TAMPEREEN AMMATTIKORKEAKOULU
Tietotekniikan koulutusohjelma
Tietoliikennetekniikka

Opinnäytetyö

Ville Heinäjoki

Sähkömagneettinen säteily ja SAR

Työn ohjaaja Yliopettaja Jorma Punju
Työn teettäjä TAMK
TAMPERE 2010

Tekijä Ville Heinäjoki

Työn nimi Sähkömagneettinen säteily ja SAR

Sivumäärä 60

Valmistumisaika 05/2010

Työn valvoja Yliopettaja Jorma Punju

Tiivistelmä

Tässä opinnäytetyössä on tarkoituksena perehtyä siihen, mitä eri laitteiden lähettämä sähkömagneettinen säteily on, miten sitä voidaan mitata ja millaisia vaikutuksia sillä on terveyteemme. Työn alussa luodaan katsaus säteilyn värikkääseen historiaan ja tarkastellaan pintapuolisesti eri säteilytyyppejä. Varsinaisesti tämä työ keskittyy kuitenkin ionisoimattomaan säteilyyn ja sen vaikutuksiin.

Seuraavaksi työssä tutustutaan sähköisiin sekä magneettisiin ilmiöihin ja tarkastellaan niiden välisiä vuorovaikutuksia. Muuttuva magneettikenttä luo muuttuvan sähkökentän ja päinvastoin. Lopputuloksena syntyy sähkömagneettista aaltoliikettä eli säteilyä. Työssä tarkastellaan syvemmin säteilyn aiheuttamia vaikutuksia eri taajuusalueilla ihmisen kehossa ja luodaan katsaus erilaisiin säteilylähteisiin.

Sähkömagneettinen säteily ei ole uhkatekijä ihmisen terveydelle normaaleissa olosuhteissa. Kudosten lämpötila saattaa hetkellisesti hieman muuttua sähkömagneettista säteilyä tuottavan laitteen vaikutuspiirissä, mutta pysyvää haittaa ei nykytiedon valossa pitäisi syntyä. Mahdollista riskiä voidaan entisestään pienentää välttämällä ihon ja säteilevän antennin välistä kontaktia, esimerkiksi käyttämällä hf-kuuloketta matkapuhelimessa tai välttämällä kannettavan tietokoneen sylissä pitämistä.

Loppuosa painottuu lakipuoleen. Työssä tarkastellaan lyhyesti eri instansseja ja niiden asettamia rajoituksia. Suomessa yleisesti käytössä olevien laitteiden pitäisi olla turvallisia käyttää, koska niiden säteilyteho jää STM:n asettamien rajojen alle, eli ne aiheuttavat maksimissaan 2 W/kg SAR-arvon. Suomen säteilyturvakeskuksen tehtävänä on valvoa, että eri säteilevät laitteet täyttävät niille asetetut standardit. Työssä käsitellään, kuinka tämä valvonta on toteutettu yleisellä tasolla ja minkälaisia tuloksia on saatu matkapuhelimien osalta. Työn lopussa luodaan myös katsaus sähkömagneettisen säteilyn mittausvälineisiin ja siihen miten STUK toteuttaa SAR-mittaukset.

Avainsanat: SAR, ominaisabsorptionopeus, säteily, matkapuhelin

Author Ville Heinäjoki

Title Electromagnetic radiation and SAR

Number of pages 60

Graduation time 05/2010

Thesis supervisor Principal Lecturer Jorma Punju

Abstract

The purpose of this thesis is investigated what electromagnetic radiation is, tell how we could measure it and scrutinize healthy issues what it causes. In the beginning of work there are best bits of radiation's colorful history and then some basic knowledge about radiation. The main focus on this thesis is still in the non-ionizing radiation.

After this, thesis contains electric and magnetic phenomenons. There is also information about interactions between these two factors. A changing magnetic field causes changing electric field and vice versa. The outcome is electromagnetic wave motion in other words radiation. In this thesis we take deeper look of this radiation's energy amount absorption effects to the human and investigate what are the sources of radiation.

Electromagnetic radiation isn't dangerous to human's health in normal circumstances. It might causes little temperature rise in tissue but it's only temporary. One way to reduce possible health issues is avoid direct contact to the radiating devices like mobile phones antenna.

Finally, some knowledge about law issues of non-ionizing radiation. For example I'm presenting different law-organizations and standards/laws what these organizations have produced. All basic devices should be safety to use in Finland because their rate of power absorption is under STM's limits. STUK is Finnish organization which task is monitoring different devices safety. This thesis includes also information about testing in common level and of course some testing results.

Keywords: SAR, specific absorption rate, radiation, mobile phone

Käytetyt lyhenteet ja termit

CENELEC	Comite Europeen de Normalisation Electrotechnique. Eurooppalainen sähköalan standardointijärjestö, jonka toiminta keskittyy teknisiin standardeihin.
COSMOS	Cohort study of mobile use and health. Tutkimus, jonka tarkoituksena on selvittää matkapuhelimen käytön mahdollisia vaikutuksia terveyteen.
Dosimetria	RF- säteilyn biologisten vaikutusten tutkimista.
Fantomi	Mallinukke, jonka mitat ja sähköiset ominaisuudet jäljittelevät ihmisten kudoksia. Käytetään SAR:n, virrantiheyden sekä kehon sisäisen sähkökentän arviointiin.
FDTD	Finite-Difference Time-Domain. Metodi, mitä voidaan käyttää analysoitaessa radiotaajuista sähkömagneettista säteilyä.
GSM	Global System of Mobile Communications. Matkapuhelinjärjestelmä.
ICNIRP	International Commission for Non-ionizing Radiation Protection. Kansainvälinen komitea, joka määrittelee ohjerajoja ionisoimattomalle säteilylle altistuville ihmisille.
ICRP	International Commission on Radiological Protection. Historian ensimmäinen säteilyturvallisuutta kontrolloiva järjestö.
IEEE	Institute of Electrical and Electronic Engineers. Kansainvälinen järjestö, jonka toiminta keskittyy erityisesti Pohjois-Amerikan ionisoimattoman säteilyn standardien ohjerajojen määrittelyyn.
Isotrooppinen	Suunnasta riippumaton eli mittapään tapauksessa sellainen, joka mittaa samanaikaisesti kolmesta kohtisuorasta suunnasta.
RF	Radio frequency. Radiotaajuus.
SAR	Specific Absorption Rate eli ominaisabsorptionopeus. Suure, jonka avulla ilmaistaan kuinka paljon energiaa absorboituu RF- taajuisesta sähkömagneettisesta kentästä ihmisen kudoksiin.
STM	Suomen sosiaali- ja terveysministeriö. Tehtävänä kansainvälisten standardien sovitus suomalaiseen yhteiskuntaan.

STUK	Suomen säteily- ja turvallisuuskeskus. Valvoo standardien noudattamista.
UMTS	Universal Mobile Telecommunications System. Kolmannen sukupolven (3G) matkapuhelinjärjestelmä, GSM:n mahdollinen seuraaja.
WHO	World Health Organization. Terveysjärjestö, jonka toiminta tähtää ihmisten terveyden edistämiseen.
WLAN	Wireless Local Area Network. Langaton lähiverkkotekniikka.

Sisällys

1 Historiaa 1
2 Säteily 3
2.1 Ionisoiva säteily 3
2.1.1 Alfa-, beta- ja gammasäteily 3
2.1.2 Röntgensäteily 4
2.1.3 Ihmisen tuottama ionisoiva säteily 5
2.1.4 Luonnon taustasäteily 5
2.2 Ionisoimaton säteily 5
3 Sähkömagnetismi 8
3.1 Sähkökenttä 8
3.2 Magneettikenttä 8
3.3 Sähkömagneettinen kenttä 9
3.4 Taajuus ja aallonpituus 10
3.6 Maxwellin yhtälöt 11
4 SAR 13
4.1 Mitä SAR tarkoittaa 13
4.2 Laitteet 15
4.2.1 Matkapuhelin ja tukiasema 16
4.2.2 WLAN 18
4.2.3 Bluetooth 19
4.2.4 Tutka 20
5 Dosimetria 22
5.1 Johdanto 22
5.2 Sähköiset ominaisuudet 23
5.2.1 Johtavuus ja suhteellinen permittiivisyys 23
5.2.2 Dispersio ja polarisaatio 23
5.2.3 Matalat taajuudet (kvasistaattinen alue) 25
5.2.4 Keskisuuret taajuudet (resonanssialue) 27
5.2.5 Suuret taajuudet (pinta-absorptioalue) 30
5.2.6 Esimerkki 2G-matkapuhelinverkon dosimetristen ominaisuuksien vaikutuksesta kehoomme 32
5.3 Biologiset vaikutukset 34
5.3.1 Lämmöstä johtuvat vaikutukset 35
5.3.2 Muut vaikutukset 39

6 Standardit ja testaus 40
6.1 Asiantuntija- ja standardointijärjestöt 41
6.1.1 ICNIRP 42
6.1.2 CENELEC 44
6.2 Testaus 45
6.2.1 Yleistä 45
6.2.2 SAR-mittaukset 45
6.2.3 Matkapuhelimien testituloksia 51
7 Loppusanat 52
Lähteet 53
Liite 1: Matkapuhelimien SAR-arvoja 57
Liite 2: Kansainvälisiä standardeja 59

1 Historiaa

Läpi historian maapallolla on ollut erimuotoista säteilyä. Kaikkein tunnetuin säteilyn aiheuttaja on aurinko, josta UV- ja infrapunasäteily sekä myös näkyvä valo ovat lähtöisin. [1]

Englantilainen Sir Isaac Newton (1643–1727) teki elämänsä aikana paljon tutkimuksia eri taivaankappaleiden parissa. Hänen tunnetuimmat aikaansaannokset jälkipolville ovat painovoima- ja liikelaki, mutta ei sovi unohtaa hänen työtään valon parissa, mikä on mahdollistanut auringon spektrianalyysit nykypäivänä. Toinen merkittävä henkilö spektrianalyysin kehittymisen takana oli saksalainen Joseph Fraunhofer, joka huomasi auringon spektrissä olevan eri aallonpituuksia (ns. Fraunhoferin viivat). Näin saatiin tieto auringon lähettämästä monimuotoisesta säteilystä. [1], [3], [4]

Tultaessa kohti nykypäivää mittausvälineet ovat kehittyneet ja tietoa asioista on kertynyt lisää, mistä syystä myös uusia havaintoja on tehty päivä päivältä enemmän. Vuonna 1895 saksalainen fyysikko Wilhelm Conrad Röntgen teki tutkimuksia katodisädeputken (CRT) toimintaan liittyvän säteilyn kanssa ja huomasi uuden säteilymuodon. Tämä säteilymuoto sai nimekseen röntgensäteily. Vuotta myöhemmin ranskalainen fyysikko Antoine Henri Becquerel löysi luonnon taustasäteilyn. Luonnon taustasäteilyllä (n. 0,5 mSv/vuosi) tarkoitetaan säteilyä, joka on peräisin maankamarassa olevista radioaktiivisten aineiden aiheuttamasta gamma-säteilystä. Vuonna 1898 ranskalainen Marie Curie löysi tutkimuksissaan miehensä Pierren kanssa alkuaine radiumin, mitä alkuun pidettiin ihmelääkkeenä vaivaan kuin vaivaan. Vasta myöhemmin, muutaman virhearvioinnin jälkeen, selvisi sen todellinen käyttötarkoitus (esim. neutronilähde). [1], [4], [5], [6]

Radioaktiivisten aineiden väärinkäyttö jatkui kymmeniä vuosia, kunnes v. 1928 perustettiin ensimmäinen säteilyturvallisuutta kontrolloiva järjestö ICRP (International commission on radiological protection). Sittemmin uusia säteilyyn liittyviä järjestöjä on tullut reilusti lisää, mutta niistä lisää myöhemmin kappaleessa 6. [1]

1940-luvulla saksalainen Otto Hahn keksi fissioreaktorin eli ilmiön, missä raskaan atomin ydin hajotetaan kahdeksi pienemmäksi ytimeksi. Fissioreaktion seurauksena vapautuu energiaa, tarkemmin sanottuna lämpöä ja gamma-säteilyä. Tähän perustuu ydinvoimaloiden sekä atomipommin toiminta. [1], [7]

Säteily voidaan jakaa ionisoivaan ja ionisoimattomaan säteilyyn sen mukaan, pystyykö se irrottamaan elektroneja atomista. 1950-luvulle tultaessa ionisoimatonta säteilyä tuottavia (laser, mikroaallot, radiotaajuinen säteily jne.) laitteita alkoi ilmestymään ammatilliseen käyttöön yhä enemmän. Tekninen kehitys vain kiihtyi tultaessa 1960-luvulle, kun toisen maailmansodan aikana jo kehitetyt tutka- ja infrapunasovellukset saivat enemmän suosiota, alkoi markkinoille tulla monimuotoisia laitteita aina mittausvälineistä lääketieteellisiin sovelluksiin asti. [1]

Nykyaikana joudutaan punnitsemaan säteilyyn liittyviä kysymyksiä entistä enemmän, koska erilaiset säteilevät laitteet (puhelin, tietokone, mikroaaltouuni jne.) ovat yleistyneet. Emme voi suojautua säteilyltä, vaikka niin haluaisimmekin, sillä säteilyä on joka puolella. Ionisoivaa radioaktiivista alkuperää olevaa säteilyä löytyy mm. ilmasta, maasta, rakennusmateriaaleista ja ruuasta. Ionisoimatonta puolestaan on esim. voimalinjoissa, puhelimessa, televisiossa, wlanissa tai mikroaaltouunissa.

2 Säteily

On olemassa kahta eri tyyppistä säteilyä; ionisoivaa ja ionisoimatonta. Ionisoiva säteily sisältää enemmän energiaa kuin ionisoimaton ja täten se pystyy irrottamaan elektronin atomista sekä aiheuttamaan vahinkoa kudokselle. [1]

2.1 Ionisoiva säteily

Aineen perusosan tiedetään olevan atomi, jonka ydin koostuu protoneista sekä neutroneista. Atomin ydintä kiertävät elektronit. Näiden määrä ei ole vakio, vaan se vaihtelee eri alkuaineilla. Jos atomissa on yhtä monta elektronia ja protonia, on se sähköisesti neutraali, eikä täten ole vielä ionisoitunut. Jos alkuaineen atomissa on sama määrä protoneja, mutta eri määrä neutroneja, sitä kutsutaan isotoopiksi. Isotoopilla tarkoitetaan kemiallisilta ominaisuuksiltaan samanlaista, mutta massaltaan eroavaa alkuainetta. [8]

Mikäli atomin ydin on varautunut, eli siinä on enemmän tai vähemmän elektroneja kuin protoneja, on kyseessä radioaktiivinen aine. Kun atomin ytimen varaus purkautuu, säteilee se ionisoivaa säteilyä. [8]

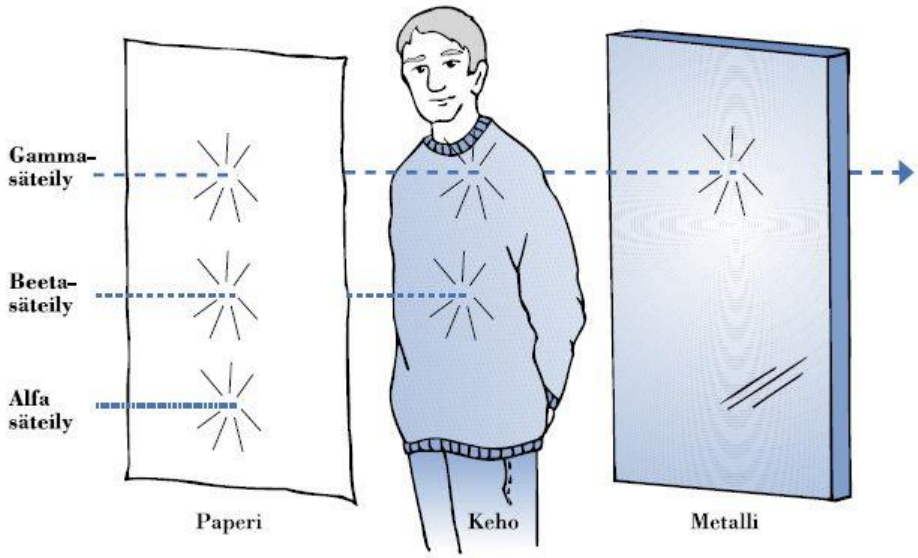
Ionisoiva säteily voidaan jakaa syntymätavan ja/tai aallonpituuden mukaan eri luokkiin, joita on alfa-. beta- ja gammasäteily, röntgensäteily, ihmisen tuottama säteily sekä luonnon taustasäteily.

2.1.1 Alfa-, beta- ja gammasäteily

Alfa- ja betasäteilyä kutsutaan hiukkassäteilyksi, mikä johtuu niiden aallonpituudesta. α-hiukkaset ovat kooltaan suuria, koska niiden sisältämä energiamäärä on suuri. β-hiukkaset puolestaan ovat kooltaan pienempiä, mutta ne liikkuvat ilmassa nopeammin ja niiden läpäisykyky on α-hiukkasia parempi. Molemmat säteilytyypit voivat aiheuttaa hengitettynä sekä oraalisesti nautittuna kohtalokkaita seurauksia. Betasäteily pystyy lisäksi läpäisemään ihmisen ihon, mistä seurauksena voi olla säteilypalovammoja. [8]

Gammasäteily ei ole hiukkassäteilyä, vaan sähkömagneettista säteilyä, koska sen aallonpituus on aina alle 10pm. Yhteinen tekijä alfa- ja betasäteilylle löytyy gammasätei-

lyn syntytavasta. Nimittäin alfa- ja betahajoamisen sivutuotteena syntyy gammasäteilyä. Gammasäteily kykenee läpäisemään ihmiskehon ja aiheuttamaan sisäisiä vaurioita. Nieleminen ja hengittäminen voi edellisten tapaan johtaa kuolemaan. Kuvassa 1 on kuvattu kyseisten säteilytyyppien läpäisykykyä eri olosuhteissa. [8]



Kuva 1. α-, β- ja γ-säteilyn läpitunkevuus [8]

2.1.2 Röntgensäteily

Röntgensäteily on luonteeltaan samanlaista kuin gammasäteilykin, mutta sen alkuperä on eri. Röntgensäteilyn aallonpituus on 0,01-10 nm. Sitä saadaan tuotettua röntgenputkessa tai vaihtoehtoisesti sitä syntyy atomin elektronirakenteen muutoksen seurauksena. [8], [9]

Röntgensäteilyn sisältämä energiamäärä on pienempi kuin gammasäteilyllä, eikä se täten ole yhtä läpäisykykyistä. Kuitenkin säteilylajina röntgensäteily on suurin yksittäinen tekijä ihmisen päivittäisessä altistumisessa. Sitä voidaan käyttää hyväksi lääketieteessä sekä teollisuudessa (esimerkiksi läpivalaisu). [8], [9]

2.1.3 Ihmisen tuottama ionisoiva säteily

Ihmisten tuottama ionisoiva säteily on lähtöisin erilaisten laitteiden toiminnasta (esim. röntgen). Myös ydinenergian tuotossa vapautuu ionisoivaa säteilyä, fissio- ja fuusioreaktiossa sekä radioaktiivisen hajoamisen yhteydessä. Ihminen käyttää ionisoivaa säteilyä hyväkseen mm. lääketieteessä, tutkimustyössä, energian tuottamisessa sekä erilaisten ydinvoimaa hyödyntävien aseiden valmistuksessa. [8]

Ihmisen tuottama säteily ei häviä mihinkään, vaan se vapautuu joko luontoon tai muuten vain synnyttää säteilyä tuottavaa materiaalia (esim. ydinjäte). [8]

2.1.4 Luonnon taustasäteily

Kuten aikaisemmin tuli ilmi, ionisoivaa säteilyä on kaikkialla. Kosmista taustasäteilyä (eli ns. kolmen Kelvinin säteilyä) tulee avaruudesta, missä se on aikoinaan saanut alkunsa ensimmäisten atomien syntyessä. Se sisältää protoneja, elektroneja, gamma- sekä röntgensäteilyä. Maaperässä suurin säteilyä aiheuttava alkuaine on kaasu nimeltään radon, muita merkittäviä ovat uranium, torium ja kalium. Kyseisissä alkuaineissa voi tapahtua radioaktiivista hajoamista, minkä seurauksena syntyy alfa-, beeta- ja gamma-säteilyä. Myös aurinko on merkittävä luonnon taustasäteilyn tuottaja. [9]

2.2 Ionisoimaton säteily

Ionisoimaton säteily on sähkömagneettista säteilyä, joka ei sisällä niin paljon energiaa, että se pystyisi ionisoimaan atomin. Se ei näin ollen kykene irrottamaan elektroneja atomista tai molekyylistä, eikä näin aiheuta yhtä nopeasti ja tehokkaasti terveydellisiä vaikutuksia. Ionisoimaton säteily sisältää aina alle 12 eV energiaa ja sen aallonpituus on suurempi kuin 10 nm. [10]

Ionisoimaton säteily koostuu sähkö- ja magneettikentistä. Jos kentän voimakkuus on vakio ja/tai sen muutonnopeus on hyvin pieni, on kyseessä staattinen kenttä. Mikäli muutosnopeus kasvaa, alkaa tapahtua sähkömagneettista aaltoliikettä, mistä voidaan käyttää termiä säteily. [2]

Siinä missä röntgensäteily (aallonpituus: 0,01-10 nm) oli vielä ionisoivaa säteilyä, ultraviolettisäteily (aallonpituus:10-400 nm) on jo ionisoimatonta. Eri ionisoimattoman säteilyn tyypit, lähteet ja vaikutukset on lueteltu alla olevassa taulukossa (taulukko 1).

Taulukko 1: Ionisoimattoman säteilyn jako [10]

Säteilytyyppi	Lähde	Aallonpituus	Taajuus	Vaikutukset esim.
UVA	musta- ja auringonvalo	318–400 nm	750–950 THz	Ruskettuminen
Näkyvä valo	laserit, auringonvalo, tuli, ledi, hehkulamppu	400–780 nm	385–750 THz	Ihon vanheneminen
Infrapuna (lyhyt)	laserit, kaukosäädin	780 nm–1,4µm	215–385 THz	Ihon palaminen
Infrapuna (keski)	laserit, pitkät tietoliikenneyhteydet	1,4 µm–3 µm	100–215 THz	Ihon palaminen
Infrapuna (pitkä)	FIR-laseri	3 µm–1 mm	300 GHz–100 THz	Kehon pintalämpötilan nousu
Mikroaalto	osa matkapuhelista, mikroaaltouuni, liikkeentunnistin, tutka, WLAN	1 mm–33 cm	1–300 GHz	Kehon kudoksen lämpötilan nousu
RF (korkea)	matkapuhelimet, televisio, FM,AM, LA- ja langatonpuhelin	33 cm–3 km	100 kHz–1 GHz	Kehon kudoksen lämpötilan nousu => kehon lämpötilan nousu
RF (matala)	voimalinjat	> 3 km	< 100 kHz	Lihas- ja hermohäiriöt
Staattinen magneettikenttä	vahvat magneetit, Magneettikuvaus	ääretön	0 Hz	Huimausta ja pahoinvointia

Ionisoimatonta säteilyä voidaan luonnehtia taajuuden (f), kentänvoimakkuuden (E) ja aaltomuodon avulla. Normaalisti oletetaan aallonpituuden ja taajuuden tulon väliaineessa olevan vakio (kaava 1), mistä käytetään nimitystä etenemisnopeus ja symbolia c. Ilmassa c on sama kuin valonnopeus tyhjiössä eli n. $3 \times 10^8 \frac{m}{s}$. [2]

$$c = \lambda \times f \tag{1}$$

Toinen tärkeä tekijä ionisoimattomassa säteilyssä on säteilyn sisältämän fotonin energia (E). Se voidaan määritellä Planckin vakion ($h = 4{,}13 \times 10^{-15} eV \times s$) ja taajuuden (f) tulona (kaava 2). [2]

$$E = h \times f \tag{2}$$

On kuitenkin hyvä muistaa, ettei pienitaajuinen säteily ole automaattisesti voimakkuudeltaan heikompaa. Sillä kentänvoimakkuus määräytyy siinä olevien fotonien energioiden yhteenlaskettuna summana. [2]

Ionisoimattomalla säteilyllä on läheinen suhde SAR:in (Specific Absorption Rate) kanssa, mihin tämän tutkintotyön tarkastelu keskittyy. SAR on suure, mitä käytetään kuvaamaan ionisoimattoman säteilyn (pääasiassa RF ja mikro) vaikutuksia. Asiasta lisää luvussa 4.

3 Sähkömagnetismi

3.1 Sähkökenttä

Michael Faradayn aikoinaan keksimällä käsitteellä sähkökenttä (E) tarkoitetaan ilmiötä, mikä syntyy, kun kahdessa eri pisteessä on erisuuruinen jännite. Tällöin nämä eri suuret varaukset kohdistavat toisiinsa voiman (Coulombin laki), minkä me ymmärrämme sähkökentäksi. Mitä suurempi näiden kahden pisteen jännite-ero on, sitä voimakkaammasta sähkökentästä on kyse. Tavallisesti kentän voimakkuutta kuvataan yksiköllä volttia per metri (V/m). [32]

Sähkökenttä (E), kuten myös voima (F) ovat vektorisuureita. Eli niissä on mitattava ominaisuus, jolla on suunta sekä suuruus. Erimerkkiset varaukset vetävät toisiaan puoleensa ja samanmerkkiset hylkivät toisiaan. Kun määritetään sähkökentän voimakkuutta, vektorisuuret lasketaan yhteen. Myös varausten etäisyydellä toisistaan on merkitystä sähkökentän voimakkuutta ajatellen. Mitä lähempänä varaukset ovat toisiaan, sitä voimakkaampi kenttä on ja päinvastoin. [2]

Eli käytännössä:

$$E = \frac{V_1 - V_2}{d} \tag{3}$$

missä,

E= sähkökentän voimakkuus (V/m)

V_1= 1. pisteen jännite

V_2= 2. pisteen jännite

d= pisteiden etäisyys toisistaan

3.2 Magneettikenttä

Magneettikenttä on ilmiö, mikä syntyy sähköisten varauksien liikkuessa. Jos varaukset pysyisivät paikallaan, kyseessä olisi staattinen sähkökenttä. Kiihtyvässä liikkeessä ole-

vat varaukset ja sähkövirrat aikaansaavat sähkömagneettisen kentän. Magneettikentän vuoviivat ovat jatkuvia, eli ne tulevat aina samaan paikkaan, mistä ovat lähteneetkin. [2]

Magneettikentän voimakkuuden ilmaisemiseen käytetään suureita H (voimakkuus) ja B (tiheys). Voimakkuuden mittayksikkö on A/m ja tiheyden mittayksikkö T eli Tesla. [2]

Käytännössä, ei-magneettisten materiaalien (ihminen) tapauksessa, löydetään yhteys voimakkuudelle sekä tiheydelle kaavasta 4. [2]

$$B = \mu_r \mu_o \times H \tag{4}$$

missä,

$\mu_0 = 4 \times \pi \times 10^{-7}\ H/m$ eli tyhjiön magneettinen permeabiliteetti

μ_r = Suhteellinen permeabiliteetti (yksikötön suhdeluku)

3.3 Sähkömagneettinen kenttä

Edellä on jo kerrottu tarkemmin sähkö- ja magneettikentistä. Käytännön elämässä kuitenkin nämä molemmat kentät esiintyvät usein yhtä aikaa.

Sähkömagneettiset kentät voidaan jakaa mikroaaltoihin (0,3-300 GHz), radio- (0,3-300 kHz) ja pientaajuisiin kenttiin (alle 300 kHz). Tässä työssä keskitytään lähinnä kahteen ensimmäiseen. [12]

Sähkömagneettisten kenttien voimakkuutta kuvataan usein symbolilla S, millä tarkoitetaan tehotiheyttä. Sen mittayksikkö on W/m^2. Yleensä kuitenkin sähkökenttä on varsin monimutkainen lähellä lähdettä ja tästä syystä myös erilliset komponentit (sähkökenttä- ja magneettikenttäkomponentin tehotiheys), jotka on muutettu voimakkuuksista tiheydeksi, ilmoitetaan. [12]

Radiotaajuisen sähkömagneettisen kentän kuvaamiseen käytetään käsitettä SAR eli ominaisabsorptionopeus. Sen avulla voidaan määrittää radiotaajuisen säteilyn terveysvaikutukset, eli kuinka paljon tehoa imeytyy kehoon per kilo (W/kg). Asiasta tarkemmin seuraavassa luvussa (luku 4). [12]

3.4 Taajuus ja aallonpituus

Tavallisesti vaihtovirralla on amplitudi, mikä vaihtelee ajan mukaan ja vaihtaa suuntaansa aina 180° välein. Yksi jakso on $360°$. Taajuudella tarkoitetaan jaksojen yhteenlaskettua määrää yhden sekunnin aikana. Taajuuden yksikkö on 1/s, josta käytetään nimeä hertsi (Hz) ja symbolia f. Taajuus on saanut nimensä saksalaisen fyysikon Heinrich Rudolph Hertzin mukaan.

Yhden jakson kesto voidaan laskea kaavalla 5:

$$T = 1/f \tag{5}$$

Toinen merkittävä tekijä sähkömagneettisessa säteilyssä on aallonpituus. Sitä kuvaamaan käytetään symbolia λ. Yhdessä taajuuden kanssa ne määräävät sähkömagneettisen säteilyn aallonnopeuden.

Normaalisti aaltojen oletetaan kulkevan homogeenistä tyhjiötä vastaavassa väliaineessa, jolloin niiden nopeudeksi on määritelty $3x10^8$ m/s (c). Samaa nopeutta voidaan käyttää myös ilmassa kulkevien aaltojen yhteydessä, mutta väliaineen ollessa joku muu, ei edellä kuvailtu tilanne enää päde. Taajuuden ja aallonpituuden suhdetta kuvataan kaavalla 1.

Sähkömagneettisen säteilyn aallot eivät välttämättä tarvitse väliainetta liikkuakseen, vaan ne voivat liikkua myös tyhjiössä. Yleensä kuitenkin jokin väliaine on olemassa, tällöin aaltojen nopeus saadaan määriteltyä kaavalla 6. [11]

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\varepsilon}} \tag{6}$$

Symbolilla μ tarkoitetaan aineen permeabiliteettia (H/m) ja symbolilla ε aineen permittiivisyyttä (F/m).

3.6 Maxwellin yhtälöt

James Clerk Maxwell (1831–1879) oli skotlantilainen 1800-luvulla elänyt fyysikko. Hän kehitti kaavat, joiden avulla kuvataan sähkömagneettisen kentän käyttäytymistä sekä vuorovaikutusta aineen kanssa. Maxwell ei itse keksinyt kaikkia fysiikan lakeja kaavojen takana, mutta hän oli ensimmäinen, joka ymmärsi hyödyntää niitä tässä yhteydessä. Nämä kaavat tunnetaan nimellä "Maxwellin yhtälöt". [14]

Maxwell keksi 20 differentiaaliyhtälöä v. 1861, mitkä brittiläinen Oliver Heavside v.1884 kokosi vektorianalyysin avulla nykyään tunnettuun muotoon (kuva 2). [14]

Vektorimuoto	Integraalimuoto	Selite	Yhtälö
$\nabla \times \boldsymbol{E} = -\frac{\partial(\mu \boldsymbol{H})}{\partial t}$	$\oint E \cdot dl = -\frac{\partial}{\partial t}\oint \mu H \cdot ds$	Faradayn laki	1
$\nabla \times H = \frac{\partial(\varepsilon E)}{\partial t} + J$	$\oint H \cdot dl = \frac{\partial}{\partial t}\oint \varepsilon E \cdot ds + \oint J \cdot ds$	Ampèren laki ja Maxwellin lisäys	2
$\nabla \cdot \varepsilon E = \rho$	$\oint_s \varepsilon E \cdot ds = \int_v \rho dv$	Gaussin laki	3
$\nabla \cdot B = 0$	$\oint_s B \cdot ds = 0$	Gaussin laki	4

Kuva 2: Maxwellin lait [2]

Yhtälö 1 on nimeltään Faradayn laki. Sen avulla kuvataan ilmiötä, missä magneettikentän muutos aiheuttaa sähkökentän. Toinen laki on nimeltään Amperen-Maxwellin laki, mikä on Maxwellin muokkaama versio alkuperäisestä Amperen laista. Sitä käytetään määrittämään magneettikentän voimakkuus, ja sen mukaan muuttuva sähkövirta aiheuttaa magneettikentän. Tiivistettynä voidaan sanoa yhtälöiden 1 ja 2 olevan Maxwellin roottoriyhtälöitä, jotka esittävät ajan funktiona muuttuvia kenttiä. [2]

Yhtälöt 3 ja 4 ovat osa Gaussin lakia. Yhtälö 3 on laki sähkökentille ja se kuvaa, kuinka sähkövaraus luo ympärilleen sähkökentän. Yhtälö 4 on puolestaan laki magneettikentille. Sen avulla voidaan päätellä, ettei magneettista monopolia eli yksinapaista magneettia ole olemassa. [2]

Matemaattisesti ajateltuna Maxwellin yhtälöt ovat 1. kertaluokan differentiaaliyhtälöitä, joissa aika ja paikka vaihtelevat. Yleensä ottaen analyyttistä ratkaisua ei näiden yhtälöiden avulla voida laskea kuin hyvin harvoissa tapauksissa, koska harvoin on olemassa homogeenistä eli aineksiltaan tasakoosteista kenttää tai esinettä kentässä. Usein joudutaan jakamaan laskentatila osiin ja sen jälkeen soveltaa Maxwellin yhtälöitä jokaiseen osaan erikseen. [2]

4 SAR

Nykyaikana lähes jokainen omistaa matkapuhelimen, olimme sitten iltalenkillä tai työmatkalla bussissa, olemme jatkuvasti radio- sekä mikrotaajuisten kenttien vaikutuksen alaisena. Jopa kouluissa olevat wlanit säteilevät tietämättämme. Tutkijat ovat selvittäneet, että ionisoimaton säteily aiheuttaa kudoksen lämpenemistä sekä hermojen ärsytystä, mutta mitä muuta se aiheuttaa pidemmällä tähtäimellä, on vielä osaksi epäselvää. Suomen säteilyturvakeskus on hiljattain aloittanut (10/2009) nk. COSMOS- (Cohort Study of Mobile Phone Use and Health) projektin, minkä avulla pyritään selvittämään kännykän käytöstä aiheutuvat todelliset terveysriskit. Tulosten valmistumiseen menee vielä useampi vuosi. Pyrin tässä kappaleessa kertomaan, miten tämä sähköisille kentille altistuminen määritellään ja mistä sitä tarkemmin ottaen tulee.

4.1 Mitä SAR tarkoittaa

SAR (Specific Absorption Rate) eli suomeksi ominaisabsorptionopeus on tärkein dosimetrinen suure 100 kHz–10 Ghz taajuuksille (kappale 2.2: Ionisoimaton säteily). Sillä tarkoitetaan keskimääräistä energiamäärää, mikä absorboituu kehoon, sen joutuessa radiotaajuiseen sähkömagneettiseen kenttään. Ominaisabsorptionopeuden yksikkö on W/kg. Yleensä ominaisabsorptionopeus määritellään keskimääräisenä koko kehoon absorboituvana säteilymääränä tai johonkin tiettyyn kehon osaan paikallisesti absorboituvana säteilymääränä. Tavallisesti sitä käytetään mittauksissa liittyen matkapuhelimiin ja magneettikuvauksiin, mutta muitakin lähteitä on, kuten voidaan kappaleesta 4.2 lukea. [2]

On tärkeää huomioida, että ominaisabsorptionopeus ei ole koko kehossa samansuuruinen, vaan se vaihtelee säteilylähteen etäisyyden mukaan. Esimerkiksi matkapuhelimien yhteydessä ilmoitettu SAR-arvo kertoo korkeimman mahdollisen arvon mitattavassa kohteessa, mikä on yleensä ihmisen pää ja tarkemmin sanottuna antennia lähinnä oleva kudos. [2], [15]

Paikallista SAR-arvoa määritellessä tarkastellaan kudospalaa (1g tai 10g), siihen absorboitunutta keskimääräistä tehoa ja kudospalan kohdalla vaikuttavan sähkökentän voimakkuutta (kaava 7). [2]

$$SAR = \frac{dP}{dm} = \frac{\sigma {E_i}^2}{\rho} \tag{7}$$

missä,

dP =kudokseen absorboitunut teho

dm =kudoksen massa

E_i= sisäisen sähkökentän voimakkuus kudospalan kohdalla

σ = johtavuus

ρ =tiheys

Ihmisen sisäisen sähkökentän voimakkuus määritellään yleensä fantomin eli mallinuken avulla, koska eettisistä syistä ihmiskokeita ei voida useimmissa tapauksissa käyttää. Muita perusteita mallinuken käytölle ovat edullisemmat kustannukset ja mittausten toteutuksen helppous. Mallinuken anatomia ja sähköiset ominaisuudet on mallinnettu samankaltaiseksi tutkittavan kudoksen kanssa mahdollisimman tarkasti. Mallinuken avulla saadaan selvitettyä kehon sisäisen sähkökentän suuruus, virrantiheys sekä SAR erilaisissa olosuhteissa. Testeistä saadut tulokset ovat aina vähintään yhtä suuret kuin oikealla elävällä ihmisellä mitattuna olisivat. Joskus mittauksissa saatetaan käyttää kuolleita nisäkkäitä mallinuken sijaan. [2]

Kuten kappaleissa 5.3.1 ja 5.3.2 tulee ilmi, ionisoimaton säteily voi aiheuttaa ihmiselle kudoksen lämpötilan nousua ja hermojen ärsytystä. Tästä päästäänkin toiseen tapaan, jolla voidaan määritellä paikallinen SAR- arvo (kaava 8). [2]

$$SAR = c_p \frac{dT}{dt} \tag{8}$$

missä,

c_p= Kudoksen ominaislämpökapasiteetti (J/KgK tai $J/Kg°C$)

dT = lämpötilan muutos altistumisaikana (K tai $°C$)

dt = altistumisaika (s)

Usein eri laitteille standardeja määritettäessä ei olla kiinnostuneita paikallisesta SAR-arvosta, koska se voi vaihdella suuresti eri osissa kehoa. Jokaisella kudoksella on omat parametrinsa, mitkä määräävät kuinka hyvin energia niihin absorboituu. Lisäksi kudok-

sen muodolla ja taajuudella on oma vaikutuksensa, näistä kuitenkin tarkemmin dosimetrian yhteydessä kappaleessa 5. [2]

Koko kehon absorboima säteily saadaan määriteltyä integroimalla paikallinen SAR koko kehon yli (kaava 9).

$$SAR = \frac{P}{m} \tag{9}$$

missä,

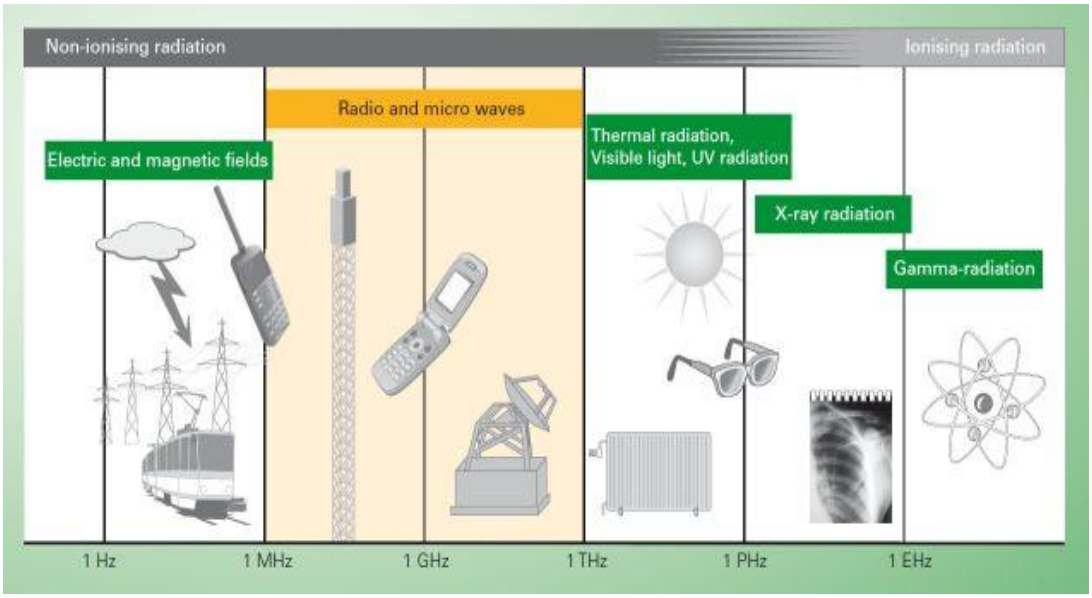
P= kokonaisteho

m= massa

4.2 Laitteet

Ominaisabsorptionopeuden (SAR) mittaukset keskittyvät mikro- ja radioaaltoihin (0,3 kHz–300 GHz), missä sähkö- ja magneettikentät tulevat yhteen. Sähkökenttä aiheuttaa magneettikentän ja magneettikenttä sähkökentän. Tuloksena on sähkömagneettisen säteilyn aaltoja, jotka matkaavat ilmassa eri reittejä, osuen erilaisiin kohteisiin ja lopulta osa energiasta absorboituu kohteeseen tai jatkaa suoraan sen läpi, loppuosan heijastuessa muualle. Kun puhutaan SAR- arvosta, tarkoitetaan yleensä matkapuhelimesta alun perin lähtöisin olevaa radiotaajuista säteilyä, mutta toki myös muutkin laitteet säteilevät.

Mikro- ja radioaaltojen lähteitä (kuva 3) ovat karkeasti jaettuna: antenni, televisio, matkapuhelimen tukiasema (esim. GSM ja UMTS), matkapuhelin, langaton puhelin (CT1,DECT/GAP), tietokoneohjattu radio-systeemi (TETRA, Tetrapol), bluetooth, wlan, tutka, mikroaaltouuni, vauvan itkuhälytin ja seurantakamera, langaton työpöytä (näppäimistö ja hiiri) sekä tehokas tietokone. [23]



Kuva 3: Laitteiden jako niiden toiminta-aluetaajuuden mukaan [15]

4.2.1 Matkapuhelin ja tukiasema

Matkapuhelimella tarkoitetaan digitaalisen viestinnän laitetta, millä ihmiset välittävät tietoa toisilleen erimittaisten etäisyyksien takaa. Nykyisen matkapuhelimen kehityksen alullepanijaksi on ajateltu Richard Frankielia ja Joel S. Engelia v.1983. Toki aikaisemminkin on ollut langatonta viestintää, mutta yhdenaikaisia puheluita ei ollut mahdollista suorittaa saman lähettimen alueella. Frankiel ja Engel keksivät kuinka langaton viestintä voidaan jakaa soluiksi ja kuinka solut voidaan uudelleen käyttää eri käyttäjillä. [16]

Nykyään matkapuhelinliittymiä on jo 4,6 miljardia kappaletta eli suurin osa ihmisistä omistaa matkapuhelimen. Niiden lähettämä RF-säteily onkin suurin säteilyn lähde ympäristössämme. [17]

Tärkeimmät tekijät analysoitaessa matkapuhelimen lähettämää säteilyä ovat puhelimen lähetysteho sekä kuinka suuri osa radioaaltojen emittoimasta energiasta absorboituu käyttäjän päähän (SAR). Lähetysteho määräytyy yhteydenlaadun ja välimatkan perusteella lähimpään tukiasemaan. Mitä lähempänä tukiasema on, sitä vähemmän tehoa vaaditaan. Sama pätee myös useimmiten laatuun, ellei väliin osu suuria esteitä. Matkapuhelin pyrkii ensisijaisesti toimimaan mahdollisimman pienellä teholla. Normaalisti sen lähetysteho sekä RF-säteilylle altistaminen on n. 1/10 maksimista (GSM) ja n. 1/100

maksimista (3G). Jos puhelinta käytetään esim. Internetin käyttöön (3G, EDGE,GPRS), sen tehonkulutus kasvaa ja säteilyn määrä sekä SAR-arvo nousee. [15]

Puhelimen käyttötapa määrää hyvin pitkälti, kuinka tehokkaasti ihminen altistuu sen lähettämälle säteilylle. Jos puhelinta pidetään normaalisti korvaa vasten, kaikki säteily kohdistuu päähän, mutta esim. handsfreen käytöllä onnistutaan riskiä pienentämään merkittävästi. Kannattaa myös huomioida itse puhelimen sijainti. Jos se on pöydällä, riski on pieni, mutta taskussa ollessa kaikki säteily kohdistuu lähimpään kudokseen samansuuruisena kuin korvalla pidettäessä. Matkapuhelimesta päähän imeytyvän lämpösäteilyn määrä on Suomessa 0,3–1,6 W/kg riippuen puhelimen mallista ja valmistajasta. [15]

Tukiasemalla (kuva 4) tarkoitetaan matkapuhelinverkon osaa, joka säätelee verkon liikennettä sekä matkapuhelimien välistä yhteyttä kyseisen tukiaseman alueella. Se toimii linkkinä puhelimen ja gsm-verkon välillä hoitaen mm. puheluiden salaamisen, pakkaamisen, purkamisen, moduloimisen ja synkronisoinnin. Sen teho määrää vaikutusalueen eli yhden solun koon. [15]

Suomesta löytyy GSM-tukiasemia lähes koko maasta, mikä mahdollistaa puheluiden soittamisen riippumatta soittajan maantieteellisestä sijainnista. Viime vuosina myös 3. sukupolven matkapuhelinteknologia (3G) on ollut yleistymässä ja UMTS:iin soveltuvia tukiasemia löytyy jo kaikista isoimmista kaupungeista. UMTS on GMS-verkkoon nähden tiedonsiirron kannalta nopeampi eli puheluiden laatu on parempi. UMTS:in käyttö vaatii tosin enemmän tehoa puhelimelta, mikä vaikuttaa säteilyn määrään kasvavasti. [15]

Matkapuhelinverkko sisältää kolmea solurakenteeltaan erilaista asematyyppiä: makro-, mikro- ja pikosoluisia. Kuten nimistäkin voi jo päätellä, makrosoluisilla asemilla on kaikkein suurin kantavuus ja pikosoluisilla kaikkein pienin, mikrosoluiset jäävät näiden keskelle. Makrosoluiset asemat mahdollistavat puhelut muutaman sadan metrin alueelle, kun taas pikosoluisten asemien yhteydessä puhutaan kymmenistä metreistä. Pikosoluisia asemia käytetään pääasiassa paikoissa, missä on katve-alueita tai erityisen paljon yhtäaikaisia matkapuhelinyhteyksiä. Pikosoluisten asemien tehonkulutus on normaalin mat-

kapuhelimen luokkaa, joten ne eivät aiheuta kovin suurta säteilyn määrää. Makrosoluisilla asemilla tehonkulutus on paljon suurempi, mutta niistäkään ei ihmiselle ole maantasolla suurta haittaa, koska niiden toiminta keskittyy pääasiassa taivaalle.. Toki tukiaseman antennin tasolla (esim. lähellä olevan korkea rakennus) oloa on syytä välttää. [15]

Kuva 4: GSM-tukiasema (900/1800Mhz) [18]

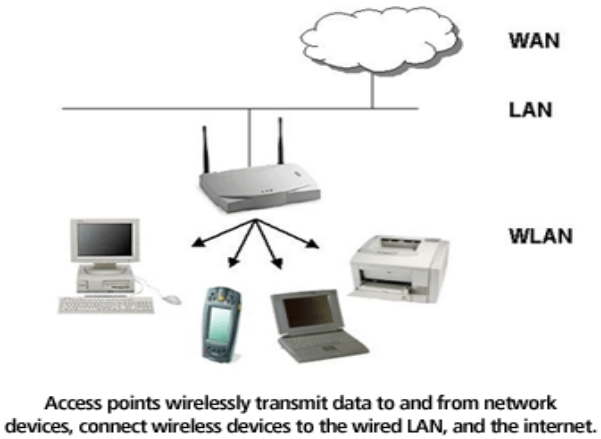
4.2.2 WLAN

WLAN (Wireless local area network) eli langaton lähiverkko on sovellus, mikä mahdollistaa langattoman verkkoyhteyden Internetiin. Alun perin käyttö oli rajoittunut tietokoneiden liittämiseen verkkoihin, mutta nykypäivänä yhä kasvavassa määrin, alkaa jokaisesta matkapuhelimesta myös löytyä wlan-yhteyteen vaadittavat komponentit.

WLAN:in toiminta perustuu lähettimen sekä vastaanottimen (Access-point) olemassaoloon, mikä toimii kulkuväylänä Internetiin ja on yhdistetty kaapelilla puhelinverkkoon. Access pointista eli esim. reitittävästä WLAN-modeemista löytyy myös antenni, mikä tarjoaa langatonta yhteyttä verkkoon ulkopuolisille laitteille (esim. matkapuhelin, tietokone tai tulostin). Vastaavasti tietokoneesta ja/tai puhelimesta löytyy integroituna tai usb (universal serial port) -paikasta langattoman yhteyden mahdollistava WLAN-adapteri, mikä neuvottelee yhteyden Access-pointtiin ja muodostaa näin langattomaan yhteyden Internettiin.[19]

Langattoman yhteyden toiminta perustuu sähkömagneettiseen aaltoliikkeeseen adapterin ja Access-pointin välillä, osa aaltoliikkeestä absorboituu eri kohteisiin ja näin voidaan puhua SAR-arvosta myös tässä yhteydessä. Kuvassa 5 on esitetty WLAN-verkon rakenne.

Teoriassa wlan-adapterin antenni sekä Access-point aiheuttavat maksimissaan 1 W/kg säteilyannoksen, riippuen kuinka kaukana ihmisen keho on niistä. Käytännössä teoreettiseen arvoon päästään vain, mikäli adapteri on kiinni kehossa, mutta jo muutaman sentin ero vähentää absorboituvan säteilyn määrää huomattavasti. Esimerkiksi 1 metrin etäisyydellä kehosta vaikutus on enää tuhannesosa. [15]



Kuva 5: WLAN-verkon rakenne [20]

4.2.3 Bluetooth

Bluetooth on vuonna 1998 kehitetty tekniikka, mitä käytetään laitteiden (esim. tietokone, puhelin, handsfree tai langaton työpöytä) keskinäiseen parittamiseen sekä tiedon siirtoon langattomasti. Bluetooth-adapteri voi olla laitteeseen integroitu tai erillinen laite. Siinä on lähetin, joka välittää sähköiseksi signaaliksi konvertoidun tiedon (tietoa tai ääntä) antennia pitkin toisen adapterin antennin kautta vastaanottimeen, missä sähköinen moduloitu signaali muutetaan takaisin alkuperäiseen muotoonsa (kuva 6). [15]

Radiotaajuinen signaali käyttää Bluetoothissa 2,4 GHz taajuutta ja sen kantavuus voi olla maksimissaan n. 100 metriä, mikäli käytössä on tehokkain mahdollinen Bluetooth-

lähetin. Bluetoothin SAR-arvo on enintään n. 0,5 W/kg, mikäli antenni on kiinni kehossa. Kun etäisyys kasvaa, SAR-arvo pienenee. [15], [21]

Kuva 6: Bluetooth /22/

4.2.4 Tutka

Tutkalla tarkoitetaan laitetta, jota käytetään jonkun tietyn kohteen paikallistamiseen ja seurantaan. Sen toiminta perustuu sähkömagneettiseen säteilyyn. Eli käytännössä tutkassa oleva antenni lähettää radio- ja mikroaaltotaajuista säteilyä, mikä osuessaan kohteeseen, heijastuu osaksi takaisin ja paljastaa kohteen sijainnin.

Käytettävät tutkat voidaan jakaa viiteen eri luokkaan riippuen niiden käyttötarkoituksesta:

1. Armeijan käytössä olevat (esim. puolustuskäyttö)
2. Lentoliikenteen kontrollointi
3. Sään seuranta (kuva 7)
4. Ympäristön kartoitus
5. Tiettyyn tarkoitukseen spesifioidut tutkat (esim. poliisilla auton nopeuden tarkkailu) [24]

Kuva 7: Säätutka [25]

Tutkan avulla voidaan tarkkailla kohdetta, jopa satojen kilometrien etäisyydeltä. Tällöin vaaditaan hyvin suuritehoinen tutka. Jos etäisyys on pienempi, myös tutkan vaatima teho on pienempi. Tutkan toiminnalle on ominaista, ettei uutta sähkömagneettista säteilypulssia lähetetä, ennen kuin on saatu selville, että edellinen pulssi on päässyt perille. Tästä johtuen pienemmän kantaman tutkat lähettävät pulsseja paljon kovemmalla intensiteetillä. Pulssien energiamäärä on suoraan verrannollinen etäisyyteen, suurempi etäisyys vaatii enemmän tehoa. Toki on olemassa myös tutkia, jotka lähettävät kantoaaltoa jatkuvasti, näistä käytetään nimeä kantoaaltotutka. [15]

Kun arvioidaan säteilyn määrää, pitää ottaa huomioon tutkan tehonkulutus, antennin tyyppi ja sijainti ihmisiin nähden. Tavallisesti tutkat sijoitetaan niin, ettei tavallisilla ihmisillä ole mitään asiaa niiden lähettyville. Muutenkin mikroaaltosäteilyn on todettu olevan keskimääräisellä teholla haitallista vasta, kun sille altistutaan useiden minuuttien ajan yhtäjaksoisesti. Käytännössä tämä ei ole mahdollista, koska useimmat tutkat pyörivät sekä lähettävät pulssejaan eri paikkoihin. Pulssit saattavat sisältää paljonkin energiaa, mutta koska ne vaikuttavat vain lyhyen ajan, ei niistä ole merkittävää riskiä. Aivan antennin vieressä SAR:in määrä saattaa nousta kymmeniä, jopa satoja kertoja suositeltavien normien yli. [15]

5 Dosimetria

5.1 Johdanto

Edellisessä kappaleessa 4.2 puhuttiin eri laitteista, jotka ovat radiotaajuisen säteilyn lähteitä. Laitteiden määrä on kasvanut eksponentiaalisesti viime vuosisadan aikana. Nykyään 10 kHz–300 GHz taajuudella toimivia laitteita löytyy joka kodista ja niiden vaikutuksista terveyteen ollaan päivä päivältä enemmän huolissaan.

Dosimetrialla tarkoitetaan radiotaajuisen säteilyn biologisten vaikutusten tutkimista. Tiedämme, että kudoksiin vaikuttava sähkökenttä E, virrantiheys J ja ominaisabsorptionopeus SAR ovat tekijöitä, mitkä vaikuttavat sähkömagneettisten kenttien biologisiin vaikutuksiin kehon sisäisesti. Asia, mitä ei tiedetä, on kuinka ulkoiset kentät vaikuttavat sisäisiin kenttiin. Tätä tarkastellaan tarkemmin sanottuna dosimetriassa. [2], [26]

Ulkoiset sekä sisäiset sähkömagneettiset kentät voivat vaihdella samanlaisissa altistumisoloissa eri ihmisillä ja muiden elävien olentojen välillä suuresti. Kentän vaihtelu on riippuvainen tarkasteltavan kohteen pituudesta, kehon muodosta, kehon sijainnista säteilylähteeseen nähden, kehon sisäisistä sähköisistä ominaisuuksista (esim. nestepitoisuus) sekä ulkoisen kentän taajuudesta. [2]

Jos taajuus on alle 100 kHz, dosimetrisissa mittauksissa biologisten vaikutusten kuvaamiseen käytetään lähes aina kudoksen keskimääräistä virran tiheyttä, mutta tätä korkeammilla taajuuksilla pitää huomioida myös tehon keskimääräinen absorptio kudoksessa tiettyä kilomäärää kohti eli SAR. [26]

Dosimetria voidaan karkeasti jakaa mikroskooppisen ja makroskooppiseen dosimetriaan. Mikroskooppisessa dosimetriassa tutkitaan kuinka sähköiset kentät jakautuvat solujen molekyylitasolla. Makroskooppisessa dosimetriassa puolestaan sitä, kuinka sähköiset kentät jakautuvat keskimääräisesti äärellisessä tilavuudessa. Näistä mikroskooppinen dosimetria painottuu lähinnä laboratorion molekyylitason mittauksiin, kun taas makroskooppisella hoidetaan käytännössä kaikki käytännön dosimetriset mittaukset. [2]

5.2 Sähköiset ominaisuudet

5.2.1 Johtavuus ja suhteellinen permittiivisyys

Fysikaalisella suureella permittiivisyys (ε) tarkoitetaan homogeenisen aineen kykyä varastoida ja kuluttaa sähkökentän energiaa eristeessä. Se on riippuvainen väliaineen polarisaatiosta sekä lämpötilan vaihtelusta. Toisinsanoin se ilmaisee, kuinka hyvin materiaali (esim. ihmisen kudos) antaa sähkökentän läpäistä itsensä. [15]

Dosimetrian yhteydessä käytetään suhteellista permittiivisyyttä, kun materiaali on epähomogeeninen. Sen tunnus on ε_r ja se on riippuvainen aineen rakenteesta. Suhteellisen permitiivisyyden arvo on epähomogeenisellä kudoksella aina suurempi kuin 1, kuten nähdään taulukosta 3 (s.33), kun vertaillaan homogeenistä vettä epähomogeenisiin aivoihin. [15]

Permittiivisyys saadaan määriteltyä matemaattisesti tyhjiön permittiivisyyden (ε_0) ja suhteellisen permittiivisyyden tulona. [27]

$$\varepsilon = \epsilon_r \times \varepsilon_0 \tag{10}$$

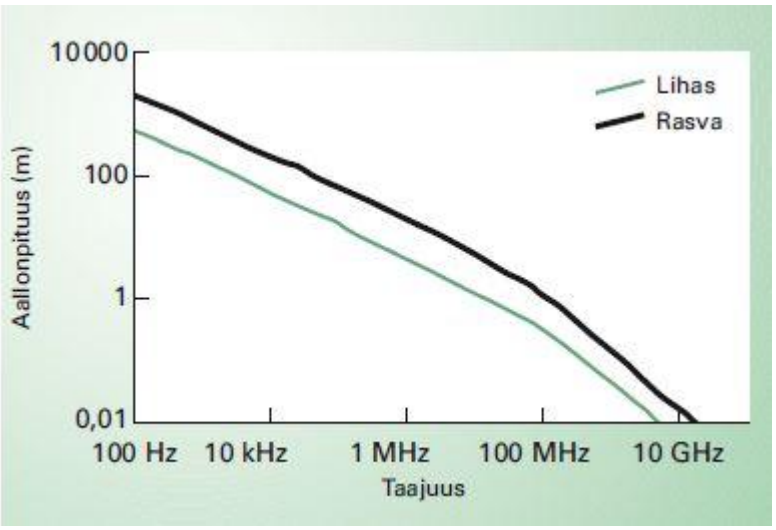
Johtavuudella tarkoitetaan materiaalin kykyä johtaa sähkövirtaa. Sen yksikkö on S/m, tunnus σ ja se on resistiivisyyden käänteisarvo.[27]

$$\sigma = \frac{1}{\rho} \tag{11}$$

5.2.2 Dispersio ja polarisaatio

Dispersiolla tarkoitetaan taajuuden vaihtelusta johtuvaa sähkömagneettisen aallon nopeuden muuttumista kudoksessa. Kun taajuus kasvaa, molekyylit ja solukalvot eivät ehdi polarisoitua kudoksessa kunnolla, mistä seuraa permittiivisyyden pieneneminen sekä johtavuuden lisääntyminen. Toisin sanoin korkeampi taajuus aiheuttaa teoriassa suuremman SAR- arvon kohteelle ja on täten vaarallisempi. Tätä on havainnollistettu

kuvassa 8, missä vertaillaan kahden eri kudostyypin keskinäistä aallonpituuden suhteellista muuttumista taajuuden kasvaessa. [2]



Kuva 8: Dispersion vaikutus lihas- ja rasvakudoksen aallonpituuteen [2]

Käytännössä aallonpituudella ei dosimetrisessä mielessä ole merkitystä kuin yli 10 MHz taajuuksilla, koska vasta tällöin aallonpituus on pienempi kuin ihmisen pituus. [2]

On olemassa neljä erilaista dispersiomuotoa, jotka on luokiteltu sen mukaan, millä taajuusalueilla niitä tavataan. Eri dispersiomuodot on esitelty taulukossa 2 lyhyesti.

Taulukko 2: Eri dispersiomuodot [2]

α	30-300 Hz	Varaa solukalvoa
β	1- 10 000 kHz	Varaa solukalvoa
δ	0.1-3 GHz	Vaikuttaa proteiineihin sekä sidottuihin vesimolekyyleihin
γ	10-100 GHz	Vaikuttaa vapaisiin vesimolekyyleihin

Polarisaatio liittyy sähkömagneettisten aaltojen kulkusuunnan määrittelyyn. Sen avulla voidaan kuvata sähkömagneettisen aallon tulosuunta suhteessa kentän vaikutuksen alaisena olevan kohteen asentoon. Tulosuuntaa voidaan kuvata kolmella eri polarisaatio

tyypillä. E-polarisaatiolla tarkoitetaan sähkökentän asentoa, H-polarisaatiolla magneettikentän asentoa ja K-polarisaatiolla sähkömagneettisen aallon etenemissuuntaa. [28]

5.2.3 Matalat taajuudet (kvasistaattinen alue)

Matalilla taajuuksilla tarkoitetaan dosimetrian yhteydessä taajuusaluetta 0 Hz–30 MHz ja siitä käytetään nimitystä kvasistaattinen alue. Alueen yläpäässä toiminta keskittyy pääasiassa kudosten lämpiämiseen tehon absorboitumisen myötä, häiriten lihas- ja hermoärsykkeitä, jolloin SAR eli ominaisabsorptionopeus tulee merkittäväksi altistumista kuvaavaksi suureksi. Kuitenkin alle 100 kHz taajuuksilla käytännössä kaikki sähkömagneettisen kentän biologisiin materiaaleihin kohdistuva tarkkailu tehdään virran johtavuuden ja tiheyden avulla. Näin pystytään helposti vertailemaan kehoon indusoituvan virran tiheyden arvoja jo tiedettyihin vaikutuksiin, eli tiedetään millä virrantiheydellä lihaksissa ja/tai hermoissa alkaa näkyä ei toivottuja stimulaatioita eli ärsykkeitä. [2], [26]

Ajan mukaan muuttuva magneettikenttä tuottaa sähkökentän ja toisinpäin (Faradayn laki). Muuttuvan magneettikentän vaikutuksesta kehoon indusoitunut sähkökenttä sekä pyörrevirrat saadaan määritettyä ideaalitilanteessa, missä oletetaan pyörrevirtojen kiertävän ympyrää, kaavalla 12. [26]

$$J = \sigma \times E = 0.5 \times r \times \sigma \times \frac{dB}{dt} \tag{12}$$

missä,

σ= kudoksen johtavuus (S/m)

E= sähkökentän voimakkuus (V/m)

r= pyörrevirtojen kierroksen säde (m)

dB/dt= magneettivuon tiheyden muutos (T/s)

J= virrantiheys (A/m^2)

Sähkökentän ja pyörrevirtojen voimakkuus on siis suoraan verrannollinen ulkoisen kentän muutosnopeuteen. Usein kuitenkin ihmisen kehon sisäisten sähkökenttien suora arviointi vaatii useita laskutoimituksia ja on täten hyvin hankalaa, koska esim. eri kudoksilla on erisuuret johtavuudet. Siksi matalilla taajuuksilla onkin helpompi ilmoittaa

maksimivirran indusoitumisarvoja kehon eri osille ja määrittää sitä kautta maksimiarvi-ot paikallisille SAR- arvoille. [26]

Kehoon altistumiseen liittyvät sähkökentät ja -virrat voidaan jakaa kahteen eri luokkaan. Niihin, jotka esiintyvät kudoksen ulkoisella pinnalla eli ns. pintasähkökenttä sekä kehon sisällä vaikuttaviin. Kun mennään kohti kvasistaattiseen alueen yläpäätä, lämpövaikutukset lisääntyvät ja SAR:ista tulee merkittävin altistumista kuvaava suure. Yhteys virrantiheydelle, kehon sisäiselle sähkökentälle ja SAR:ille löytyy kaavoista 7 sekä 13. [26]

$$SAR = \frac{J^2}{\sigma \times \rho} \tag{13}$$

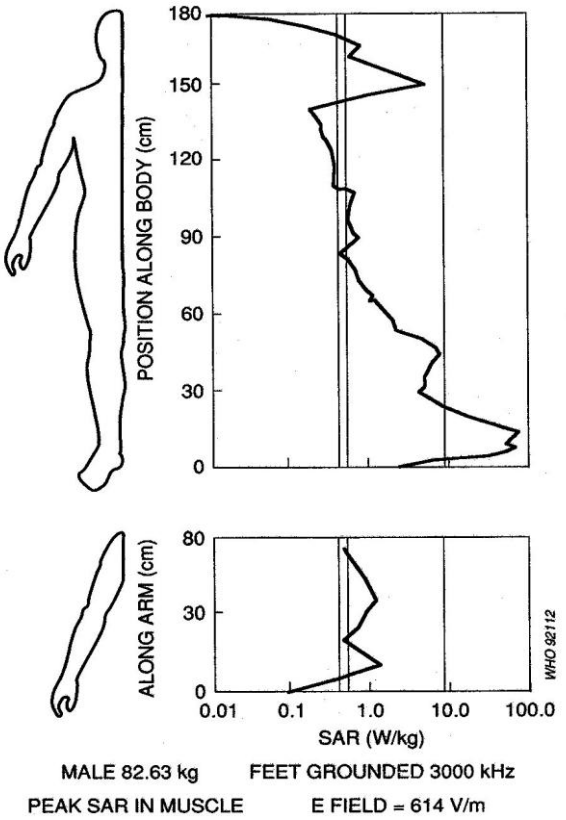
missä,
J= virrantiheys (A/m^2)
σ= kudoksen johtavuus (S/m)
E= sisäisen sähkökentän voimakkuus (V/m)
p= materiaalin tiheys (kg/m^3)

Aikaisemmin todettiin kehon sisäisten sähkökenttien suuruuden vaihtelun riippuvan eri kudosten ominaisuuksista. Lisäksi täytyy huomioida ulkoisen sähkökentän vaikutus. Kaavaa 14 voidaan käyttää tähän tarkoitukseen. [26]

$$J = k \times f \times E \tag{14}$$

missä,
J= virrantiheys (A/m^2)
f= taajuus (Hz)
k= vakio, jonka suuruus on erisuuri kehon eri osilla
E= ulkoisen sähkökentän voimakkuus

Kuvassa 9 kuvataan 82 kg painavan miehen lihaskudokseen kohdistuvaa SAR:ia, hänen altistuessaan 3000 kHz taajuudella vaikuttavaan 614 V/m sähkökenttään.



Kuva 9: SAR-jakauma kehossa [26]

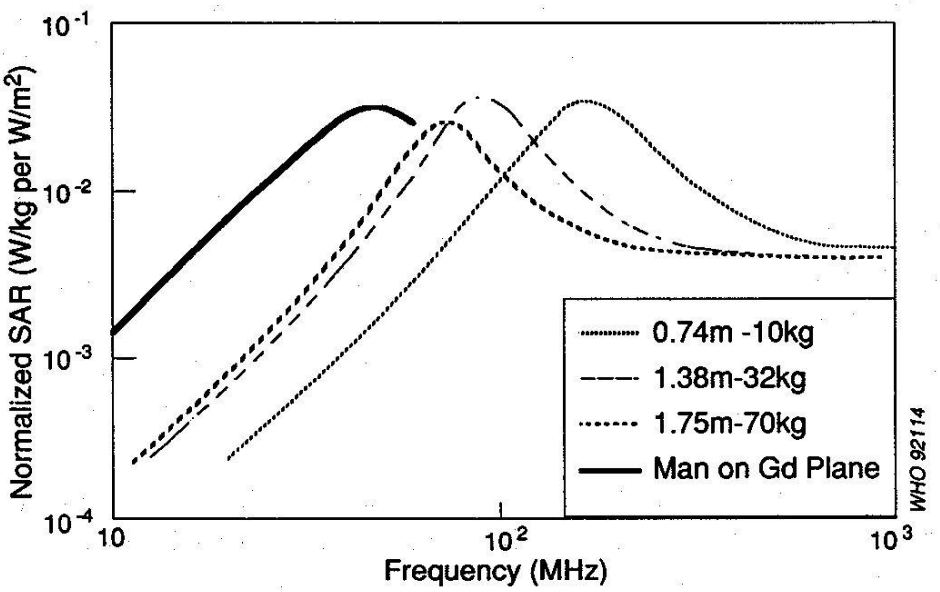
Kuten huomataan kuvasta 9, maadoitetun ihmisen paikallinen SAR on niissä kohdissa suurimmillaan, missä poikkipinta-ala on pienimmillään. Jalkojen suureen paikalliseen SAR-arvoon vaikuttaa myös jalkojen ja maan välinen kontakti (oikosulkuvirta). Pieni poikkipinta-alue tarkoittaa suoraan sitä, että energiaa ahtautuu enemmän pienenpään tilaan ja virrantiheys suurenee. Koska virrantiheys on kaavan 13 mukaan suoraan verrannollinen SAR:iin, myös ominaisabsorptionopeus kasvaa.

5.2.4 Keskisuuret taajuudet (resonanssialue)

Kyseinen taajuusalue rajoittuu taajuuksien 30–3000 MHz väliin. Nimi resonanssialue tulee siitä, kun johtavuusvirta sekä kapasitiivinen siirrosvirta kohoavat niin korkeiksi, että ne aiheuttavat voimakkaan sekundäärisen eli myöhemmin muodostuneen magneettikentän, jo olemassa olevan lisäksi. Tällöin kehossa kulkeva sähkökenttä vaimenee sisäosissa, ja virta alkaa ahtautua kohti kudoksen pintaa. Kun taajuus on sopiva, nämä pintaan pyrkivät vaimenevat aallot resonoivat keskenään ja aiheuttavat tehotihentymiä

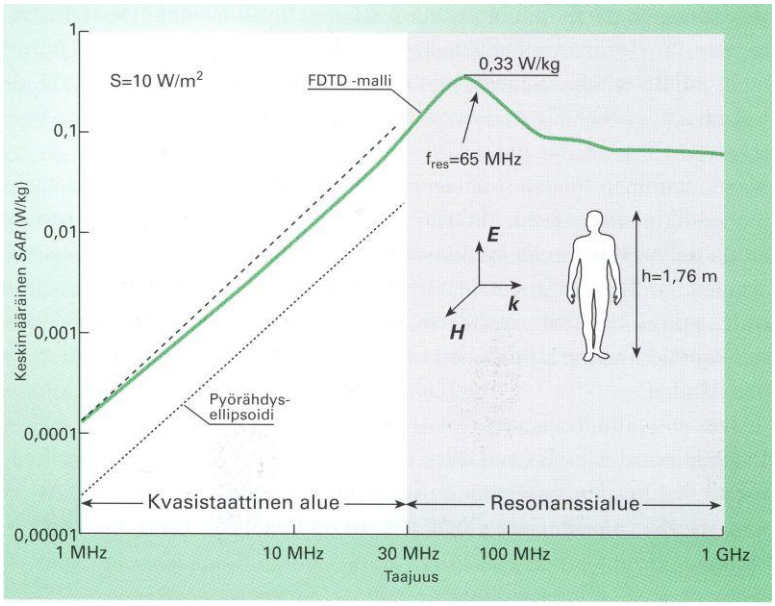
eli kuumia pisteitä eripuolille kehoa. Taajuus, missä resonointi alkaa, merkitsee kohtaa missä teho absorboituu tehokkaimmin sähkömagneettisesta aallosta eli kohtaa, missä SAR-arvo on korkein vallitsevissa olosuhteissa. [2]

Resonanssialueella ei voida käyttää yksinkertaisia analyyttisiä laskentakaavoja, vaan kehon sisäisen sähkökentän suuruus sekä SAR joudutaan määrittelemään Maxwellin yhtälöihin (kappale 3.6) perustuvien mallien avulla. Määriteltäessä pitää huomioida taajuuden vaikutus, eli se kuinka erikokoisilla sekä tyyppisillä kohteilla vaihtelee resonointitaajuus. Esimerkiksi rotalla on resonanssialueella resonanssitaajuus kymmenkertainen verrattuna ihmiseen ja maksimi SAR n. 3,6-kertainen (E-polarisaatio), mutta alemmilla taajuuksilla eli kvasistaattisella alueella vaikutus on päinvastainen. Alla olevassa kuvassa tulee ilmi ihmisen pituuden vaikutus SAR–arvoon resonanssialueella (kuva 10). [26]



Kuva 10: Ihmisen pituuden vaikutus ominaisabsorptionopeuteen [26]

Käytännössä, mitä pienemmästä ihmisestä on kyse, sitä matalammalla taajuudella resonointia (käyrien huippukohdat) tapahtuu. Lisäksi pitää huomioida mitattavan kohteen sijoittuminen tulevaan sähkömagneettiseen aaltoon nähden (polarisaatio) sekä sähköinen yhteys maahan, eli onko mitattava kohde maadoitettu vai ei.



Kuva 11: FDTD-menetelmällä analysoitu tilanne RF-säteilyn vaikutuksesta ihmiseen. [2]

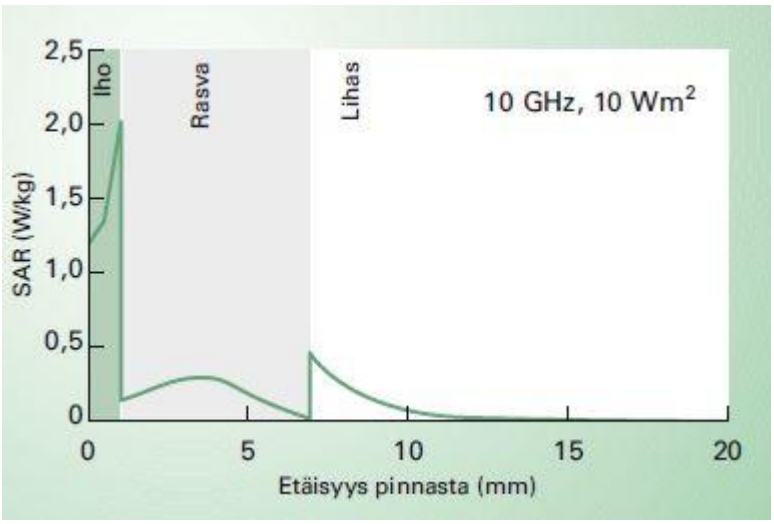
Aika-alueen differenssimenetelmä eli FDTD-menetelmä (Finite-difference time domain) on yksi mahdollinen malli, mitä voidaan käyttää analysoitaessa radiotaajuista sähkömagneettista säteilyä. Kuvassa 11 on havainnollistettu, kuinka 10W/m^2 tehoinen tasoaalto absorboituu SAR-taajuuksien funktiona maadoitettuun 1,76 m pitkään ihmiseen.

Kuten kuvasta 11 nähdään, keskimääräinen SAR on riippuvainen taajuudesta. Alle 30 MHz (kvasistaattinen alue) taajuuksilla SAR kasvaa lähes suoraan verrattuna taajuuden neliöön. Tällöin ihmisen kehossa pinta-absorptio on kaikkein voimakkainta. Kun aallonpituus on noin puolet ihmisen pituudesta (taajuus 65 MHz), pintaan pyrkivät aallot resonoivat keskenään ja SAR-arvo saavuttaa maksiminsa (0,33 W/kg). Taajuuden kasvaessa välillä 400 MHz–3 GHz, absorboituvan energian määrä pienenee suhteessa ja se lähenee hiljalleen kohti vakiotasoa, mikä on n. viidesosa resonanssialueen SAR-arvon huipusta eli n. 0,66 W/kg. Jos magneettikenttä (H-polarisaatio) olisi kuvassa olevassa tilanteessa pystysuorassa ihmiseen nähden, ei resonanssihuippua nähtäisi. Tästäkin huolimatta tehon absorboituminen olisi silti yhtä suurta kuin yllä olevassa tilanteessa, missä sähkökenttä on pystysuorassa ihmiseen nähden ja aallon eteneminen sitä vastaan kohtisuorassa.

Resonanssialueelle ovat tyypillisiä tehotihentymät eli kuumat pisteet, mihin teho absorboituu. Tehotihentymiä syntyy toki myös muilla alueilla, mutta resonanssialueella ne ovat ominaisia kehon sisäosissa. Tehotihentymissä SAR-arvo voi olla jopa 20–30 kertaa suurempi verrattuna keskimääräiseen koko kehon SAR-arvoon. Se miten asia otetaan huomioon standardeja määrittäessä, tulee ilmi kappaleessa 6. Jos taajuutta kasvatettaisiin vielä resonanssialueen taajuuksien yli, lämpövaikutus lisääntyisi ja absorboituminen rajoittuisi vain kehon pinnalle. Siitä lisää suurien taajuuksien kohdalla. [2]

5.2.5 Suuret taajuudet (pinta-absorptioalue)

Pinta-absorptionalue on nimitys, mitä käytetään 4-300 GHz taajuuksien rajaamasta alueesta. Koska taajuudet ovat suuria, ovat ulkoisen kentän aallonpituudet hyvinkin pieniä (<10cm) kehon mittoihin suhteutettuna. Tästä syystä tunkeutumissyvyys ei ole kovin suuri ja suurin osa tehosta absorboituu kehon pintaan (iho) ja välittömästi sen läheisyydessä oleviin kerroksiin. Kun suurella taajuudella sykkivä sähkömagneettinen aalto osuu kehon pintaan, osa tehosta heijastuu takaisin ja loppuosa jatkaa matkaansa sisäpuolelle vaimentuvana ja eri kudostyyppien rajapinnoista heijastelevina aaltoina. Ihmisen kehon koostumus ei ole tasainen, vaan se koostuu erityyppisistä kudoksista, kuten voidaan lukea keskisuurten taajuuksien kohdalta (kappale 5.2.4). Heijastuneet sekä etenevät aallot voivat aiheuttaa interferoidessaan tehotihentymiä. [2]



Kuva 12: Mikroaaltojen tunkeutuminen kehoon [15]

Eräs tehotihentymistä esiintyy ihon ja rasvakudoksen rajapinnassa, kuten nähdään kuvasta 12. Asia selittyy, kun tarkastellaan kyseisten kudosten vesipitoisuutta. Rasvakudoksen vesipitoisuus on pienempi kuin ihon, mikä tarkoittaa pienempää suhteellista permittiivisyyttä sekä johtavuutta. Ihosta tuleva aalto sekä rasvakudoksesta heijastuva aalto ovat vastakkaisvaiheisia. Tällöin sähkökentät summautuvat ja SAR-arvo kasvaa hetkellisesti, mikä näkyy kuvassa etäisyyden ollessa n. 1 mm ihon pinnasta. Toinen vastaavaa aaltojen kohtaaminen, tosin ei niin suuri hetkellisen SAR-arvon kasvaminen, tapahtuu rasva- ja lihaskudoksen rajapinnassa n. 7 mm etäisyydellä ihon pinnasta. Lihaksen johtavuus huononee, mitä syvemmälle mennään ja heijastumista ei pääse enää tapahtumaan, vaan tuleva aalto vaimenee vaimenemistaan, kunnes lopulta kaikki teho on absorboitunut. Mikäli taajuus on suurempi kuin 10 GHz, ihon pinta-absorptio kasvaa suhteessa taajuuteen ja samalla aallonpituus sekä tunkeutumissyvyys muuttuvat entistä pienemmiksi. [2]

Usein suurilla taajuuksilla ei ole tarpeellista tietää paljonko tehoa absorboituu tiettyyn kohtaan ihon pintaa, vaan ennemminkin tarkastellaan koko kehon lämpenemiseen johtavia vaikutuksia. Normaalisti vain noin kolmannes tehosta absorboituu, loppuosan heijastuessa pois. Pinta-absorptioalueella voidaan SAR määrittää kaavan 15 avulla, kun tiedetään tehotiheys. [2]

$$SAR = (1 - R^2) \times \frac{S \times A}{\rho \times V} \tag{15}$$

missä,

R^2= tehoheijastuskerroin ihon pinnalla

S= tehotiheys (W/m^2)

A= kehon poikkipinta-ala (m^2)

ρ= tiheys (kg/m^3)

V= tilavuus

5.2.6 Esimerkki 2G-matkapuhelinverkon dosimetristen ominaisuuksien vaikutuksesta kehoomme

Ihmisen kehossa olevat kudokset koostuvat pääasiassa vedestä (40–70 %), veteen liuenneista suoloista sekä muista orgaanisista yhdisteistä, kuten proteiineista ja hiilihydraateista. Koska vesipitoisuus on suuri, on se solurakenteen kanssa keskeisin tekijä, joka määrittelee kudoksen sähköiset ominaisuudet. Voidaan ajatella kudoksen olevan sekoitus johtimia ja eristeitä, missä kiinteät (=pieni vesipitoisuus) solunosat toimivat eristeinä ja loput johtimina. [2]

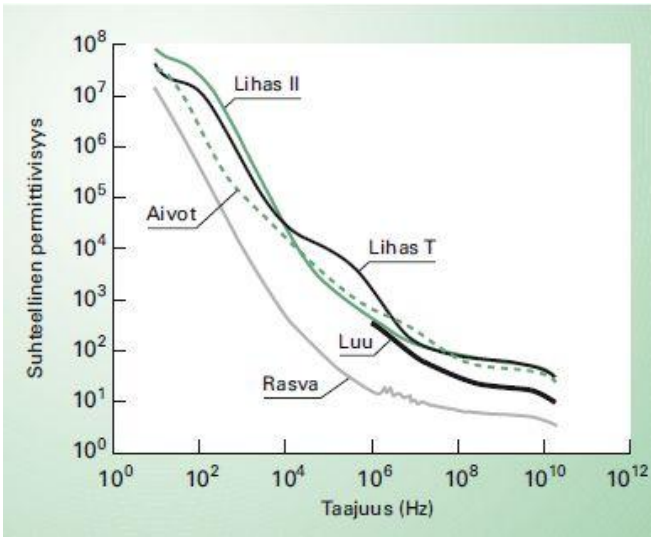
Taulukossa 3 on esitetty 2G-matkapuhelinverkon käytössä olevien taajuuksien aiheuttamia vaikutuksia ihmisen kehoon. Tiedot on kerätty Italian kansallisen tutkimuslaitoksen (IFAC-CNR) kehittämällä simulaattorilla, jolla saadaan laskettua haluttuja altistumissuureita eri taajuuksille. [29]

Taulukko 3: Kehon sähköiset ominaisuudet 2G-verkon vaikutuksen alaisena [29]

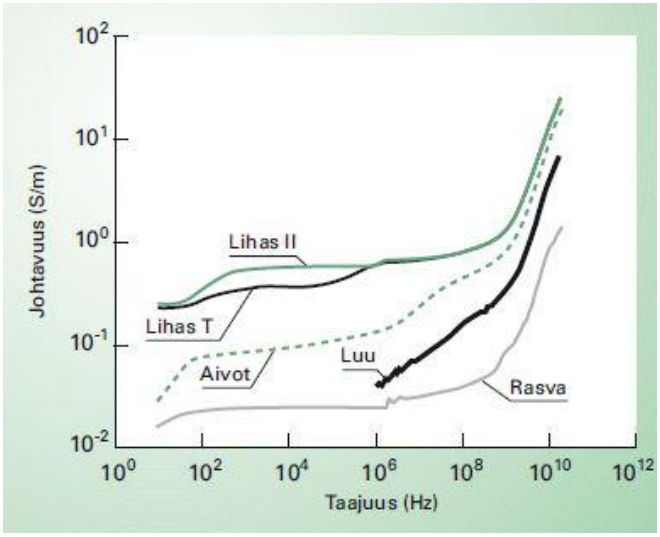
		900MHz		
Kudostyyppi	Johtavuus [S/m]	Suhteellinen permitiivisyys [εr]	Aallonpituus [m]	Tiheys [kg/m^3]
Ilma	0,00	1,00	0,333	1000
Veri	1,538	61,360	0,041	1025
Lihas	0,929	55,032	0,044	1060
Rasva	0,051	5,460	0,142	900
Iho (kuiva)	0,867	41,405	0,051	1010
Aivot (harmaa alue)	0,942	52,725	0,045	1040
Aivot (valkoinen alue)	0,591	38,886	0,053	1040
		1800MHz		
Kudostyyppi	Johtavuus [S/m]	Suhteellinen permitiivisyys [εr]	Aallonpituus [m]	Tiheys [kg/m^3]
Ilma	0,000	1,000	0,167	1000
Veri	2,044	59,372	0,021	1025
Lihas	1,341	53,549	0,078	1060
Rasva	0,078	5,349	0,072	900
Iho (kuiva)	1,185	38,872	0,026	1010
Aivot (harmaa alue)	1,391	50,079	0,023	1040
Aivot (valkoinen alue)	0,915	37,011	0,027	1040

Kuten huomataan taulukosta 3, lihaskudoksen suhteellinen permittiivisyys sekä johtavuus on yli kymmenkertainen verrattuna rasvakudoksen vastaaviin arvoihin. Tämä selittyy sillä, että lihas, aivot, iho sekä useimmat sisäelimet sisältävät vähän vettä, kun taas rasvakudoksessa sitä on huomattava määrä. Normaalivartaloisen täysi-ikäisen ihmisen keho sisältää lihasta n. 50 %, mikä tarkoittaa lihaskudoksen olevan keskeisin koko kehon sähköisiin ominaisuuksiin vaikuttava tekijä. Kyseiset sähköiset ominaisuudet ovat

riippuvaisia myös taajuuden vaihtelusta, jolloin eri dispersioiden vaikutusten johdosta, mitattavat suureet muuttuvat. Tämä voidaan todeta taulukosta 3, mutta paremmin se tulee ilmi kuvista 13 ja 14. Mitä korkeampi taajuus on, sitä suurempi on suhteellinen permittiivisyys ja vastaavasti sitä pienempi johtavuus. [2]



Kuva 13: Suhteellisen permittiivisyyden muutos eri kudoksissa taajuuden kasvaessa [2]



Kuva 14: Johtavuuden muutos eri kudoksissa taajuuden kasvaessa [2]

5.3 Biologiset vaikutukset

Terveysvaikutuksia tarkastellessa ei ole relevanttia puhutaanko sähkömagneettisesta kentästä vai säteilystä, koska tässä yhteydessä ne tarkoittavat samaa asiaa. Se mikä ker-

too enemmän terveydellisistä vaikutuksista: on kentän taajuus, kentän voimakkuus, altistumisaika säteilylle, etäisyys säteilylähteestä sekä suojautuminen säteilyä vastaan.

Säteily voidaan jakaa taajuuden mukaan ionisoivaan ja ionisoimattomaan säteilyyn. Tässä työssä olemme kiinnostuneita SAR:ista, jonka mittaukset keskittyvät radio- ja mikro-taajuiseen säteilyyn (300 Hz–300 GHz). Biologiset vaikutukset ovat hyvin pitkälti tällä alueella seurauksia kehon lämpenemisestä, koska useimmat laitteet, mitä on käytössä toimivat useamman megahertsin taajuuksilla. On ollut paljon puhetta, kuinka matkapuhelimen käytöstä aiheutuisi syöpää, mutta uusimman WHO:n (World Health Organization) tutkimuksen mukaan asioilla ei pitäisi olla yhteyttä toisiinsa. Syövän syntyminen vaatii DNA-vaurion, mikä jäisi solussa pysyväksi ja aiheuttaisi mutaation, mikä vuosien aikana kehittyisi vaaralliseksi. On totta, ettei asiaa ymmärrettävistä syistä ole riittävästi voitu tutkia, koska matkapuhelinteknologia on kohtuullisen nuori toimiala ja tutkimukset vaativat elävän ihmisen koekappaleeksi. Tälläkin hetkellä STUK on aloittanut syksyllä 2009 asiaan liittyvän vuosia kestävän tutkimuksen (COSMOS).

Tässä osiossa keskitytään tarkastelemaan jo tunnettuja välittömiä terveyteen vaikuttavia tekijöitä, eikä spekuloimaan sillä, mitä asiat saattavat aiheuttaa vuosien päästä, koska tutkimustietoa ei ole vielä riittävää määrää. Tässä työssä ei käsitellä yksityiskohtaisesti kehon eri osia, koska ne eivät varsinaisesti ole olennaisia.

Terveysvaikutukset voidaan karkeasti jakaa kehon lämpenemisestä johtuviin (thermal) sekä ei lämpenemisestä johtuviin (non-thermal). [30]

5.3.1 Lämmöstä johtuvat vaikutukset

Kuten voidaan lukea kappaleista 5.2.3 ja 5.2.4, ihmisen keho alkaa absorboida energiaa tehokkaammin taajuuden ollessa yli 100 kHz ja resonointia kentän sekä kehon välillä alkaa tapahtua. Mitä enemmän tehoa absorboituu kentästä, sitä enemmän lämpenemistä tapahtuu kudoksessa. Normaalisti +/-1 celsius-asteen vaihtelut kehon normaalilämpöön nähden ovat täysin normaalia vaihtelua. Tietyissä olosuhteissa, kuten liikunnan aikana, saattaa kehon lämpötila nousta jopa kahdella asteella. Myös ympäristön lämpötilalla, ilman suhteellisella kosteudella ja ilmavirtauksilla on oma vaikutuksensa kehon lämpö-

tilavaihteluihin. Keho pyrkii säätelemään lämpötilan vaihteluita hikoilulla sekä pintaverenkierron muutoksilla. Liian suuri lämpötilan nousu voi aiheuttaa tilapäisiä muutoksia kehon toiminnassa, huonoimmassa tapauksessa jopa kudosten kuolemista. Tämä tosin vaatisi yli 5 celsius-asteen lämpötilannousun kehossa, pitkän vaikutusajan sekä ulkoisen kentän läsnäolon. [2], [30]

Kun määritellään SAR-arvon vaikutuksia, pitää yllä olevien normaalien vaikutusten lisäksi huomioida absorboituvan energian määrä, kuinka energia jakautuu ja kuinka pitkään ollaan ulkoisen kentän vaikutuksen alaisena. Jos koko kehon SAR on 1-4 W/kg ja altistumisaika 30 minuuttia, kehon lämpötila kohoaa alle 1 celsius-asteen, mikä menee normaalin ihmiskehon lämpötilanvaihtelun rajoihin. Kun otetaan vielä huomioon se, että useimmat standardit rajoittavat SAR-arvon vieläkin pienemmäksi, jää kehon normaaleille lämpötilan vaihteluille hyvin marginaalia. [2], [26]

Normaalioloissa ihminen ei altistu suurille säteilymäärille, mutta esim. tutkan tai matkapuhelimen tukiaseman antennin välittömässä läheisyydessä voidaan altistua todella korkeille SAR-arvoille, jolloin kehoon voi tulla paikallisia palovammoja. SAR-arvo on niin korkea, ettei kehon lämmönsäätely enää toimi toivotulla tavalla, vaan paikallisten kudosten lämpötila nousee nopeasti ja proteiinien denaturoituminen eli tuhoutumiseen johtava prosessi alkaa. Jos altistuminen jatkuu pitkään, edessä on solujen kuolemista. Normaalien radiotaajuisten kenttien aiheuttama lämpötilan nousu, mikä ei ole suurempi kuin +3 ^{o}C, voidaan laskea kaavalla 16. [26], [30]

$$T' = \frac{SAR}{\lambda c} * (1 - e^{-\lambda t}) \tag{16}$$

missä,

T'= lämpötilannousu (^{o}C)

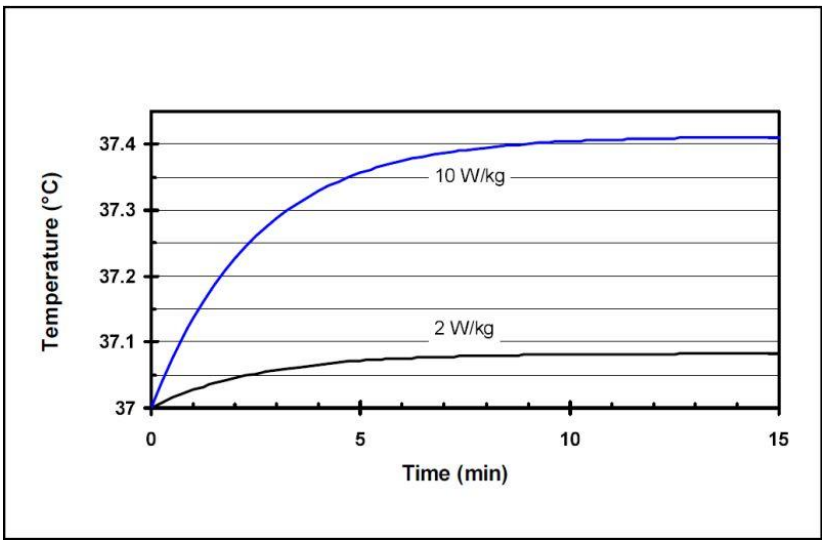
c= ominaislämpökapasiteetti (aivoilla c=3,64 kJ/kg^{o}C)

SAR= paikallinen ominaisabsorptionopeus (10g kudospalan keskiarvo)

λ= tehollinen lämpöaikavakio, millä kuvataan kudoksen jäähtymiskapasiteettia (aivoilla 0,4 min^{-1})

t= aika (minuutteina)

Kuvassa 15 on havainnollistettu kuinka paikallisen SAR:in arvoilla 2 W/kg ja 10 W/kg on vaikutusta ihmisen päähän. Arvot on saatu kaavan 16 avulla. Käytännössä vanhemman teknologian NMT-puhelimenkaan paikallinen SAR-arvo ei nouse yli 5 W/kg puhelinta käytettäessä 900 MHz taajuusalueella, uudempi GSM-tekniikka jää jopa tämän alle, kuten nähdään liitteestä 1. [30]



Kuva 15: Radiotaajuisen säteilyn lämpövaikutus ihmisen aivoihin [30]

Paikallisen SAR-arvon ollessa 10 W/kg, saavutetaan kuvassa n. 90 % maksimilämpötilannousu noin 6 minuutin altistumisen jälkeen. Tästä eteenpäin lämpötilan nousu hidastuu ja lopulta saavutetaan noin 0,4 ^{o}C kokonaisnousu. Aina 40 ^{o}C:een asti lämpötilan nousu on liki lineaarinen kasvavaan SAR- arvoon nähden, mutta tämän jälkeen se muuttuu epälineaariseksi, koska ihmisen verisuonet rupeavat laajenemaan ja keho alkaa tehokkaammin jäähdyttämään itseään. Käytännössä tarvitaan n. 50 W/kg SAR-arvo, että lämpötilan nousu olisi aivoissa kokonaisuudessaan 3 ^{o}C. Vasta 100 W/kg SAR-arvo aiheuttaisi pysyviä vammoja , kun solut alkaisivat vahingoittumaan aivoissa. [30]

Osa kudoksista on herkempiä kuin toiset. Esim. ihmisen silmälle pienempikin määrä säteilyä voi olla kohtalokasta ja tuloksena voi olla esim. harmaakaihi eli näön sumentuminen. Tämä johtuu siitä, ettei ihmisen silmässä kulje verisuonia, mitkä jäähdyttäisivät lämpötilan nousua. Kun sovelletaan kuvan 15 paikallisia SAR- arvoja silmään, on silmän lämpötilan nousu 10 W/kg SAR-arvolla maksimissaan noin 1 ^{o}C, kun se päällä

(aivoilla) oli 0,4 °C. Kuvassa 16 on havainnollistettu muita kriittisiä lämpötilatasoja, mitkä aiheuttavat keholle haittoja, kun ne ylitetään. [2], [30]

Vaikutus	Kohde	Lämpötilan kynnysarvo (°C)	Altistumisen kesto
Lämpöhalvaus	Ihminen, kehon sisäosat	> 42	1–2 h
Keskushermoston vaurioituminen	Ihminen, rotta, hiiri koira, kissa	42–44	1–2 h
Palovamma iholla Kipuaistimus	Ihminen	55–60 45	3–10 s 3–10 s
Käyttäytyminen muuttuu	Rotta (koko-keho)	1 °C (lämpö-tilannousu)	40–60 min
Harmaakaihi [1)]	Mykiö (kani)	≥ 41	≥ 30 min

Kuva 16: Kehon lämpötilannousun seurauksia [2]

Ihmiselle harmaakaihin syntyminen vaatii reilun 100 W/kg paikallisen SAR-arvon silmän kohdalle. Muutenkin keho alkaa reagoimaan lisääntyneeseen lämmöntuottoon koko kehon SAR-arvon ollessa 0.5–1.5 W/kg. Tällöin kehon oma lämmöntuotto alkaa korvautua hitaasti säteilylähteen tuottamalla lämmöllä. Jos koko kehon SAR-arvo nousee yli 4 W/kg raja-arvon, lämpökuormitus muuttuu haitalliseksi ja selviä oireita, kuten uupumista sekä suorituskyvyn heikkenemistä alkaa näkyä. Koko kehon SAR-arvon noustessa, tulee jo tunnettuja haittavaikutuksia ja pahimmillaan edessä voi olla kuolema. Kuvassa 17 esitellään lyhyesti, miten ihmisen keho käyttäytyy koko kehon SAR- arvon noustessa. [2]

Vaikutus	Koko kehon SAR (W/kg)	Paikallinen SAR[1] (W/kg)	Huom
Kipuaistimus iholla		120	3 GHz, 2 min, 10 kW/m^2
Harmaakaihi		100	
Lämpöaistimus		8	2,45 GHz, 10s, 630 W/m^2
Lämpöuupuminen ja -halvaus	>4		Muut lämpöolosuhteet
Lämmönsäätely-järjestelmä alkaa kuormittua	4		Muut lämpöolosuhteet
Lämpökuormaa vähennetään tietoisesti	1,2		Havaitsemiskynnys
Perusaineen-vaihdunnan lämpö pienenee	0,5–1,5		
ICNIRPin työntekijä-raja ylittyy	0,4	10[1)]	
ICNIRPin väestö-raja ylittyy	0,08	2[1)]	

Kuva 17: Koko kehon SAR-arvon fyysiset vaikutukset [2]

On myös olemassa epäsuoria lämpövaikutuksia. Kun ihminen on sähkömagneettisen kentän alaisuudessa, kontaktissa maadoittamattomaan isoon metalliseen objektiin, saattavat tässä objektissa kulkevat virrat indusoitua ihmisen kehoon. Alle 100 kHz taajuuksilla riski kohdistuu kudoksiin, jotka johtavat hyvin sähköä (hermo- ja lihaskudos), aiheuttaen lähinnä kipua. Korkeimmilla taajuuksilla (100 kHz–100 MHz) voi syntyä jopa syviä palovammoja, jos kontakti kohdistuu pieneen osaan kehoa, kuten yksittäiseen sormeen. [31]

5.3.2 Muut vaikutukset

Termejä "indusoitunut virta" sekä "virrantiheys" käytetään alle 1 MHz taajuisen säteilyn vaikutusten kuvaamisessa, kun taas korkeammilla taajuuksilla kehon lämpeneminen tulee dominoivaksi tekijäksi ja SAR-arvosta tulee keskeinen suure. Kehon ulkopuolinen hetkittäinen virta saattaa muuttaa solussa olevaa ionirakennetta, mistä voi seurata erilaisia tilapäisiä vaikutuksia. Esimerkiksi korkea sähkövirta voi muuttaa hermojen ionirakennetta, minkä seurauksena esiintyy hermo- ja lihasstimulaatioita sekä ei-toivottuja pakkoliikkeitä. Sen sijaan pitkäkestoinen virta saattaa aiheuttaa pysyviä vaikutuksia. Jos virta pääsee indusoitumaan esim. sydänlihakseen, seurauksena on sydämen pysähtyminen. Taulukossa 4 on kuvattu mitä eri virrantiheydet aiheuttavat kehollemme matalilla taajuuksilla (3-300Hz). [31]

Taulukko 4: Virrantiheyden terveydelliset vaikutukset [31]

current density (mA/m^2)	effect
< 1	no effects demonstrated
1 - 10	minor physiological effects
10 - 100	clear physiological effects
100 - 1000	possible adverse health effects
> 1000	acute danger resulting from ventricular fibrillation

6 Standardit ja testaus

Edellisessä luvussa oli puhetta RF-säteilyn aiheuttamista vaikutuksista. Asiana terveysvaikutukset eivät ole uusi puheenaihe, vaan jo vuosia niiden vaikutuksista ihmiseen on keskusteltu, mutta tarvittavien testausvälineiden puutteellinen kehitys on aikaisemmin rajoittanut testejä. Erityisesti radiotaajuutta käyttävien laitteiden aiheuttama lämpenemisilmiö on ollut huolenaiheena. Jotta tiedetyiltä sekä potentiaalisilta vaikutuksilta säästyttäisiin, ovat useat, niin kansalliset kuin kansainvälisetkin järjestöt kehittäneet standardeja sekä suosituksia. Osa standardeista on käytössä suuremmillakin (esim. EU) alueilla, kun taas loput ovat maakohtaisia.

Standardilla tarkoitetaan määritelmää, kuinka joku asia pitää tehdä. Standardeja määrittelevät viralliset organisaatiot. Kun taas normi on ennemminkin suositus, kuinka asia pitäisi tehdä. On toki olemassa myös normeja, jotka ovat velvoittavia. Standardien ja normien avulla pystytään rajaamaan kuinka paljon ihmiseen kohdistuu altistumista eri laitteista (esim. matkapuhelin). Jos laitteen säteilyarvot ylittävät sallitut rajat, se vedetään myynnistä tai jätetään julkaisematta. Altistumisrajat ovat yleensä erilaiset tavallisille ihmisille, kuin ihmisille, jotka työskentelevät säteilyä tuottavien laitteiden parissa. [2]

Valtaosa radiotaajuisen säteilyn aiheuttamista huolenaiheista liittyy matkapuhelimiin, koska niitä on määrällisesti enemmän käytössä kuin muita laitteita kyseisellä taajuusalueella. Erityisesti tarkkailu on kohdistunut päähän kohdistuvan absorboituvan säteilyn määrään tietyllä aikavälillä. Kun puhutaan maksimi SAR-arvosta standardien kohdalla, tarkoitetaan "aikavälillä" keskimääräistä absorboituvan energian määrää yhden päivän sisällä olevan 6 minuutin jakson aikana (ICNIRP). [30]

Tässä luvussa keskitytään erityisesti siihen, kuinka säteilyrajat asetetaan Euroopassa asuvan suomalaisen peruskansalaisen näkökulmasta (ICNIRP), ja vain lyhyesti kertomaan kuinka muualla maailmassa (IEEE ym.) toimitaan.

6.1 Asiantuntija- ja standardointijärjestöt

On olemassa kansainvälisiä, kuin myös kansallisia standardeja laativia sekä valvovia järjestöjä. Maailmanlaajuisesti standardit pohjautuvat kolmen eri järjestön suosituksiin, joista muut järjestöt ovat tehneet omia linjavetojaan. Euroopassa ionisoimattoman säteilyn säteilyrajat asettaa ICNIRP (International Commission on Non-Ionizing Radiation), myös osa Euroopan ulkopuolisista teollisuusmaista noudattaa ICNIRP:in suosituksia. Atlantin toisella puolella USA:ssa ja Kanadassa standardit päätetään IEEE:n (Institute of Electrical and Electronic Engineers) suositusten pohjalta. Kiinassa sekä Venäjällä standardit pohjautuvat Neuvostoliiton aikaisiin säteilyhygieenisiin normeihin. Taulukkoon 5 on listattu myös muita kansainvälisesti merkittäviä standardointijärjestöjä. [2]

Taulukko 5: Kansainväliset standardointijärjestöt [2]

Järjestö	www-sivut
ICNIRP – International Commission on Non-Ionizing Radiation	www.icnirp.de
IEEE – The Institute of Electrical and Electronics Engineers	www.ieee.org
IEC – International Electrotechnical Commission	www.iec.ch
CENELEC – European Committee for Electrotechnical Standardization	www.cenelec.org
WHO – World Health Organization	www.who.int

Suomessa standardit, mitkä pohjautuvat ICNIRP:in suosituksiin, määrittelevät STM (Sosiaali- ja terveysministeriö) ja STUK (Säteilyturvakeskus). STM on vaikutusvaltaisempi organisaatio. Sen ratkaisujen pohjalta määräytyy lainsäädännölliset uudistukset sekä linjavedot säteilyrajojen osalta. STUK toimii STM:n alaisuudessa. Sen tehtävänä on ennemminkin valvoa säteilyrajojen noudattamista, tutkia säteilyn (ionisoiva sekä ionisoimaton) vaikutuksia ihmisiin sekä ympäristöön ja jakaa tietoa säteilyn vaikutuksista.Taulukossa 6 on listattu muiden maiden kansallisia järjestöjä. [2]

Taulukko 6: Kansalliset standardointi- sekä tutkimusjärjestöt [2]

Maa	Viranomainen tai järjestö	www.sivut
Suomi	**STUK** (Säteilyturvakeskus) **STM** (Sosiaali- ja terveysministeriö)	www.stuk.fi www.stm.fi
Ruotsi	**SSI** (Statens strålskyddsinstitut)	www.ssi.se
Norja	**NRPA** (Norwegian Radiation Protection Authority)	www.nrpa.no
Iso-Britannia	**HPA** (Health Protection Agency)	www.hpa.org.uk
Saksa	**BFS** (Bundesamt für Strahlenschutz) Stralenschutzkommission	www.bfs.de www.ssk.de
Venäjä	**RNCNIRP** (Russian National Committee on Non-Ionizing Radiation Protection)	www.pole.com.ru/news_en.htm www.tesla.ru/english/
Yhdys-vallat	**FDA** (The Food and Drug Administration)	www.fda.gov
Kanada	**Health Canada**	www.hc-sc.gc.ca
Australia	**ARPANSA** (The Australian Radiation Protection and Nuclear Safety Agency)	www.arpansa.gov.au

6.1.1 ICNIRP

ICNIRP:in juuret ulottuvat aina vuoteen 1977 asti. Tällöin perustettiin kansainvälisen säteilysuojeluyhdistyksen (IRPA) toimesta komitea nimeltään INIRC (International Non-Ionizing radiation Commission), jonka tarkoituksena oli suojella väestöä ionisoimattomalta säteilyltä. Vuonna 1992 komitea irtosi erilleen IRPA:sta ja nimeksi vaihtui ICNIRP. [2]

Vuonna 1998 ICNIRP julkaisi nykyisin käytössä olevat ohjerajat muuttuville sähkö- ja magneettikentille (alle 300 GHz). ICNIRP:in ohjerajat voidaan jakaa perusrajoituksiin sekä viitearvoihin. Perusrajoituksilla tarkoitetaan sellaisia rajoja, mitkä suojaavat riittävän hyvin kaikilta todennetuilta haittavaikutuksilta. Viitearvot puolestaan ovat rajoja, mitkä eivät saa ylittyä edes kaikkein epätodennäköisimmässä altistumisskenaariossa. ICNIRP:n asettamat ohjerajat koskevat väestöä. [2]

ICNIRP ohjerajat rajoittavat eri taajuuksilla eri asioita. Alle 100 kHz taajuuksilla, missä säteilyn vaikutukset liittyvät lihas/hermostimulaatioihin, rajoitetaan virrantiheydenmäärää. 100 kHz–10 GHz taajuuksilla lämpövaikutus on merkittävin terveydellinen tekijä ja

tästä syystä rajoitetaan ominaisabsorptionopeutta (SAR). Jos taajuus kasvaa yli 10 Ghz, säteilyn absorboituminen muuttuu pinnalliseksi, eikä SAR:ia pystytä enää halutulla tavalla käyttämään mittasuureena, joten loogiseksi vaihtoehdoksi jää tehotiheys ja sen rajoittaminen. [2]

Valvotuissa olosuhteissa ihmiseen ei saisi kohdistua radiotaajuista säteilyä, jonka keskimääräinen SAR on enemmän kuin 0,4 W/kg. Valvomattomissa olosuhteissa keskimääräisen radiotaajuisen säteilyn SAR-raja on 0,08 W/kg. Valvotuissa olosuhteissa (radiotaajuisten kenttien parissa työtä tekevä ihminen) saa altistua siis 5 kertaa korkeammalle säteilymäärälle kuin tavallinen ihminen valvomattomissa olosuhteissa. Hetkellisesti koko kehon SAR-arvo voi olla korkeampi, kunhan 6-minuutin keskiarvotulos ei ylitä säädettyjä rajoja. Samoja keskimääräisiä SAR-rajoja käyttävät myös muut merkittävät järjestöt omissa ohjeraja-julkaisuissaan (IEEE 1992, CENELEC 1995 ja ICNIRP 1998). [30]

On olemassa erilaisia rajoja kehon eri osille (koko keho, pää, ylävartalo, kädet, jalat, ranteet ja nilkat), mutta päähän kohdistuvat vaikutukset kiinnostavat eniten testaajia sekä tavallisia ihmisiä. ICNIRP:in mukaan valvomattomissa olosuhteissa paikallinen SAR saa olla päässä korkeintaan 2 W/kg ja ylävartalossa 4 W/kg. Valvotuissa olosuhteissa rajat ovat 5 kertaa korkeammat, kuten oli myös koko kehon SAR-arvojen kohdalla. IEEE:llä on hieman tiukemmat vaatimukset päähän kohdistuvan säteilyn osalta. Heidän asettamillaan rajoilla ei 1,6 W/kg SAR-arvo saa ylittyä. Ero johtuu siitä, että ICNIRP:in rajoituksissa paikallinen SAR määritellään 10g testipalan avulla, kun taas IEEE:n määritykset pohjautuvat 1g testipalan käyttöön. Eri järjestöjen paikalliset SAR-arvot (pää) on koottu yhteen taulukossa 7. [30]

Taulukko 7: Altistumisrajat paikalliselle SAR-arvolle [30]

Organization	Year	Status	Specific absorption rate (SAR)[a] [W/kg]		Averaging	
			General Public	Controlled environment	Time (min)	Mass (g)
IRPA	1988	Recommendation	-	10	6	100
STM	1990	National regulation	-	10	6	-
IEEE	1992	National standard	1.6[b]	8[c]	-	1
CEC	1994	Directive proposal	-	10	6	100
CENELEC	1995	Standard	2	10	6	10
ICNIRP	1996	Statement	2	10	6	10
FCC	1996	National regulation	1.6[d]	8	-	1
ICNIRP	1998	Recommendation	2	10	6	10

IRPA: International Radiation Protection Association
STM: Ministry of Social Affairs and Health, Finland
IEEE: Institute of Electrical and Electronics Engineers, USA
CEC: Commission of the European Communities
CENELEC: European Committee for Electrotechnical Standardization
ICNIRP: International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection
FCC: Federal Communications Commission, USA

[a] twofold SAR allowed in hands and legs
[b] averaged over any 30 minutes
[c] averaged over any 6 minutes
[d] averaged over the pulse period

6.1.2 CENELEC

ICNIRP:in suositusten pohjalta tiedetään kuinka suurelle säteilymäärälle ihminen saa altistua. Säteilyä tuottaviin laitteisiin ei ICNIRP:in asettamat standardit suoraan taivu, vaikka niiden taustalla vaikuttavatkin. CENELEC (European Committee for Electrotechnical Standardization) on EU:n tukema standardointijärjestö, jonka tehtävänä on laatia teknisiä standardeja laitteille, joiden toiminnasta aiheutuu sähkömagneettista säteilyä. Standardien avulla määritellään, etteivät laitteet säteile yli suositusrajojen. Standardien mukaan valmistetut tuotteet merkitään ”CE”-merkinnällä, ilman kyseistä merkintää esim. Kiinasta tuodut matkapuhelimet jäävät tullin haltuun. Matkapuhelimia ja SAR- mittauksia Euroopassa koskevat standardit vahvistettiin viimeksi vuonna 2001 (EN 50360:2001 ja EN 50361:2001). Muiden maanosien SAR-mittauksiin liittyvät standardit on lyhyesti listattu liitteeseen 2. [2], [30]

6.2 Testaus

6.2.1 Yleistä

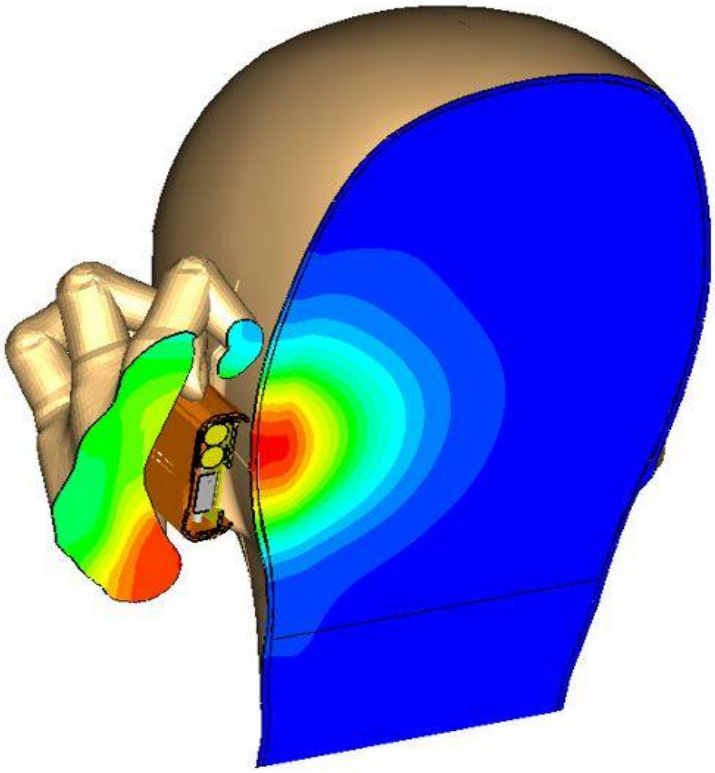
Altistumista sähkömagneettisille kentille voidaan kuvata mittauksilla, simuloinneilla sekä laskentamalleilla, jotka pohjautuvat tarkasteltavan kohteen teknisiin tietoihin. Se mitä menetelmää käytetään, riippuu seuraavista asioista:

- Kentän taajuus ja spektri
- Kentän aaltomuoto
- Etäisyys säteilylähteestä
- Mikä kehon osa altistuu
- Altistuvan henkilön fyysiset ominaisuudet
- Standardit eli mihin rajoihin tähdätään

Yleensä ottaen sähkömagneettisen kentän täydellinen mittaaminen on vaikeaa, koska mittaukset pitäisi suorittaa samanaikaisesti useammassa eri suunnassa (xyz- avaruus) ja monessa eri pisteessä. Lisäksi kentän spektri ei välttämättä ole tasainen ja amplitudikin voi vaihdella epäsäännöllisesti. Tästä syystä eri mittaustilanteisiin on omat spesifit mittauslaitteistot ja menetelmät. Usein myös mittausdatasta suodatetaan käyttöön vain altistumisen kannalta olennaiset asiat. [2]

6.2.2 SAR-mittaukset

Matkapuhelimeen puhuttaessa kehon paikallinen SAR-arvo voi olla hyvinkin paljon suurempi kuin koko kehon SAR-arvo, kuten nähdään kuvasta 18. Kuvassa suurin osa säteilystä absorboituu puhelinta kannattelevan käden ja pään väliin. Muutenkin sähkö- ja magneettikentän viitearvot saattavat ylittyä, vaikka todellisuudessa ei altistuttaisi liian suurille SAR-arvoille. [2]



Kuva 18: Energian absorboituminen päähän puhelimeen puhuttaessa [34]

Absorboituvan energian määrää voidaan mitata niin sisäisesti kuin ulkoisestikin. Sisäisiä mittauksia ei ymmärrettävistä syistä voida toteuttaa elävillä ihmisillä, joten asioiden helpottamiseksi käytetään fantomeja eli ihmiskehoa jäljitteleviä mallinukkeja. SAR-testausta varten on olemassa eri standardeja (liite 2), jotka määrittelevät miten ja minkälaista laitteistoa on käytettävä testaamiseen. [2]

Fantomi

Fantomeja käytetään mallintamaan ihmiskehon anatomisia ja sähköisiä ominaisuuksia. Fantomeja on kahta eri tyyppiä, osakeho- ja kokokehofantomeita. Jos halutaan mitata päähän kohdistuvaa säteilyä langattomasta laitteesta, mitä painetaan korvaa vasten, käytetään SAM-fantomia (specific Anthropomorphic Mannequin) eli antropomorfista (ihmisen kaltainen) mallinukkea. SAM-fantomeita käytetään osakeho-mittauksissa, useimmin ne kuvastavat ihmisen päätä tai vaihtoehtoisesti yläruumista. Kuvassa 19 on esimerkki mittaustilanteesta, missä käytetään SAM-fantomia.

Mittauksissa, missä langaton laite ei ole pään välittömässä läheisyydessä, vaan tarkoitus on mitata koko kehoon absorboituvaa energiaa, käytetään useimmiten flat-fantomia. [2], [35]

Kuva 19: Mittaukset, missä käytetään SAM-fantomia [35]

Fantomi voi olla rakenteeltaan kiinteä, puolikiinteä tai nestemäinen riippuen mittaustilanteesta. Nestemäisen fantomin käytön edut löytyvät kolmiulotteisen SAR-jakauman määrityksestä, toisaalta sen avulla ei voida jäljitellä yhtä montaa kudostyyppiä kuin kiinteällä tai puolikiinteällä. Riippumatta fantomin rakenteesta, sen avulla saatujen SAR-arvojen suuruus pitää olla vähintään yhtä suuri kuin aidossa ihmisen kehossa olisi. [2]

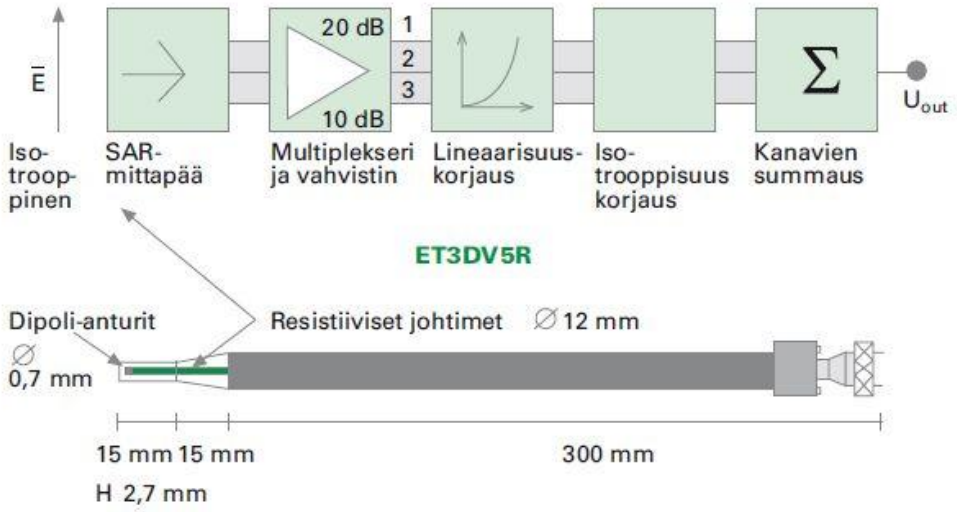
Simulointineste

Fantomi sisältää aina kudosekvivalenttia nestettä eli nestettä, jonka tehtävänä on jäljitellä kudoksen sähköisiä ominaisuuksia. Neste mahdollistaa mittapään vapaan liikkeen fantomin sisäpuolella. Standardit määrittelevät aina tietylle taajuusalueelle sopivat nesteen ominaisuudet, eli sen kuinka suuret pitää johtavuuden sekä suhteellisen permitiivisyyden arvojen olla nesteessä. Samaa nestekoostumusta ei voida käyttää eri taajuusalu-

eilla, vaan jokaisella taajuusalueella on oma reseptinsä. Normaalisti mittauksissa pitää huomioida ±5 % virhemarginaali, koska nesteen sekoitusvaiheessa voi tulla helposti eroavaisuuksia (raaka-aineiden tarkat määrät ja eri raaka-aineiden vaihteleva koostumus). [35]

Mittapää

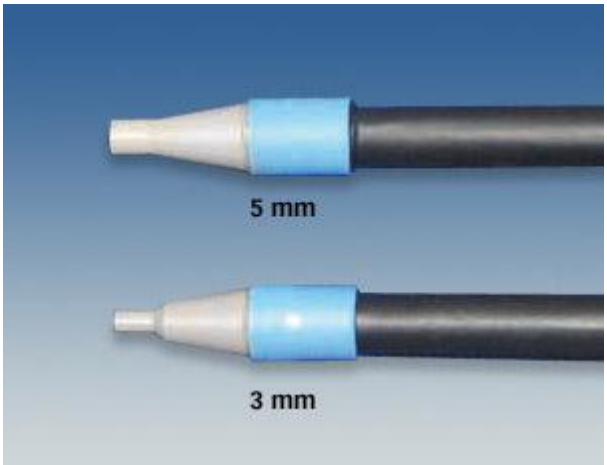
SAR-mittapään tyypillinen rakenne koostuu kolmesta hyvin pienestä ja lyhyestä identtisestä dipoli-anturista, jotka ovat tiiviin muovisuojan sisällä mittapään kärjessä. Mittapään varsi sisältää resistiivisiä johtimia, joiden tehtävänä on siirtää eteenpäin informaatio dipoli-antureihin indusoituvasta radiotaajuisesta jännitteestä. Mittapään toiseen kärkeen voidaan liittää vahvistin, jonka ulostulosta saadaan siirrettyä mitattu tieto eteenpäin jatkokäsittelyä varten. Kuvassa 20 on sama asia esitetty tarkemmin kuvana. [2]



Kuva 20: SAR-mittapään rakenne [2]

Mittapään kohdalla on oleellista, ettei se ole kooltaan liian suuri ja aiheuta resonointia mitattavalla taajuusalueella. Se ei myöskään saa häiritä merkittävästi kentän rakennetta liikkuessaan kudosekvivalentissa nesteessä fantomin sisällä. Standardien mukainen mittapää on herkkä, lineaarinen ja isotrooppinen. SAR-mittapäillä, jotka mittaavat jännitettä, voidaan mitata SAR:ia aina reiluun 3 GHz asti. Lämpötilan muutosta mittaavia mittapäitä voidaan käyttää jopa 6 GHz asti, koska ne ovat kooltaan pienempiä kuin jännitettä mittaavat. Minimissään pystytään mittaamaan 0,01 W/kg suuruisia arvoja ja maksi-

missaan n. 100 W/kg suuruisia. Standardeilla on rajoitettu SAR-mittapään halkaisijaksi korkeintaan 8 mm. Kuvassa 20 olevan mittapään halkaisija on 0,7 mm. Mittapään koolla on erityisesti merkitystä mitattaessa korkeilla taajuusalueilla, mitä pienempää mittapäätä käytetään, sitä vähemmän se aiheuttaa häiriöitä mitattavaan kenttään ja sitä korkeammilla taajuuksilla voidaan mittauksia tehdä. Mittapään ulkoinen olemus selviää kuvasta 21. [35]

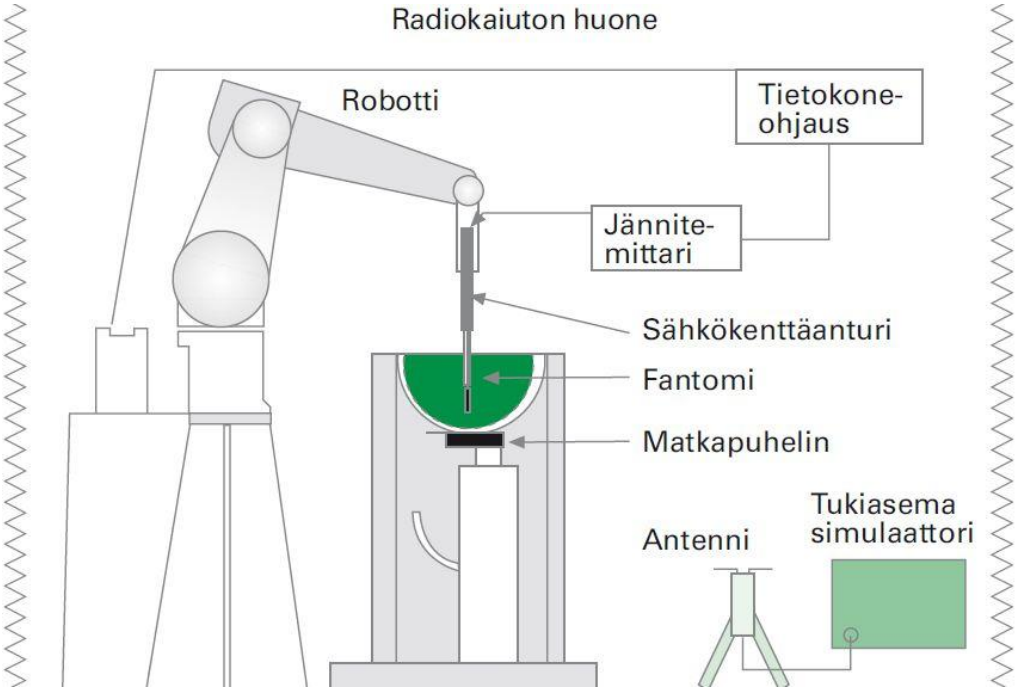


Kuva 21: 3 mm ja 5 mm halkaisijoilla olevat mittapäät [35]

Mittaustapahtuma

Tyypillisessä mittaustapahtumassa tietokoneen ohjaamaa robotti-järjestelmä kannattelee mittapäätä ja ohjaa sitä läpi kolmiulotteisen mittauspisteiden verkoston. Mittapään kulkiessa kudosekvivalentissa nesteessä, se mittaa esim. kolmesta pisteestä niiden jännitteet. Saaduille jännitearvoille tehdään lineaarikorjaus ja ne summataan, minkä jälkeen tiedetään jokaisen mittauspisteen sähkökentän voimakkuuden tehollisarvo E_i. Tehollisarvon avulla ja kaavaa 7 hyväksi käyttäen voidaan määrittää ominaisabsorptionopeus eri pisteissä. [2], [35]

Tämän jälkeen pistemäisistä SAR-arvoista määritetään keskiarvo. Lopulta lasketuista SAR-keskiarvoista etsitään maksimiarvo, jota verrataan esim. ICNIRP:in asettamiin ohjearvoihin. Kuvassa 24 on STUK:in näkemys oikeanlaisesta SAR-mittausjärjestelmästä. [2]



Kuva 22: STUK:in käyttämä SAR-mittausjärjestelmä [2]

On olemassa myös toinen tapa mitata SAR-arvoa. Nimittäin edellä kuvatusta skenaariosta voidaan mittapäässä olevat sähkökenttäanturit korvata lämpötila-antureilla. Tässä tilanteessa mitataan keskimääräinen lämpötilan nousu tietyllä altistumisajalla ja käytetään kaavaa 8 SAR-arvon laskemiseksi. [2]

Lämpötilan nousumittaukset edellyttävät, ettei lämmönsiirtymistä tapahdu, mikä puolestaan tarkoittaa, että altistumisajan on oltava mahdollisimman lyhytkestoinen. Lämpötilan mittaukseen soveltuvia antureita on olemassa useaa eri tyyppiä (yleisimmin käytössä on suurohminen termistorianturi), millä jokaisella on omat hyvät ja huonot puolensa. Oleellista on kuitenkin se, etteivät ne saa häiritä kudosekvivalentin nesteen sisäistä sähkökenttää mittauksissa missään tilanteessa. Ei ole olemassa yhtä ja oikeaa tapaa määrittää SAR-arvoa. Jännitearvoihin pohjautuva mittaus on nopeampi suorittaa kuin lämpötilanmuutosta tarkkaileva, mutta toisaalta lämpötila-antureilla pystytään tekemään SAR-mittauksia tuplasti korkeammalla taajuudella. [2]

6.2.3 Matkapuhelimien testituloksia

Aikaisemmin oli puhetta STUK:in ja STM:n roolijaosta. STM:n tehtävänä on asettaa standardeja matkapuhelinten turvallisuudelle, jotka pohjautuvat ICNIRP:in suosituksiin, kun taas STUK pääasiassa valvoo näiden suositusten noudattamista. STM:n asettama raja väestön altistumiselle on 2 W/kg.

Kuten nähdään kuvasta 18, altistuminen matkapuhelimesta peräisin olevalle säteilylle on hyvin paikallista ja vaimenee melko nopeasti pinnalta syvemmälle mentäessä. Matkapuhelimet aiheuttavat keskimäärin 0,5–1,6 W/kg suuruisen paikallisen SAR-arvon, mikä jää selkeästi STM:n rajojen alle. [2]

Tiedetään, että matkapuhelinvalmistajat joutuvat testaamaan tuotteensa ennen markkinoille julkaisua. Usein eri mallien ohjekirjoissa lukee tarkka SAR-arvo ja lisäksi tuotteissa saattaa olla eri merkintöjä (esim.”CE”), mitkä takaavat sen, että kyseinen malli valmistajan mukaan läpäisee merkinnän mukaisen standardijärjestön laatukriteerit. STUK:in tehtävänä on testata satunnaisella otannalla myydyimpien puhelimien joukosta, että tuotteen valmistajan lupaukset ovat riittävän tarkkoja. Liite 1 sisältää STUK:in vuoden 2009 alkupuolella testaamia tuotteita, aivan tuoreimmat mallit puuttuvat, mutta kyseinen lista antaa hyvän yleiskäsityksen vallitsevasta tilanteesta. [36]

Maksimiarvo STUK:in mittauksissa on liitteen 1 mukaan 1,41 W/kg Sony Ericssonin W350i-mallilla, kun taas pienimmät arvot löytävät Nokian puhelinten joukosta. Huomaamme myös, että STUK:in ja valmistajien mittaukset eroavat välillä toisistaan. Säteilyturvakeskuksen mukaan valmistajan ilmoittamat arvot ovat pääasiassa ±30 % vaihteluvälin sisällä verrattuna STUK:in mittaamiin arvoihin. Jossain malleissa ero saattaa olla suurempikin, mutta oleellisinta on, ettei rajoja ylitetä missään tilanteissa. Mahdolliset erot selittyvät erilaisilla mittauskäytännöillä ja käytössä olevilla laeilla ja standardeilla. [2]

7 Loppusanat

Globaalikehitys etenee vuosi vuodelta entistä kovempaa eteenpäin nopeasti kehittyvän teknologian avittamana ja sillä on moninaiset vaikutukset ihmiskunnan tulevaisuuden kehittymisessä. Todennäköisesti maailmassa on vuonna 2050 jopa 9,2 miljardia ihmistä, mikä on 2,5 miljardia enemmän kuin nyt. [39]

Ihmismäärän ja elintason kasvaessa ja globaalin maailman teknistyessä uusien ionisoimatonta säteilyä tuottavien ja hyödyntävien laitteiden määrä kasvaa huimasti. Tästäkin syystä on välttämätöntä tietää, mitä sähkömagneettinen säteily on, miten se vaikuttaa ihmisten terveyteen ja kuinka sitä mitataan, jotta kehittyvä teknologia palvelisi ihmiskuntaa parhaimmalla tavalla. Nämä kysymykset ovat opinnäytetyöni kantava teema.

Ionisoimaton säteily ei nykytiedon valossa aiheuta normaaliolosuhteissa pysyviä vaikutuksia ihmisen terveydentilaan, joten ulkonakin on nykykäsityksen mukaan turvallista liikkua. Paljon on puhuttu, esimerkiksi, kuinka matkapuhelimen käyttö mahdollisesti aiheuttaa syöpää. Syövän kehittyminen kestää vuosia ja sen syntymiseen vaikuttavien tekijöiden tutkiminen on vaikeaa. Viimeisimmän WHO:n raportin mukaan matkapuhelimen käytöllä ja syövällä ei pitäisi olla yhteyttä. On kuitenkin olemassa ristiriitaisia tutkimustuloksia ja muita vielä mahdollisesti tuntemattomia tekijöitä, jotka osoittavat, että tutkimustyöhön täytyy voimallisesti panostaa, joten testit jatkuvat ja niiden tarve lähitulevaisuudessa entisestään kasvaa.

Nykyään on käytössä ionisoimatonta säteilyä hyödyntäviä tekniikoita mm. GSM, UMTS (3G), VIRVE, digi-tv, WLAN, Wimax, Bluetooth, RFID, erilaisia tutkia ja satelliitteja. Lähitulevaisuudessa 3G-verkot korvataan LTE-verkoilla (Long Term Evolution), mitkä edustavat uudempaa ns. 4G-tekniikka. Verkkoyhteyksien nopeudet kasvavat kasvamistaan ja pian meillä saattaa olla käytössä 1,25 Gbit siirtonopeuteen pystyvä langaton verkkotekniikka eli WIGWAM (Wireless Gigabit with Advanced Multimedia). [38]

Esimerkiksi huipputeknologian sovellutuksista sodankäynnin pelotteena on mahdollisesti lähitulevaisuudessa käytössä EMP (Electro Magnetic Pulse)- ja EMR (Electro

Magnetic Radiation)-aseet, mitkä mahdollistavat atomipommin kaltaisen hävityksen, mutta paremmalla tarkkuudella ja suuremman välimatkan takaa. Tällaisenkin teknologian kehittäminen ihmiskuntaa palvelevana rauhaa edistävänä teknologiana edellyttää jatkuvaa tutkimus- ja kehitystyötä.

Uudempi tekniikka tulevaisuudessa todennäköisesti käyttää useimmissa tapauksissa hyväkseen korkeampia taajuusalueita, mikä puolestaan vaikuttaa teoriassa negatiivisesti säteilymäärään, mille ihmiskunta saattaa altistua ja siksi tutkimus- ja kehitystyöhön panostaminen on tulevaisuudessa äärimmäisen tärkeää.

Lähteet

[1] Brune, Hellborg, Persson, Pääkkönen. Oslo 2001. Radiation at home, outdoors and in the workplace.

[2] Nyberg, Jokela. Hämeenlinna 2006. Sähkömagneettiset kentät, Säteily- ja ydinturvallisuus 6.

[3] Wikipedia [www-sivu] Sir Isaac Newton [Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Sir_isaac_newton 22

[4] Wikipedia[www-sivu] Joseph von Fraunhofer [Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Joseph_von_Fraunhofer

[5] Wikipedia [www-sivu] Wilhelm Röntgen [Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Wilhelm_Conrad_R%C3%B6ntgen

[6] Wikipedia[www-sivu] Antoine Becquerel [Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Antoine_Henri_Becquerel

[7] Wikipedia [www-sivu] Otto Hahn [Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Otto_Hahn

[8] STUK: Ionisoiva säteily[www-sivu].[Viitattu 16.12.2009]. Saatavissa: http://www.stuk.fi/julkaisut/katsaukset/pdf/ionisoiva_sateily.pdf

[9] United States Enviromental protection agency: Ionizing radiation [www-sivu].[Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa: http://www.epa.gov/rpdweb00/docs/402-f-06-061.pdf

[10] Wikipedia[www-sivu] Non-ionizing radiation [Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Non-ionizing_radiation

[11] Speed of wave[www-sivu].[Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa: http://homepages.ius.edu/kforinas/W/waves/Speed.html

[12] Pääkkönen, Kyttälä. Helsinki 2000. Säteily ja sähkömagneettiset kentät työympäristössä

[13] Kuva sini-käyrästä[www-sivu].[Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa: http://www.csounds.com/ezine/winter1999/beginner/sine.gif

[14] Wikipedia [www-sivu] James Maxwell [Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/James_Clerk_Maxwell

[15] STUK: Radio waves and our enviroment[www-sivu].[Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa:
http://www.stuk.fi/julkaisut_maaraykset/fi_FI/katsaukset/_files/81811016537538837/default/taustakentat_engl_22_7_2009_lopullinen.pdf
[16] Matkapuhelimen historia[www-sivu].[Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa:
http://www.phonehistory.co.uk/mobile-phones-timeline.html
[17] Artikkeli kännyköiden määrästä [www-sivu].[Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa:
http://www.tekniikkatalous.fi/ict/article334539.ece?s=u&wtm=tt-08102009
[18] Kuva GSM-tukiasemasta[www-sivu].[Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa:
http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/c/c5/Gsm-bts-walbrzych.jpg
[19] Wlan perusteet[www-sivu].[Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa:
http://www.pulsewan.com/data101/wireless_lan_basics.htm
[20] Kuva wlan-systeemistä[www-sivu].[Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa:
http://barcode4less-usa.com/images/WLAN.gif
[21] Bluetoothin historia [www-sivu].[Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa:
http://www.bluetomorrow.com/about-bluetooth-technology/history-of-bluetooth/bluetooth-history.html
[22] Kuva buetoothista[www-sivu].[Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa: http://www.usb-ware.com/images/bluetooth-diagram.gif
[23] Irish doctors enviromental association: Electromagnetic pollution in our enviroment [www-sivu].[Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa:
http://www.ideaireland.org/electromagnetic_pollution_oberfeld_2009.pdf
[24] Kitchen, Ronald. Elsevier 1993. RF Radiation Safety Handbook
[25] Kuva tutkasta [www-sivu].Viitattu [16.12.2009]. Saatavissa:
http://www.stuffintheair.com/images/NewRadarDish.gif
[26] World health organization: Electromagnetic fields (300 Hz to 300 GHz) [www-sivu].[Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa: http://whqlibdoc.who.int/ehc/
[27] Wikipedia [www-sivu] Permittivity [Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/Permittivity
[28] Wikipedia [www-sivu] Waves polarization [Viitattu: 16.12.2009]. Saatavissa:
http://en.wikipedia.org/wiki/Polarization_(waves)

[29] Dielectric properties of body tissue [www- sivu].[Viitattu: 4.1.2010]. Saatavissa: http://niremf.ifac.cnr.it/tissprop/

[30] Jokela, Leszczynski, Paile, Salomaa, Puranen, Hyysalo: Radiation safety of hand-held mobile phones and base station [www- sivu].[Viitattu: 4.1.2010]. Saatavissa: http://www.stuk.fi/julkaisut/stuk-a/stuk-a161.html

[31] Health council of the Netherland – Radiofrequency electromagnetic fields [www-sivu]. [Viitattu: 4.1.2010]. Saatavissa: http://www.gezondheidsraad.nl/sites/default/files/199701E.pdf

[32] Wikipedia [www- sivu] Electric Field [Viitattu: 4.1.2010]. Saatavissa: http://en.wikipedia.org/wiki/Electric_field

[33] Wikipedia [www- sivu] Taajuus [Viitattu 4.1.2010]. Saatavissa: http://fi.wikipedia.org/wiki/Taajuus

[34] CST: Mobile phone simulations with human head and hand models [www- si-vu].[Viitattu: 14.2.2010]. Saatavissa: http://www.cst.com/Content/Applications/Article/Mobile+Phone+Simulations+with+Human+Head+and+Hand+Models

[35] ETS-Lindgren, David Seabury: An update of sar standards and the basic require-ments for sar assessment [www-sivu].[Viitattu 14.2.2010]. Saatavissa: http://www.ets-lindgren.com/pdf/sar_lo.pdf

[36] STUK: Matkapuhelinten säteily mittaukset [www-sivu].[Viitattu 15.2.2010]. Saa-tavissa http://www.stuk.fi/sateilytietoa/sateilevat_laitteet/laitteiden_valvonta/fi_FI/matkapuhelimet

[37] RF Exposure Lab: Worldwide standards [www- sivu].[Viitattu 15.2.2010]. Saata-vissa: http://www.rfexposurelab.com/sarinformation.html

[38] Matkapuhelinteknologia- mitkä ovat terveysriskit [www- sivu].[Viitattu 2.3.2010]. Saatavissa: http://www.sahkoailmassa.fi/tiedostot/matkapuhelinteknologia_sisallysluettelo.pdf

[39] YK: World population prospects: The 2006 revision [www-sivu].[Viitattu 2.3.2010] . Saatavissa: http://www.un.org/esa/population/publications/wpp2006/English.pdf

Liite 1: Matkapuhelimien SAR-arvoja [36]

Puhelinmalli	STUKissa mitattu SAR (W/kg)	Valmistajan ilmoittama SAR (W/kg)
LG		
LG C1100	1,00	1,12
LG KG110	1,12	0,728
LG KG275	0,96	0,956
LG KU250	1,23	1,24
LG L3100	1,23	0,30
Motorola		
Motorola C139	0,87	0,97
Motorola C200	0,80	0,78
Motorola C350	0,54	0,90
Motorola C550	0,79	0,71
Motorola C650	0,56	0,87
Motorola F3	0,54	0,72
Motorola L6	1,13	1,33
Motorola T191	0,96	1,01
Motorola V150	0,56	0,67
Motorola V180	0,77	0,87
Nokia		
Nokia 1100	0,68	0,67
Nokia 1112	0,65	0,78
Nokia 1600	0,62	0,82
Nokia 2100	0,55	0,55
Nokia 2600	0,53	0,80
Nokia 2610	0,58	0,56
Nokia 2650	0,48	0,54
Nokia 3100	0,63	0,76
Nokia 3200	0,55	0,56
Nokia 3220	0,59	0,78
Nokia 3310	0,91	0,96
Nokia 3510	0,58	0,66
Nokia 5100	0,47	0,48
Nokia 5140	0,86	0,77
Nokia 6021	0,37	0,72
Nokia 6030	0,62	0,70
Nokia 6060	0,65	0,77
Nokia 6085	0,71	1,15
Nokia 6100	0,61	0,60
Nokia 6103	0,48	0,75
Nokia 6151	0,84	1,02
Nokia 6220	0,65	0,66
Nokia 6270	0,28	0,74
Nokia 6610	0,97	0,63
Nokia 6630	0,69	0,83
Nokia 6810	0,87	0,82
Nokia 6822	0,71	0,67
Nokia 9500 Communicator	0,27	0,49
Nokia E51	0,97	1,47
Nokia E65	0,53	0,87
Nokia E71	0,53	1,33
Nokia N70	1,01	0,95

Nokia N73	0,85	1,12
Nokia N-Gage QD	0,48	0,57
Samsung		
Samsung SGH-A800	0,88	0,96
Samsung SGH-B100	0,77	0,91
Samsung SGH-C100	0,74	0,60
Samsung SGH-E330	1,17	0,90
Samsung SGH-L760	0,78	0,554
Samsung SGH-X100	0,54	0,76
Samsung SGH-X200	0,87	0,74
Samsung SGH-X300	0,39	0,58
Samsung SGH-X450	1,13	0,98
Samsung SGH-X460	0,79	0,846
Samsung SGH-X510	0,77	0,781
Samsung SGH-X680	0,59	0,801
Samsung SGH-X820	1,15	0,639
Samsung SGH-Z540	0,38	0,54
Siemens		
Siemens A55	0,45	0,56
Siemens A60	0,75	0,67
Siemens A65	0,28	0,49
Siemens A70	0,35	0,52
Siemens CF62	0,75	0,75
Siemens M55	0,80	0,64
Siemens MC60	0,60	0,67
Siemens ME45	1,12	0,98
SonyEricsson		
SonyEricsson J230i	0,70	0,98
SonyEricsson J300i	1,31	1,02
SonyEricsson K500i	0,53	0,53
SonyEricsson T230	0,50	0,74
SonyEricsson T310	0,53	0,61
SonyEricsson T630	0,85	0,88
SonyEricsson W300i	1,03	1,20
SonyEricsson W350i	1,41	1,46
SonyEricsson Z200	0,77	0,94
SonyEricsson Z300	0,90	0,75
SonyEricsson Z310i	0,43	0,7
Keskiarvo	0,73	0,80
Maksimi	1,41	1,47
Minimi	0,27	0,30

Liite 2: Kansainvälisiä standardeja [37]

1. FCC OET Bulletin 65 Supp. C
Evaluating Compliance with FCC Guidelines for Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields – Additional Information for Evaluating Compliance of Mobile and Portable Devices with FCC Limits for Human Exposure to Radiofrequency Emissions.

2. IEEE 1528 Std.- 2003
Recommended Practice for Determining the Peak Spatial-Average Specific Absorption Rate (SAR) in the Human Head from Wireless Communications Devices: Measurement Techniques

3. Industry Canada – RSS – 102
Evaluation Procedure for Mobile and Portable Radio Transmitters with respect to Health Canada's Safety Code 6 for Exposure of Humans to Radio Frequency Fields

4. Industry Canada – Health Safety Code 6
Limits of Human Exposure to Radiofrequency Electromagnetic Fields in the Frequency Range from 3 kHz to 300 GHz

5. Australian Communication Authority
Radiocommunications (Electromagnetic Radiation – Human Exposure) Standard 2003

6. Australian Communication Authority
Radiocommunications (Compliance Labelling - Electromagnetic Radiation) Notice 2003

7. Australian Communication Authority
Radiation Protection Series No. 3 – Maximum Exposure Levels to Radiofrequency Fields – 3kHz to 300 GHz

8. International Electrotechnical Commission (IEC) – IEC 62209
Procedure to determine the Specific Absorption Rate (SAR) for hand-held mobile telephones in the frequency range of 300 MHz to 3GHz

9. European Union – EN 50360
Product Standard to Demonstrate the Compliance of Mobile Phones with the Basic Restrictions Related to Human Exposure to Electromagnetic Fields (300 MHz – 3 GHz)

10. European Union – EN 50361
Basic Standard for the Measurement of Specific Absorption Rate Related to Exposure to Electromagnetic Fields from Mobile Phones (300 MHz – 3 GHz)

11. European Union – EN 50364
Limitation of Human Exposure to Electromagnetic Fields from devices operating in the Frequency Range of 0 Hz to 10 GHz, used in Electronic Article Surveillance (EAS), Radio Frequency Identification (RFID) and similar applications

12 European Union – EN 50371
Generic Standard to Demonstrate the Compliance of Low Power Electronic and Electrical Apparatus with the Basic Restrictions related to Human Exposure to Electromagnetic Fields (10 MHz – 300 GHz) – General Public