



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO
TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

JANNE RINNE
MATERIAALIEN ATTENUAATIO
Kandidaatintyö

Tarkastaja:
Jarno Jokinen

TIIVISTELMÄ

Tampereen teknillinen yliopisto

Materiaalitekniikan koulutusohjelma

RINNE, JANNE: Materiaalien attenuaatio

Kandidaatintyö, 19 sivua

Heinäkuu 2018

Pääaine: Materiaalitekniikka

Tarkastaja: Jarno Jokinen

Avainsanat: attenuaatio, sähkömagneettinen säteily, mikroaallot

Sähkömagneettiseen säteilyyn luetaan kaikkien fotonien liike. Työssä käsitellään sähkömagneettisen säteilyn eri aallonpituuksia ja eri materiaalien attenuaatiota. Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuksilla on hyvin erilainen vaikutus sitä kohtaavan materiaalin kanssa. Työssä tarkastellaan attenuaatioon vaikuttavia asioita, kuten materiaalin dielektrisyttä tai magneettisuutta. Työssä on selvitetty miten sähkömagneettinen säteily ja erityisesti mikroaallot läpäisevät erilaisia materiaaleja. Tarkasteltavia materiaaleja ovat metallit, polymeerit, rakennusmateriaalit ja luonnon materiaalit. Säteilyn attenuaatiolla on merkitystä esimerkiksi matkapuhelimien kuuluvuuteen. Tällä hetkellä kehitteillä oleva entistä nopeampi 5G-verkko toimii korkeammalla taajuudella kuin tämän hetkinen 4G-verkko. Korkeamman taajuuden 5G:llä on paljon heikompi kantavuus ja materiaalien läpäisevyys verrattuna nykyiseen hitaampaan yhteyteen. Tämän takia materiaalien attenuaatiota on tärkeää tutkia.

ABSTRACT

Technical University of Tampere
Materials Science training program
RINNE, JANNE: Attenuation of Materials
Bachelor's thesis, 19 pages
July 2018
Major: Materials Science
Examiner: Jarno Jokinen
Keywords: attenuation, electromagnetic radiation, microwaves

The concept of electromagnetic radiation includes the movement of all photons. This bachelor's thesis focuses on different types of electromagnetic radiation and the attenuation of different materials. The effect of electromagnetic radiation is very different depending on the radiation's wavelength and the material. The thesis focuses on issues affecting attenuation, such as dielectricity or magnetism in the material. The thesis examines how especially microwaves penetrate different materials. The materials examined include metals, polymers, building materials and natural materials. The attenuation of radiation is important, for example, in the service area of mobile phones. The ever faster 5G network currently being developed operates at a higher frequency than the current 4G network. Higher frequency 5G has much lower load capacity and material permeability compared to the current slower connection. Therefore, it is important to study the attenuation of materials.

ALKUSANAT

Tämä kandidaatintyö on tehty Tampereen teknillisen yliopiston materiaaliopin laitokselle. Kiitän ohjaaja Jarno Jokista perusteellisesta ohjauksesta ja hyvistä kandidaatintyön sisältöön liittyvistä neuvoista. Haluan kiittää myös aikaisempaa ohjaajaani Sanna Siljan-deria kandidaatintyön aiheen ja sisällön valinnassa. Kandidaatintyö tehtiin kevään 2017 ja kesän 2018 välisenä aikana.

Tampereella, 25.07.2018

Janne Rinne

SISÄLLYSLUETTELO

1.	JOHDANTO	1
2.	SÄHKÖMAGNEETTINEN SÄTEILY.....	2
2.1	Sähkömagnetismin perusteet.....	2
2.2	Näkyvä valo.....	3
2.3	Sähkömagnetismia kuvaavat perusyhtälöt	3
2.4	Faradayn häkki	4
3.	ATTENUAATIO	5
3.1	Mikroaallot.....	5
3.2	Sironta	6
3.3	Materiaalin dielektrisyysvaikutus	8
4.	RAKENNEMATERIAALIEN VAIKUTUS.....	11
4.1	Metallit	12
4.2	Polymeerit	12
4.3	Luonnon materiaalit	13
5.	SEOSAINEIDEN VAIKUTUS	14
6.	YHTEENVETO	17
	LÄHTEET.....	18

1. JOHDANTO

Sähkömagneettiseen säteilyyn luetaan kaikkien fotonien liike. Fotonien energiat ja aallonpituudet vaihtelevat merkittävästi. Tässä työssä perehdytään eniten mikroaaltoihin. Mikroaallot ovat korkeataajuisia sähkömagneettisia aaltoja, joita käytetään hyödyksi elektroniikassa. Tunnetuin mikroaaltoja hyödyntävä elektroninen laite on mikroaaltouuni. Mikroaaltouunin vaikutus perustuu ruuassa olevien poolisten molekyylien rotaatioon, joka aiheuttaa ruuan lämpenemisen. Mikroaaltoja käytetään myös verkkoyhteyksiä välittävinä aaltoina. Työssä pohditaan mikroaaltojen penetraatiosyvyyttä eri materiaaleissa, eli miten pitkälle aallot tunkeutuvat materiaalissa. Tämän avulla saadaan selville, miten hyvin ruoka lämpenee mikroaaltouunissa ja miten verkkoyhteys läpäisee eri materiaaleja. Mikroaaltoja absorboivia materiaaleja tarvitaan paljon. Armeijan tarpeisiin esimerkiksi absorboiva pintamateriaali panssarivaunussa tai laivassa saa ne näkymään huommin tutkassa. Eri tutkien käyttämä taajuusalue on todella laaja. Tämän takia on erittäin tärkeää, että materiaali absorboi mikroaaltoja suurelta taajuusväliltä. Siviilikäyttökohteista tärkein on elektronisten laitteiden suojaaminen ulkopuoliselta säteilyltä.

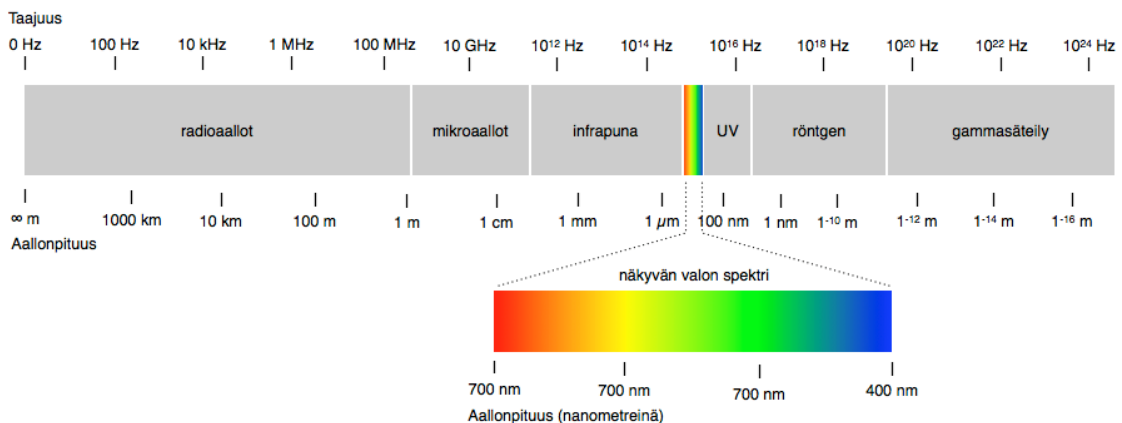
Attenuaatio kuvaa ääniäallan, valoäallan tai säteilyn vaimenemista väliaineessa. Pääasiassa keskitytään siihen, miten sähkömagneettinen säteily ja erityisesti mikroaallot läpäisevät erilaisia materiaaleja. Näitä materiaaleja ovat metallit, polymeerit, rakennusmateriaalit ja luonnon materiaalit. Attenuaatio on samoillakin materiaaleilla hyvin erilaista. Materiaalin väri, olomuoto ja tiheys vaikuttavat siihen, miten aallot vaimenevat väliaineessa. Esimerkiksi ääni kulkee parhaiten kiinteässä, kun taas valo ja säteily kulkevat parhaiten esteettömässä tilassa.

Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuksilla on hyvin erilainen vaikutus sitä kohtaavan materiaalin kanssa. Työssä käsitellään sähkömagneettisen säteilyn eri aallonpituuksia ja sitä, miten hyvin erilaiset materiaalit absorboivat niitä. Työssä pohditaan myös absorptioon vaikuttavia asioita, kuten materiaalin dielektrisyttä tai magneettisuutta. Tällä hetkellä kehitteillä oleva, entistä nopeampi 5G-verkko toimii korkeammalla taajuudella kuin tämän hetkinen 4G. Työssä käsitellään muun muassa sitä, miten paljon heikompi kantavuus ja materiaalien läpäisevyys korkeamman taajuuden verkkoyhteydellä on verrattuna nykyiseen, hitaampaan yhteyteen.

2. SÄHKÖMAGNEETTINEN SÄTEILY

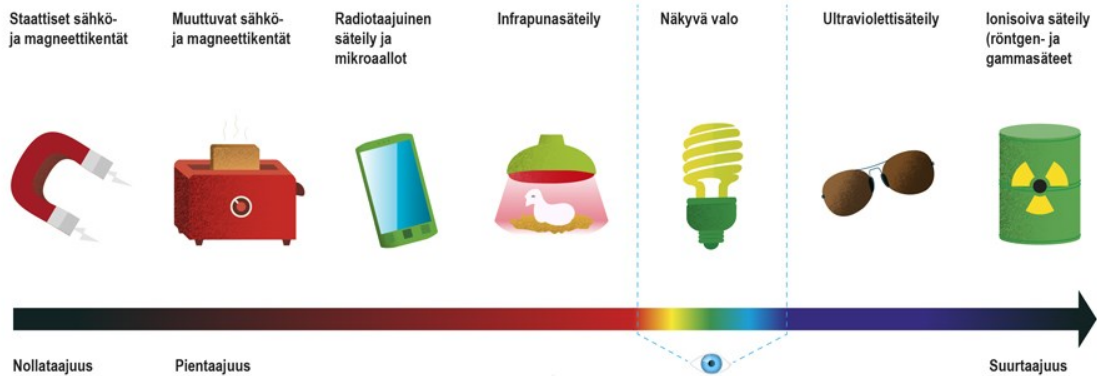
2.1 Sähkömagnetismin perusteet

Sähkömagneettiseen säteilyyn kuuluu paljon muitakin kuin valo. Kuvassa 1 on esitetty sähkömagneettinen spektri. Matkapuhelinverkot perustuvat korkeataajuuksiin radioaaltoihin sekä mikroaaltoihin. Esteet pysäyttävät aallot vaihtelevasti eri taajuusalueilla. Esimerkiksi valo pysähtyy helposti mihin tahansa värilliseen esteeseen, mutta gammasäteilyn pysäyttäminen vaatii tiheän lyijylevyn.



Kuva 1. Sähkömagneettisen säteilyn spektri, [1]

Eri sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuksilla on hyvin erilainen vaikutus sitä kohtaavan materiaalin kanssa. Esimerkiksi ihmisen läpi radioaallot kulkevat helposti. Lyhyillä aallonpituuksilla ihminen ja muut esteet absorboivat säteilyä tehokkaasti. Esimerkiksi ultraviolettisäteily pysähtyy jo ihon uloimpaan kerrokseen. Kuvasta 2 nähdään, miten sähkömagneettisen säteilyn vaikutus muuttuu eri aallonpituuksilla. Röntgensäteitä käytetään luunmurtumien kuvaukseen. Ne eivät absorboidu ihoon ja lihaksiin tehokkaammin, vaan huonommin kuin näkyvä valo. Tämä johtuu siitä, etteivät samat absorptiomekanismit päde röntgensäteilylle. Röntgensäteilyn energia on niin suuri, etteivät ihon ja lihaskudoksen molekyylit pysty absorboimaan sitä. [3]



Kuva 2. Sähkömagneettisen säteilyn aallonpituusalueiden vaikutus [2]

2.2 Näkyvä valo

Valo on ihmisille tutuin sähkömagneettisen säteilyn muoto. Sen liikettä on todella helppo häiritä, vaikka valon nopeus tyhjiössä on korkea $2,99 \times 10^8$ m/s. Valon eteneminen väliaineeseen estyy helposti jo pintakerroksessa, mutta väliaineeseen päästessäänkin se etenee hitaammin. Hidastumisen vuoksi valo taittuu rajapinnassa. Valon attenuaatioon väliaineessa liittyy olennaisesti absorbanssi. Se aiheuttaa valon intensiteetin vähenemistä. Valo, joka ei absorboitu, pääsee läpi ja sitä kutsutaan transmittanssiksi Lambert–Beerin lain eli kaavan (1) mukaan.

$$T = \frac{I}{I_0} = 10^{-A}, \quad (1)$$

jossa T on transmittanssi, I on valon intensiteetti väliaineessa, I_0 valon intensiteetti ilmassa ja A valon absorbanssi väliaineessa. Absorbanssia hyödynnetään erityisesti spektroskopiassa liuoksessa olevien väriaineiden pitoisuuden selvittämiseen. [4]

2.3 Sähkömagnetismia kuvaavat perusyhtälöt

Sähkömagnetismia kuvataan Planckin teorialla. Se on

$$E = hf, \quad (2)$$

jossa h on Planckin vakio, E on säteilyn energia ja f sen taajuus. Sen mukaan kaikki sähkömagneettinen säteily on kvanttiintunutta ja esiintyy tietyn suuruisina energiapakkauksina, fotoneina [3]. Esimerkiksi aallonpituudeltaan 450 nm sinisen valon energia on 2,76 eV. Fotoni ei voi olla puolittunut, jolloin sen energia on vakio. Tosin fotoneita voi olla enemmän tai vähemmän. Tästä seuraa, että mikäli säteilyn energia ei osu sopivasti kohtaavan materiaalin absorboitusmekanismin kanssa, absorptiota ei

tapahdu. Esimerkiksi röntgensäteily absorboituu luihin, mutta ei muihin kudoksiin, koska se ei saa kudoksen atomeja virittymään.

Maxwellin yhtälöillä voidaan laskea sähkömagneettisten kenttien ominaisuuksia. Yhtälöihin kuuluvat Gaussin lait $\nabla \cdot D = \rho$ ja $\nabla \cdot B = 0$. Ne kertovat sähkökentän ja magneettikentän käyttäytymisestä. Näiden lisäksi tarvitaan Faradayn laki

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t}, \quad (3)$$

joka kertoo, että sähkömagneettisen kentän voimakkuuden voi laskea magneettikentän muutoksesta. Tähän liittyy myös Ampèren laki ja Maxwellin lisäys

$$\nabla \times H = J + \frac{\partial D}{\partial t}, \quad (4)$$

jossa Ampère päätteli magneettikentän voimakkuuden olevan riippuvainen virrantiheydestä. Maxwell lisäsi tähän sähkövuon tiheyden muutoksen. Maxwellin yhtälöistä on erilaisia muotoja. Nämä muodot pätevät nimenomaan sähkömagneettiseen aaltoon väliaineessa. Eri suureet saadaan rinnastettua Maxwellin toisiin yhtälöihin kaavoilla $D = \epsilon E$, $B = \mu H$ ja $J = \sigma E$. Kaikissa edellä mainituissa yhtälöissä D on sähkövuon tiheys, ρ varausitiheys, B magneettivuon tiheys, E sähkökentän voimakkuus, H magneettikentän voimakkuus, J virrantiheys, ϵ väliaineen dielektrisyys, μ magneettikentän permeiteivisyys sekä σ sähkönjohtavuus [5, s. 15].

2.4 Faradayn häkki

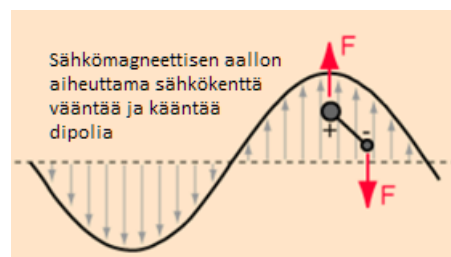
Faradayn häkki attenuoi erittäin tehokkaasti sähkömagneettista säteilyä ja sähkökenttiä. Se voidaan rakentaa johtavasta materiaalista joko umpinaiseksi tai ristikoksi materiaalin kulutuksen vähentämiseksi. Ristikon aukkojen täytyy olla pienempiä kuin estettäväksi halutun säteilyn aallonpituus, muuten aallot pääsevät läpi. Häkin toiminta perustuu siihen, että sähkökentän positiivinen varaus vetää häkin elektronit puoleensa aiheuttaen häkin sisään vastakkaisuuntaisen yhtä suuren kentän kumoten ulkoisen kentän. Arkisia Faradayn häkkeitä ovat esimerkiksi hissit, autot sekä mahdollisesti betonin vahvistamiseksi rakennetut teräsristikot. Autot suojaavat salaman iskuilta, mutta suuret ikkunat mahdollistavat radiosignaalien ja mikroaaltojen läpipääsyn. Nykyaikainen hissi estää usein matkapuhelimen toiminnan täysin sen ollessa suljettu. Lisäksi elektronisissa laitteissa on paljon pieniä Faradayn häkkeitä. Esimerkiksi television takaosassa voi olla kehikko suojaamassa ulkoisilta signaaleilta. Poliisit käyttävät digitaalisen todistusaineiston säilyttämisessä metallisia pusseja, jotka toimivat Faradayn häkkeinä. Ne estävät esimerkiksi matkapuhelimen etänä annetun muistintyhjennys käskyn. [6]

3. ATTENUAATIO

Attenuaatio kuvaa ääniaallon, valoallon tai säteilyn vaimenemista väliaineessa. Näissä eri tilanteissa attenuaatio on samoillakin materiaaleilla hyvin erisuuruista ja -tapaista. Sähkömagneettinen säteily on aaltoliikettä kuten ääni, mutta eroaa merkittävästi käyttäytymisessä. Ääni etenee paineaaltona väliaineen läpi. Tästä syystä ääniaalto kulkee sitä paremmin, mitä tiiviimmin atomit ovat. Parhaiten ääni etenee kiinteässä, hyvin nesteessä ja huonoiten kaasussa. Tosin kiinteässä aineessa äänen nopeus on sitä pienempi, mitä raskaampaa ja puristuvampaa materiaali on. Kevyissä kaasuissa äänen nopeus on suurempi kuin ilmassa. Nesteissä äänen nopeus puolestaan on suuri, vaikka ne ovat raskaita, koska puristuvuus on erittäin pieni. [7, s. 30] Sähkömagneettinen säteily toimii täysin päinvastaisesti äänen kanssa, jolloin paras kantama saadaan, kun on mahdollisimman vähän ja harvaan esteitä. Esimerkiksi valoalto ei kykene liikkumaan värillisen kappaleen pintaa syvemmälle, mutta kirkkaan kappaleen se läpäisee helposti.

3.1 Mikroaallot

Mikroaaltouunin lämmitysteho perustuu siihen, että yksittäiset mikroaallot eivät saa juurikaan vaikutusta aikaan kohteessa, mutta uunissa mikroaallot läpäisevät kohteen miljoonia kertoja. Mikroaaltojen kvanttienergian ollessa miljoona kertaa pienempi kuin röntgensäteillä, ne eivät aiheuta lämmitettävässä kohteessa ionisaatiota. Mikroaallot (2,4 GHz) läpäisevät erittäin huonosti vettä, jolloin ne lämmittävät sitä tehokkaasti. Lämpeneminen johtuu mikroaaltojen kyvystä kääntää eli aiheuttaa rotaatiovoimia poolisiin molekyyliin kuvan 3 mukaisesti.



Kuva 3. Mikroaalto aiheuttaa rotaatiota ja vääntöä poolisiin molekyyliin [3]

Absorption määrää väliaineessa voidaan kuvata lineaarisella absorptiokertoimella μ [8]. Se on riippuvainen väliaineesta ja väliaineeseen tulevan säteilyn energiasta $\mu = \mu(Z, \lambda, \rho)$, jossa Z on väliaineen atomin järjestysluku, λ on väliaineeseen tulevan säteilyn aallonpituus ja ρ on väliaineen tiheys. Sille pätee kaava

$$\Delta I_x = -\mu I_x \Delta x, \quad (5)$$

jossa ΔI_x on säteilystä poistunut intensiteetti, Δx on aineen paksuus, I_x saapuvan säteilyn intensiteetti ja μ lineaarinen absorptiokerroin. Säteilyn vaimeneminen on muutosta negatiiviseen suuntaan. Integroimalla kaava (5) saadaan kaava

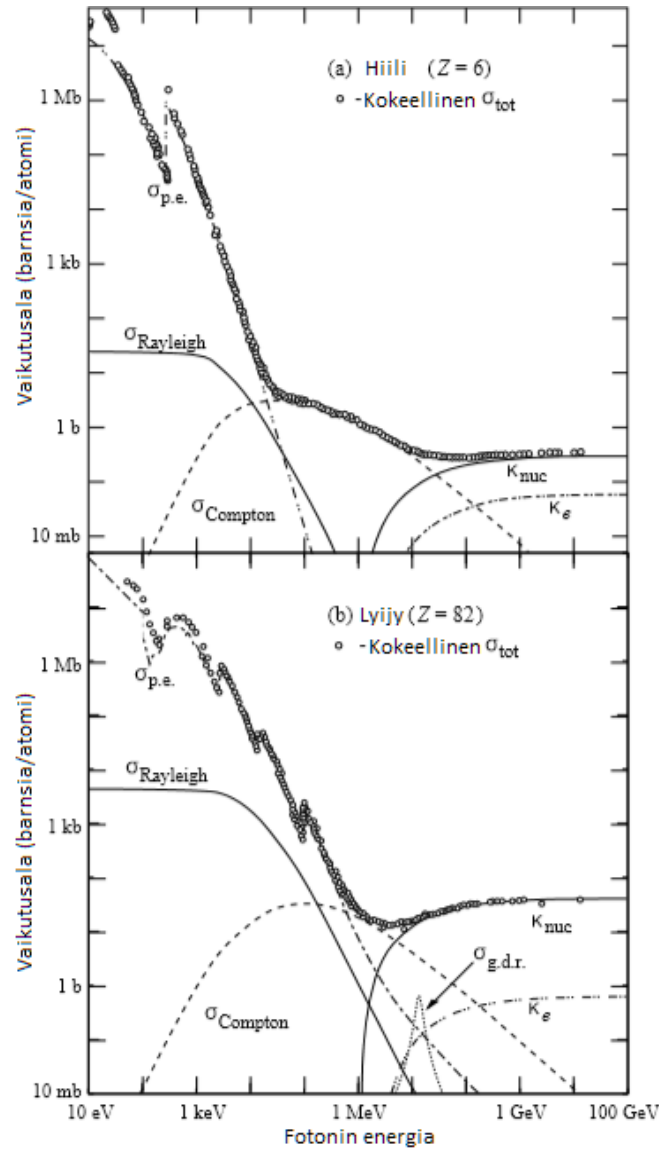
$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (6)$$

jossa I_0 tulevan säteilyn intensiteetti (W/m^2), I läpipäässeeseen säteilyn intensiteetti (W/m^2) ja x väliaineen paksuus (m). Intensiteetti siis vähenee, mitä pidempi matka x kuljetaan.

3.2 Sironta

Absorption määrään vaikuttaa moni asia, joista yksi on sironta. Kuvassa 4 on esitetty eri energisten fotonien sirontaa; ylemmässä kuvassa hiilessä ja alemmassa lyijyssä. Pienet pallot esittävät kokeellisen sironnan määrän ja muut kuvaajan osat vallitsevan sirontatyyppin eri sähkömagneettisen säteilyn energioille. Kuvien pysty akseli kuvaa pinta-alaa per atomi, jolla siroaminen tapahtuu.

Kuvassa 4 esiintyviä sirontatyyppejä ovat $\sigma_{p.e.}$ eli valosähköinen ilmiö, jossa fotonin absorboituessa atomista siroaa elektroni. Toinen sirontatyyppi $\sigma_{Rayleigh}$, joka tarkoittaa koherenttia Rayleigh-sirontaa. Tällöin atomi ei ionisoidu, eikä siirry virittyneeseen tilaan. Kolmantena tyyppinä esiintyy Compton-sironta $\sigma_{Compton}$. Compton-sironta on inkoherenttia, jolloin fotoni siroaa atomin ulkoelektronista. Compton-sironnan ollessa vallitseva sirontatyyppi sähkömagneettisen säteilyn taajuus on röntgensäteiden alueella. Viimeisimpinä vain yli 1 MeV:n energisillä fotoneilla eli selvästi gammasäteilyn alueella tapahtuu parinmuodostus atomin ytimien välillä κ_{nuc} ja parinmuodostus elektronien välillä κ_e .

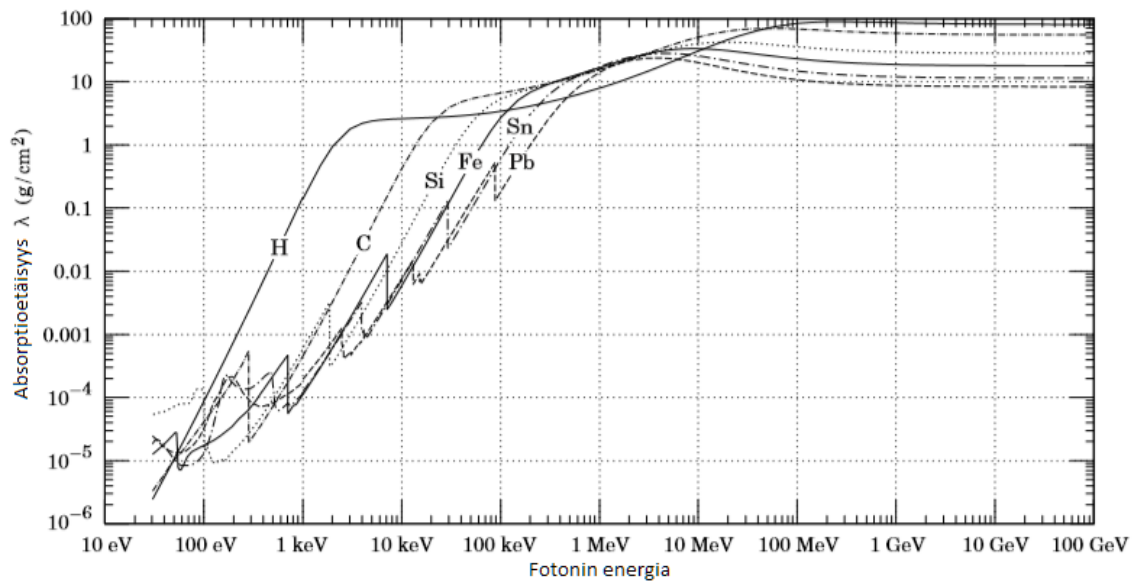


Kuva 4. Eri energisten fotonien hiilen ja lyijyn läpäisy sekä vallitseva sirontatyypit [9, s. 449]

Kuvassa 5 esitetään vedyn, hiilen, piin, raudan, tinan ja lyijyn absorptioetäisyys materiaalin läpäisevän fotonin energian funktiona. Pysty akselin absorptioetäisyys λ saadaan kaavasta (7)

$$\lambda = \frac{1}{\mu/\rho}, \quad (7)$$

jossa μ/ρ on materiaalin massa-absorptiokerroin. Tällöin μ on lineaarinen yksikötön absorptiokerroin ja ρ aineen tiheys. Fotonin intensiteetti läpäistään matkan x materiaalia saadaan kaavasta (6). Noin 100 keV suuremman energian fotonit edustavat gammasäteilyä. Sitä alhaisemmissa energiatasoissa esiintyy röntgensäteilyä ja aivan kuvaajan vasemmasta reunasta noin 100 eV:iin asti ultraviolettisäteilyä.



Kuva 5. 10 eV-100 GeV energisten fotonien absorptioetäisyys eri alkuaineissa [9, s. 450]

3.3 Materiaalin dielektrisyden vaikutus

Taulukossa 1 on listattu mikroaaltouunin käyttämän mikroaaltotaajuuden 2450 MHz penetraatiosyvyyyksiä eri materiaaleissa. Taajuus vastaa 12,2 cm aallonpituutta. Samaa taajuutta käyttävät internet-reitittimet voivat häiriintyä mikroaaltouunien toiminnasta varsinkin uunin vuotaessa mikroaaltoja. Penetraatiosyvyydet on laskettu kaavalla (8)

$$PD = \frac{\lambda \sqrt{\epsilon_r^\delta}}{2 * \pi * \epsilon_r^\delta}, \quad (8)$$

jossa λ on mikroaaltojen aallonpituus, ϵ sisältää reaali- ja imaginääriosat kompleksimuotoisesta dielektrisyysvakioista $\epsilon = \epsilon_0 * (\epsilon_r' - j\epsilon_r'')$. Eksponentti δ on tangenti imaginääriosan ja reaali-osan väliltä $\tan\delta = \frac{\epsilon_r''}{\epsilon_r'}$, ja δ on dielektrinen kulman häviö asteina. Kaavan on määrä kertoa etäisyys, jolloin mikrosäteily on attenuoitunut määrään $1/e$, jossa e on Neperin luku. Prosentissa silloin noin 63 % säteilystä on pysähtynyt.

Taulukko 1. 2450 MHz mikroaaltojen penetraatiosyvyydet eri materiaaleissa [10]

Materiaali	Lämpötila (°C)	Penetraatiosyvyys (cm)
Vesi	45	1,4
Vesi	95	5,7
Jää	-12	1100
Leipä	25	2-5
Raaka peruna	25	0,9
Perunamuussi	25	0,8
Herneet, porkkanat	25	1
Liha	25	0,9-1,2
Paperi, pahvi	25	20-60
Puu	25	8-350
Kumi	25	15-350
Ontto lasi	25	35
Posliini	25	56
Polyvinyylikloridi	20	210
Epoksihartsi (Araldite CN-501)	25	4100
Teflon	25	9200
Kvartsilasi	25	16000

Penetraatiosyvyys lyhenee huomattavasti taajuuden kasvaessa eli aallonpituuden lyhessä. Säteilyn teho laskee eksponentiaalisesti materiaaliin tunkeutuessaan. Materiaalit, joilla on korkea ϵ_r'' eli häviökerroin, absorboivat mikroaaltosäteilyä paremmin. Häviökerroin saadaan kompleksisen dielektrisyyskertoimen imaginääriosasta. Taulukossa 1 on paljon mikroaaltouuniin sopivia ruoka-aineita, koska tutkimus on tehty kartoittamaan mikroaaltojen soveltuvuutta lämmitykseen.

Edellinen kaava penetraatiosyvyydelle oli saksalaisyhtiö Püschnerin versio asiasta. Lähteestä [11] vastaava kaava on

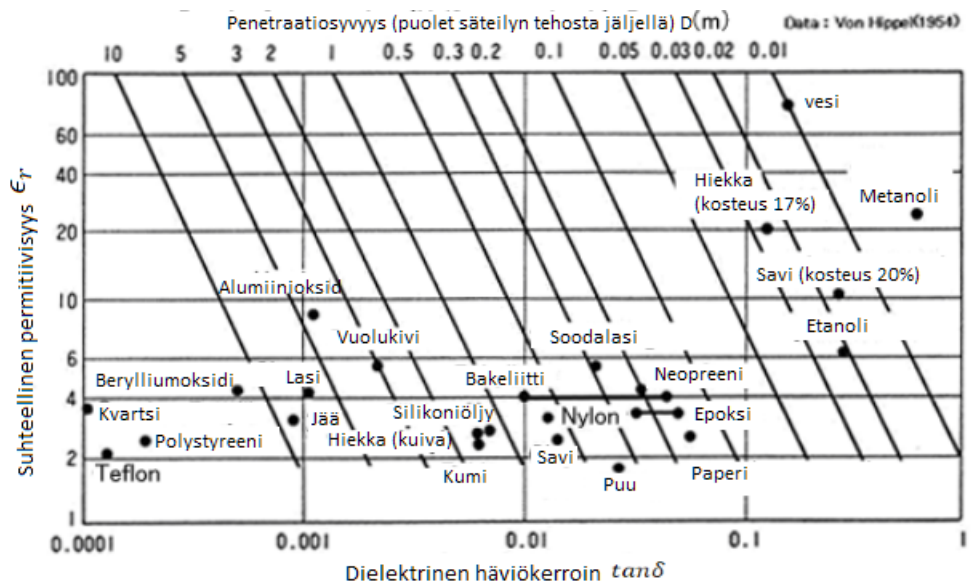
$$Dp = \frac{\lambda}{2\pi * \tan\delta * \sqrt{\epsilon_r'}}, \quad (9)$$

jossa kaikki merkinnät ovat yhteneviä edellisen kaavan kanssa. Japanilaisen kumeihin erikoistuneen yhtiön Micro Denshin mukaan penetraatiosyvyys on se etäisyys, jolloin materiaalin pintaan osuvan säteilyn tehosta on hävinnyt puolet [12]. Tämä saadaan kaavasta (10)

$$D = \frac{3,31 * 10^7}{f * \sqrt{\epsilon_r'} * \tan\delta}. \quad (10)$$

Kaavaan (10) sijoitetaan aallonpituuden λ sijasta taajuus f . Kuvassa 6 on havainnollinen esitys eri materiaalien dielektrisistä ominaisuuksista. Penetraatiosyvyyden D (m) eli vi-

nojen pystyviivojen huomataan riippuvan eniten häviökulman δ tangentista $\tan\delta$ ja jonkin verran aineen permittiivisyydestä. Permittiivisyys vaikuttaa vähemmän, sillä sen vaihteluväli aineiden kesken on pienempi.

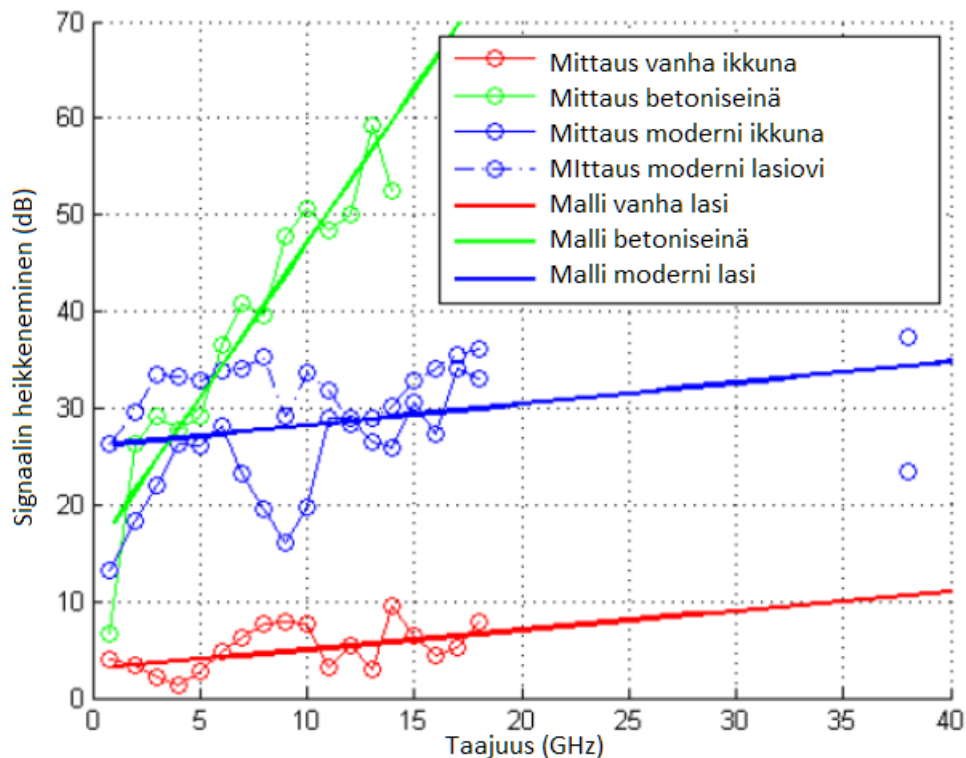


Kuva 6. Tiettyjen materiaalien dielektrisiä ominaisuuksia 2450 MHz:ssä [12]

4. RAKENNEMATERIAALIEN VAIKUTUS

Mikroaaltojen eri taajuudet vaikuttavat materiaalien attenuaatioon. Suuren taajuuden mikroaltoja on helpompi häiritä kuin matalia. 5G-verkot perustuvat korkeataajuuksiin mikroaltoihin ja niitä kehitetään maailmanlaajuisesti. 5G-verkot toimivat 15-30GHz alueella. 2450MHz on paljon alhaisempi taajuus, kuin 5G-verkoille suunniteltu käyttöalue. Kuvassa 7 esitetään Qualcommin kokeileman 28 GHz verkon häiritseviä esteitä.

Kuvasta 7 nähdään, että vanhat ikkunat päästävät mikroaltoa läpi huomattavasti paremmin kuin uudet ikkunat. Ne päästävät läpi myös lämpöä sekä UV-säteilyä enemmän kuin uudet materiaalit. Suurin este mikroalloille on betoniseinä. Qualcomm harkitsi myös 60 GHz taajuuden käyttöä, mutta se voi attenuoitua ilman vesimolekyylien vaikutuksesta [13]. Käyrien mallit ovat dataan sovitettuja trendiviivoja.



Kuva 7. Eri mikroaltoaajuuksien häiriintyminen arkisista esteistä [13]

Taulukossa 2 on tutkittu erilaisten esteiden vaikutusta korkeataajuuksisen mikroaaltosäteilyn etenemiseen. Mikroaaltojen taajuuksina käytettiin 26 ja 39 GHz. Kummankin taajuuden alle on listattu kunkin esteen aiheuttama vaimeneminen säteilyn intensiteettiin desibeleinä.

Taulukko 2. Yleisiä mikroaaltojen esteitä [17, s. 8]

Materiaali	Paksuus	26 GHz	39 GHz
Puinen ovi	47,94 mm	5,50 dB	4,59 dB
Läpinäkyvä lasiovi	12,85 mm	3,95 dB	4,59 dB
2 läpinäkyvää lasiovea	25,70 mm	5,55 dB	9,45 dB
Sumea lasiovi	12,30 mm	4,10 dB	4,65 dB
Ohut puinen ovi	19,82 mm	4,16 dB	5,59 dB

4.1 Metallit

Metallit pääsääntöisesti läpäisevät erittäin huonosti mikroaaltoja. Mikroaalloilta suojaamiseen käytetään erityisesti kuparia. Muita vaihtoehtoja ovat alumiini, teräs, tina ja sinkki. Mikroaallot läpäisevät huonosti alumiinia, jonka sähkönjohtavuus on noin 50-60% kuparista. Teräs on paljon käytetty rakennusmateriaali ja yksi parhaista materiaaleista yli 1 GHz taajuuksien torjumiseen. Parhaan suojan mikroaalloille antaa umpinainen metallirakenne eli Faradayn häkki. Toiseksi paras on tiheä metalliristikko. Metallin hyvät absorptio-ominaisuudet johtuvat niiden sähkönjohtavuudesta ja magneettisista ominaisuuksista. [14, s. 1283-1284]

4.2 Polymeerit

Britannian kansallisen fysiikan laboratorion NPL:n ylläpitämän Kaye & Laby [15] mukaan taulukon 3 arvot pätevät seuraaville polymeereille. Taulukosta 3 voidaan päätellä, ettei polymeerien attenuaatio mikroaaltojen suhteen ole merkittävää. Penetraatiosyvyys on laskettu kaavalla (8). Myös korkean taajuuden mikroaaltoihin polymeereillä ei ole suurta vaikutusta. [16, s. 439] Polymeerien aiheuttama attenuaatio mikroaaltoihin kasvaa merkittävästi, mikäli polymeeri on sähkönjohtava. Tällaisia polymeerejä ovat esimerkiksi polyaniliinit ja -asetyleenit.

Taulukko 3. Eri polymeerien dielektrisiä ominaisuuksia [15]

Polymeeri	Lämpötila	Taajuus	ϵ'_r	$\tan\delta$	Penetraatio- syvyys f=2450MHz
Polyeteeni	20°C	1GHz	2,3	0,0003	42,8m
Polyisobuteeni	20°C	3GHz	2,2	0,0005	26,3m
Polypropeeni	20°C	1MHz	2,2	0,0005	26,3m
Polystyreeni	20°C	1GHz	2,6	0,0005	24,2m
Polykarbonaatti	20°C	1MHz	3,0	0,01	11,2m

4.3 Luonnon materiaalit

Kaye & Labyn [15] mukaan puut häiritsevät mikroaaltosäteilyä merkittävästi. Puiden tapauksessa suurin vaikutus on veden prosenttiosuudella, joka vaihtelee eri lajien välillä. Tämä johtuu siitä, että vesimolekyylit attenuoivat mikroaaltoja.

Puiden tehokas mikroaaltojen vaimennus selittää sen, miksi metsässä on niin huono mobiilidatayhteys. Kaavalla (8) saadaan koivun penetraatiosyvyydeksi 13,7 cm mikroaaltosäteilylle, jonka aallonpituus on 12,2 cm. Taulukon 4 arvot ϵ'_r ja $\tan\delta$ muuttuvat jonkin verran, kun taajuus kasvaa. Lyhyempi aallonpituus lyhentää penetraatiosyvyyttä.

Taulukko 4. Eri puulajien dielektrisiä ominaisuuksia [15]

Puulaji ja massa-% osuus vettä	Lämpötila	Taajuus	ϵ'_r	$\tan\delta$	Penetraatio- syvyys f=2450MHz
Balsapuu 0%	20 °C	3 GHz	1,2	0,0140	1,3 m
Koivu 10%	20 °C	100 MHz	3,1	0,08	0,14 m
Pähkinäpuu 0%	20 °C	10 MHz	5	0,035	0,25 m
Pähkinäpuu 17%	20 °C	10 MHz	3	0,14	0,08 m

5. SEOSAINEIDEN VAIKUTUS

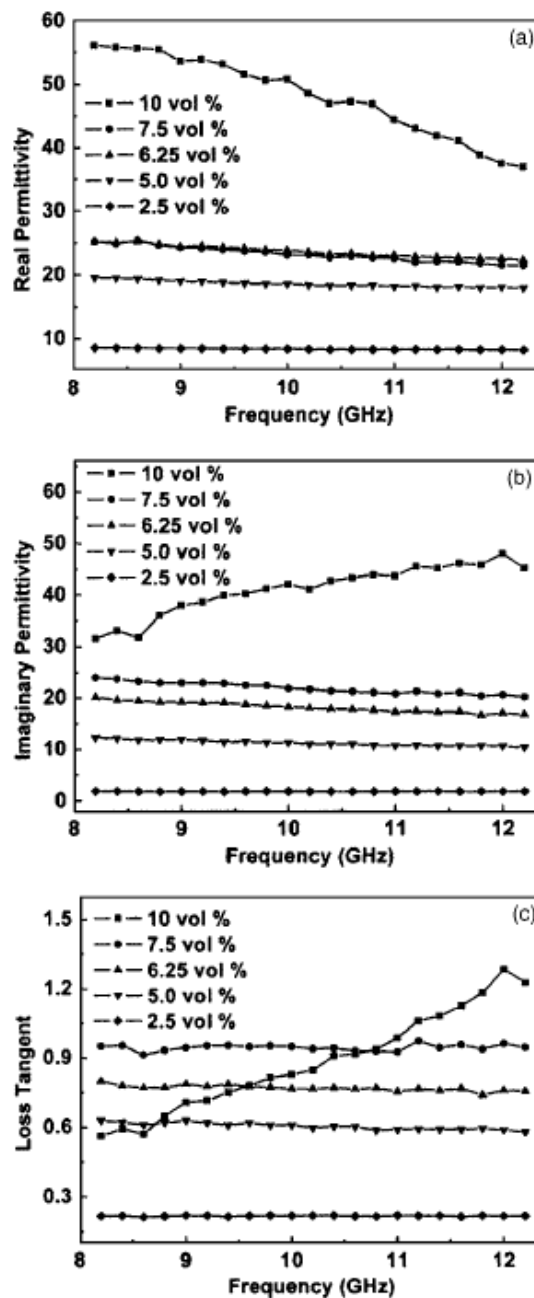
Hyvän mikroaaltoja absorboivan materiaalin tulee täyttää seuraavat kriteerit. Se ei saa heijastaa säteitä takaisin. Säteiden takaisinheijastus käy attenuaatioksi, mutta nyt halutaan, että materiaali nimenomaan absorboi. Tämä toteutuu korkeiden dielektrisyysarvojen sekä magneettisten häviöiden vaikutuksesta. Absorboiva materiaali ei saa tarvita ulkoista magneetikenttää, vaan korkeaan absorptioon on päästävä materiaalin fysikaalisilla ominaisuuksilla.

Polymeerien kyky absorboida mikroaaltoja on hyvin heikko johtuen niiden vähäisistä dielektrisistä sekä magneettisista ominaisuuksista. Absorptiota voidaan kasvattaa lisäämällä polymeerimatriisiin hiiltä, jolla pyritään kasvattamaan sähkönjohtavuutta. Hiiltä on hyvin saatavissa, sillä se on neljänneksi yleisin alkuaine maailmankaikkeudessa vedyn, heliumin ja hapen jälkeen. Matriisiin voidaan lisätä mitä tahansa hiilen sähköä johtavista allotroopeista kuten grafiittia, grafeenia, fullereenia tai nanoputkia.

Suuri ongelma hiilen lisäämisessä on hiilimolekyylien aggregoituminen ryppäiksi. Tarkoitus olisi saada 0,5 massa-% hiilinanoputkea tai 5 massa-% grafiittia tasaisesti koko polymeerimatriisiin. Valittaessa hyödynnettävää hiilen allotrooppia voidaan vertailla seuraavia asioita. Hiilinanoputkia tarvitaan vastaavien absorptio-ominaisuuksien saavuttamiseksi huomattavasti vähemmän kuin grafiittia. Tämä tekee lopputuotteesta kevyemmän samalla saavuttaen suuremman jäykkyyden ja kestävyuden.

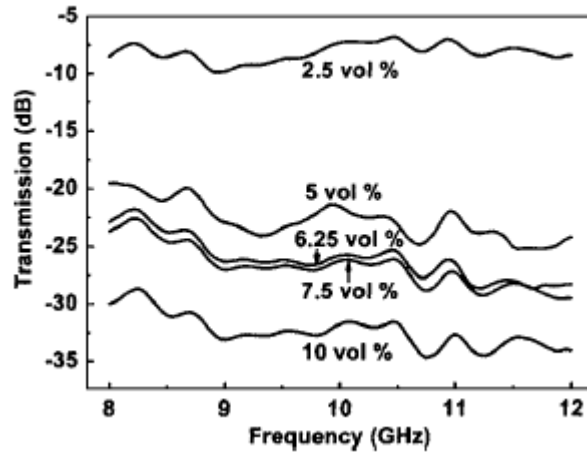
Tutkimuksessa [19] tutkitaan silikaattiin lisättyjen hiilinanoputkien vaikutusta materiaalin mikroaaltojen absorptiokykyyn. Näytteet valmistettiin piioksidijauheesta ja eri määristä hiilinanoputkia puristuksella. Valmiiden näytteen läpi lähetettiin mikroaaltoja ja läpi menneiden aaltojen intensiteetti mitattiin detektorilla.

Fysikaalisista ominaisuuksista absorptioon vaikuttavat erityisesti häviökerroin $\tan\delta$ ja sen takia myös permittiivisyys ϵ' ja sen imaginääriosia ϵ'' . Näistä ϵ' liittyy energian varastoitumiseen ja ϵ'' energian häviöön. Häviöt aiheutuvat materiaalin sähkönjohtavuudesta, resonanssista tai magneettisista ominaisuuksista. [18, s. 4] Kuvassa 8 esitetään, kuinka hiilinanoputkien lisääminen kasvattaa materiaalin a) ϵ' b) ϵ'' ja c) $\tan\delta$. Jokaisessa kuvassa hiilinanoputkien suurempi tilavuusprosenttiosuus kasvattaa y-akselin arvoa. Poikkeuksena suurin 10 tilavuusprosenttia käyttäytyy omituisesti varsinkin kohdassa c).



Kuva 8. Hiilinanoputkien lisäys silikaattiin parantaa absorptio-ominaisuuksia [19, s. 2]

Kuvassa 9 nähdään hiilinanoputkien eri tilavuusprosenttien vaikutus käytännössä mikroaaltojen vaimennukseen eli absorptioon. Vaimennus ei ole tasaista, sillä eri taajuudet käyttäytyvät eri tavoin.



Kuva 9. Muuttujien vaikutus käytännössä [19, s. 2]

Energian häviö materiaalissa johtuu vaimentavien voimien vuorovaikutuksesta molekyylien kanssa ja materiaalien äärellisestä sähkönjohtavuudesta [19, s. 4]. Häviö muodostuu heijastumisesta, absorptiosta ja useista heijastumisista. Näistä vallitsevin on absorptio, sillä ϵ'' nousu ja sähkönjohtavuuden kasvu hiilinanoputkia lisättäessä kasvattaa merkittävästi absorptiota. Kuvissa 8 ja 9 ei ole merkitty lainkaan tilavuusprosenttia 0, sillä puhdas silikaatti on lähes täysin mikroaaltoja läpäisevää.

6. YHTEENVETO

Sähkömagneettinen säteily on fotonien eli säteilykvanttien liikkeen aiheuttamia aaltoja, jotka muodostuvat nopeasti värähtelevistä sähkö- ja magneettikentistä. Sähkömagneettista säteilyä on kaikkialla ja tavallisin esimerkki sähkömagneettisesta säteilystä on näkyvä valo. Sähkömagneettisen säteilyn spektriin kuuluu kuitenkin paljon muutakin, kuten radioaallot, mikroaallot, infrapuna, UV, röntgen ja gammasäteily.

Eri sähkömagneettisen säteilyn aallonpituuksilla on hyvin erilainen vaikutus sitä kohtaavan materiaalin kanssa. Esimerkiksi ohut, värillinen lasi pystyy pysäyttämään valon, kun taas gammasäteily menee siitä helposti läpi. Attenuaatio eli ääniaallon, valoallon ja sähkömagneettisen säteilyn vaimeneminen on samoillakin aineilla hyvin erisuuruista ja -tapaista. Esimerkiksi ääni kulkee sitä paremmin mitä tiiviimmin atomit ovat. Parhaiten ääni etenee kiinteässä, hyvin nesteessä ja huonoiten kaasussa.

Eri materiaalit vaikuttavat attenuaatioon eri tavoin. Esimerkiksi mikroaallot läpäisevät erittäin huonosti metalleja ja mikroaalloilta suojautumiseen käytetään erityisesti kuparia. Muita vaihtoehtoja ovat alumiini, teräs, tina ja sinkki. Polymeerit eivät attenuoi mikroaalloja merkittävästi. Polymeerien aiheuttama attenuaatio mikroaalloihin kasvaa kuitenkin huomattavasti, mikäli polymeeri on sähkönjohtava. Tällaisia polymeerejä ovat esimerkiksi polyaniliinit ja -asetyleenit. Puu puolestaan häiritsee mikroaaltosäteilyä merkittävästi. Tämä johtuu puiden sisältämistä vesimolekyyleistä, jotka attenuoivat mikroaaltoja tehokkaasti. Puiden tehokas mikroaaltojen vaimennus selittää sen, miksi metsässä on niin huono mobiilidatayhteys.

Mikroaaltoja absorboivia materiaaleja tarvitaan paljon. Polymeerien absorptiota voidaan kasvattaa lisäämällä polymeerimatriisiin hiiltä, jolla pyritään kasvattamaan sähkönjohtavuutta. Hiiltä on hyvin saatavissa ja sen suuri esiintyvyys tekee siitä useissa tapauksissa halpaa. Matriisiin voidaan lisätä mitä tahansa hiilen sähköä johtavista allotroopeista kuten grafiittia, grafeenia, fullereenia tai nanoputkia.

LÄHTEET

- [1] M. Harju, Sähkömagneettinen spektri, Aaltomuoto, Saatavissa (viitattu 28.5.2018): <https://aaltomuoto.files.wordpress.com/2012/09/spektri.png>
- [2] Sähkömagneettinen spektri, Mobiili ja terveys, Saatavissa (viitattu 28.5.2018): <http://www.mobiilijaterveys.fi/assets/graafit/sahkomagneettinen-spektri.jpg>
- [3] R. Nave, Hyperphysics, Saatavissa (viitattu 28.5.2018): <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- [4] J. Clark, The Beer-Lambert Law, Chemistry Libretexts, Saatavissa (viitattu 28.5.2018): https://chem.libretexts.org/Core/Physical_and_Theoretical_Chemistry/Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy/Electronic_Spectroscopy_Basics/The_Beer-Lambert_Law
- [5] S. Puisto, Sähkömagneettinen sironna, TTY, 2000
- [6] J. Rubin, Michael Faraday: The Invention of Faraday Cage, Saatavissa (viitattu 28.5.2018): <http://www.julianrubin.com/bigten/faradaycageexperiments.html>
- [7] J. Toivanen, Teknillinen akustiikka, 3. painos, Otakustantamo, 1981
- [8] H. Vahtola, Sähkömagneettisen säteilyn vuorovaikutus materian kanssa, Oulun yliopisto, 2000
- [9] H. Bichsel, D.E. Groom, S.R. Klein et. al. REVIEW OF PARTICLE PHYSICS 33. Passage of particles through matter, Vol. 38, Iss. 9, 2014, Saatavissa (viitattu 28.5.2018): http://pdg.lbl.gov/2017/html/computer_read.html
- [10] Penetration Depths, Püschner, Saatavissa (viitattu 28.5.2018): <http://www.pueschner.com/en/microwave-technology/penetration-depths>
- [11] M. Chaplin, Water and Microwaves, Saatavissa (viitattu 28.5.2018): http://www1.lsbu.ac.uk/water/microwave_water.html
- [12] Basics of Microwave, Micro Denshi, Saatavissa (viitattu 28.5.2018): <http://www.microdenshi.co.jp/en/microwave/>
- [13] Qualcomm unveils its first 5G modem: 5Gbps peak downloads, beam forming, and 800MHz of spectrum, ExtremeTech, Saatavissa (viitattu 28.5.2018): <https://www.extremetech.com/mobile/237866-qualcomm-unveils-its-first-5g-modem-5gbps-peak-downloads-beam-forming-and-800mhz-of-spectrum>

- [14] L.L. Hatfield, B. Schilder, Microwave shielding measurement method, 2009 IEEE Pulsed Power Conference
- [15] Dielectric properties of materials, Kaye & Laby, Saatavissa (viitattu 28.5.2018): http://www.kayelaby.npl.co.uk/general_physics/2_6/2_6_5.html
- [16] M.N. Afsar, Dielectric Measurements of Common Polymers at Millimeter Wavelength, 1985 IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest
- [17] Q. Wang, X. Zhao, S. Li et. al. Attenuation by a Human Body and Trees as well as Material Penetration Loss in 26 and 39 GHz Millimeter Wave Bands, International Journal of Antennas and Propagation, Vol. 2017
- [18] F. Qin, C. Brosseau, A review and analysis of microwave absorption in polymer composites filled with carbonaceous particles, Journal of Applied Physics, Vol. 111, Iss. 6, 2012
- [19] C. Xiang, Y. Pan, X. Liu, X. Sun, X. Shi, J. Guo, Microwave attenuation of multiwalled carbon nanotube-fused silica composites, Applied Physics Letters, Vol. 87, Iss. 12, 2005