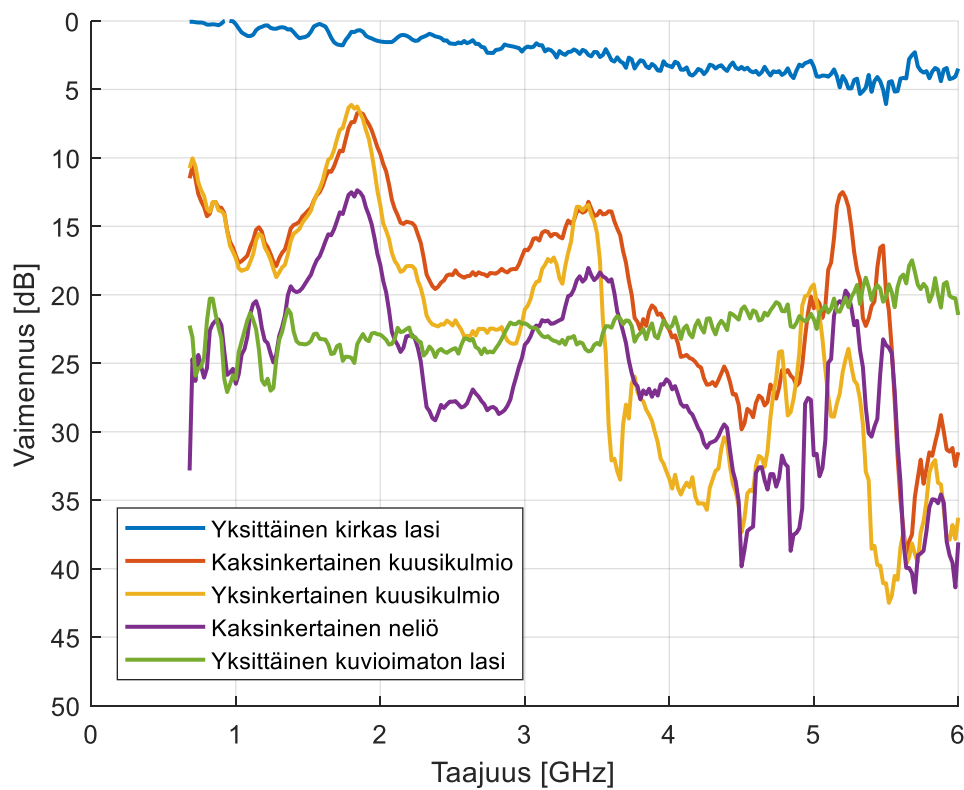


Kuva 6.7: Havainne kuva kolminkertaisesta ikkunarakenteesta mittauksessa.

Rakenteet mitattiin samalla tavalla kuin eristyslasipaketit tai yksittäiset lasit asettamalla ne mittauksia varten valmistettuun alumiinikehikkoon. Kolminkertaisia rakenteita mitattaessa havaittiin, että vastaanotetun signaalin tehotasoihin syntyy läpäisyn huippukohtia, jotka eivät korreloi lasin pintaan suunnitellun kuvion taajuuksien kanssa. Myöskin eristyslasipaketin ja ulomman lasin etäisyyttä muuttamalla huippukohtat siirtyvät eri taajuuksille. Tulokuvissa vertailukohtana on jälleen annettu kirkkaan lasin ja yksittäisen kuvioimattoman lasin käyrät.



Kuva 6.8: Eristyslasi ja tavallinen kirkas lasi etäisyydellä 100 mm.

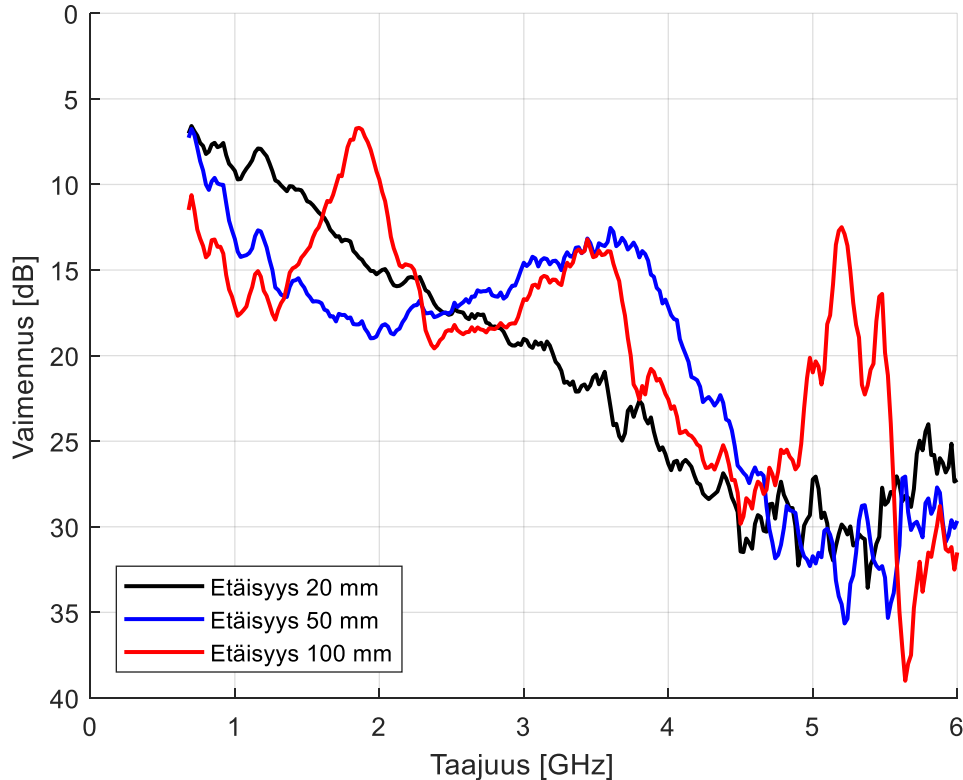


Kuva 6.9: Eristyslasi ja vastaavalla kuviolla kuvioitu yksittäinen lasi etäisyydellä 100 mm.

Kuvaajista nähdään, että vaimennus on lähtökohtaisesti suurempi tilanteessa, jossa ulompana lasina on samalla kuviolla varustettu lasi. Ero tilanteiden välillä esimerkiksi kuusikulmion tapauksessa taajuuden 2,6 GHz kohdalla olevassa ”kuopassa” on noin 11 dB ja taajuuden 1,8 GHz kohdalla olevalla huipulla noin 4,5 dB.

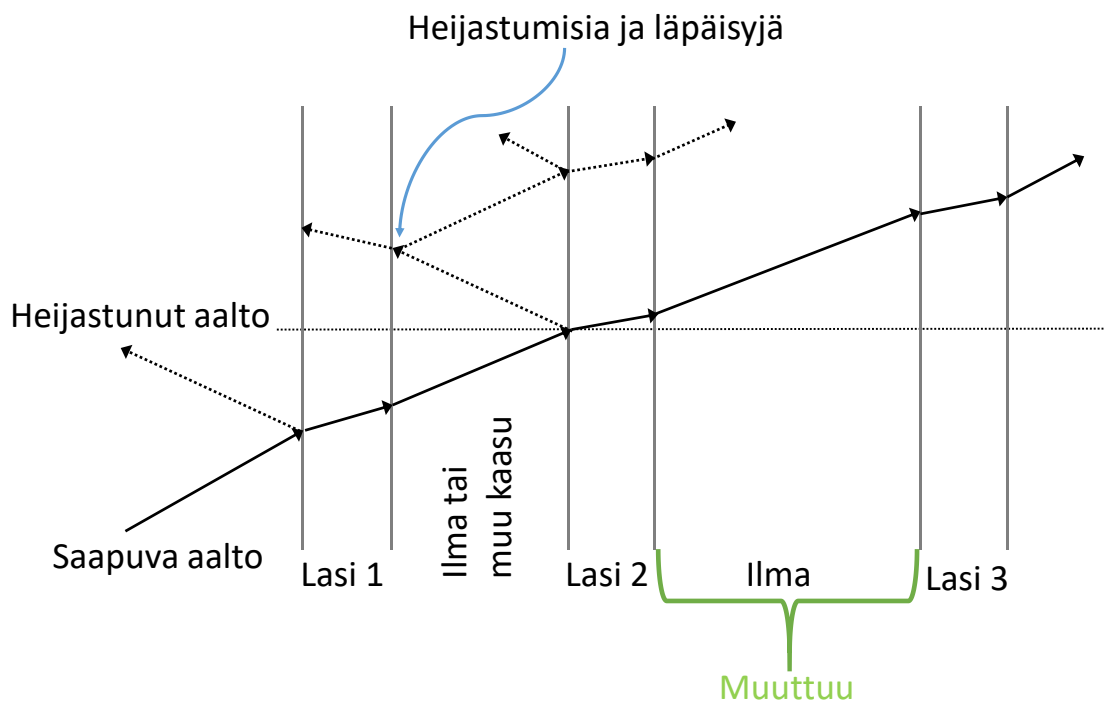
Voidaan olettaa, että tyypillisen matalaemissiviteetilaseilla toteutetun ikkunarakenteen vaimennus on noin 21 dB (900 MHz), 34 dB (2,1 GHz) ja 41 dB (3,5 GHz), joka on yksinkertaistaen suuruusluokkaa 30–40 dB [5, s. 22]. Näin ollen ratkaisulla, jossa on käytetty kahta kuvioitua lasia ja suunniteltua kaksinkertaista kuusikulmiota, voidaan tulosten mukaan potentiaalisesti saavuttaa noin 7 dB (900 MHz), 20 dB (2,1 GHz) ja 26,8 dB (3,5 GHz) parannukset signaalin läpäisyyn. Nämä tulokset on laskettu mittauksista niillä oletuksilla, että lasien välinen etäisyys on rakenteessa noin 100 mm ja aalto saapuu kohtisuorassa lasin pintaan nähden.

Eräs voimakkaasti läpäisyyn vaikuttavista tekijöistä tässä koejärjestelyssä vaikutti olevan eristyslasipaketin ja yksittäisen lasin välinen etäisyys, jonka muuttuessa rakenteen läpäisy muuttui huomattavasti, eli aikaisemmin havaitut läpäisyn huippukohdat liikkuivat eri taajuuksille ja käyrien muoto muuttui. Käytännön ikkunarakenteessa lasien keskinäinen etäisyys on kuitenkin usein suuruusluokaltaan noin 100 mm tai hieman suurempi. Mittauksin ei tutkittu signaalin tulokulman tai polarisaation vaikutusta kolminkertaisen rakenteen läpäisyyn



Kuva 6.10: Kaksinkertaisen kuusikulmio-kuvioinnin vaimennus eristyslasipaketin ja yksittäisen kuvioitun lasin etäisyyden muuttuessa.

Näistä läpäisyn piikkikohdista johtuen käytännön ikkunarakenteen läpäisykyvyn ennustaminen saattaa olla hankalampaa ja vähemmän suoraviivaista kuin pelkän yksittäisen ruudun tai eristyslasipaketin. Läpäisyn piikkien aiheuttaja on mahdollisesti kappaleessa 3.5 käsitelty heijastuminen, jossa esimerkiksi dielektristä materiaalia kohdatessaan sähkömagneettinen aalto heijastuu ja läpäisee materiaalin osittain. Käytännössä tällaisen kolminkertaisen ikkunarakenteen voidaan ajatella koostuvan dielektrisistä ja metallisista kerroksista, jossa vuorottelevat paksuudeltaan 4 mm lasikerrokset ($\epsilon_r \approx 6,85$) ja 16 mm tai 0 ... 100 mm kaasukerrokset ($\epsilon_r \approx 1,0$) sekä metallipinnat. Näiden kerrosten välillä on rajapintoja, joista aalto voi taittua tai heijastua. Kun aalto alun perin saapuu ilmasta ja kohtaa ensimmäinen lasikerroksen, osa siitä heijastuu ja osa läpäisee kerroksen. Kun jo läpäisseet signaalit kohtaavat seuraavan rajapinnan, on mahdollista, että ne läpäisevät ja heijastuvat uudelleen: lasien välissä saattaa tapahtua edestakaista heijastumista lasipintojen välillä.



Kuva 6.11: Läpäisy ja heijastuminen kerroksittaisessa dielektrisessä rakenteessa. [muokaten lähteestä 37, s. 389–390] Alkuperäisen lähteen kuvassa kaikki materiaalikerrokset ovat kiinteitä kerroksia, mutta peruseriaatteen voidaan olettaa olevan vastaava tässä tilanteessa.

Eristyslasipaketin ja yksittäisen lasin välistä etäisyyttä muutettaessa tullaan muuttaneeksi yhden kerroksen ominaisuuksia, joka todennäköisesti vaikuttaa siihen, miten aalto heijastuu rakenteen sisällä, miten eri suuntiin liikkuvat aallot vaikuttavat toisiinsa ja miten aalto lopulta läpäisee rakenteen. Kaksinkertaisen lasirakenteen tapauksessa on havaittu vastaavan kaltainen ilmiö, jossa läpäisy ja sen huippu muuttuvat hieman lasien etäisyyttä muuttaessa [47].

6.3.3 Kokonaisuus

Yksittäisillä kuvioiduilla laseilla saavutetaan parantunut ja varsin laajakaistainen läpäisy taajuusalueella noin 800 MHz – 4 GHz, joka kattaa kaikki tämänhetkiset matkaviestintaajuudet. Eristyslaseilla läpäisykaista on lähestulkoon yhtä laaja, mutta korkeammilla taajuuksilla havaitaan hieman suurempaa vaimennusta ja lisäksi kaistan muoto riippuu kuvioinnista. Kuusikulmion kuvioinnin laajakaistaisuutta voidaan selittää kuvioinnin itsensä ominaisuuksilla, sekä kuvioiden keskinäisellä läheisyydellä. Neliökuviointi ei suoriudu aivan yhtä hyvin korkeammilla taajuuksilla, jonka syyksi voidaan arvioida elementin hieman suurempaa kokoa ja keskinäisiä etäisyyksiä. Kolminkertaisten rakenteiden läpäisyssä tulee esille myös muita tekijöitä, joista yksi tärkeimmistä lienee lasikerrosten välinen etäisyys.

Simuloinneissa ja mittauksissa alun perin havaittuja eroja pyrittiin selvittämään aktiivisesti ja suurimmaksi yksittäiseksi tekijäksi paljastui lasin pinnan suhteen mallissa tehdyt oletukset. Mallin tarkentamisen jälkeen tulokset vastasivat toisiaan ja simuloinnin perusteella voidaan näin ollen arvioida varsin luotettavasti lasipinnan käyttäytymistä matkaviestinsignaalien läpäisyn kannalta.

6.4 Arvio kuviointien vaikutuksesta lasirakenteen U-arvoon

Tässä työssä ei mitattu tajuusselektiivisten kuviointien vaikutuksia lasin lämmönläpäisykertoimeen eli U-arvoon. Lasirakenteet olisi mahdollista testata esimerkiksi lähteessä [6] esitetyillä menetelmillä, mutta tämän työn puitteissa tyydymme arvioimaan vaikutuksia vain kirjallisuuteen perustuen. Poistettava alue tulisi luonnollisesti pitää mahdollisimman pienenä lasin energiatehokkuuden ylläpitämiseksi. Lähteessä [48] valmistettiin laserkuviointitekniikalla metallioksidipinnoitteeseen FSS-pinta, jossa poistetun materiaalin pinta-alan osuus oli 4 % lasin kokonaispinta-alasta. Lasin emissiviteettiä mitattiin artikkelissa ennen ja jälkeen kuvioinnin ja tämän jälkeen määritettiin laskennallisesti lasin U-arvo. Kuvioinnin jälkeen U-arvo heikkeni $0,1 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ arvosta $1,6 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ arvoon $1,7 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$. Tämä muutos voidaan arvioida pieneksi. Radiosignaalin läpäisyn kannalta kuviointi kuitenkin tarjoaa merkittävän parannuksen, sillä artikkelin tulokset esittävät läpäisyn parantuvan lähes metallipinnoittamattoman lasin tasolle. [48]

Lähteessä [49] valmistettiin vastaavalla menetelmällä kaksikerroksisesta ikkunarakenteesta taajuusselektiivinen ikkuna. Tutkimuksessa on mitattu verrokkina käytetylle kaksikerroksiselle ikkunalasille U-arvoksi $2,89 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$. Vastaava lasi metallipinnoitettuna tuotti U-arvoksi $1,86 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$ ja kuvioituna vain hieman heikomman arvon $1,87 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{K}}$, mittauksen virhemarginaalin ollessa 2 %. Lasin pinnan kuvioinnilla poistettiin kuviointia 2,5 % lasin kokonaispinta-alasta. Tässäkin tapauksessa signaalien läpäisyä parannettiin täysin metal-

lipinnoitettuun lasiin merkittävästi ja mitatut erot U-arvoissa sijoittuvat mittauksen virhemarginaalin sisäpuolelle. [49] Näin ollen, mikäli metallipinnoitteesta poistettava osuus on riittävän pieni, ei poistolla näyttäisi olevan juurikaan vaikutusta ikkunan U-arvoon.

Lisäksi on suoritettu aiemmin mittauksia todellisten, avautuvapuitteisten alumiiniverhoiltujen puualumiini-ikkunoiden U-arvoille lasiratkaisuilla, joissa metallikerrosta ei ole poistettu tai metallioksidikerroksesta on poistettu noin 3,8 % [50]. Kuvioidun ja kuvioimattoman metallioksidipinnoitetun ikkunan U-arvoissa oli 0,02 mittayksikön ero. Raportissa mainitun mittauserpävarmuuden (± 5 %) puitteissa tässä esitettyjä lasirakenteita ei voi lämmönläpäisykertoimen puitteissa mitenkään luotettavasti erottaa toisistaan. [46]

Kokonaisuutena tarkasteltuna näyttäisi siltä, että lasin kuvioinnilla ja poistetulla metallilla on jonkin verran vaikutusta lasin lämpöominaisuuksiin. Kuvioinnin vaikutus näyttäisi kuitenkin olevan vähäinen, mikäli poistettava pinta-ala pidetään pienenä ($< 4 - 5$ %) lasin kokonaispinta-alaan suhteutettuna. Tässä työssä käytettyjen kuviointien pinta-alat on määritetty simulointiohjelmiston pinta-alamittaustyökalun antamista arvoista. Koska rakenne sisältää yksikkösolun kokoisia alueita levitettynä koko ikkunan laajuudelle, on poistetun pinta-alan prosenttiosuus laskettu käyttämällä yksikkösolun ja yksittäisen kuvion pinta-alaa. Lisäksi tulee huomioda, että kuviointi ei todellisessa lasissa jatku aivan lasin reunaan asti, vaan päättyy kuvion mukaan vaihtelevan etäisyyden päässä reunasta, jolloin poistetun pinta-alan prosentuaalinen osuus lienee todellisuudessa vielä hieman pienempi.

Edellä mainittuihin seikkoihin perustuen voidaan arvioida tutkituilla kuvioinneilla varustetun lasin kuvioinnin vaikutuksen U-arvoon olevan varsin vähäinen, sillä poistetut pinta-alat vaihtelivat noin 2,4 %:n ja 6,4 %:n välillä. Yksinkertaisella ajatusmallilla voidaan olettaa, että poistamalla esimerkiksi 4 % metallikerroksesta tullaan U-arvoon vaikuttaneeksi vähentävästi samassa suhteessa, mutta kirjallisuuslähteiden mukaan muutokset näyttäisivät olevan kuitenkin hiukan pienempiä. Jotta kuvioinnin vaikutukset U-arvoon saataisiin varmuudella selville, tulisi lasin lämpö-ominaisuudet varmentaa mittaamalla. Lisäksi todellisen ikkunarakenteen energiatehokkuuteen vaikuttavat myös esimerkiksi karmirakenteet.

6.5 Kuvioinnin näkyvyys

Vaikka lasin pintaan muodostetut kuvioinnit ovat erittäin ohuita (käytetty viivanleveys on 0,1 mm), on ne havaittavissa paljain silmin oikeissa valaistusolosuhteissa ja oikeanlaista taustaa vasten. Lasi ei olekaan perinteisen lasin tavoin pinnaltaan täysin kirkkaan yhtenäinen. Kuviointi on visuaalisesti tarkasteltuna vaaleaa, ja näkyy hieman paremmin tummaa taustaa vasten. Normaalien loistevalaisimien tarjoamassa valossa lasia tulee katsoa sopivasta kulmasta, jotta kuviointi on erotettavissa, suorassa kulmassa katsottuna lasista on varsin haastavaa erottaa kuviointia. Kuvioinnit ovat kuitenkin erotettavissa sekä

eristyslasista että yksittäisestä ruudusta. Visuaalisen, subjektiivisen tarkastelun perusteella kuvio ei kuitenkaan ole erityisen häiritsevää tai ruma. Kuviota on myös huomattavan paljon vaikeampi erottaa, kun lasia katsellaan etäämmältä ja kuviota ei yritetä erityisesti etsiä katseella.



Kuva 6.12: Valokuva yksittäiseen on-line -pinnoitettuun lasiin valmistetusta kuvioinnista ulkotiloissa (kaksinkertainen kuusikulmio). Tarkennus on kohdistettu lasin pinnalla nähtäviin vesipisaroihin, tausta on tarkoituksella epätarkka. Kuusikulmaiset, tiheästi asetellut, toisistaan irti olevat kuvioinnit ovat havaittavissa.

Valokuvassa lasi ei ole pystysuorassa, vaan sitä on kallistettu hieman niin, että taivaalta yläviistosta tuleva vähäinen valo sallii kuvion näkymisen, jottei salamavaloa tarvita. Kuvioinnin kokoa on myös hyvä verrata kuvaushetken heikon sateen aiheuttamiin vesipisaroihin. Kuviointi on selvästi nähtävissä, mutta normaalissa katselutilanteessa katse tarttuu kuitenkin usein kohteeseen, joka on lasin toisella puolella. Tällöin katsoja ei keskity itse lasiin ja kuviointi saattaa jäädä huomaamatta, koska katseen kohde on muualla. Lisäksi kohdetta tarkastellaan usein kauempana lasista. Onkin sopivaa sanoa, että katsojan on mahdollista nähdä kuvion läpi kiinnittämättä siihen mitään huomiota. Siihen, muuttaako kuviointi merkittävästi ikkunan optisia ominaisuuksia olisi mahdollista paneutua lisätutkimuksin.

7. YHTEENVETO

Suomi on pitkään ollut teknologisesti kehittynyt valtio ja täällä on ollut, ja on edelleen runsaasti langattomaan viestintään liittyvää tutkimusta ja kehitystyötä. Nykyisen energia- tehokkaan rakentamisen vaikutukset matkaviestinsignaalien kuuluvuuteen ovat kuitenkin osoittautuneet varsin merkittäviksi. Maallikon korvaan kuvatun kaltaiset kuuluvuusongelmat saattavatkin kuulostaa perin oudoilta. Kyseessä on konkreettinen ongelma, jonka ratkaisuun tulisi ponnistella esimerkiksi yhteistyössä operaattorien, rakennusteollisuuden ja valtion kanssa. Matalaemissiviteettilasien vaikutus lasirakenteiden energiatehokkuuteen ja sitä kautta myös itse rakennusten energiankulutuksen vähentämiseen on varsin hyvin havaittavissa niiden tuomasta parannuksesta ikkunoiden U-arvoihin. Tämän työn tarkoituksena olikin tutkia radiosignaalin läpäisyä lasissa ja suunnitella matalaemissiviteettilasien metallipinnoitteeseen kuvioiteja, joilla matkaviestintaajuisen signaalin läpäisyä voidaan parantaa lasin lämpöä heijastavia ominaisuuksia merkittävästi heikentämättä. Työssä suunniteltiin kuvioita, joiden dimensiot nykyisin ja lähitulevaisuudessa käytössä oleville matkaviestintaajuuksille ovat johdettavissa kirjallisuudesta. Näitä kuvioiteja tutkittiin simulointiohjelmistolla, johon rakennetun mallin avulla kuvioita voitiin edelleen parantaa. Optimoitujen kuvioitien toimivuus varmennettiin käytännön materiaalivaimennusmittauksin.

Rakennettu simulointimalli koostui aluksi dielektrisenä materiaalina mallinnetusta lasielementeistä ja ideaalijohtimena mallinnetusta metallikerroksesta. Dielektrisen kerroksen osalta lasin permittiivisyydelle määritettiin arvio kirjallisuudesta, jota täydennettiin osana työtä tilatuilla mittauksilla arvoon $\epsilon_r \approx 6,80 \dots 7,0$. Lasin permittiivisyys vaikuttaa metallipinnoitteeseen suunniteltujen kuvioiden resonanssitaajuuteen alentavasti, mikä tulee huomioida varsinaisten kuvioiden suunnittelussa. Kuvatulla simulointimallilla saatiin erittäin lupaavia tuloksia, mutta käytännön mittaukset osoittivat, ettei simuloinneilla ja käytännön toteutuksella ole paljontaan korrelaatiota keskenään. Erilaisten virhemahdollisuuksien analysoinnin jälkeen tultiin siihen lopputulokseen, että simulointimallin johtavan kerroksen parametreja tarkentamalla saadaan tulokset sovitettua keskenään samankaltaisiksi. Havaittiin, että käytännön tilanteessa lasiin muodostettua johtavaa pinnoitetta ei näyttäisi voitavan approksimoida ideaalijohteena, sillä kerroksen paksuus on pienempi kuin käytännön materiaalin sähkömagneettisen säteilyn tunkeutumissyvyys. Toisin ilmaistuna ohuen metallikerroksen häviöllisyys heikentää PEC-approksimaation tarkkuutta, jolloin ideaalijohtimelle suunnitellut kuviot eivät käyttäydy todellisessa tilanteessa odotetulla tavalla. Mallia tarkennettiin huomioimalla metallikerroksen paksuus (noin 15 nm) ja materiaalin äärellinen johtavuus (hopean johtavuus). Kokonaisuutena tärkeimmät yksittäisen taajuusselektiivisen ikkunalasin tai taajuusselektiivisen eristyslasi-paketin toimintaan vaikuttavat materiaaliominaisuudet ovat lasin permittiivisyys sekä

metallikerroksen äärellinen paksuus ja johtavuus. Näiden lisäksi sekä lasin pinnalle suunniteltujen kuvioiden dimensioilla, että kuvioiden keskinäisillä etäisyyksillä on keskeinen merkitys. Määrittämällä nämä parametrit tarkasti, voidaan lasirakenteen käyttäytymistä mallintaa kattavasti erilaisissa tilanteissa, kuten esimerkiksi polarisaation tai tulokulman muuttuessa.

Kuvioiduilla laseilla näyttäisi olevan potentiaalia radiosignaalin läpäisyn parantamisessa, mikäli tilannetta tarkastellaan ainoastaan puhtaasti läpäisyn parantumisenä. Saavutetut parannukset nykyisten matkaviestintaaajuuksien läpäisyssä yksittäiseen metallipinnoitettuun lasiin verrattuna olivat parhaimmillaan yksinkertaiselle ja kaksinkertaiselle kuusikulmiolle noin 15 dB, ja kaksinkertaisille neliöille noin 10 dB – 15 dB. Läpäisy myös heikkenee hieman näistä arvoista korkeammilla taajuuksilla. Työssä tutkittiin simuloinnalla pelkkiä eristyslaseja, mutta kuvioinnit valmistettiin mallin pohjalta sellaisinaan myös yksittäisille on-line -pinnoitetuille laseille. Lisätutkimuksena voisi mallintaa myös yksittäistä ruutua ja tutkia voisiko kuviota jotenkin optimoida erikseen tälle lasityypille.

Kun ikkunarakennetta tarkastellaan puolestaan kolme lasia käsittävän kokonaisuutena, saattaa kuvioimattomilla matalan emissiviteetin laseilla toteutetun ikkunan vaimennus olla jopa noin 30–40 dB, jota pystytään mitatuilla kuvioiduilla laseilla parantamaan noin 7 dB – 26 dB taajuuskaistalla 800 MHz – 3,5 GHz. Kolminkertaisten lasirakenteiden tapauksessa signaalin läpäisyssä tapahtuu kuitenkin ilmiö, jossa lasien vaimennuskäyriin muodostuu suunnittelutaajuuksista poikkeavia läpäisyn huippukohtia ja vastaavasti läpäisy on heikompi näiden piikkien välissä. Näiden huippukohtien synty vaatii lisätutkimuksia, mutta tutkimushetkellä vaikuttaisi, että huippuja aiheuttaa signaalin edestakainen heijastuminen kerroksittaisessa rakenteessa. Tätä voitiin havainnoida käytännössä muuttamalla eristyslasipaketin ja yksittäisen lasin välistä etäisyyttä, joka aiheutti huippujen paikkojen siirtymistä taajuusakselilla. Huippujen siirtyminen eri taajuuksille vaikuttaa merkittävästi lasin vaimennukseen ja signaalin läpäisyyn taajuusaluekohtaisesti. Läpäisyä tulisikin seuraavaksi tutkia oikealle ikkunarakenteelle todellisilla mittasuhteilla. Lisätutkimuksena voisi tutkia käytännössä myös, miten tulokulma vaikuttaa lasin läpäisyyn erityisesti kerroksittaisessa rakenteessa. Tilannetta voisi myös tutkia todellisessa kohteessa, jossa voitaisiin käyttää todellisia ikkunoita.

Yleisellä tasolla kuvioinnin vaikutuksia lasirakenteen U-arvoon arvioitiin tarkastelemalla sitä, kuinka paljon metallipinnoitteista pintaa lasista poistetaan. Kirjallisuuslähteiden mukaan pidettäessä poistettava pinta-ala maltillisena lasin kokonaispinta-alaan suhteutettuna, ovat vaikutukset U-arvoon varsin vähäiset. Jos ainoastaan vähäisillä vaikutuksilla U-arvoon kyetään saavuttamaan merkittävästi parantunut RF-läpäisy, on kuvioinnissa oikeasti järkeä. Lopulliset vaikutukset U-arvoon tulisi ehdottomasti kuitenkin varmentaa lisätutkimuksin.

Silmämääräiset tarkastelut osoittivat, ettei kuviointi näyttäyty lasissa visuaalisesti kovin häiritsevänä tekijänä, ja onkin havaittavissa vain sopivaa taustaa vasten tai sopivissa valoisuusolosuhteissa. Kuvioiden tarkempaa vaikutusta lasin ulkonäköön tai optisiin ominaisuuksiin voitaisiin arvioida esimerkiksi tarkastelemalla lasia luonnollisessa asennusympäristössä ja erilaisissa valaistusolosuhteissa, tai käyttää muuta soveltuvaa koejärjestelyä.

Kuvioitujen lasien valmistamisen kustannustehokkuutta tai vaikutuksia lopullisen lasituotteen hintaan ei työssä arvioitu. Lasin kuviointi lisää lasien valmistusprosessiin yhden ylimääräisen vaiheen, jossa lasin pinnasta poistetaan metallikerros kuvioinnin alueelta esimerkiksi laservalolla. Kustannuksia aiheutuu esimerkiksi työstä, laitteistosta ja koneista, prosessoinnista sekä mahdollisista muista epäsuorista kuluista. Tämän vaiheen ajankulutus ja kustannukset riippuvat käytettävissä olevasta laitteistosta ja myös muusta tuotantolinjaston välineistöstä. Tästä syystä lopullisia kustannuksia tulisikin arvioida vielä lisätutkimuksin.

LÄHTEET

- [1] America's Climate Choices: Panel on Advancing the Science of Climate Change; National Research Council, 2010. Advancing the Science of Climate Change. Washington, D.C.: The National Academies Press.
- [2] COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS A policy framework for climate and energy in the period from 2020 to 2030 [verkkojulkaisu]. 22.1.2014, [viitattu: 7.3.2018]. Saatavissa: <http://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/ALL/?uri=CELEX:52014DC0015>
- [3] Suomen virallinen tilasto (SVT): Kasvihuonekaasut, verkkojulkaisu. 2016, Suomen kasvihuonekaasupäästöt 2016. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 7.3.2018]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/khki/2016/khki_2016_2017-05-24_kat_001_fi.html
- [4] Suomen virallinen tilasto (SVT): Energian hankinta ja kulutus, verkkojulkaisu. 4. vuosineljännes 2016, Liitekuvio 14. Energian loppukäyttö sektoreittain 2016*. Helsinki: Tilastokeskus [viitattu: 7.3.2018]. Saatavissa: http://www.stat.fi/til/ehk/2016/04/ehk_2016_04_2017-03-23_kuv_014_fi.html
- [5] Niemelä J., Asp A., Sydorov Y. Radiosignaalin vaimennusmittauksia nykyaikaisissa asuintaloissa, Loppuraportti, Tampere: Tampereen teknillinen yliopisto, Tietoliikennetekniikan laitos, 2012, 61 s.
- [6] Rainamo M., Riikonen M. Lasirakentajan käsikirja, Enterpress Oy, Tampere, Suomi, 1999, 151 s.
- [7] Seppänen R., Kervinen M., Parkkila I., Karkela L., Meriläinen P. MAOL-Taulukot, Kustannusosakeyhtiö Otava, Helsinki, Suomi, 2.-6. painos, 2008
- [8] Young H. D., Freedman R. A., Sears F. W. Sears and Zemansky's university physics: with modern physics, 11th ed., San Francisco, CA, Pearson Addison-Wesley, 2003
- [9] American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers. 2013 ASHRAE Handbook - Fundamentals (SI Edition), 2013 [viitattu: 19.3.2018]. Saatavissa: <https://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpASHRAEC1/ashrae-handbook-fundamentals/ashrae-handbook-fundamentals>

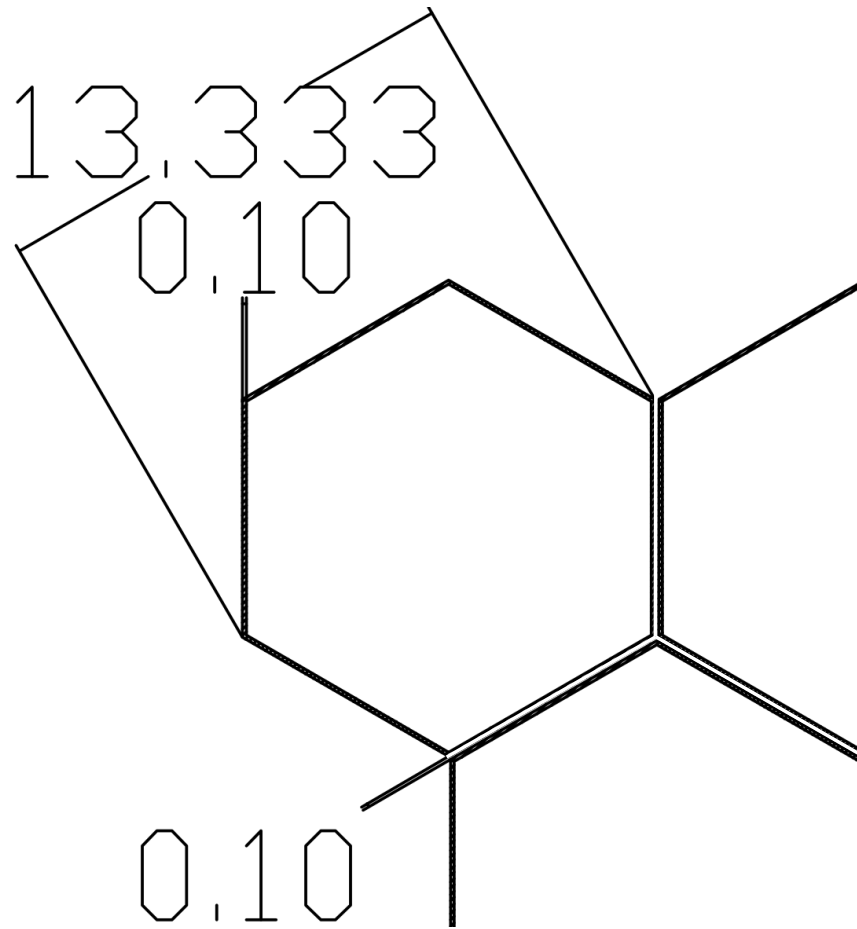
- [10] Ympäristöministeriön asetus uuden rakennuksen energiatehokkuudesta, 1010/2017, 27.12.2017 [viitattu: 9.4.2018]. Saatavissa: http://www.ym.fi/fi-FI/Maankaytto_ja_rakentaminen/Lainsaadanto_ja_ohjeet/Rakentamismaarayskoelma/Energiatehokkuus
- [11] Metal prices, Stock Market Watch, Stock Market News, 2018, verkkosivu [viitattu: 9.4.2018]. Saatavissa: <http://thestockmarketwatch.com/metal/prices.aspx>
- [12] Lasitietoa, Lasisanasto, Suomen Tasolasiyhdistys ry, 2018, verkkosivu [viitattu: 9.4.2018]. Saatavissa: <https://www.tasolasiyhdistys.fi/lasitietoa/>
- [13] Bansal N. P., Doremus R. H. Handbook of glass properties, Academic Press, USA, 1986
- [14] Sohail S.I., Kiani G. I., Esselle K. P. Enhancing RF/microwave efficient transmission through energy saving glass windows using frequency selective surface, 2011 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation (APSURSI), Spokane, WA, USA, pp. 2262-2263, 2011, doi: 10.1109/APS.2011.5996967
- [15] Kiani G. I., Karlsson A., Olsson L., Esselle K. P. Glass Characterization for Designing Frequency Selective Surfaces to Improve Transmission through Energy Saving Glass Windows, Asia-Pacific Microwave Conference, Bangkok, pp. 1-4, 2007, doi: 10.1109/APMC.2007.4554974
- [16] Gustafsson M., Karlsson A., Pontes Rebelo A. P., Widenberg B. Design of Frequency Selective Windows for Improved Indoor Outdoor Communication, Technical Report LUTEDX/(TEAT-7132)/1-14/(2005), Vol. TEAT-7132, Department of Electrosience, Electromagnetic Theory, Lund Institute of Technology, 2005, 14 p. [viitattu: 23.7.2018]. Saatavissa: <http://lup.lub.lu.se/search/ws/files/6201933/624831.pdf>
- [17] Maxwell J. C. A dynamical theory of the electromagnetic field, Philosophical Transactions of the Royal Society of London, vol. 155, pp. 459–512, 1865, doi:10.1098/rstl.1865.0008
- [18] Pozar D. M. Microwave engineering, 4th ed., Wiley, Hoboken, NJ, USA, 2012
- [19] Reitz J. R., Milford F. J., Christy R. W. Foundations of Electromagnetic Theory, 4th ed., Addison-Wesley, Reading, MA, USA, 1992
- [20] Baniya A. Assessment of Frequency Selective Surface for Improving Indoor Cellular Coverage, Master's thesis, Tampere University of Technology, 2014, 70 p. Saatavissa: <http://URN.fi/URN:NBN:fi:tty-201408211369>

- [21] Saunders S. R., Aragón-Zavala A. Antennas and propagation for wireless communication systems, 2nd ed., Wiley, Chichester, UK, 2007
- [22] Wu T. K., Frequency selective surface and grid array. Wiley–Interscience, New York, USA, 1995
- [23] Tolstrup M. Indoor radio planning: A practical guide for GSM, DCS, UMTS, HSPA and LTE, 2nd ed., Wiley, Somerset, UK, 2011
- [24] Frenkiel R.H., Nokia Bell Labs, Cellular radiotelephone system structured for flexible use of different cell sizes, Pat. US 4144411A, 22.9.1976. Saatavissa: <https://patents.google.com/patent/US4144411>
- [25] Sauter M. From GSM to LTE-Advanced Pro and 5G An Introduction to Mobile Networks and Mobile Broadband, 3rd ed., John Wiley & Sons, Newark, NJ, USA, 2017
- [26] Radiolupapäätökset, Matkaviestinoperaattorit ja matkaviestinverkot, Viestintävirasto, 2018, verkkosivu [viitattu: 21.3.2018]. Saatavissa: <https://www.viestintavirasto.fi/ohjausjavalvonta/laitmaarayksetpaatokset/lupapaaatokset/radiolupapaatokset.html>
- [27] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 1: Range 1 Standalone (Release 15), 3GPP TS 38.101-1 V15.3.0 (2018-09), 198 p. [viitattu: 11.10.2018]. Saatavissa: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3283>
- [28] 3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; NR; User Equipment (UE) radio transmission and reception; Part 2: Range 2 Standalone (Release 15), 3GPP TS 38.101-2 V15.3.0 (2018-09), 106 p. [viitattu: 11.10.2018]. Saatavissa: <https://portal.3gpp.org/desktopmodules/Specifications/SpecificationDetails.aspx?specificationId=3284>
- [29] Suomi 5G-kärkimaaksi: Taajuushuutokauppa päätynyt, Viestintävirasto, tiedote, julkaistu 1.10.2018, verkkosivu [viitattu: 11.10.2018]. Saatavissa: <https://www.viestintavirasto.fi/viestintavirasto/ajankohtaista/2018/suomi5g-karkimaaksिताajuushuutokauppapaattynyt.html>

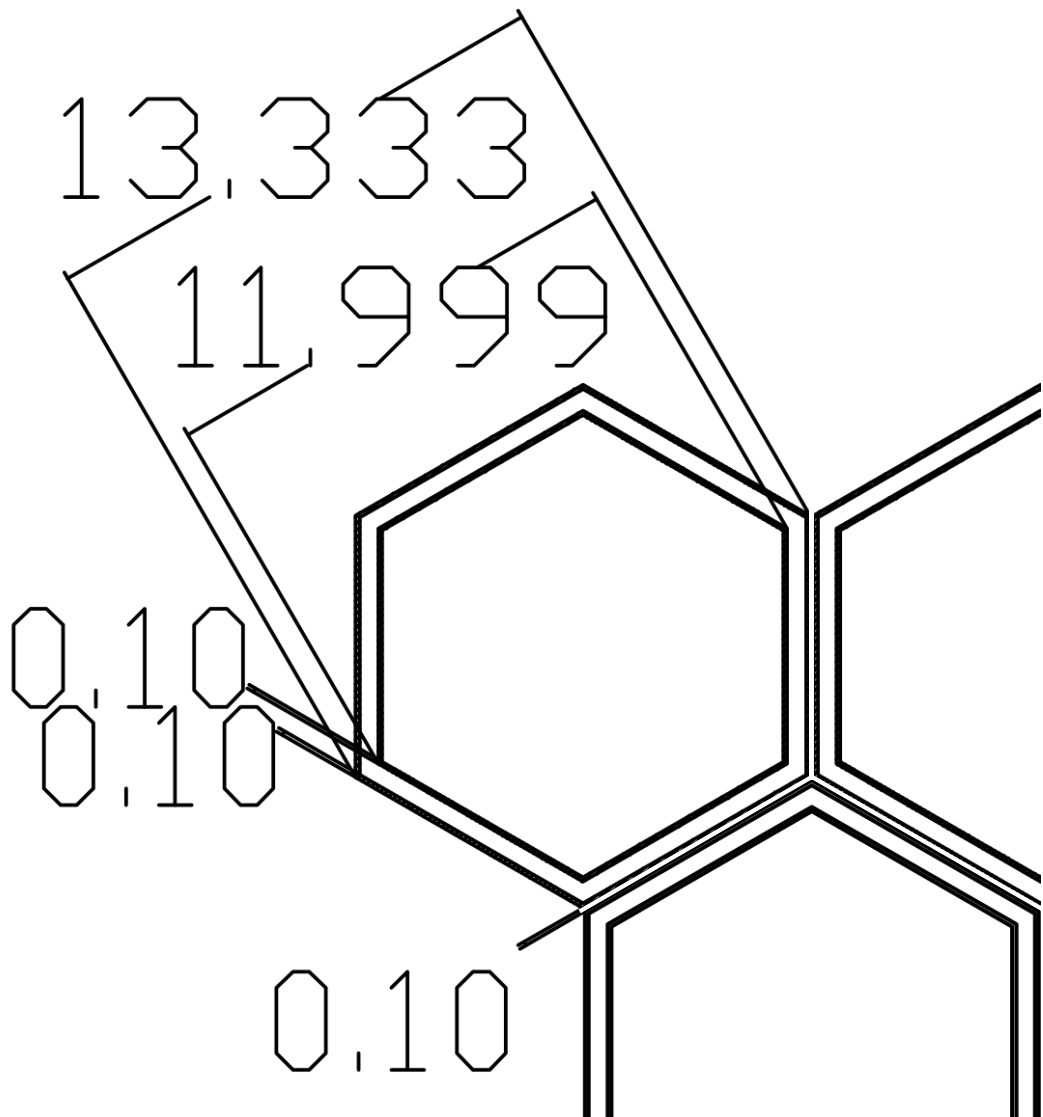
- [30] Asp A., Sydorov Y., Valkama M., Niemelä J. Radio signal propagation and attenuation measurements for modern residential buildings, 2012 IEEE Globecom Workshops, Anaheim, CA, USA, 2012, pp. 580-584, doi: 10.1109/GLOCOMW.2012.6477638
- [31] Mattila, M. Matkaviestinverkon kuuluvuusratkaisuihin varautuminen rakennuksen suunnitteluvaiheessa, insinööriyö, Sähkötekniikan koulutusohjelma, Metropolia Ammattikorkeakoulu, 2018, 30 s. Saatavissa: <http://urn.fi/URN:NBN:fi:amk-201804164784>
- [32] Narayan S., Jha R. M. Electromagnetic Techniques and Design Strategies for FSS Structure Applications [Antenna Applications Corner], IEEE Antennas and Propagation Magazine, vol. 57, no. 5, pp. 135-158, 2015, doi: 10.1109/MAP.2015.2474867
- [33] Thuillier G., Hersé M., Labs D., Foujols T., Peetermans W., Gillotay D., Simon P. C., Mandel H. The Solar Spectral Irradiance from 200 to 2400 nm as Measured by the SOLSPEC Spectrometer from the Atlas and Eureka Missions, Solar Physics, v. 214, Issue 1, p. 1-22, 2003, doi:10.1023/A:1024048429145
- [34] Dewani A. A., O'Keefe S. G., Thiel D. V., Galehdar A. Window RF Shielding Film Using Printed FSS, IEEE Transactions on Antennas and Propagation, vol. 66, no. 2, pp. 790-796, 2018, doi: 10.1109/TAP.2017.2780893
- [35] Itoh, T. Periodic Structures for Microwave Engineering, verkkosivu [viitattu: 12.7.2018]. Saatavissa: http://www.ebrahimforati.com/Floquet_Itoh.pdf
- [36] Maurizio B. Periodic Structures, Encyclopedia of RF and Microwave Engineering, John Wiley & Sons, 2005, doi: 10.1002/0471654507.eme306
- [37] Munk B. A. Frequency selective surfaces: Theory and design, John Wiley & Sons, USA, 2005, 440 p.
- [38] Munk B. A. Finite antenna arrays and FSS, John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 2005, doi:10.1002/0471457531
- [39] Kraus J. D., Marhefka R. J. Antennas: For all applications, 3rd ed., McGraw-Hill, Boston, MA, USA, 2002
- [40] Narayan S., Sangeetha B., Jha R.M. Frequency Selective Surfaces based High Performance Microstrip Antenna, Springer Singapore, 2016, 45 p., doi: 10.1007/978-981-287-775-8

- [41] Fowler, M. Modeling a Complementary Split Ring Resonator with Ease, Comsol blog, 2014, verkkoaineisto, [viitattu: 1.5.2018]. Saatavissa <https://www.comsol.com/blogs/modeling-complementary-split-ring-resonator-ease/>
- [42] Sung, H-H. Frequency selective wallpaper for mitigating indoor wireless interference, PhD Thesis, The University of Auckland, 2006. Saatavissa: <http://hdl.handle.net/2292/3071>
- [43] Comsol Frequency Selective Surface Simulator Application (Application ID 24371), verkkoaineisto, [viitattu: 1.5.2018]. Saatavissa: <https://www.comsol.fi/model/frequency-selective-surface-simulator-24371>
- [44] Bergström K., Sunner S. The Relative Permittivity of Argon, Carbon Dioxide, and Hydrogen, Determined at 10 kHz Using a Transformer Bridge Method, *Physica Scripta*, vol. 13, no. 1, pp. 51, 1976, doi:10.1088/0031-8949/13/1/007
- [45] Hector, L. G., Schultz H. L. The Dielectric Constant of Air at Radiofrequencies, *American Institute of Physics, Physics*, vol. 7, no. 4, pp. 133–136, 1936, doi:10.1063/1.1745374.
- [46] Finnglass Oy, Alavus. Avautuvapuitteisen alumiiniverhoillun puualumiinikkunan U-arvon määrittäminen kahdella eri sisälasiratkaisulla, TESTAUSSELOSTE Nro VTT-S-06946-17, 2017, 7s. [ei julkinen]
- [47] Bouvard, O., Lanini, M., Burnier, L., Witte, R., Cuttat, B., Salvadè, A., Schüler, A. Mobile communication through insulating windows: A new type of low emissivity coating. *Energy Procedia*, 122, pp. 781-786., 2017, doi:10.1016/j.egypro.2017.07.396
- [48] Bouvard O., Lanini M., Burnier L., Witte R., Cuttat B., Salvadè A., Schüler A. Structured transparent low emissivity coatings with high microwave transmission, *Applied Physics A*, vol. 123, no. 1, pp. 66, 2016, doi: 10.1007/s00339-016-0701-8
- [49] Burnier L., Lanini M., Bouvard O., Scanferla D., Varathan A., Genoud C., Marguerit A., Cuttat B., Dury N., Witte R., Salvadè A., Schüler A. Energy saving glazing with a wide band-pass FSS allowing mobile communication: up-scaling and characterisation, *IET Microwaves, Antennas Propagation*, vol. 11, no. 10, pp. 1449–1455, 2017, doi: 10.1049/iet-map.2016.0685
- [50] Saukko T., toimitusjohtaja, Finnglass Oy, Alavus. Tajuusselektiivisen kuvioinnin piirustukset. Haastattelu 26.3.2018

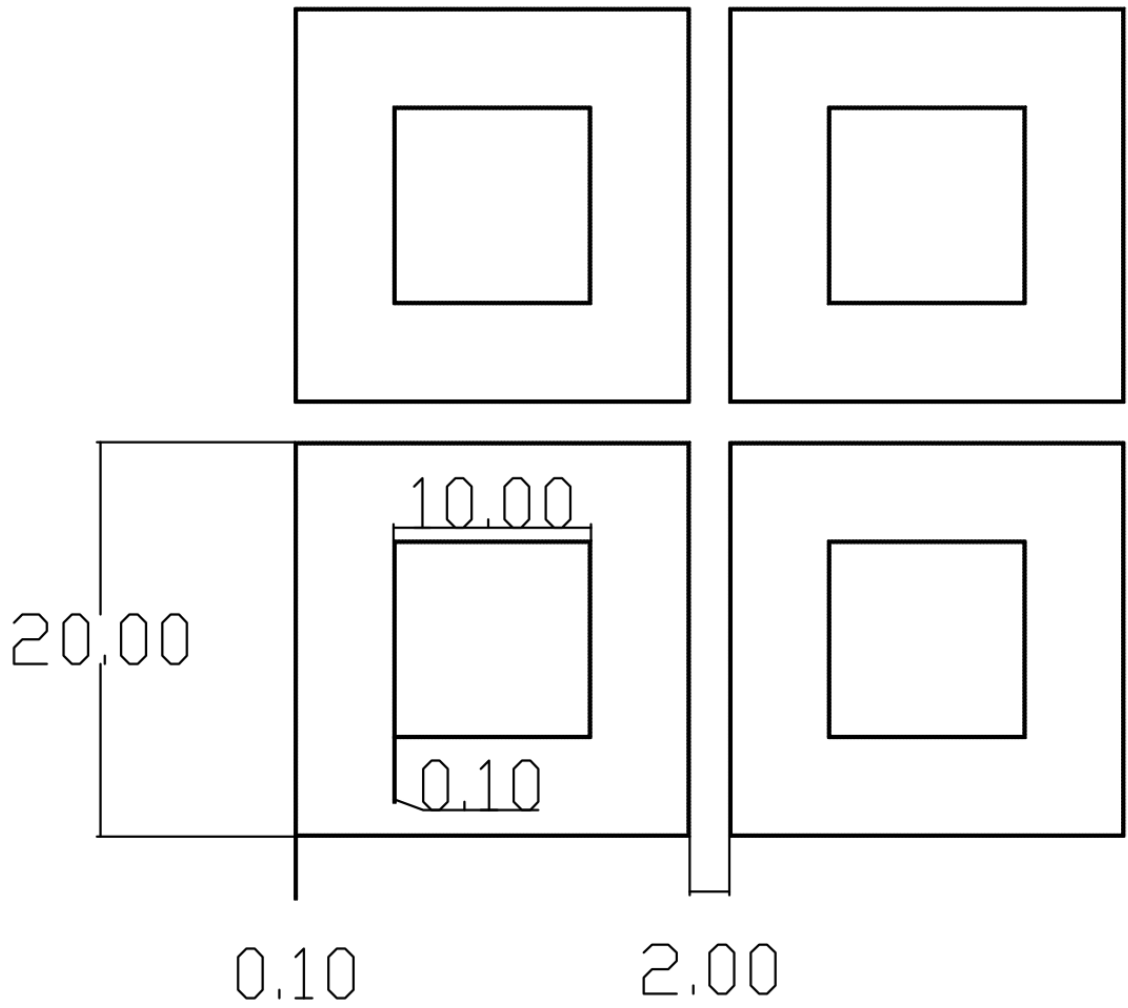
LIITE A: SUUNNITELLUT TAAJUUSSELEKTIIVISET KUVIOT



Kuva A.1: Yksinkertaisen kuusikulmion dimensiot ja etäisyys muista kuusikulmioista [mm]. Halkaisijat ovat ulkohalkaisijoita.

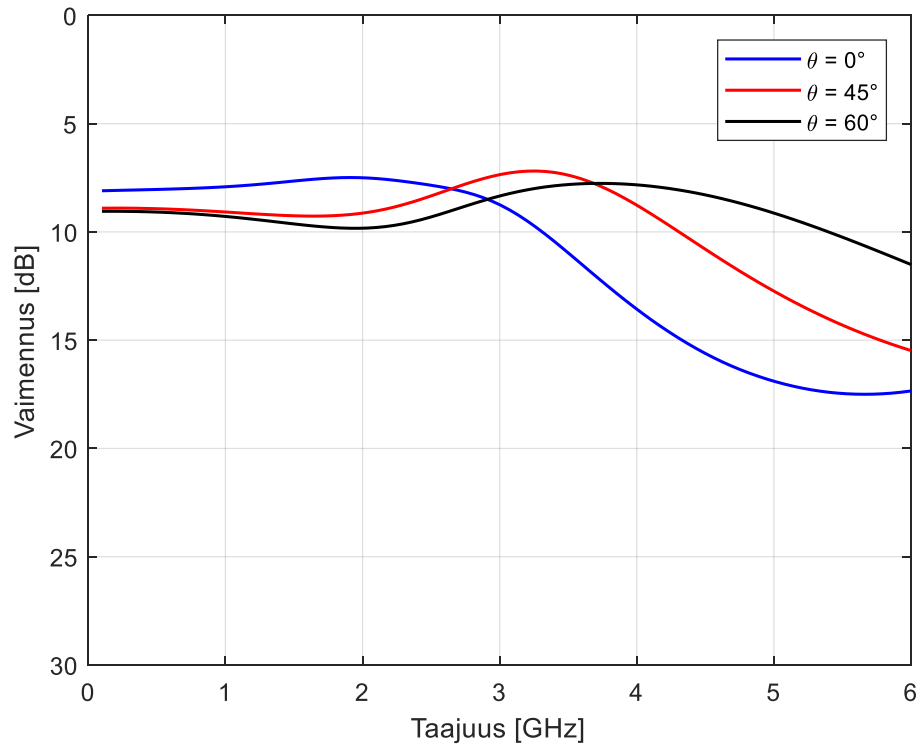


Kuva A.2: Kaksinkertaisen kuusikulmion dimensiot ja etäisyys muista kuusikulmioista [mm]. Halkaisijat ovat ulkohalkaisijoita.

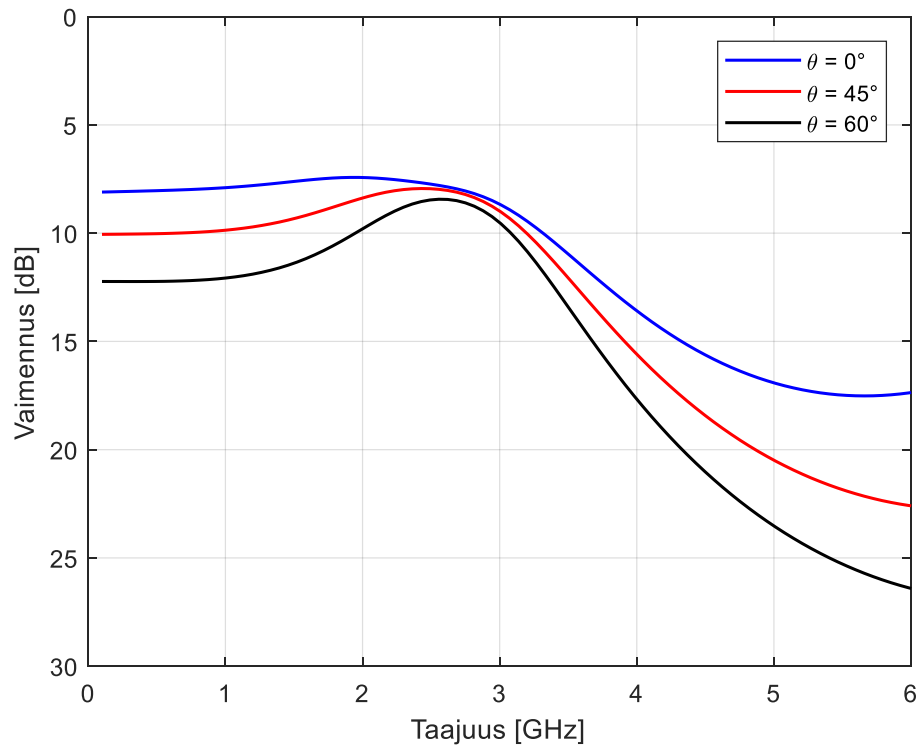


Kuva A.3: Kaksinkertaisen neliön dimensiot ja etäisyys muista neliöistä [mm]. Halkaisijat ovat ulkohalkaisijoita.

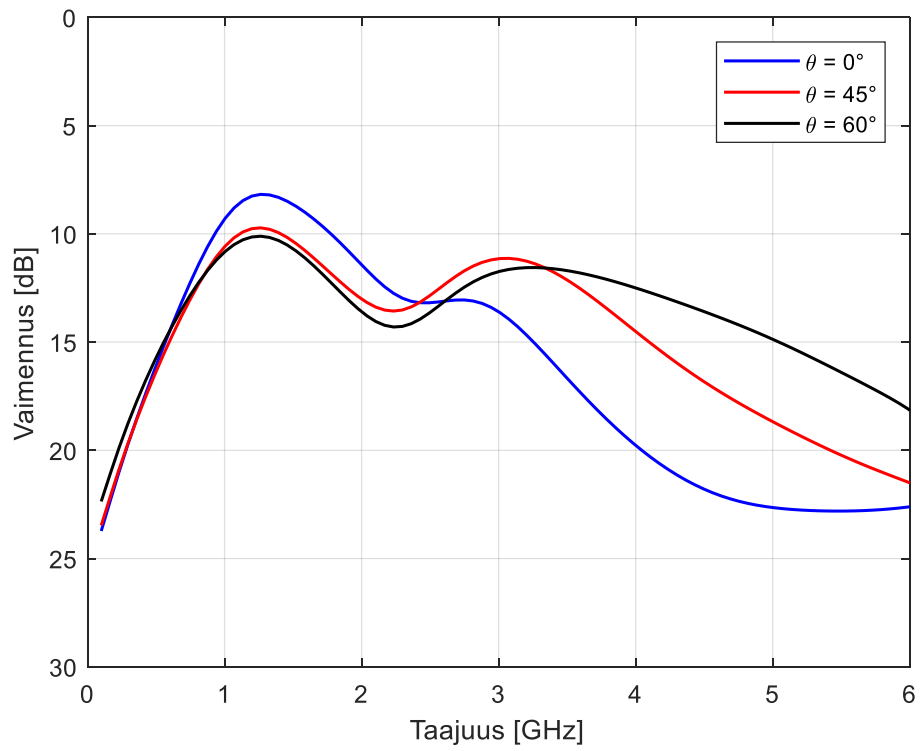
LIITE B: SIMULOINTITULOKSIA ERI TULOKULMILLA



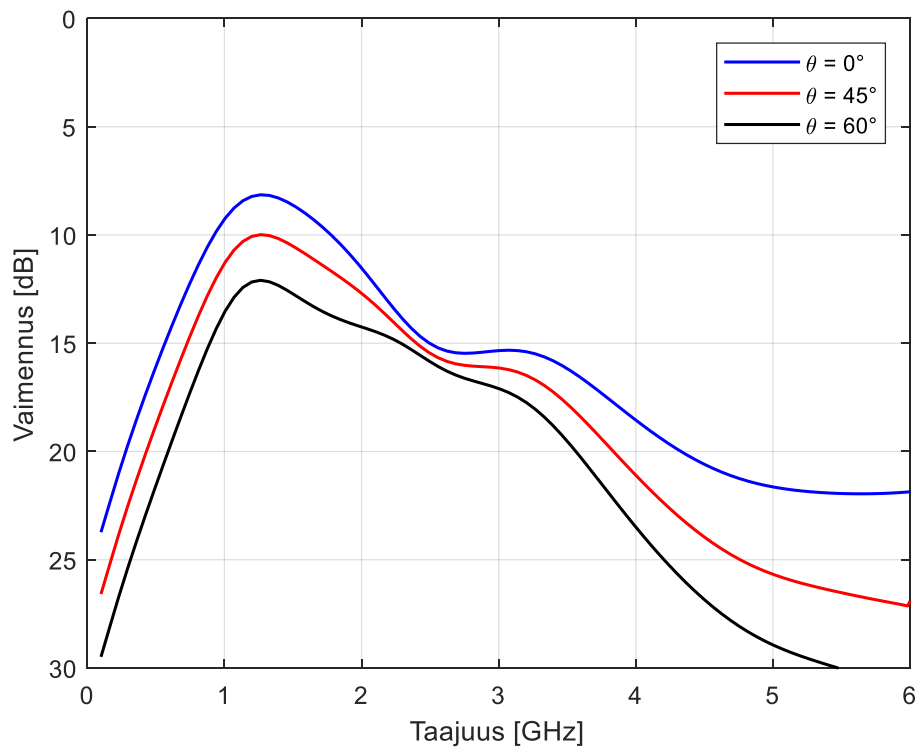
Kuva B.1: Kaksinkertainen kuusikulmio (TM-polarisaatio).



Kuva B.2: Kaksinkertainen kuusikulmio (TE-polarisaatio).



Kuva B.3: Kaksinkertainen neliö (TM-polarisaatio).



Kuva B.4: Kaksinkertainen neliö (TE-polarisaatio).