

Mikroaaltouunin fysiikkaa

Tommi Ukonmurto

ukonmurto.tommi@gmail.com

LuK-tutkielma

Toukokuu 2022

Fysiikan aineenopettaja

Oulun yliopisto

Sisällysluettelo

Johdanto	3
1. Mikroaaltouunin historia.....	4
2. Mikroaaltouunin fysiikka.....	6
2.1 Mikroaaltouunin osien sanastoa.....	6
2.2. Magnetroni	6
2.3. Interferenssi ja seisova aalto	12
2.4. Ruoan lämpenemisen fysiikka	15
3. Mikroaaltouunin käyttöohjekirjan kiellot ja kieltojen ymmärtäminen	20
4. Mikroaaltouunin turvallisuudesta	22
5. Mikroaaltouunin ja klassisen uunin eroavaisuudet	24
6. Mikroaaltouunin mahdollinen kehitys	25
7. Yhteenveto	26
8. Lähdeluettelo.....	28

Johdanto

Henkilökohtainen kokemukseni on, että itsetehty ruoka on halvempaa kuin valmisruoka tai opiskelijaravintoloiden ruoka, vaikka jälkimmäisestä saakin opiskelija-alennuksen. Tästä syystä itsetehtyä ruokaa tulee syötyä päivittäin. En kuitenkaan voi väittää olevani niin reipas, että joka päivä viitsisin ruokaa sipulin pilkkomisesta alkaen valmistaa. Jokapäiväisen reippailun sijaan teen ruokaa samalla kertaa useaksi päiväksi. Tässä menetelmässä on kuitenkin se ongelma, että ruuan lämpökapasiteetti ei riitä ylläpitämään sen lämpötilaa useaa päivää syöntiin sopivana. Kylmän ruoan ongelman ratkaisu on onneksi helppo ja nopea. Ratkaisuna ongelmaan toimii nykyaikaisen uuni: mikroaaltouuni.

Vaikka ennen tätä LuK-tutkielmaa – ja sen jälkeen – käytin mikroaaltouunia lähes päivittäin, en ollut varma mihin mikroaaltouunin toiminta perustuu. Ruoan lämpenemisen fysiikkaa koskien minulla oli epäilykset sähkökentän vaikutuksesta ruoan vesimolekyyleihin ja vaikka osasin arvata, että mikroaaltouunin toiminta perustuu mikroaaltosäteilyyn, hajuakaan minulla ei ollut mistä ja miten mikroaaltosäteily syntyy. Lisäksi olin epätietoinen siitä, miksi minunkin mikroaaltouunin – joka näkyy kuvassa alla – käyttöohjekirja kieltää laittamasta mikroaaltouuniin metallia tai laittamasta mikroaaltouunia tyhjänä päälle. Tässä tutkielmassa on siis tarkoituksena saada käsitys mikroaaltouunin toiminnasta, sekä miten käyttöohjekirjan kiellot voidaan perustella. Lisäksi tutustutaan mikroaaltouunin historiaan ja mahdolliseen tulevaisuuteen.



Johdanto Kuva 1: Esimerkki kuluttajan mikroaaltouunista: UPO M 11.

1. Mikroaaltouunin historia

Hua Zhangin vuonna 2020 julkaistussa kirjassa *Microwave Cooking, Scientific Fundamentals and Practical Guidelines: Foods, Heat Transfer, and Electromagnetism*, käydään läpi mikroaaltouunin keksimiseen johtavia tekijöitä ja mikroaaltouunin kehitystä [1]. Mikroaaltouunien historia alkaa vuodesta 1945. Tällöin amerikkalaisessa *Raytheon*-yrityksessä kehitettiin tutkateknologiaa toisen maailmansodan tarpeeseen olla ylivertainen vihollishävittäjien havaitsija. Mikroaaltosäteilyä hyödyntävät tutkat olivat sodan aikana todella tärkeitä, sillä mikroaalloilla toimiva tutka ei tarvinnut suurikokoista antennia ja radioaaltoja pienempi aallonpituiset mikroaallot olivat parempia havaitsemaan pieniä kappaleita. [1]

Raytheon-yrityksessä työskennellyt itseoppinut insinööri Percy Spencer on mikroaaltouunin keksijä. Vuoden 1946 aikaan Spencer työskenteli mikroaaltoja hyödyntävän tutkalaitteen parissa, kun hän huomasi taskussaan olleen suklaapatukan osittain sulaneen, mistä hän sai alkuperäisen idean keksintöönsä. Sulaneen suklaapatukan havaitsemista seurasi kokeet popcornin ja kananmunan valmistamisesta mikroaaltoja käyttäen ja lopulta metallilaatikon valmistamiseen, joka toimi Spencerin keksimän mikroaaltouunin prototyypinä, jonka hän pian patentoi. Spencer päätyi nopeasti mikroaaltouunin keksittyään myymään patenttinsa työnantajalleen *Raytheonille* ja sai patentistaan 2 dollaria. Vuoden 1946 loppuun mennessä *Raytheon*-yrityksen insinöörit kehittivät Percy Spencerin keksinnöstä käytännöllisemmän mikroaaltouunin version, minkä jälkeen Bostonilaisessa ravintolassa kokeiltiin käytännössä tällaista mikroaalloilla ruoan lämmittävää uunia. [1]

Ensimmäistä kertaa tavallisten ihmisten ostettavaksi mikroaaltouuni tuli markkinoille vuonna 1947. Tämän mikroaaltouunin nimi oli *Radarange*. *Radarangen* massa oli 750 paunaa eli $750 \cdot 0,4536 \text{ kg} = 340,2 \text{ kg}$, sen korkeus oli 5,5 jalkaa eli $5,5 \cdot 0,3048 \text{ m} = 1,6764 \text{ m}$ ja se oli vesijäähdytteinen, minkä vuoksi tämän mikroaaltouunin asentaminen vaati putkimiehen. Yksikkö muunnokset on tehty *MAOL taulukot* -taulukkokirjan avulla [2]. Vuoden 1947 *Radarangen* hinta oli 5000 \$, mikä vastaa nykyrahassa (7.5.2022) *US Inflation Calculator* -internetsivuston mukaan 64 462,78 \$ [3]. Tämä ensimmäinen kuluttajille julkaistu mikroaaltouuni sai kielteisen vastaanoton markkinoilla, eikä näin ollen ollut myyntimenestys. Mikroaaltouunien jatkokehityksen myötä saataville tuli keveämpirakenteisia, luotettavampia, ilmajäähdytteisiä ja edullisempia mikroaaltouuneja, joiden myötä mikroaaltouunit saivat paremman yleisen hyväksynnän. Mikroaaltouunit olivat erityisesti esimerkiksi ravintoloiden suosiossa, koska mikroaaltouunit mahdollistivat ruuan säilyttämisen jääkaapissa tarjoiluun asti, mikä vähensi ravintolayritysten hukkaan menevää ruokaa ja näin vähensi taloudellisia tappioita. [1]

Vaikka mikroaaltosäteilyä keksittiinkin käyttää ruuan lämmittämiseen vuonna 1946, ei sähkömagneettisensäteilyn käyttäminen materiaalin lämmittämässä ole Percy Spencerin alkuperäinen keksintö, mikä käy ilmi *ACADEMIC*-sivun artikkelista *Dielectric Heating* [4]. Jo vuonna 1930 radioaaltoja käytettiin materiaalin lämmittämiseen [4]. Dielektrisen lämmittämisen ideana oli lämmittää materiaalia kauttaaltaan tasaisesti [4].

Nykyään mikroaaltouunit toimivat edelleen ruoan lämmityksessä, mutta mikroaaltouuneilla on käyttöä muuallakin kuten esimerkiksi tieteessä. Kemian analyyseissä mikroaaltoavusteinen näytteenkäsittely on mahdollista, mikä käy ilmi *Johdatus Analyyttiseen Kemiaan* -kurssissa [5]. Biologian alalla puolestaan vuonna 1955 Radoslav K. Andjus ja James E. Lovelock tutkivat tutkimuksessaan *Reanimation of rats from body temperatures between 0° and 1° C by microwave diathermy* sitä, miten miltei jäätympisteessä olevat rotat voitaisiin mahdollisesti herättää takaisin henkiin mikroaaltouunilla [6].

2. Mikroaaltouunin fysiikka

2.1 Mikroaaltouunin osien sanastoa



Kuva 2.1: Mikroaaltouuni UPO M 11

Tämän LuK-tutkinnon kannalta tärkeitä mikroaaltouunin osia ovat kammio ja kammiomagnetroni. Kammioksi tässä tutkielmassa kutsutaan mikroaaltouunin metalliseinäistä tilaa, johon ruoka tai muu lämmitettävä materiaali laitetaan. Kammiomagnetroni on mikroaaltouunin mikroaaltosäteilyn generoiva komponentti ja se sijaitsee kuvan 2.1 teho- ja aikäsäätimen takana mikroaaltouunin sisällä.

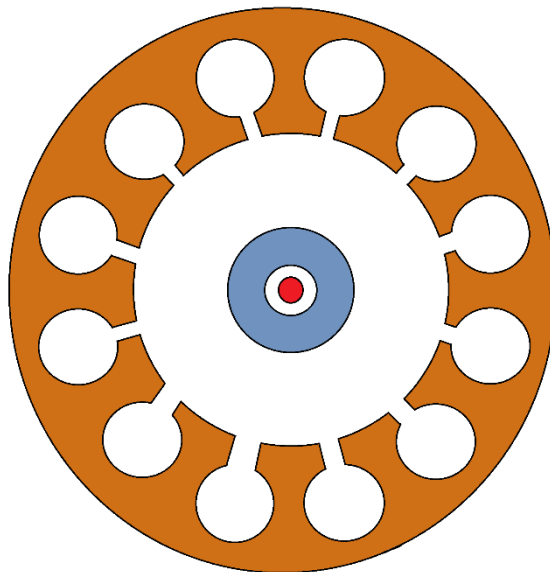
2.2. Magnetroni

Tyhjiöputki on laite, jossa elektronit kiihdytetään tyhjiön läpi katodilta anodille, selviää internetsivuston *engineering.com* artikkelista *Vacuum tubes: The World Before Transistors* vuodelta 2018 [7]. Vielä 1900-luvun alkupuolella tyhjiöputket olivat osa tietokone-, radio- ja puhelinteknologiaa, mutta samana vuonna kuin *Radarange* tuli markkinoille, keksittiin tyhjiöputket syrjäyttävä transistori, mikä oli pienempi, vaati vähemmän energiaa ja jonka käyttöikä oli pidempi. Tyhjiöputket eivät kuitenkaan tulleet kokonaan transistorien syrjäyttämiksi, sillä magnetronit ovat tyhjiöputkia ja edelleen mikroaaltouuneissa käytössä. Tyhjiöputkien muita nykyajan sovellutuksia ovat esimerkiksi jotkin hifi-audiolaitteet ja MRI-skannerit. Mikroaaltouunin tyhjiöputkea nimitetään spesifisemmin kammiomagnetroniksi. [7]

Kammiomagnetronin (englanniksi: cavity magnetron) toimintaa kuvaa Merve Kayanin vuonna 2018 tekemä väitöskirja *an optimization study on cavity magnetron* [8]. Kayan kertoo magnetronin olevan laite, joka käyttää elektroneja sekä sähkö- ja magneettikenttää tuottamaan

suurivoimaista sähkömagneettistasäteilyä. Toinen magnetronin variaatio on esimerkiksi usea kammioinen magnetroni (englanniksi: multi-cavity magnetron). Väitöskirjassa viitataan usein kammiomagnetroniin pelkästään sanalla magnetroni, joten tässäkin tutkielmassa tarkoitetaan magnetronilla kammiomagnetronia. Magnetron on suosittu mikroaaltojen tuottamisväline johtuen magnetronin pienestä massasta sekä koosta, edullisuudesta ja hyvästä hyötysuhteesta. Magnetronin hyötysuhteeksi Kayan ilmoittaa 40–70 %. Internetsivun *radartutorial.eu* artikkelin *Magnetron* mukaan magnetronien hyötysuhde voi olla jopa 80 % [9]. [8]

Kammiomagnetroni koostuu anodista, katodista, katodia lämmittävästä johdosta sekä kestopagneeteista. Anodi on kuparista valmistettu ja katodi on valmistettu termisesti emissoivasta materiaalista. Vielä 1940-luvulla katodit valmistettiin volframista, mutta volframi katodeja parempi vaihtoehto on bariumoksidi katodi, joka vapauttaa elektroneita matalammassa lämpötilassa, kuin volframi katodi. Anodin, katodin ja lämmitysjohdon esimerkkigeometria magnetronin läpileikkauksessa näkyy kuvassa 2.2. Kuvassa 2.2 ei näy kestopagneetteja, mutta ne ovat sijoitettu magnetronin sylinterimuodon päihin siten, että niiden aiheuttama magneettikenttä on magnetronin akselin suuntainen. [8]



Kuva 2.2: Magnetronin anodin (oranssilla), katodin (sinisellä) ja lämpenevän johdon (punaisella) läpileikkaus. Läpileikkaus kuvattu siten, että magnetronin akseli on läpileikkaustason normaalin suuntainen. [9]

Kuvassa 2.2 katodin ja anodin välissä olevaa tyhjää kutsutaan vuorovaikutustilaksi (englanniksi: interaction space). Anodissa olevia reikiä kutsutaan resonanssikammioiksi (englanniksi: resonant

cavity). Resonanssikammiot toimivat kuten rinnankytketty kondensaattori ja käämi. Resonanssikammion kondensaattorina toimii resonanssikammion ja vuorovaikutustilan yhdistävä rako ja yksikierteisenä kääminä toimii anodimateriaalin reuna resonanssikammion ja magnetronin ulkopuolen välissä. Resonanssikammiot eivät ole aina ympyränmallisia kuten kuvassa 2.2. Resonanssikammiot voivat olla myös kulmikkaita siivuja, jotka yhdistyvät vuorovaikutustilaan [9]. Resonanssikammioita voi olla myös eri määrä kuin kuvassa 2.2. Resonanssikammioiden määrä on kuitenkin parillinen. Resonanssikammiot on kytketty siten, että kun yksi kammio värähtelee, seuraava kammio värähtelee 180° vaihe-erolla. [8]

Seuraavaksi kuvataan magnetronin toimintaa, mikä aloitetaan lämmitysjohdon lämpenemisestä, joka nostaa katodin lämpötilaa. Lämmitysjohdolla lämmitetty katodi alkaa emittoida elektroneja termisesti magnetronin vuorovaikutustilaan. Koska elektronit ovat varattuja hiukkasia, elektronit kokevat sähköisen voiman F_S katodin ja anodin välisen sähkökentän ansiosta. Sähkökenttä johtuu katodin ja anodin välisestä potentiaalierosta, missä anodi on suhteessa katodiin positiivisesti varattu. Sähkökentän suunta on magnetronin akseliin nähden radiaalinen anodilta katodille. Lisäksi negatiivisen alkeisvarauksen omaavat elektronit kokevat vuorovaikutustilassa kestopagneetin aiheuttaman magneettisen voiman F_B [2]. Näiden voimien lisäksi vuorovaikutustilan elektronit kokevat kolmannen voiman, toisen sähköisen voiman. Tämä voima on seuraus magnetronin toiminnan aiheuttamasta vaihtovirrasta, joka aiheuttaa vaihtelevan sähkökentän magnetroniin. [8]

Elektroneihin vaikuttava sähköinen voima F_S vaikuttaa kaikkiin varattuihin hiukkasiin ja on suoraan verrannollinen hiukkasen varaukseen q ja hiukkaseen vaikuttavan sähkökentän E suuruuteen. Sähkökentän E suuruus katodin ja anodin välissä saadaan johdettua Hugh D. Youngin ja Roger A. Freedmanin oppikirjassa vuodelta 1972 *University Physics* ilmoittamaa kaavaa apuna käyttäen [10].

$$V = \int_k^a \bar{E} d\bar{l} \tag{1}$$

Kaavassa (1) V on katodin ja anodin välinen potentiaaliero. Kun sähkökenttää E integroidaan polkuintegraalina katodilta k anodille a polkua l pitkin. Integraalista saadaan, että $V = \bar{E}d$, mistä saadaan, että

$$\bar{E} = \frac{V}{d}, \tag{2}$$

missä d kuvaa katodin ja anodin välistä etäisyyttä. Sama kaava on Kayanin väitöskirjassa [8]. Kaavasta (2) nähdään, että vuorovaikutustilassa vallitsevan sähkökentän suuruus on verrannollinen katodin ja anodin väliseen potentiaaliin ja kääntäen verrannollinen katodin ja anodin väliseen etäisyyteen.

Sähköistä voimaa F_S kuvaava kaava nähdään myös Youngin ja Freedmanin oppikirjasta. Sähköinen voima selviää seuraavasti

$$\bar{F}_S = q\bar{E}. \quad (3)$$

Kaavasta (3) nähdään, että varatun hiukkasen kokeman voiman F_S suunta ja suuruus riippuu sähkökentän E suunnasta ja suuruudesta, sekä hiukkasen, johon sähkökenttä vaikuttaa varauksesta q . Jos hiukkanen, johon sähkökenttä vaikuttaa, on positiivisesti varattu, niin voima F_S on sähkökentän suuntainen ja jos hiukkanen on negatiivisesti varattu, hiukkasen kokema voima on sähkökentän suunnan vastainen. Magnetronin toiminnan kannalta tärkeät hiukkaset ovat elektronit, jotka ovat sähköisen voiman kokevat hiukkaset. Elektronien varaus on negatiivinen alkeisvaraus.

Magnetronin sylinterin muotoisen geometrian päädyissä olevat kestomagneetit aiheuttavat vuorovaikutustilaan magneettikentän B [8]. Magneettikenttä voi vaikuttaa varattuihin hiukkasiin voimalla F_B Youngin ja Freedmanin oppikirjan perusteella seuraavasti

$$\bar{F}_B = q(\bar{v} \times \bar{B}). \quad (4)$$

Kaavasta (4) nähdään, että sellaiset varatut hiukkaset, joilla on liikekomponentti v kohtisuorassa magneettikenttään B nähden, kokevat voiman F_B . Magnetronin tapauksessa elektronit kokevat voiman F_B , joka on kohtisuorassa liikekomponenttia ja magneettikenttää kohtaan. Elektronin liikkeen ja voiman kohtisuoruuden vuoksi, voima F_B ei tee työtä eikä elektronin nopeus muutu [8]. Yhtälöistä 3 ja 4 saadaan Merve Kayanin mukaan summaamalla vuorovaikutustilassa elektroneihin vaikuttavan Lorentzvoiman yhtälö seuraavasti

$$\bar{F} = q \cdot [\bar{E} + (\bar{v} \times \bar{B})]. \quad (5)$$

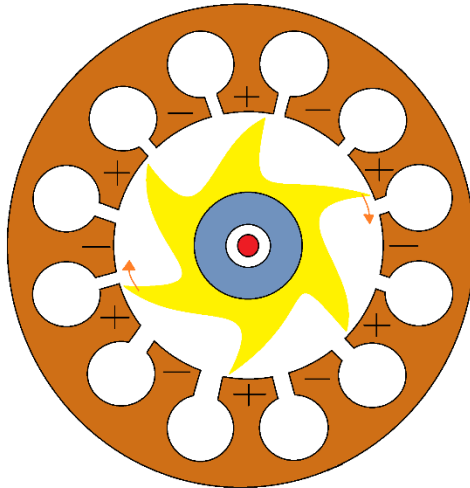
Elektronin kokema kokonaisvoimavoima F aiheuttaa elektronille kiihtyvyyden a , Newtonin toisen lain mukaisesti [10]. Newtonin toisen lain mukainen yhtälö on seuraavanlainen

$$\sum \vec{F} = m\vec{a}.$$

(6)

Kaavasta (6) nähdään, että kappaleeseen, jonka massa on m , vaikuttavien voimien summa $\sum F$ aiheuttaa kappaleelle kiihtyvyyden a . Ilman magneettikentän vaikutusta vuorovaikutustilassa elektroni kokee sähköisen voiman katodilta radiaalisesti anodille. Tämä voima aiheuttaa elektronille kiihtyvyyden radiaalisesti kohti anodia kaavan (6) mukaisesti. Kun vuorovaikutustilassa on sähkökentän lisäksi magneettikenttä, elektroni kokee myös magneettisen voiman seurauksena normaalikihtyvyyden, joka saa elektronin ympyräradalle. Magneettisen voiman aiheuttaman elektronin ympyräliikkeen säde riippuu elektronin nopeudesta, eli mitä suuremman nopeuden sähkökenttä katodin ja anodin välissä aiheuttaa termisesti emittoidulle elektronille, sitä suuremmalle ympyräradalle elektroni päätyy, jos magneettikenttä on vakio. Tästä syystä katodin ja anodin välisellä potentiaalilla – vaikuttaa sähkökentän suuruuteen – ja kestopagneettien aiheuttamalla magneettikentällä voidaan määrittellä millaiselle radalle elektronit vuorovaikutustilassa päätyvät. Elektronien radat määrittelee törmäävätkö elektronit lopulta takaisin katodille vai anodille. Jos vuorovaikutustilan sähkö- ja magneettikenttä ovat suhteutettu siten, että elektroni törmää katodille siten, että sen rata kulkee mahdollisimman lähellä anodia kuitenkin anodiin törmäämättä, puhutaan *cutoff* -tilanteesta. *Cutoff* -tilanteessa elektronien virta anodille on nolla. Elektronin tahdotaan pysyvän vuorovaikutustilassa mahdollisimman kauan, eli pyritään *cutoff* -tilanteeseen. [8]

Miksi elektronin tahdotaan pysyvän vuorovaikutustilassa, selviää radartutorial.eu internetsivun artikkelista *magnetron*. *Magnetron*-artikkelissa käsitellään pääasiassa kammiomagnetronin toimintaa. Artikkelin mukaan vuorovaikutustilassa katodia kiertävä elektroni indusoi sähkökentän anodin resonanssikammioiden kondensaattoriosiin. Elektronin liikkeessä kondensaattoriosan levyn ohi, anodimateriaalin elektronit kokevat sähköiseen voimaan perustuvan hylkimisvoiman [10]. Tällöin resonanssikammion käämiosan läpi kulkee sähkövirta, joka aiheuttaa positiivisen osittaisvarauksen sille kondensaattorin levyille, jonka kohdalla vuorovaikutustilassa kiertävä elektroni on. Näin vuorovaikutustilassa oleva elektroni aiheuttaa resonanssikammioiden kondensaattoriosan levyjen välille sähkökentän. Sähkökenttä johtuu kondensaattorin levyjen välisestä potentiaalierosta. Kun elektroni jatkaa katodin kiertämistä vuorovaikutustilassa ja tulee kondensaattorin toisen levyn kohdalle, kondensaattorin levyjen välinen sähkökentän suunta muuttuu. Tämä vaihtelu aiheuttaa resonanssikammion resonanssivirtapiiriin vaihtovirran. Magnetronissa resonanssikammioita on parillinen määrä, joten joka toisella anodin kondensaattorilevyllä on eri varaus, vaihdellen positiivisen ja negatiivisen välillä. Tämä varausten vuorottelu on kuvattuna plus- ja miinusmerkein kuvassa 2.3. [9]

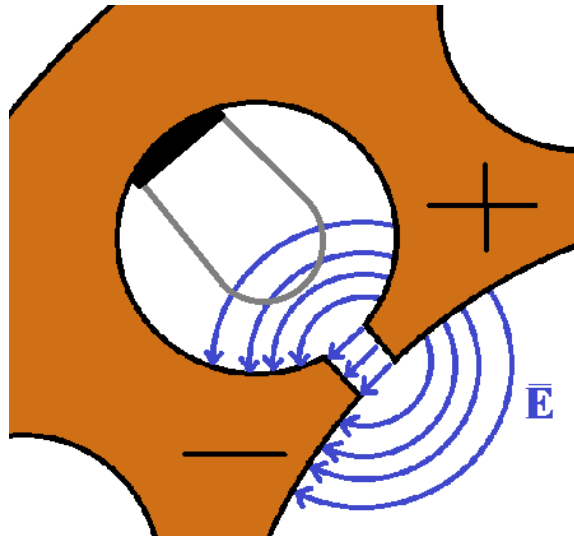


Kuva 2.3: Kammiomagnetronin läpileikkaus, jossa näkyy vuorovaikutustilan elektronien – kuvassa keltaisella – muodostama varaustihentymä, joka puolestaan aiheuttaa vaihtelevat osittaisvaraukset anodimateriaalissa. Osittaisvarauksia on kuvattu plus- ja miinusmerkeillä. [9]

Vuorovaikutustilassa on todellisuudessa suuri määrä elektroneita, jolloin vuorovaikutustilan tilannetta tarkastellaan varaustihentymänä, kuten kuvassa 2.3. Vuorovaikutustilaan muodostuu avaruudellinen varausrenkas (englanniksi: space charge wheel), joka kiertää katodia samaan suuntaan kuin elektronit muotoa muuttamatta. Kiertosuunta on merkattu kuvaan 2.3 oransseilla nuolilla. Varaustihentymäkuvion pyörimisnopeus on, varausrenkaan niin sanottua sakaraa seuraten, kaksi resonanssikammioita per kondensaattoriosien levyjen väliin indusoituneiden sähkökenttien suunnanmuutoksen sykli. Toisin sanonon aina kun avaruudellisen varausrenkaan sakara ohittaa resonanssikammion ja vuorovaikutustilan yhdistävän raon, levyjen välinen sähkökenttä on samansuuntainen varausrenkaan elektronien liikkeen kanssa. Varausrankaan elektronit liikkuvat siis aina kondensaattorilevyjen välisen sähkökentän elektroneihin aiheuttamaa voimaa F_S vastaan. Näin ollen elektroni, joka liikkuu sähkökentän suuntaan, luovuttaa kondensaattorin sähkökentälle energiaa. Varaustihentymän yksittäiset elektronit menettävät siis kineettistä energiaa, luovuttaessaan energiaa anodin resonanssikammioille indusoiduille sähkökentille ja lopulta törmäävät katodille. Tällä tavalla tasavirralla toimiva sähkökenttä katodin ja anodin välissä on muutettu vaihtovirraksi resonanssikammioissa ja ylläpitää värähteleviä sähkökenttiä. [9]

Värähtelevien sähkökenttien avulla saadaan magnetronin tuottamaa vaihtovirtaa, josta saadaan sähkömagneettista säteilyä. Vaihtovirtaa saadaan magnetronista kytkentäluupilla (englanniksi: coupling loop). Riittää, että kytkentäluoppi on yhdessä magnetronin resonanssikammiossa. Kytkentäluoppi on johdemateriaalista valmistettu kaapeli, josta on esimerkki

kuvassa 2.4 alla. Michael Vollmerin tutkimuksen *Physics of the microwave oven* vuodelta 2004 mukaan kytkentäluoppi ottaa osan mikroaaltosäteilystä ja aalto-ohjuri (englanniksi: waveguide) kuljettaa mikroaallot magnetronilta mikroaaltouunin kammioon [11]. [9]



Kuva 2.4: Osa magnetronin anodin läpileikkauksesta, jossa näkyy sininen sähkökenttä resonanssikammion kondensaattoriosan levyjen välissä sekä mustalla ja harmaalla kytkentäluoppi, johon indusoituu vaihtovirta. [9]

Magnetronin tuottaman sähkömagneettisen säteilyn teho P riippuu Kayanin väitöskirjan mukaan monesta tekijästä. Esimerkiksi katodin ja anodin geometrialla ja materiaaleilla sekä resonanssikammioiden määrällä on tähän tehoon vaikutus [8]. Tuotetun sähkömagneettisen säteilyn teho on puolestaan verrannollinen mikroaaltosäteilyn amplitudiin eli sähkökentän E suuruuden neliöön selviää internetsivun *lumen physics* artikkelista *Energy in Electromagnetic Waves* [12].

2.3. Interferenssi ja seisova aalto

Hua Zhangin kirjan luvusta *The History of Microwave Heating*, selviää että mikroaaltouunin toiminta perustuu mikroaaltosäteilyyn [1]. Mikroaaltojen aallonpituus λ , kun valonnopeus $c=299\,792\,458$ m/s, on suuruudeltaan yhdestä millimetristä yhteen metriin [0,001:1] m [2, 1]. Tällöin mikroaaltojen taajuus f on välillä 3–300 GHz yhtälön (7) mukaisesti:

$$f = \frac{c}{\lambda}.$$

(7)

Sähkömagneettisella spektrillä mikroaaltoja pienemmät aallonpituudet omaavat infrapunasäteily ja suuremmat aallonpituudet radioaallot [1]. Kotikäyttöisillä mikroaaltouuneilla toimintataajuus on $2,45 \pm 0,025$ GHz [1]. Tämä tarkoittaa, että kaavan (7) mukaan laskettaessa, kotikäyttöisten mikroaaltouunien mikroaaltosäteilyn aallonpituus λ_m on

$$\lambda_m = \frac{299792458 \text{ m/s}}{2,45 \cdot 10^9 \text{ Hz}} = 0,12236... \text{ m} \approx 12,2 \text{ cm}.$$

Mikroaaltosäteilyn käyttäytyminen mikroaaltouunin kammiossa voidaan selittää *Mini Physics* artikkelin *UYI: Standing Electromagnetic Waves* avulla [13]. Mikroaaltouunin kammio, johon magnetronin aiheuttama mikroaaltosäteily johdetaan, on mitoitettu siten, että kammion leveys L suunnassa sinne mahtuu mikroaallon puolikkaan aallonpituuden monikerta ($L = n \cdot \frac{\lambda}{2}$, missä $n \in \mathbb{N}$). Tällainen mikroaaltouunin kammion mitoitus ilmoitetaan myös arvioksi Muna Fozan Ahmad Darawshen väitöskirjassa vuodelta 2014 *Electric and Magnetic Field Radiation Leakage from Microwave Ovens at Homes in Palestine*, jossa tutkitaan mikroaaltouunien mikroaaltosäteilyn vuotoja [14]. [13]

Kammion mitoituksen takia sähkömagneettisen säteilyn sähkökenttäkomponentti on nolla kammion molemmilla seinämillä ja magneettikentän komponentti saavuttaa maksiminsa. Kammioon johdettu sähkömagneettinen säteily ei pääse läpäisemään kammion metalliseinämiä vaan heijastuu takaisin, tämä johtuu siitä, että sähkömagneettinen säteily heijastuu johteesta, mitä metalliseinämät ovat. Mikroaaltouunien ovien ikkunoiden edessä oleva verkko on myös metallia ja verkon tiheys selittyy sillä, että $\lambda_m = 12,2$ cm mikroaalto ei mahdu metalliverkon rei'istä. Mikroaaltojen kanssa mikroaaltouunin ovesa oleva verkko käyttäytyy kuten metallilevy [11]. Kammion seinämistä takaisin heijastunut mikroaaltosäteily säilyttää alkuperäisen aallonpituuden sekä vaiheen ja heijastuneen mikroaaltosäteilyn sähkökenttäkomponentti interferoi muiden lähetettyjen aaltojen sähkökenttäkomponenttien kanssa. Jos mikroaaltouunin kammioon johdetaan jatkuvasti mikroaaltosäteilyä, kammioon muodostuu seisova aalto. [13]

Seisova aalto voi syntyä alkuperäisen ja heijastuneen sähkömagneettisen aallon kohdatessa ja interferoidessa. Jos heijastunut sähkömagneettinen aalto, jonka sähkökenttäkomponentti on juuri amplitudin minimissään, kohtaa lähetetyn aallon, jonka sähkömagneettisen aallon sähkökenttäkomponentti on amplitudin maksimissaan, kumoavat aallot toisensa. Eli kohdassa, jossa aallot kohtaavat ei ole sähkökenttää. Tätä kutsutaan destruktiiviseksi interferenssiksi. Kun heijastunut ja lähetetty aalto kohtaavat toisensa molempien osa-aaltojen sähkökenttäamplitudien maksimin/minimin aikana syntyneen summa-aallon amplitudi on kaksinkertainen. Tätä kutsutaan konstruktiviseksi interferenssiksi. Yleisesti kohtaavien aaltojen kokonaissähkökenttä saadaan

kohtaavien aaltojen sähkökenttäkomponenttien yhteenlaskulla, kun kenttien suunnat otetaan huomioon [15].

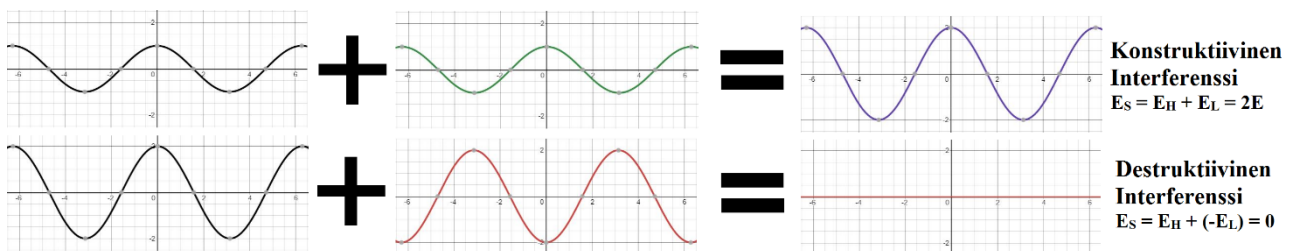
Seisovan aallon aaltorintama ei liiku lähetettyjen tai heijastuneiden mikroaaltojen mukana, minkä takia seisovan aallon kupu- (englanniksi: antinode) ja solmukohtat (englanniksi: node) ovat aina samassa paikassa. Toisin sanoen mikroaaltosäteilyn sähkökenttäkomponentin ollessa nolla mikroaaltouunin kammion seinämällä – johtuen kammion mitoituksesta $L = n \cdot \frac{\lambda}{2}$ – kammiossa oleva seisova mikroaalto koostuu $n \in \mathbb{N}$ kappaleesta sähkökenttäkomponentin kupuja ja $n+1$ kappaleesta sähkökenttäkomponentin solmukohtia. Kuvuilla tarkoitetaan sellaisia sähkökenttäkomponentin aallon kohtia, missä sähkökentän suuruuden vaihtelu on suurinta seisovan aallon värähdellessä. Solmukohdilla puolestaan tarkoitetaan sellaisia kohtia, joissa sähkökenttäkomponentin suuruus on aina nolla. Kahden solmukohdan puolivälissä on aina kupu ja kuvun ja solmukohdan välissä sähkökentän suuruus vaihtelee itseisarvoltaan pienenevällä sähkökentän suuruudella kohti solmukohtaa sinifunktion omaisesti. Koska seisovan aallon aaltorintama ei liiku, seisovan aallon solmukohdissa ei ole lainkaan mikroaaltouunin laitteiston aiheuttamaa sähkökenttää. [13]

Aallon, joka koostuu kahdesta interferoineesta aallosta, amplitudi tai sähkökentän suuruus voidaan laskea alla olevasta kaavasta, jossa E_S on summa-aallon sähkökenttäkomponentin suuruus, E_H on heijastuneen aallon ja E_L on lähetetyn aallon sähkökenttäkomponentin suuruus [15]:

$$E_S = E_H + E_L.$$

(8)

Kaavan (8) mukainen sähkömagneettisten aaltojen sähkökenttäkomponenttien summautuminen on esitetty kuvassa 2.5 alla.



Kuva 2.5: Konstruktioivinen ja destruktioivinen interferenssi esitettyinä kahden mikroaaltosäteilyn sähkökenttäkomponentin summana. Kun kaksi aaltoa kohtaa samassa paikkaa avaruutta, niiden sähkökentät summautuvat joko suuremmaksi sähkökentäksi konstruktioivisessa interferenssissä tai pienemmäksi destruktioivisessa interferenssissä riippuen aaltojen amplitudien merkeistä. Ylemmässä aaltojen kohtaamisessa aallot ovat samassa vaiheessa ja alemmassa kohtaamisessa vastakkaisissa vaiheissa.

Seisovasta aallosta tulee merkittävä, kun otetaan huomioon sähkökentän vaikutus varattuihin hiukkasiin. Tutkielman kappaleessa magnetroni, esitettiin miten magnetronin vuorovaikutustilassa sähkökenttä vaikuttaa negatiivisen alkeisvarauksen omaaviin termisesti emittoituihin elektroneihin, mutta tämän lisäksi sähkökenttä E aiheuttaa voiman F_s kaikkiin varattuihin hiukkasiin. Kaavasta (3) nähdään, että varatun hiukkasen kokeman voiman F_s suuruus on suoraan verrannollinen sähkökentän suuruuteen ja hiukkasen varaukseen. Kun q tai E ovat nollia, myös hiukkaseen kohdistuva voima on nolla. Seisovan aallon solmukohdissa hiukkasiin ei siis kohdistu mikroaaltojen ansiosta voimaa ja kohdissa, joissa amplitudi vaihtelee negatiivisesta positiiviseksi eli kuvuissa ja solmukohtien ympärillä, hiukkasiin vaikuttaa vaihteleva sähköinen voima. Sähköisen voiman vaihtelevuudella tarkoitetaan, että voiman suunta vaihtuu sähkökentän suunnan ja suuruuden muutoksen mukana. Kun sähkökenttä osoittaa alas, varattuun hiukkaseen vaikuttavan voiman suunta on eri, kuin kun sähkökenttä osoittaa ylös, sillä sähkökentän suunta vaikuttaa voiman F_s suuntaan. Samoin voiman F_s suuntaan vaikuttaa hiukkasen varauksen q etumerkki. Negatiivisesti varattuun hiukkaseen vaikuttaa voima, joka on sähkökentän suuntaa vastaan ja positiivisesti varattuun hiukkaseen vaikuttaa voima, joka on samansuuntainen sähkökentän suunnan kanssa. Kun sähkökentän suunta vaihtelee ajan funktiona, myös hiukkaseen vaikuttavan voiman suunta ja suuruus vaihtelee ajan funktiona – paitsi solmukohdissa. Voiman suuruus vaihtelee, koska sähkökenttä saa maksimiensa ja minimiensä välissä arvot niiden väliltä sinifunktion omaisesti. Newtonin toisen lain mukaan, jos kappaleeseen vaikuttava kokonaisvoima $\sum F$ on erisuuri kuin nolla, niin kappale kokee kiihtyvyyden a siihen suuntaan, mihin kokonaisvoima osoittaa, mikä käy ilmi kaavasta (6).

Kotikäyttöisten mikroaaltojen taajuus $f \approx 2,45$ GHz [1]. Yhteen aallon oskillaatioon eli heilahdukseen alusta vastakkaiseen tilanteeseen ja takaisin kestää siis noin $t=1/2$ 450 000 000 s. Toisin sanoen ajassa $1/2$ 450 000 000 s kammiossa olevaan varattuun hiukkaseen vaikuttaa sähköiset voimat F_{max} ja $-F_{max}$ sekä kaikki siltä väliltä kahdesti.

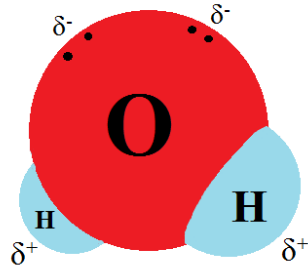
2.4. Ruoan lämpenemisen fysiikka

Kotikäyttöisessä mikroaaltouunissa ei yleensä koiteta lämmittää elektroneja tai muita varattuja hiukkasia, vaan ruokaa. Varsinkin nestemäisessä ruoassa voi olla liuenneena negatiivisesti tai positiivisesti varattuja ioneja, mutta ruoan lämpenemisestä vastaavat myös kokonaisuudessaan varauksettomat ruoan molekyylit kuten vesimolekyylit, rasvat ja sokerit, mikä käy ilmi *SCIENTIFIC AMERICAN* vuoden 2013 artikkelista *Soapy Science: How Microwaves Affect Matter* [16]. Ruoan lämpenemiseen vaikuttavien molekyyliden vain täytyy sisältää jonkinlainen varauseräajakauma, eli

olla ulospäin varaukseton mutta sisäisesti epähomogeenisesti varautunut [16]. Toisin sanottuna molekyylin täytyy olla poolinen, mikä käy ilmi oppikirjasta *General Chemistry Principles and Modern Applications*, joka on Ralph H. Petrucci ja Williams S. Harwood alun perin 1972 julkaisema oppikirja [17]. Tällaisesta poolisesta molekyylistä esimerkkinä toimii vesimolekyyli [17]. Vesimolekyylit ovat siis varauksettomia ulospäin, mutta se ei ole mikroaaltouunien toiminnan kannalta ongelma.

General Chemistry Principles and Modern Applications -oppikirjassa selitetään, että vesi koostuu kahdesta vetyatomista H ja yhdestä happiatomista O muodostaen molekyylin H_2O . Vetyatomit omaavat yksinään yhden elektronin elektroni pilvessään ja yhden protonin ytimessään. Protoneilla ja elektroneilla on yhtä suuri mutta vastakkaismerkkinen varaus – alkeisvaraus [2]. Vetyatomi ei kuitenkaan kovin yleisesti näy yksittäin, sillä se tarvitsee kaksi elektronia elektronipilveensä saavuttaakseen pysyvän ulkoelektronirakenteen, eli tilan johon atomit pyrkivät. Hapella on puolestaan kahdeksan elektronia ja protonia, joista kuusi elektronia on niin sanottuja ulkoelektroneja, jotka osallistuvat reaktioihin [2]. Samoin kuin vety, happi ei yleisesti näy yksittäisenä atomina vaan tarvitsee myös lisäelektroneja saavuttaakseen pysyvän ulkoelektronirakenteen. Tarkalleen yksittäinen happiatomi tarvitsee kaksi lisäelektronia. Huomataan että kaksi vetyatomia ja happiatomi voivat liittyä toisiinsa kovalenttisesti, kun ne jakavat elektroninsa. Kahden vetyatomien ja happiatomien kemiallisesta sidoksesta syntyy kahden yksinkertaisen kovalenttisen sidoksen myötä vesimolekyyli. Kun vesimolekyyli on muodostunut, hapella on kahdeksan ulkoelektronia ja molemmilla vedyillä kaksi ulkoelektronia, eli kaikki vesimolekyylin atomit ovat saavuttaneet pysyvän ulkoelektronirakenteen. [17]

Vesimolekyyli ei ole suora vaan taipunut. Hapen ulkoelektronit jakaantuvat siten, että vetyjen kanssa jaossa olevat ulkoelektronit ovat vierekkäin ja kaksi vapaata elektroniparia vierekkäin. Vesimolekyylin elektronegatiivisin atomi on happiatomi, joka vetää kovalenttistensidosten sidoselektroneja lähemmäs itseään [2]. Seurauksena tästä vesimolekyylin vedyille jää niiden protonien ansiosta positiivinen osittaisvaraus ja hapelle jää vesimolekyyliässä negatiivinen osittaisvaraus sen kovalenttisiin sidoksiin osallistumattomien vapaiden elektroniparien takia. [17]



Kuva 2.6: Vesimolekyylin polaarisuus esitettyä vesimolekyylin osittaisvarausten avulla. Punaisella merkityssä hapessa on kaksi vapaata elektroniparia, jotka aiheuttaa negatiivisen osittaisvarauksen. Osittaisvaraukset ovat merkattu symbolilla δ^- . Sinisellä on merkitty vedyt, joiden positiiviset osittaisvaraukset on merkitty symbolilla δ^+ . [2]

Kuvassa 2.6 näkyy mustina pisteinä vapaat elektroniparit (2 kpl), joilla on yhteensä negatiivinen osittaisvaraus -2δ ja kullakin vetyatomilla on positiivinen osittaisvaraus suuruudeltaan $+\delta$, joten positiivisia osittaisvarauksia vesimolekyylissä on $+2\delta$. Vesimolekyyli on siis ulospäin varaukseton, mutta poolinen. Poolisella molekyyllillä tarkoitetaan molekyyliä, jonka varaus ei ole jakaantunut tasaisesti [15]. Poolisissa molekyyliissä on pysyvä sähköinen dipoli, jonka merkitys tulee ilmi tämän luvun lopussa [15].

Poolisuuden merkitys mikroaaltouunin toiminnan kannalta käy ilmi Emanuele Calabrón ja Salvatore Magazùn tutkimuksesta vuodelta 2012 *Comparison between Conventional Convective Heating and Microwave Heating: An FTIR Spectroscopy Study of the Effects of Microwave Oven Cooking of Bovine Breast Meat*, jossa tutkitaan mikroaaltouunin ja klassisen uunin eroavaisuuksia [18]. Tutkimuksesta käy ilmi, että mikroaaltouunin kammiossa vaihteleva sähkökenttä aiheuttaa rotaatiota kammiossa oleviin poolisiin molekyyliin sekä ioneihin. Sähkökenttä, jonka suunta vaihtuu taajuuden $f = 2,45$ GHz tahdissa eli 2,45 miljardia kertaa sekunnissa, kuten aiemmin todettiin, aiheuttaa molekyylien rotaation ansiosta esimerkiksi vesimolekyylien välistä kitkaa, joka nostaa kokonaisuudessaan mikroaaltouunissa olevan veden lämpötilaa. Tämän lisäksi sähkökentän kiihdyttämät ionit lisäävät mikroaaltouunissa olevan veden lämpötilaa törmätessään muihin molekyyliin ja häiritessään vesimolekyylien välisiä vetysidoksia. Tällä tavalla mikroaaltouunin aiheuttama sähkökentän energia muutetaan ruoan lämmöksi. [18]

Vesimolekyylien rotaatio perustuu sähköiseen voimaan, joka syntyy vesimolekyylin osittaisvarausten ja sähkökentän vuorovaikutuksessa. Sähköinen voima F_s vaikuttaa, vesimolekyylin negatiiviseen ja positiiviseen osittaisvaraukseen yhtä suurella, mutta vastakkaisuuntaisella voimalla. Kun sähkökentän suunta muuttuu, myös osittaisvarauksiin vaikuttavien voimien suunta muuttuu, mikä nähdään kaavasta (3). Koska tarvitaan muuttuva sähkökenttä, että ruoka voi lämmitä

kauttaaltaan eikä epätasaisesti, mikroaaltouuneissa on pyörivä lautanen, jonka ansiosta ruokaan ei jää kohtia, joihin vaihteleva sähkökenttä ei vaikuta [14]. Tällaisia sähkökentättömiä kohtia ovat kammion seisovan aallon solmukohdat.

Lasketaan esimerkiksi tilanne, jossa mikroaaltouunin kammiossa on litra vettä ja siihen liuenneena on 1 g natriumkloridia. Vesimolekyylien ja liuenneiden ionien hiukkasmäärä on laskettavissa *MAOL taulukot* -taulukkokirjan avulla alla olevasta kaavasta.

$$N = \frac{m}{M} \cdot N_A \quad (9)$$

Kaavassa N_A on Avogadron vakio (kpl/mol), m on laskettavan hiukkasen massa grammoina (g), M laskettavan hiukkasen moolimassa grammoina per mooli (g/mol) ja N on laskettavan molekyylin hiukkasmäärä (1/mol). Kaavan (9) avulla voidaan siis laskea litrassa vettä ($m \approx 1000\text{g}$) olevien vesimolekyylien määrä [2].

$$N_{H_2O} = \frac{1000\text{g}}{(1,008 \cdot 2 + 16,00)\text{g/mol}} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \frac{\text{kpl}}{\text{mol}} = 33,425 \dots \cdot 10^{24} \text{kpl} \approx 33 \cdot 10^{24} \text{kpl}$$

Samoin voidaan laskea natriumkloridin määrä.

$$N_{NaCl} = \frac{1}{(22,99 + 35,45)\text{g/mol}} \cdot 6,022 \cdot 10^{23} \frac{\text{kpl}}{\text{mol}} = 1,030 \dots \cdot 10^{22} \text{kpl} \approx 1,0 \cdot 10^{22} \text{kpl}$$

Litrassa nestemäistä vettä on siis suuri määrä rotaation kokevia molekyyliä, jotka aiheuttavat ruoan lämpenemistä esimerkiksi kitkan sekä vetysidosten ja ionien törmäysten ansiosta mikroaaltouunissa. Lisäksi jo yhdestä grammasta natriumkloridia liuenneena litraan vettä seuraa $2 \cdot N_{NaCl}$ määrä liuenneita ioneja, sillä yhdestä natriumkloridi ioniyhdisteestä seuraa kaksi liuennutta ionia [19].

Vesi on merkittävä tekijä ruuan dielektrisyydessä [18]. Puhdas vesi on dielektrinen aine eli eriste. Tämä tarkoittaa sitä, että kun vesi joutuu ulkoiseen sähkökenttään veden sisällä ei ole varausten kulkua, mutta mikroskooppisella tasolla voidaan havaita muutoksia. Ulkoinen sähkökenttä saa vedessä olevat vesimolekyylit niiden pysyvien sähköisten dipolien – eli poolisuuden – ansiosta suuntautumaan ulkoisen sähkökentän suuntaisesti. Toisin sanoen vesimolekyylit polarisoituvat eli järjestäytyvät ulkoisen sähkökentän suuntaisesti. Vesimolekyylien positiiviset osittaisvaraukset kohti ulkoisen sähkökentän suuntaa ja negatiiviset osittaisvaraukset ulkoista sähkökenttää vastaan. Kun dielektrinen aine polarisoituu se heikentää sisällään ulkoista sähkökenttää, koska polarisaatioissa järjestäytyneet pysyvät dipolit aiheuttavat pieniä ulkoista sähkökenttää vastaan olevia sähkökenttiä.

Tämä heikkeneminen selittyy kaavan (8) perusteella, kun polarisaation aiheuttamat sähkökentät ovat vastakkaisuuntaisia ulkoisen sähkökentän kanssa. [15]

Sähkömagneettisella säteilyllä lämmitettävän materiaalin lämpeneminen riippuu Vollmerin tutkimuksen *Physics of the microwave the oven* mukaan sähkömagneettisen säteilyn taajuudesta f . Tutkimuksessa huomattiin, että suurin lämpeneminen tapahtuu taajuusvälillä [20:1000] GHz, mutta näillä taajuuksilla sähkömagneettisen säteilyn läpäisevyys laskee ja vain ruoan pinta lämpenee. Tämän takia mikroaaltouuneissa on käytössä taajuus 2,45 GHz, jolla läpäisevyys on senttimetrien luokkaa. [11]

3. Mikroaaltouunin käyttöohjekirjan kiellot ja kieltojen ymmärtäminen

Kun Suomessa ostaa uuden mikroaaltouunin, saa ostaja mikroaaltouunin mukana käyttöohjekirjan. Sähkölaitteiden valmistajat on veloitettu toimittamaan tarvittavat käyttöohjeet kuluttajalle laitteiden mukana, kertoo Turvallisuus- ja kemikaalivirasto *Tukes* internetsivustollaan [20]. Käyttöohjekirja sisältää nimensä mukaan mikroaaltouunin käyttöön liittyvät ohjeet, mutta ohjeiden lisäksi kirja sisältää listan kieltoja ja varoituksia. Johdanto -kappaleen UPO M 11 -mikroaaltouunin mukana tulleen käyttöohjekirjan neljästätoista suomenkielisestä väliotsikosta seitsemän on sellaisia, joiden aihe käsittelee mikroaaltouunin vaaran aiheuttajia tai vahingon estämistä [21]. Käyttöohjekirjassa on toistoa ja mikroaaltouunin käytön kannalta kirjan merkittävimmät kaksi neuvoa lienee: ”mikroaaltouuniin ei saa laittaa metallia” ja ”mikroaaltouunia ei saa laittaa päälle tyhjänä” [21]. Muut ohjeet ovat melko selkeitä mikroaaltouuniin fysiikan ymmärtämisen ulkopuoleltakin, kuten väliotsikon: ”TÄRKEITÄ VAROTOIMENPITEITÄ” 13. kohdassa sanotaan: ”Älä upota johtoa tai pistoketta veteen” [21].

Michael Vollmerin, Klaus-Peter Möllmannin ja Detlef Karstädtin tutkimuksessa *Microwave oven experiments with metals and light sources* vuodelta 2004 pohdittiin ja tutkittiin muun muassa, miksi metallia kielletään niin usein laittamasta mikroaaltouuniin [22]. Tutkimukset suoritettiin modifioidulla mikroaaltouunilla, jonka vaihdetun lasin läpi voitiin kuvata infrapunakameralla. Tutkimuksen mukaan metalli absorboi sähkömagneettista säteilyä, mutta emittoi suurimman osan säteilyn energiasta pois. Metallia kuitenkin absorboi enemmän kuin emittoi ja suuren termisen johtavuuden ansiosta emittoinnista jäljelle jäänyt energia jakautuu nopeasti metallikappaleeseen kauttaaltaan. Jos metallikappale on massiivinen, kuten esimerkiksi kammion metalliseinämät, kappaleen lämpeneminen on vähäistä. Tilavuudeltaan pienet ja ohuet metallikappaleet sen sijaan voivat lämmitä nopeasti. Tällaiset kappaleet voivat alkaa hehkua ja metallikoristeet voivat höyrystyä astioista. Jos kammiossa on ohut metallijohdin, voi johtimen päihin syntyä sähkökenttä, joka ylittää läpilyöntijännitteen, jolloin voi syntyä kipinöitä. Tutkimuksessa huomautetaan, miten nopeasti CD-levyn kaltainen ohut metallinen kappale voi syttyä palamaan mikroaaltouunissa ja tutkimuksessa mikroaaltouunia pidettiin päällä vain 3-5s, kun tutkittiin CD-levyjen käyttäytymistä. [22]

Tutkimuksen mukaan kaikki ovat kuulleet viisauden, ettei metallia kuulu laittaa mikroaaltouuniin, mutta tämä tutkimuksen mukaan: ”viisaus”, ei ole fyysikoiden mielestä täysin validisti perusteltu. Tutkimuksessa esimerkiksi todetaan, että foliota ja metallisen lusikan voi tietyissä tilanteissa laittaa mikroaaltouuniin. Pelkkä folio voi kipinöidä mikroaaltouunissa, mutta jos folio on kosketuksissa johonkin lämpöenergiaa absorboimaan kykenevään materiaaliin, voi foliota laittaa

mikroaaltouuniin ilman vaaraa. Samoin metallisen lusikan voi laittaa ilman vaaraa mikroaaltouuniin, jos lusikka on esimerkiksi kosketuksissa lusikkaa suurempaan tilavuuteen vettä. Vollmerin tutkimuksessa veden lämpötila nousi 34,8 K ja lusikan 15,5 K, kun niitä lämmitettiin 30 s ajan 700 W teholla. [22]

Tyhjänä mikroaaltouunia ei saa laittaa päälle, koska tällöin kammioon johdettu mikroaaltosäteily ei absorboitu kuten on tarkoitettu eli esimerkiksi veteen. Tyhjänä käytettynä mikroaaltouunin käyttöikä voi lyhentyä, jos mikroaaltosäteily pääsee magnetronille [22]. Lisäksi pitkään päällä olevan mikroaaltouunin kammio voi lämmetä, kuten luvussa aiemmin todettiin. *General Electronics* sanoo heidän valmistamistaan mikroaaltouuneista internetsivullaan, että niitä voi käyttää noin viisi minuuttia suurimmalla teholla tyhjänä ilman tulipalon riskiä [23]. Tyhjänä mikroaaltouunin käyttämistä on vältettävä mikroaaltouunin käyttöiän pidentämiseksi [23].

4. Mikroaaltouunin turvallisuudesta

Mikroaaltouunin toimintaan tutustuessa huomaa tutkimuksia mikroaaltouunin vaaroista. Esimerkiksi pelätään mikroaaltosäteilyn vuotavan ulos kammiosta, mutta tämä pelko on osoitettu muiden pelkojen muassa turhaksi [14]. Muita pelkoja ovat esimerkiksi mikroaaltouunin mahdolliset vaikutukset ruoan ravinnepitoisuuteen.

Mikroaaltouunin ruuanlämmitysmetodin on pelätty laskevan ruoan ravinnepitoisuutta klassisia uuneja enemmän, mutta Helga Gersterin artikkeli vuodelta 1989 *Vitamin Losses with microwave cooking* toteaa ravinnepitoisuuden laskevan mikroaaltouuneilla yhtä paljon kuin klassisilla uuneilla [24]. Helga Gersterin artikkeli puolustaa mikroaaltouunia kommentoimalla mikroaaltouunin nopeaa toimintaa, mikä vähentää lämmityksenaikaista ravinnekatoa ja mikroaaltouunin vedetöntä toimintatapaa, eli vastoin kuin keittämisessä, mikroaaltouunissa lämmitetystä ruuasta ei liukene keitinveteen ravinteita [24]. Michael Vollmerin artikkelin mukaan pelätään myös, että mikroaaltouunissa lämmitettyyn ruokaan tulee kemiallisia radikaaleja [11]. Artikkelissa kuitenkin todetaan, että tällaiset kemialliset muutokset vaatisivat elektronivoltin suuruisia energioita, kun mikroaaltojen tuottamien fotonien energia on luokkaa 10^{-5} elektronivoltia [11]. Mikroaaltouunin tuottama säteily ei ole siis kyllin suuri energistä luomaan kemiallisia radikaaleja.

Mikroaaltouuneja tutkiessa huomaa myös mikroaaltouunin fyysisten haittojen pohdintoja. William Revillen vuoden 1998 artikkelissa *Health Risk From Microwave Radiation* puhutaan mikroaaltouunin mahdollisesti aiheuttamista terveysriskeistä [25]. Artikkelin mukaan mikroaaltosäteilyn intensiteetin mikroaaltouunin ulkopuolella ei pitäisi ylittää 2.5 mW/cm^2 kahden senttimetrin etäisyydellä mikroaaltouunista. Raportointeja kuitenkin on suuremmista intensiteeteistä. Riskeinä tällaisissa vuodoissa on ihmiskehon lämpeneminen paikoista, joissa verenkierto ei kehoa jäähdytä kuten silmässä. [25]

Tutkimuksessa *Electric and Magnetic Field Radiation Leakage from Microwave Ovens at Homes in Palestine* todettiin, että vuotojen intensiteetit ovat sallituissa rajoissa, joka oli tutkimuksen aikaan Palestiinassa 10 W/m^2 . Tutkimalla 115 eri ikäistä mikroaaltouunia todettiin, että mikroaaltouunin iällä ei ole vaikutusta vuotojen määrään ja että mikroaaltouunin vähäisen käynnissäoloajan takia vuotojen aiheuttamat vaarat ovat myös vähäiset. [14]

Säteily turvakeskuksen (STUK) vuoden 2015 artikkelin Mikroaaltouunit ovat turvallisia mukaan mikroaaltouunit ovat artikkelin otsikoinnin mukaan turvallisia. STUK:n mukaan Suomessa ei ole aiheutunut mikroaaltouuneista johtuvia terveyshaittoja mikroaaltouunien käyttäjille. [26]

5. Mikroaaltouunin ja klassisen uunin eroavaisuudet

Sähköuunin lämmitysmetodi eroaa mikroaaltouunin lämmitysmetodista. Mikroaaltouunilla lämmitys perustuu mikroaaltosäteilyyn, joka lämmittää ruokaa kauttaaltaan, mutta sähkö- tai kaasu-uunissa lämmittävä tekijä on lämmitetty ilma. Sähköuunissa lämpölähde lämmittää johtumalla uunin kammion metalliseinämät, jotka puolestaan lämmittävät kammion ilmaa, josta lämpö siirtyy johtumalla ruokaan ulkoa sisälle päin. Tämä johtumiseen perustuva lämmitystapa on mikroaaltouunin lämmitystapaa hitaampi, sillä ruoan lämmönjohtavuus ei ole suuri. Mikroaaltouunissa ruoan lämmitys perustuu, kuten jo todettu, ruoan läpäisevään mikroaaltosäteilyyn, joka saa esimerkiksi ruoassa olevat pooliset vesimolekyylit lämmittämään ruokaa. Sähköuunin lämmönjohtumiseen perustuva lämmitys ei sen sijaan vaadi poolisia molekyylejä tai varattuja hiukkasia. Lämmönjohtuminen tapahtuu kaikkien materiaalien välillä suuremmasta lämpötilasta pienempään. [15, 18]

Calabròn ja Magazùn tutkimuksessa lisäksi huomautettiin, että on tehty tutkimuksia, joissa vertaillaan mikroaaltouunilla ja johtumiseen perustuvilla ruoanlämmitystekniikoilla valmistettuja ruokia. Tutkimusten tulokset ovat olleet ristiriitaisia. Toisessa tutkimuksessa on päätelty, että mikroaaltouunilla ruokaa valmistamalla saadaan lämmönjohtumiseen perustuvalla uunilla valmistetun ruoan kanssa vertailukelpoista ruokaa ja toisaalta toisessa tutkimuksessa on todettu, että lämmönjohtumiseen perustuvilla uuneilla saadaan ruokaan hyväksyttävämpi aromi ja maku, kuin mikroaaltouunilla. [18]

6. Mikroaaltouunin mahdollinen kehitys

Sivuston *Popular Science* vuoden 2016 Lindsey Kratochwillin artikkelista *In The Future Your Microwave Could Be Small Enough To Travel* kerrotaan puolijohdeteknologiaan pohjautuvista mikroaaltouuneista, jotka eivät ole enää rajoitettu kuvan 2.1 tapaiseen nykymikroaaltouunin ulkomuotoon [27]. Artikkelin kertoo vuonna 2014 kehitetystä akkukäyttöisestä puolijohdemikroaaltouunista, joka ei ole kuin suurehkon termospullon kokoinen eli sen voi vaikka kantaa mukana. Ainoana ongelmana tässä tulevaisuuden matkamikroaaltouunissa on se, että sen akku tyhjenee vähintään kahdesti ennen kuin ruoka on lämmennyt. [27]

Puolijohdemikroaaltouuni ei ole kuitenkaan uusi keksintö vaan patentoitu jo 1971, kertoo Eli Jerbyn ja muiden tutkijoiden artikkeli *Special Issue on Solid-State Microwave Heating* vuodelta 2016 [28]. Teknologian tuleminen markkinoille on pitkään estänyt puolijohdeteknologian suuri hinta, mutta hinta on laskenut. Syy sille, miksi puolijohdemikroaaltouunia toivotaan markkinoille, on magnetronmikroaaltouunin epätäydellinen toiminta; magnetronmikroaaltouunin lämmitys ei ole aina tasaista kammion pyörivästä lautasesta huolimatta. [28]

Puolijohdeteknologiaan perustuvassa mikroaaltouunissa on muitakin puolia kuin sen koko, mikä käy ilmi Satoshi Horikoshin tutkimuksesta *Can a Semiconductor Generator Be Used at Microwave Heating or Energy Applications?* vuodelta 2017 [29]. Tutkimuksessa osoitettiin, että puolijohdeteknologiaan perustuvilla mikroaaltouuneilla voidaan lämmittää ruokaa valikoiden sekä hienovaraisesti, toisin kuin magnetroniin perustuvalla mikroaaltouunilla. Japanilaisessa tutkimuksessa lämmitettiin puolijohdemikroaaltouunilla raakaa kalaa ja riisiä valikoiden lämmitys siten, että vain riisi lämpeni. Lisäksi tutkimuksessa lämmitettiin 15 s puolijohdemikroaaltouunissa jäätelöä alkaen -8°C päätyen -2°C . Magnetronmikroaaltouunissa jäätelön lämmittäminen useiden sekuntien ajan sulattaisi jäätelön, sillä lämmityksen tarkka säätely ei ole magnetronmikroaaltouuneilla mahdollista. [29]

Puolijohdemikroaaltouunilla mahdollinen lämmityskohteen valikointi ja hienovarainen lämmitys ovat mahdollisia puolijohdegeneraattorilla, koska puolijohdegeneraattorilla voidaan säädellä saatavan sähkömagneettisen säteilyn taajuutta sekä tehoa [28]. Kuten aiemmin on todettu, taajuudella on vaikutus, kuinka syvältä ruoka lämpenee ja mikroaaltosäteilyn teholla on vaikutus saatavan sähkökentän suuruuteen, millä on puolestaan vaikutus ruoan lämpenemiseen.

7. Yhteenveto

Mikroaaltouunin perustoiminnan ymmärtäminen on jo lukiossa opettavien fysiikan tietojen pohjalta mahdollista. Jos tuntee varattujen hiukkasten käyttäytymisen magneetti- ja sähkökentässä, mikroaaltouunin perustoimintaa ei ole mahdoton käsittää. Magnetronin luoma, lähes vakiotaajuinen mikroaaltosäteily johdetaan aalto-ohjurilla mikroaaltouunin kammioon, jossa se metallisen kammion oikean mitoituksen seurauksena aiheuttaa heijastuessaan ja interferoidessaan kammion muiden aaltojen kanssa seisovan aallon. Aallon sähkökenttä komponentti aiheuttaa esimerkiksi poolisiin vesimolekyyleihin kaavan (3) mukaisen sähköisen voiman F_S , jonka suunta muuttuu mikroaaltosäteilyn taajuuden tahdissa. Voiman suunnan muutoksien ja Newtonin II-lain – kaava (6) – vuoksi vesimolekyylit polarisoituvat jatkuvasti eri suuntiin aiheuttaen kitkaa, joka puolestaan lämmittää vettä.

Perustoiminnan ymmärtäminen ei kuitenkaan tarkoita, että ymmärtäisi tosielämän mikroaaltouunin toiminnan. Esimerkiksi magnetronin toiminta on monimutkaisempaa kuin tässä työssä esitettiin, sillä magnetronin aiheuttaman taajuuden riippuvuus magnetronin geometriasta ja resonanssikammioiden määrästä jäi pelkästään maininnan varaan. Lisäksi ei otettu kantaa siihen, että vaikka kuvassa 2.3 on piirretty kahdentoista resonanssikammion tapauksessa kuusi sakarainen varaustihentymä, todellisuudessa helpommin on saatavilla esimerkiksi varaustihentymä, jossa sakaroita on neljä kappaletta [9]. Varaustihentymän saa magnetronin lisäosilla stabiloitua halutunlaiseksi [9]. Tutkielmassa on siis esitetty magnetronin toimintaa idealisoituna. Kuitenkin tutkielman esittämä peruseräite tyhjiöputkirakenteesta magneettikentän kera antaa kuvaavan ymmärryksen magnetronin toiminnasta.

Tutkielmassa kävi selväksi, että mikroaaltouunin lämmitys ei ole rajattu kuitenkaan vain ruokaan, vaan mikroaaltouunit ovat käytössä esimerkiksi tieteellisissä tutkimuksissa, ruoan pastöroinnissa, tekstiilien kuivaamisessa ja kumin vulkanoinnissa [11]. Mikroaaltouunilla ei kuitenkaan voi lämmittää mitä tahansa, sillä sen lämmitysmetodi ei perustu lämmönjohtumiseen. Muita mikroaaltouunin ja tavallisen uunin eroja ovat: mikroaaltouunin lämmitys ei perustu lämmönjohtumiseen 250 °C lämpötilassa, mikroaaltouuni ei tarvitse esilämmitystä ja mikroaaltouunin käyttöaika voi olla kymmenien minuuttien sijaan kymmeniä sekunteja [8].

Mikroaaltouunin turvallisuudesta todettiin, että mikroaaltouuni ei hävitä muita valmistuskeinoja enempää ruoan ravinteita tai aiheuta siihen kemiallisia radikaaleja. Sen sijaan todettiin, että lyhyen lämmitysajan vuoksi mikroaaltouuni voi säästää ruoan ravinteita. Lisäksi

todettiin, että mikroaaltosäteilyn vuodoista ei ole ainakaan Suomessa ollut haittaa ja että suuressa osassa tapauksista vuodot ovat alle sallittujen rajojen. Selvisi myös, että miksei mikroaaltouuniin suositella laittamasta metallia. Pelkän metallin laittaminen mikroaaltouunin todettiin vaaralliseksi, sillä uhkana on, että metallikappale kuumenee liikaa tai alkaa esimerkiksi kipinöidä, mutta tämä voitiin välttää metallikappaleen kontaktilla johonkin lämpöabsorboivaan materiaaliin. Tyhjänä mikroaaltouunia ei suositella pitämään päällä mikroaaltouunin käyttöiän pidentämiseksi.

Tutkielma aloitettiin katsauksella mikroaaltouunin historiaan, mikä muistuttaa monen muun keksinnön alkutaivalta. Ensinnäkin Percy Spencerin taskuun sulanut suklaapatukka -tarina muistuttaa ruokateemallaan paljon sitä, miten Isaac Newtonin päähän pudonnut omena johti erään tarinan mukaan painovoimateorian ja liikkeenlakien keksimiseen. Mikroaaltouuni sotateknologian sivutuotteena muistuttaa toisessakin mielessä muista keksinnöistä sillä esimerkiksi NASA on tunnettu kehittämänsä teknologian sivutuotteista. Tällaisista keksinnöistä löytyy listauksia esimerkiksi sivun *Kennedy Space Center* vuoden 2018 artikkelista *NASA Spinoffs - Everyday Products from NASA*, joka kiittää NASA-teknologiaa muun muassa nykyaikaisista puhelimen kameroista ja akkukäyttöisistä työkaluista [30].

Nykyisen magnetron mikroaaltouunin historia voi olla kuitenkin käännekohdassa. Mikroaaltouunit ovat olleet koti- ja teollisuuskäytössä yli puoli vuosisataa, ja niiden tarvitsema mikroaaltosäteily on ollut magnetronin tuottamaa vuodesta 1946 [29]. Nykyään puolijohdeteknologia alkaa olla tarpeeksi halpaa, että se voisi syrjäyttää magnetronit parempana vaihtoehtona mikroaaltouunin mikroaaltosäteilyn generoijana. Ehkä tulevaisuudessa tyhjiöputket syrjäytetään kaikesta teknologiasta.

8. Lähdeluettelo

- [1] Zhang Hua, Microwave Cooking, Scientific Fundamentals and Practical Guidelines: Foods, Heat Transfer, and Electromagnetism, Amazon Kindle, (2020)
- [2] Maol, Maol-taulukot, 1.–4. painos, Otavan kirjapaino Oy, Keuruu, (2014)
- [3] US Inflation Calculator, saatavilla <https://www.usinflationcalculator.com/> (Laskettu 7.5.2022)
- [4] ACADEMIC, Dielectric heating, saatavilla <https://en-academic.com/dic.nsf/enwiki/923787> (Viitattu 7.5.2022)
- [5] Perämäki P., Johdatus analyttiseen kemiaan, Luentotiivistelmä 2021 osa 2, Oulun yliopisto (2021)
- [6] Andjus, R. K., Lovelock, J. E., (1955), Reanimation of rats from body temperatures between 0 and 1° C by microwave diathermy. *The Journal of Physiology*, 128 doi: 10.1113/jphysiol.1955.sp005323.
- [7] Vacuum Tubes: The World Before Transistors, 2018, saatavilla <https://www.engineering.com/story/vacuum-tubes-the-world-before-transistors> (Viitattu 7.5.2022)
- [8] M. Kayan, “An Optimization study on cavity magnetron,” M.S. - Master of Science, Middle East Technical University, 2018.
- [9] radatutorial.eu Magnetron, saatavilla <https://www.radartutorial.eu/08.transmitters/Magnetron.en.html> (Viitattu 7.5.2022)
- [10] Young Hugh D., Freedman Roger A., Low Price Edition Sears and Zemansky's University Physics, 11. painos, Pearson Education Inc, Dorling Kindersley Publishing Inc, New Delhi, (2007)
- [11] Vollmer, M. Phys. Educ. **39**, 74 (2004)
- [12] lumen Physics Energy in Electromagnetic Waves, saatavilla <https://courses.lumenlearning.com/physics/chapter/24-4-energy-in-electromagnetic-waves/> (Viitattu 7.5.2022)
- [13] Mini Physics UY1: Standing Electromagnetic Waves, saatavilla <https://www.miniphysics.com/uy1-standing-electromagnetic-waves.html> (Viitattu 7.5.2022)
- [14] Darawshe Muna Fozan Ahmad, “Electric and Magnetic field Radiation Leakage from Microwave Ovens At Homes in Palestine”, Doctoral thesis, An-Najah National University – Nablus, Palestine (2014)
- [15] Mansfield Michael, O’Sullivan Colm, Understanding Physics, 2. painos, Praxis Publishing Ltd, West Sussex, (1999)
- [16] SCIENTIFIC AMERICAN Soapy Science: How Microwaves Affect Matter, 2013, saatavilla <https://www.scientificamerican.com/article/bring-science-homes-soap-microwave/> (Viitattu 7.5.2022)

- [17] Petrucci Ralph H., Harwood William S., General Chemistry Principles and Modern applications, 7. painos, Prentice-Hall Inc, New Jersey, (1997)
- [18] Calabrò, Emanuele. (2012). Comparison Between Conventional Convective Heating and Microwave Heating: An FTIR Spectroscopy Study of the Effects of Microwave Oven Cooking of Bovine Breast Meat. Journal of Electromagnetic Analysis and Application **4**, 433-439. 10.4236/jemaa.2012.411060.
- [19] Lehtiniemi Kalle, Turpeenoja Leena, Mooli 2 Kemian mikromaailma, 2.-6. painos, Otava, Keuruu, (2009)
- [20] TUKES Tuotteiden käyttöohjeet ja turvallista käyttöä koskevat merkinnät saatavilla <https://tukes.fi/tuotteet-ja-palvelut/vaatimustenmukaisuus/tuotteiden-kayttoohjeet-ja-turvallista-kayttoa-koskevat-merkinnat> (Viitattu 7.5.2022)
- [21] UPO mikroaaltouunin käyttöohjeet M 11
- [22] Vollmer, M., et al, Phys. Educ. **39**, 500 (2004)
- [23] GE Appliances MICROWAVE PRECAUTION (OPERATING EMPTY) saatavilla <https://products.geappliances.com/appliance/gea-support-search-content?contentId=17934> (Viitattu 7.5.2022)
- [24] Gerster, Helga. (1989). Vitamin Losses with Microwave Cooking. Food Sciences and Nutrition. 173-181. 10.1080/09543465.1989.11904142.
- [25] Reville William, The Irish Times, 2. maaliskuuta, (1998)
- [26] STUK Mikroaaltouunit ovat turvallisia, 2015, saatavilla <https://www.stuk.fi/aiheet/kodin-ja-toimiston-sateilevat-laitteet/mikroaaltouunit-ovat-turvallisia> (Viitattu 7.5.2022)
- [27] Kratochwill Lindsey, Popular science In the Future, Your Microwave Oven Could Be Small Enough To Travel, 2016, saatavilla <https://www.popsci.com/in-future-your-microwave-oven-could-be-small-enough-to-travel/> (Viitattu 7.5.2022)
- [28] Wesson, Robin & Jerby, Eli & Schwartz, Eli & Gerling, John & Werner, Klaus & Durnan, Gregory & Yakovlev, Vadim & Achkasov, Kostiantyn & Meir, Yehuda & Metaxas, Andrew. (2016). AMPERE Newsletter: Trends in RF and Microwave Heating: SPECIAL ISSUE ON SOLID-STATE MICROWAVE HEATING.
- [29] Horikoshi Satoshi, AMPERE Newsletter nro. 94, Can a Semiconductor Generator Be Used at Microwave Heating or Energy Applications?, (2017)
- [30] Kennedy Space Center, NASA SPINOFFS - EVERYDAY PRODUCTS FROM NASA, (2018), saatavilla <https://www.kennedyspacecenter.com/blog/nasa-spinoffs> (Viitattu 7.5.2022)