



TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

JONI ORRE

UUSIUTUVAT MATERIAALIT ELEKTRONIIKAN TUOTESUUNNIT-
TELUSSA

Diplomityö

Tarkastajat: Johanna Virkki &
Leena Ukkonen

Tarkastaja ja aihe hyväksytty
Tieto- ja sähkötekniikan tiedekuntaneu-
voston kokouksessa 7. joulukuuta 2011

TIIVISTELMÄ

TAMPEREEN TEKNILLINEN YLIOPISTO

Sähkötekniikan koulutusohjelma

ORRE, JONI: Uusiutuvat materiaalit elektroniikan tuotesuunnittelussa

Diplomityö, 61 sivua, 4 liitesivua

Toukokuu 2012

Pääaine: Elektroniikan tuotesuunnittelu

Tarkastaja: Johanna Virkki & Leena Ukkonen

Avainsanat: Puu, paperi, tuotesuunnittelu, elektroniikka, substraatti, painettava elektroniikka.

Työssä käsitellään uusiutuvista materiaaleista paperia, kartonkia ja puuta. Tarkoituksena on selvittää miten näitä materiaaleja pystyttäisiin käyttämään hyödyksi elektroniikan tuotesuunnittelussa. Työssä yritetään löytää mahdollisuuksia korvaamaan perinteisiä elektroniikan valmistusmateriaaleja, kuten esimerkiksi muoveja, uusiutuvilla materiaaleilla. Puulle ja paperille etsitään myös uusia käyttötarkoituksia elektroniikassa. Uusiutuvat materiaalit yhdistettynä materiaaleja lisääviin tekniikoihin on hyvin ympäristöystävällinen tapa valmistaa elektroniikan tuotteita.

Puu ja paperi ovat orgaanisia materiaaleja ja ne reagoivat ilman kosteuteen. Puun ja paperin mekaaniset, sähköiset ja termiset ominaisuudet on tärkeä tietää elektroniikassa. Ominaisuudet riippuvat paljon materiaalien kosteudesta. Elektroniikassa vaaditaan kuitenkin ominaisuuksien pysyvyyttä, joten materiaaleja on hyvä päällystää tai käsitellä kosteudensuoja-aineilla. Elektroniikassa pitää ottaa huomioon suunnittelun kannalta myös asioita kuten suuri taajuus, elektromagneettiset häiriöt ja lämmönhaihtuminen. Käsiteltävien materiaalien sähköisistä ominaisuuksista tärkeimpiä ovat johtavuus, permittiivisyys, häviötangentti ja dielektrinen voimakkuus. Puu ja paperi ovat myös lämmöneristeitä, joten niiden käyttäminen kotelomateriaalina voi aiheuttaa ongelmia.

Käsiteltävät materiaalit ovat sähköeristeitä. Paperia on käytetty aikaisemmin muun muassa kondensaattoreiden valmistuksessa ja piirilevy materiaalina. Muovit ja lasikuitu ovat kuitenkin korvanneet nämä käyttökohteet, koska niillä saadaan parempia ja luotettavampia tuotteita. Puu ja paperi ovat kuitenkin halpoja ja mekaanisesti hyviä materiaaleja. Niillä on myös hyvät sähköiset ominaisuudet kuivana. Paperia ja puuta voitaisiin käyttää halvoissa ja joustavissa piirilevyissä. Materiaaleille voidaan painaa johtimet paksukalvotekniikoilla, kuten painamalla silkkipainolla tai inkjet-tulostuksella. Puusta ja paperista saadaan hyvä alusta esimerkiksi erilaisille antureille ja RFID-tageille. Puu ja paperi ovat paljon käytettyjä pakkausmateriaaleja. Kiinnittämällä niihin sulautettuja järjestelmiä saadaan parannettua pakkauksien seurattavuutta, lisättyä tietoa käyttäjälle ja kerättyä tietoa pakkauksen ympäristöstä. Paperi sopii myös joustavaksi ratkaisuksi puolijohdesubstraatiksi. Tällöin saadaan valmistettua halpoja, orgaanisia tuotteita, kuten orgaanisia ohutkalvotransistoreita tai elektroluminanssiin perustuvien näyttöjen taustavaloksi. Painotekniikoiden parametrit pitää saada selville, jotta musteet saataisiin johtamaan tarpeeksi hyvin. Inkjet-menetelmällä on mahdollista painaa hyvin monelle erilaiselle materiaalille.

ABSTRACT

TAMPERE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Master's Degree Programme in Electrical Engineering

ORRE, JONI: Renewable materials in electronics product design

Master of Science Thesis, 61 pages, 4 Appendix pages

May 2012

Major: Electronics product design

Examiner: Johanna Virkki & Leena Ukkonen

Keywords: Wood, paper, product design, electronics, substrate, printable electronics.

This thesis includes wood, paper, and cardboard as renewable materials. The purpose is to recognize how these materials are able to be used in electronics product design. This thesis searches opportunities to replace traditional electronics materials, such as plastics, with renewable materials. For wood and paper new appliances are also searched. Renewable materials combined with additive techniques are an eco-friendly way to manufacture electronics products.

Wood and paper are organic materials and they react to humidity. Wood and paper mechanical, electrical and thermal properties are important to know in electronics. The properties are also dependent of the moisture inside the materials. In electronics it is important that the properties are stable, so some times it is necessary to coat or treat the materials with moisture protection substances. From the design point of view many things have to be taken into consideration in electronics, such as high frequency, electromagnetic compatibility and heat dissipation. The discussed materials most important electrical properties are conductivity, permittivity, loss tangent, and dielectric strength. Wood and paper are also thermal insulators, so usage for case materials could cause problems.

The discussed materials are electrical insulators. Paper has been used in manufacturing capacitors and printed circuit board material. Plastics and fiberglass have replaced these products, because the new materials are better and more reliable. Wood and paper are although cheap and mechanically strong materials. They also have good electrical properties when they are dried. The discussed materials could be used in inexpensive and flexible printed circuit boards. Conductors could be printed with thick-film technology, for example with silk screen or inkjet-printing, to the materials. Wood and paper are excellent substrates for various sensors or RFID-tags. Wood and paper are also common packaging materials. Embedded systems can be added to these packages to improve tracking, increase information about the product or collect information from packages surroundings. Paper is also suitable for flexible substrate for semiconductor devices. It allows inexpensive, organic products, such as organic thin-film transistors or displays based on electroluminescent backlight. Printing however is not simple task, because the printing parameters are to be find out, so that the used conductive ink would be gotten conductive enough. The inkjet-printing enables printing for many different materials and surfaces.

ALKUSANAT

Tämä työ on tehty Suomen Metsäsäätiön apurahalla. Työ on osa suurempaa Suomen Metsäsäätiön rahoittamaa tutkimusta nimeltä ”Puu-, kartonki- ja paperimateriaalit elektroniikassa”. Työ on tehty Tampereen teknillisen yliopiston Elektroniikan laitoksella.

Kiitos työn ohjaajalle Johanna Virkkille työn aiheesta ja neuvoista työn aikana. Kiitos myös tarkastaja Leena Ukkoselle työn aikana saaduista kommenteista ja neuvoista. Kiitos myös Juha Virtaselle puulle ja paperille painamisen testaamisesta. Haluan vielä kiittää kaikkia elektroniikan laitoksen työntekijöitä, joilta sain kannustusta ja ohjeita työn suorittamiseen.

Suuri kiitos Suomen Metsäsäätiölle tutkimuksen rahoittamisesta.

Kiitos vielä perheelleni ja läheisilleni koko opiskeluni tukemisesta.

Tampere
Toukokuu 2012

Joni Orre
Insinöörinkatu 60 A 95
33720 Tampere

SISÄLLYS

1	Johdanto	1
2	Tuotekehitys	3
	2.1 Tuotekehityksen vaiheet	3
	2.2 Tuotesuunnittelu	4
	2.2.1 Elektroniikkasuunnittelu	5
	2.2.2 Mekaniikkasuunnittelu	6
	2.2.3 Ohjelmointi	7
	2.3 Toteuttaminen	7
3	Elektroniikkasuunnittelun erityisasiat	8
	3.1 EMC-suunnittelu	8
	3.2 RF-suunnittelu	13
	3.3 Lämpösuunnittelu	14
	3.4 Ympäristönäkökohdat	15
4	Uusiutuvien materiaalien ominaisuudet	17
	4.1 Kosteus	17
	4.2 Mekaaniset ominaisuudet	19
	4.3 Sähköiset ominaisuudet	21
	4.4 Termiset ominaisuudet	23
5	Uusiutuvien materiaalien käyttö elektroniikkalaitteissa	24
	5.1 Materiaalien sähköisten ominaisuuksien käyttö	24
	5.1.1 Eriste	24
	5.2 Sovellukset	27
	5.2.1 Komponentit	27
	5.2.2 Substraatti	29
	5.2.3 Kotelointi ja käyttöliittymä	39
6	Laitteet	43
	6.1 Esittely	43
	6.2 Kello	43
	6.3 MP3-soitin	45
7	Tulokset ja kommentit	47
8	Yhteenvedo	48
	Lähteet	49
	LIITE 1: KELLON PIIRIKAAVIO	54
	LIITE 2: KELLON LAYOUT	55
	LIITE 3: MP3 -SOITTIMEN PIIRIKAAVIO	56
	LIITE 4: MP3 -SOITTIMEN LAYOUT	57

LYHENTEET JA MERKINNÄT

E_d	Eristeen läpilyöntijännite
MC	Kosteussuhde
MC_f	Kosteussuhteen saturaatiopiste
R_{th}	Lämpöresistanssi
S	Suojan kokonaistehokkuus
S_A	Vaimenevat häviöt
S_B	Useiden heijastusten korjauskerroin
S_R	Heijastuvat häviöt
$\tan \delta$	Häviötangentti, Häviökerroin
V_{max}	Suurin mahdollinen syntyvä varaus
Z_0	Ominaisaaltoimpedanssi
Z_S	Suojausimpedanssi
Z_w	Aaltoimpedanssi
AD	(Analog to Digital) Anologia-digitaali muunnos.
ANSI	(American National Standards Institute) Amerikan kansallinen standardi-instituutio.
Assembly	Matalan tason ohjelmointikieli.
C	Korkeamman tason ohjelmointikieli.
CAD	(Computer Aided Design) Tietokone avusteinen suunnittelu.
CD	(Cross-machine Direction) Poikittain kuitujen suuntaan.
CEM	(Composite Epoxy Material) Komposiitti-epoksi piirilevy.
DFE	(Design For Environment) Ympäristömyönteinen suunnittelu.
EL	(Electroluminescent) Elektroluminenssi.
ELKO	Elektrolyyttikondensaattori.
EMC	(Electromagnetic Compatibility) Elektromagneettinen yhteensopivuus.

ESD	(Electrostatic Discharge) Elektrostaattinen purkaus.
Flexography	Fleksopaino.
FR	(Flame Retardant) Tulta kestävä piirilevymateriaali.
Gravure Printing	Syväpaino.
HDL	(Hardware Description Language) Konekuvauskieli.
IC	(Integrated Circuit) Integroitu piiri.
inkjet-printing	Inkjet-tulostus.
IP	(Intellectual property) Immateriaalioikeus.
ITO	(Indium Tin Oxide) Indium tina oksidi.
Kraft-paperi	Paperilaatu, "voima"-paperi.
Layout	Elektroniikan pohjakaavio
LCD	(Liquid Crystal Display) Nestekidenäyttö.
LED	(Light Emitting Diode) Valodiodi.
MD	(Machine Direction) Kuitujen suuntaan.
MP3	(MPEG Audio Layer III) Ääniformaatti
NEMA	(National Electrical Manufacturers Association) Kansallinen elektroniikkavalmistajiensäätiö.
Net List	Verkkolista, lista komponenttien kytkennöistä.
offset-lithography	offset-litografia, painomenetelmä.
OTFT	(Organic Thin-Film Transistor) Orgaaninen ohutkalvotransistori.
Pad Printing	Tampopaino.
PCB	(Printed Circuit Board) Piirilevy.

PEL	(Poweder Electroluminescent) Jauhe-elektroluminenssi.
PET	Polyetyleenitereftalaatti
PN-liitos	P- ja N-tyypin puolijohteiden liitos.
Reel-to-reel	Rullalta rullalle -valmistusmenetelmä
RF	(Radio Frequency) Suurtaajuus, Radiotaajuus.
RFID	(Radio Frequency IDentification) Radiotaajuinen tunnistaminen.
RMS	(Root-mean-square) Tehollisarvo.
RoHS	(the Restriction of Hazardous Substances) Vaarallisten aineiden rajoitteet standardi.
Screen Printing	Silkkipaino.
SD-kortti	(Secure Digital) Muistikorttityyppi
SDP	(System Design Process) Suunnitteluprosessi.
SoC	(System on Chip) Järjestelmä yhdellä sirulla.
SOG	(Spin-on glass) Eristekerroksen levitysmenetelmä.
SPI	(Serial Pheripheral Interface bus) Sarjaväylä
TFT	(Thin-Film Transistor) Ohutkalvotransistori.
UHF	(Ultra High Frequency) Todella suuri taajuus, UHF-taajuus.
USB	Universal Series Buss Yleinen tiedonsiirto väylä.
XXXPC	Piirilevyluokka, valmistettu paperista.

1 JOHDANTO

Uusiutuvilla materiaaleilla voidaan pyrkiä korvaamaan elektroniikka tuotteen muita materiaaleja kuten erilaisia muoveja. Uusiutuvat materiaalit ovat ympäristöystävällisempiä kuin perinteiset materiaalit, koska ne uusiutuvat suhteellisen nopeasti. Uusiutuvia materiaaleja voidaan myös kierrättää tai käyttää muulla tavoin hyödyksi esimerkiksi polttamalla energiaksi. Lisäksi materiaaleja lisäävät menetelmät ovat ympäristöystävällisempiä kuin ensin lisäävät ja sitten lopuksi ylimääräisen poistavat menetelmät.

Työssä käsitellään uusiutuvista materiaaleista paperia, kartonkia ja puuta. Tarkoituksena on selvittää miten näitä materiaaleja pystyttäisiin käyttämään hyödyksi elektroniikan tuotesuunnittelun eri vaiheissa. Laitesuunnittelu alkaa tuoteideasta, joka pitää eri välivaiheiden kautta saada valmistettua valmiiksi tuotteeksi. Suunnittelussa täytyy ottaa huomioon miten materiaalien valinta vaikuttaa suunnittelun eri vaiheisiin. Uusiutuvilla materiaaleilla käytetään tässä työssä korvaamaan muita perinteisiä materiaaleja, kuten muoveja, niiltä osa-alueilta miltä pystytään.

Puu ja paperi ovat haasteellisia materiaaleja, koska ne ovat orgaanisia materiaaleja ja reagoivat helposti ympäristön kosteuteen. Työssä käsitellään millaisia materiaaleja puu, paperi ja kartonki ovat. Työssä käydään läpi uusiutuvien materiaalien mekaanisia, termisiä ja sähköisiä ominaisuuksia. Puusta valmistettujen materiaalien mekaanisista ja termisistä ominaisuuksista tiedetään paljon sekä niiden sähkön eristävydestä. Muista sähköisistä ominaisuuksista tiedetään lähinnä matalilla taajuuksilla, mutta suurilla taajuuksilla on saatu hyvinkin erilaisia tuloksia. Sähköiset ominaisuudet ovat tärkeitä, jotta tiedettäisiin miten materiaalit käyttäytyvät sähkö- ja magneettikentissä, ja miten niitä voitaisiin käyttää elektroniikassa.

Elektroniikassa piirilevy on peruskomponentti, johon muut komponentit voidaan kiinnittää tukevasti ja kytkeä johtimilla toisiinsa. Työssä käydään läpi miten puu ja paperi kävisivät piirilevyn liitosalustaksi. Puolijohdekomponenttien alusta yleensä rakennetaan piistä, mutta niitä voidaan rakentaa myös paperin päälle, jolloin saadaan aikaan edullisia ja joustavia ratkaisuja. Paperi on erityisen kiinnostava materiaali, koska tulostettavaa elektroniikkaa tutkitaan paljon ja sen määrä tulee kasvamaan tulevaisuudessa. Paperille tulostamisesta musteella tiedetään jo hyvin paljon. Tutkimalla miten elektroniikkaa saataisiin tulostettua paperille, saataisiin etua tulevaisuuden joustavissa ja edullisissa tuotteissa.

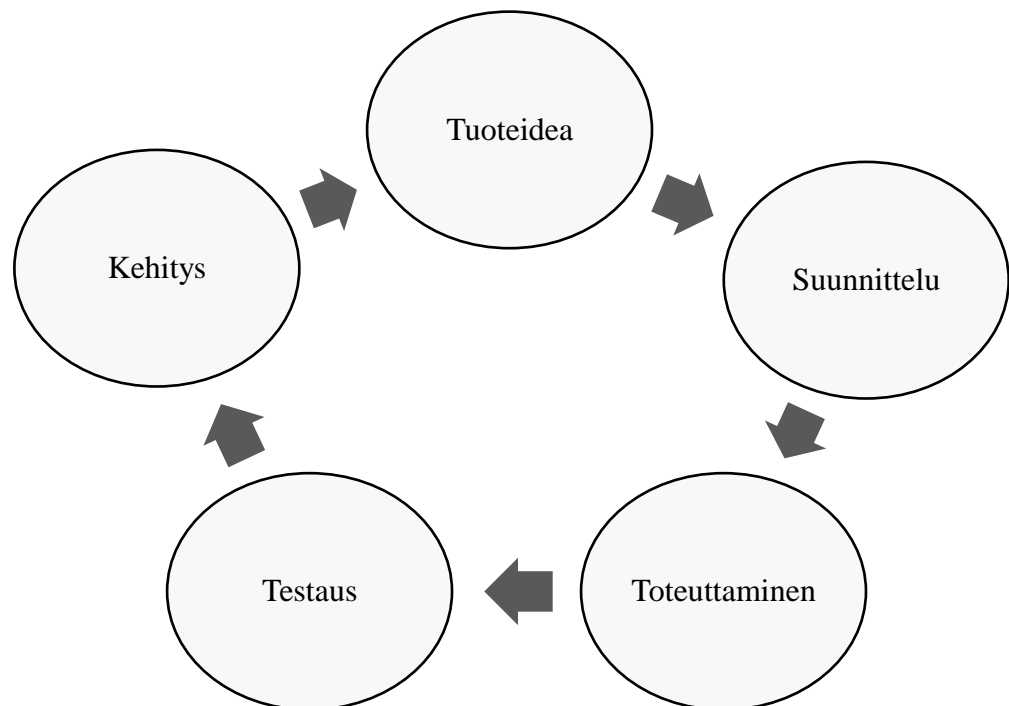
Materiaalien sähköiset ominaisuudet vaikuttavat niiden käyttöön elektroniikassa. Käsiteltävät materiaalit ovat hyvin huonosti sähköä johtavia, joten niitä käytetään eristeenä tuotteissa. Työssä rakennettiin myös esimerkkituotteita, joissa käydään läpi lyhyesti uusiutuvien materiaalien käyttöä ja kerrotaan mitä ongelmia esiintyi. Kappaleessa 2

käsitellään ensin elektroniikan tuotekehitystä ja suunnittelun vaiheita, jotta saataisiin käsitys mitä tuotesuunnittelu pitää sisältää. Tuotesuunnittelu on jaettu elektroniikkasuunnitteluun, mekaniikkasuunnitteluun ja ohjelmointiin. Kappaleessa 3 kerrotaan muutamista tärkeistä elektroniikkasuunnitteluun liittyvistä erityisasioista. Käsiteltävät erityisasiat ovat RF-suunnittelu, elektromagneettinen yhteensopivuus, lämpösuunnittelu ja ympäristönäkökohdat. Kappaleessa 4 käsitellään puun ja paperin ominaisuuksia. Ominaisuuksista käsitellään mekaaniset-, sähköiset- ja lämpöominaisuudet. Kappaleessa kerrotaan myös kosteuden vaikutuksesta käsiteltäviin uusiutuviin materiaaleihin. Kappaleessa 5 kerrotaan mihin paperia ja puuta on käytetty aikaisemmin ja mietitään materiaaleille uusia käyttötarkoituksia sekä esitellään artikkeleita uusista käyttökohteista paperille ja puulle. Kappaleessa 6 on rakennettu esimerkkilaitteiksi yksinkertainen kello ja MP3-soitin, joissa on kokeiltu käyttää uusiutuvia materiaaleja. Kellossa on kokeiltu puuta ja paperia piirilevymateriaalina. MP3-soittimen koteloitiin taas puusta. Kappaleessa käsitellään myös silkipaino ja inkjet-tulostusta. Kappaleessa 7 käydään läpi ja keskustellaan uusiutuvien materiaalin käyttökohteiden sopivuudesta. Kappaleessa 8 tehdään vielä yhteenveto työstä.

2 TUOTEKEHITYS

2.1 Tuotekehityksen vaiheet

Tuotekehityksen tarkoituksena on luoda uusi tuote tai parantaa nykyistä tuotetta. Tuotekehitys voidaan jakaa eri vaiheisiin. Tuotekehitysprosessista luotu kehityskaavio on esitetty kuvassa 1.



Kuva 1: Tuotekehitysprosessi [1].

Tuoteideaa pitää ensin jalostaa määrittelemällä tuotteen ominaisuudet. Määrittelyiden jälkeen tehdään järjestelmäsuunnitelma, joka pitää sisällään laitteen tekniset tiedot, suorituskyvyn, luetettavuuden ja rajapinnat. Suunnittelu kannattaa jakaa alilohkoihin, jotta saadaan sen kokoisia lohkoja, jotka suunnittelija pystyy helpommin käsittämään ja täten helpommin suunnittelemaan. Järjestelmäsuunnittelu voidaan jakaa erikseen elektroniikkasuunnitteluun, mekaniikkasuunnitteluun ja ohjelmointiin. Samalla pitää myös päättää millä teknologioilla laite toteutetaan. Suunnitteluiden jälkeen laite toteutetaan, jolloin eri suunnitteluiden osa-alueet ja alilohkot yhdistetään. Laitteen pitää vielä käydä läpi tarkistukset, jotta varmistetaan, että laite toimii määriteltyjen ominaisuuksia mukaisesti. Kehitysvaiheessa parannetaan tuotetta palaamalla edellisiin vaiheisiin uudestaan esimerkiksi lisäämällä tuotteeseen uusia ominaisuuksia tai parantelemalla nykyisiä ominaisuuksia. Eri vaiheesta voidaan myös palata edellisiin kohtiin, jolloin joudutaan tekemään suunnittelun uusintakerroksia niin kauan kuin tuote on halutunlainen. Tärkein

asia on täyttää asiakkaan toivomukset. Erityisesti testausvaiheessa löydetyt virheet tai puutteet pitää korjata, jolloin palataan kaaviossa taaksepäin. Eri vaiheista palataan myös taaksepäin, jos huomataan, että edellisiä määrittelyjä ei voida toteuttaa tai ne eivät toimi. Yleisesti voidaan laskea, että virheen hinta kymmenkertaistuu, kun siirrytään suunnittelun vaiheesta toiseen [2]. Tämän takia tuoteidea pitäisi määritellä mahdollisimman tarkkaan ja kaikki asiat on otettava huomioon yhä aikaisemmin.

2.2 Tuotesuunnittelu

Elektroniikan tuotesuunnittelu on elektronisten laitteiden ja piirien sekä tuotanto- ja pakkaustekniikan suunnittelemista. Tuotesuunnittelussa voidaan käyttää apuna erilaisia suunnitteluprosesseja. Yksinkertaistettuna suunnitteluprosessi voidaan jakaa neljään vaiheeseen: tutkimus, kehitys, arviointi ja tiedonanto [1]. Elektroniikkatuotteen suunnittelu alkaa tuoteideasta, joka valmistetaan valmiiksi laitteeksi käyttämällä saatavilla olevia voimavaroja ja noudattamalla asetettuja toiminnallisia vaatimuksia. Nykyään suunnittelussa käytetään apuna tietokoneita (Computer Aided Design), joilla voidaan suunnitella koko systeemi, tehdä tutkimukset, laskelmat, analyysit ja raportit. Tietokoneavusteinen suunnittelu helpottaa suunnittelun valintoja ja lopulta koko laitteen valmistamista.

Suunnitteluun vaikuttaa yleisesti:

- Hinta
- Aika
- Suorituskyky
- Luotettavuus
- Koko, muoto, paino ja muotoilu/tyyli
- Lainsäädäntö ja standardit
- Immateriaalioikeus (Intellectual Property)
- Tuotteen ylläpito ja tuki

Luotettavuus on tärkeä osa elektroniikkasuunnittelua. Luotettavuus tarkoittaa laitteen kykyä toimia tietyllä suorituskyvyllä tietyn ajan tietyissä käyttöolosuhteissa. Valmistajien täytyy olla tietoisia tuotteidensa kestävydestä ja luotettavuudesta, koska huono laatu voi maksaa valmistajalle enemmän kuin luotettavuuteen panostaminen. Laitteen olosuhteet, eli sen kokemat rasitukset voidaan jakaa sisäisiin ja ulkoisiin rasituksiin. Ulkoisia rasituksia ovat mekaaniset iskut, kosteus, kemikaalit, säteily ja lämpötilan vaihtelusta aiheutuvat materiaalien geometrian muutokset. Sisäisiä rasituksia ovat virran ja jännitteen aiheuttamat ongelmat, kuten oikosulun aiheuttamat palamiset. Materiaalien osalta on tärkeää, että materiaalit kestävät käytön aiheuttamat rasitukset, eivätkä aiheuta käyttäjälle vaaratilanteita. Materiaalien pitää myös toimia oikein niille tarkoitetuille tehtävissä, esimerkiksi elektroniikassa on siis tärkeää, että johtimet johtaisivat mahdollisimman hyvin eivätkä katkeisi käytössä ja eristeet eivät johda sähköä missään tilanteessa. [3; 4.]

Kuinka uusiutuvia materiaaleja voidaan käyttää tuotteissa, riippuu materiaalien ominaisuuksista. Materiaalien valinta voi vaikuttaa suuresti suorituskykyyn, luotettavuuteen ja hintaan. Elektroniikan komponentteja ovat muun muassa vastukset, transistorit, operaatiovahvistimet, kondensaattorit, kelat ja useista aktiivikomponenteista koostuvat digitaalikomponentit. Digitaalipiirit koostuvat miljoonista logiikkaportteista, jolloin suunnittelu tapahtuu ohjelmoimalla konekuvauskielellä (Hardware description language), koska suunnittelu ei enää onnistu perinteisellä piirilevysuunnittelulla. Digitaalitekniikassa pyritään käyttämään siten mahdollisimman paljon abstraktiotasoja. Erityisesti SoC-suunnittelussa (System on Chip) käytetään systeemitason suunnittelu (System-level Design), jossa keskitytään suunnittelemaan tuote ylimmällä abstraktiotasolla [5]. Komponentit kytketään toisiinsa ja niille tuodaan käyttöjännitteet hyvillä sähkönjohteilla, yleensä metalleilla, kuten kuparivedoilla piirilevyllä. Piirilevyn alusta eli substraatti valmistetaan johtamattomasta materiaalista, jonka tarkoitus on olla mekaanisena tukena komponenteille ja johtimille. Lisäksi eristeitä tarvitaan erottamaan johtavat osat toisistaan. Laitteet ja jopa yksittäiset komponentit voidaan vielä koteloida suojakuorella. Koteloinnin tehtävä on muun muassa suojata sisällä olevia komponentteja kosketuksilta. Kotelointiin täytyy tuoda sisälle johtimia, jotta laitteet ja komponentit voidaan kytkeä ulkomaailmaan. Kotelointiin vaikuttaa myös mahdollinen käyttöliittymä. Myös yksittäisiä komponentteja tai useaan komponentin systeemiä voidaan koteloida yksittäiseen koteloon.

2.2.1 Elektroniikkasuunnittelu

Elektroniikkasuunnittelu alkaa alustavasta suunnittelusta, jossa valitaan mitä teknologioita käytetään ja miten eri toiminnot toteutetaan. Tämän jälkeen valitaan käytettävät komponentit. Komponentit kytketään toisiinsa piirtämällä kytkentäkaavio/piirikaavio. Kytkentää simuloidaan simulointiohjelmistoilla kuten Cadence Pspice:lla [6], RF-piirejä suunniteltaessa Agilent ADS:llä [7] tai digitaalipiirien tapauksessa Mentor Modelsim:llä [8]. Analogiasimulaatiosta nähdään miten kytkennät toimivat ja kuinka suuret ovat jännitteet ja virrat. Digitaalisimulaatioissa nähdään signaalien muutokset ja tilat. Simuloinnalla saadaan testattua miten komponenttien arvojen muutokset vaikuttavat kytkentään ja miten esimerkiksi häiriölähde vaikuttaa kytkentään. Kytkentäkaavio viedään piirilevysuunnittelu ohjelmistoon, kuten Mentor PADS [9]. Kytkentäkaavio lähetetään vetolistana (Net List) osaluettelo ja komponenttien väliset kytkennät layout-suunnittelu puolelle. [10]. Samalla voidaan lähettää myös suunnittelusäännöt tai muita oleellista tietoa piirilevysuunnittelupuolelle. Oleellisia suunnittelusääntöjä ovat:

- Johdinleveydet
- Eristevälit
- Kytkentäjärjestys
- Signaalin suurin pituus
- Signaalin kulkuajaviive
- Sallittu muodostuva kapasitanssi

- Komponenttien ryhmittelytiedot
- Signaalien tärkeysjärjestys automaattireitityksessä

Piirilevysuunnittelun tehtäviä ovat:

- Mekaniikan määrittely: piirilevygeometria ja kiinnitysreiät
- Komponenttisijoittelu
- Reititys
- Dokumentointimerkinnot
- Tulostus ja arkistointi

Tärkein asia tässä vaiheessa on komponenttisijoittelu, koska se vaikuttaa tarvittavien piirilevyjen kerrosmäärään, johdinleveyksiin ja -pituuksiin, läpivientien määrään, sähköiseen toimivuuteen, piirilevyn mittoihin, automaatioladontakelpoisuuteen, juotettavuuteen, testattavuuteen ja huollettavuuteen liittyviin asioihin. [10.]

2.2.2 Mekaniikkasuunnittelu

Mekaniikkasuunnittelussa suunnitellaan tuotteen geometriat. Piirilevysuunnittelussa voidaan suunnitella komponenttien paikat ja piirilevyn muodot, mikä on tärkeä osa elektroniikkalaitteen toimivuuden ja rakenteen kannalta. Laitteet voivat tarvita myös kotelon, joten liittimien paikat ja ulospääsyt kotelosta pitää suunnitella hyvin. Samalla otetaan huomioon myös kotelon EMC-asiat (electromagnetic compatibility) ja piirien lämpenemisestä johtuva tuuletuksen suunnittelu. EMC- ja lämpöasioista kerrotaan enemmän luvussa 3. Komponenttisijoittelun ohjesääntöjä ovat [10.]:

- Eristevälit
- Komponenttien korkeudet ja jäähdytyslevyjen ulottuvuudet
- Optiset kohdistusmerkit
- Laittekotelon mahdolliset ulokkeet
- Piirilevyn reunan läheisyys
- Lämpenevien komponenttien sijoittelu
- Toiminnalliset ryhmät
- Identtisten kanavien symmetria
- Asettelun vaikutus komponenttien juottamiseen
- Komponenttikotelojen valinta

Lisäksi tuotteissa voi olla elektromekaanisia laitteita, kuten moottoreita, kytkimiä ja antureita, joiden mekaaninen ja sähköinen toiminta pitää suunnitella. Näistä rakennetut järjestelmät ovat usein sulautettuja järjestelmiä, joita ohjataan mikrokontrollereilla.

2.2.3 Ohjelmointi

Ohjelmointi on järjestelmälle annettujen käskyjen muuttaminen sille ymmärrettävään muotoon. Järjestelmät voivat olla tietokoneita, joilla voidaan suorittaa monia erilaisia tehtäviä, tai sulautettuja järjestelmiä, jotka on tarkoitettu juuri tietyn tehtävän suorittamiseen. Sulautettuja järjestelmiä ohjataan mikrokontrollereilla, samalla tapaa kuin tietokoneita niiden prosessoreilla. Sulautetun järjestelmän on tarkoitus olla huomaamaton käyttäjälle. Ohjelmointikielenä voi olla konekieli (Assembly) tai korkeamman tason kieli kuten C. Ohjelmointi voidaan jakaa seuraaviin osiin:

- Määrittely
- Suunnittelu
- Toteuttaminen
- Testaus

Ohjelmointi alkaa ohjelman tehtävän määrittelyllä, jossa määritellään mitä ongelmaa ollaan ratkaisemassa ja mitä ohjelman pitää tehdä. Määrittelyssä mietitään myös mitä tietoa ohjelma tarvitsee sisäänsä ja mikä pitää olla ohjelman ulostulon tuloste. Seuraavana ohjelma suunnitellaan, jakamalla se helpommin ymmärrettäviin osiin. Jokainen osa määritellään mahdollisimman tarkasti. Suunnitelmasta voidaan piirtää vuokaavio, joka on hyvä työkalu selkeyttämään ohjelman toimintaa. Toteutuksessa tehdään ohjelmakoodi suunnitteluiden perusteella. Lopuksi ohjelma testataan, ettei ohjelmassa ole virheitä ja ohjelma toimii määrittelyiden mukaan. [11.]

2.3 Toteuttaminen

Toteutuksessa yhdistetään elektroniikkasuunnittelu, mekaniikkasuunnittelu ja ohjelmointi. Tämä tarkoittaa elektroniikka komponenttien latomista piirilevyille oikeisiin kohtiin ja mekaanisten osien liittämistä toisiinsa. Myös ohjelma ladataan mikroprosessorin muistiin ja lopuksi tuote koteloidaan.

Komponenttien ladonta voidaan tehdä pienissä erissä käsin kolvilla juottamalla, mutta suurimmissa tuotantolinjoissa ladonta tehdään koneellisesti ja komponenttien juottaminen tapahtuu esimerkiksi pastajuotosmenetelmällä uunissa (Reflow) tai aaltajuotosmenetelmällä. Ladontaa varten komponentit pakataan, niin että syöttölaite saa komponentit irrotettua, esimerkiksi teippikeloihin. Komponenttien pakkaukset muodostuvat kanto- ja suojateipeistä, josta komponentti saadaan otettua repäisemällä suoja teippi irti tai lyömällä komponentti teipistä läpi. Teipit voivat olla valmistettu paperista, muovista tai pahvista. Komponenttien pakkauksen valintaan vaikuttaa hinta, ESD (Electro Static Discharge) -suojaus ja pakkauksesta aiheutuvien epäonnistuneiden ladontojen määrä. Paperi on halvin, mutta muoveilla saadaan paljon parempi suoja komponenteille. Paperista valmistetut pakkaukset sopivat paremmin kestäville passiivikomponenteille. [12.]

3 ELEKTRONIIKKASUUNNITTELUN ERITYIS-ASIAT

3.1 EMC-suunnittelu

Elektroniikassa pitää ottaa huomioon laitteiden elektromagneettinen yhteensopivuus (Electromagnetic Compatibility, EMC). EMC tarkoittaa, että

1. Laite ei häiritse muita laitteita
2. Laite ei häiriköidy muista laitteista
3. Laite ei häiritse itse itseään.

EMC -ongelma koostuu aina häiriölähteestä, häiriötä kuljettavasta väliaineesta ja häiriön vastaanottajasta. Häiriöt voivat syntyä esimerkiksi luonnosta kuten salamit, kosketuksessa purkautuvasta elektrostaattisesta purkauksesta (Electrostatic Discharge, ESD), suurjännitelinjojen aiheuttamista häiriöistä, sähköisten moottoreiden häiriöistä, huonosta EMC -suunnittelusta johtuvista säteilevistä tai johtuvista häiriöistä. Häiriöt kytkeytyvät johtumalla, säteilemällä, induktiivisesti magneettikentän kautta tai kapasitiivisesti sähkökentän kautta. [13.]

EMC -suunnittelu ei ole vain laitteen parempaa toimimista varten, vaan laitteen pitää toteuttaa lainsäädännön asettaman säädökset, ennen kuin sitä voidaan myydä eteenpäin. EMC asiat on käsitelty standardeissa, joista kertoo laitteissa oleva CE -merkintä. Laitteen valmistaja on vastuussa, että laite vastaa standardia. Suomessa sovelletaan Euroopan unionin direktiiviä 2004/108/EY [14]. Direktiivi ei määritellä yksityiskohtaisia vaatimuksia laitteiden EMC-ominaisuuksille vaan direktiivin vaatimustenmukaisuus voidaan osoittaa käyttämällä harmonisoituja eurooppalaisia standardeja. EMC-perusstandardit ovat EN/IEC 61000-sarjan standardit. Myös radiohäiriöihin keskittyvä IEC:n tekninen komitea CISPR laatii standardeja, jotka käsittelevät radiohäiriöiden mittalaitteita, mittaustekniikkaa sekä sähkö- ja elektroniikkalaitteiden radiohäiriövaatimuksia. Standardisarjassa CISPR 16 käsitellään radiohäiriöiden mittalaitteita ja mittaustekniikkaa. Lisäksi useat CISPR-standardit ovat tuote-/tuoteperhestandardeja, joissa annetaan häiriöpäästöjen mittausten menetelmät ja raja-arvot.

EMC-häiriön kytkeytyminen voidaan estää poistamalla häiriölähde, estämällä häiriön kulkeutuminen ja suojaamalla kohde. Johtuvia häiriöitä voidaan estää käyttämällä oikeaa maadoitusta eri tilanteissa, kuten monipiste, yksipiste (sarjan tai rinnan) ja hybridi. Lisäksi johtuvia häiriöitä voidaan suodattaa tai estää kytkeytymistä esimerkiksi optoerottimilla. Kapasitiivisen häiriöltä suojautumiskeinoja ovat etäisyyden kasvatus, yhdensuuntaisten johdinten välttäminen, pinta-ala pienentäminen ja johtavat suojakuoret.

Induktiivisilta häiriöiltä suojaudutaan pienentämällä johtimien silmukoiden pinta-alaa, kasvattamalla etäisyyttä, pienentämällä virtaa tai taajuutta (jos mahdollista) ja johtimien geometrialla, kuten asettamalla silmukat kohtisuoraan toisiaan vasten. [13; 15.]

Sähkömagneettinen säteily eli sähkömagneettiset aallot koostuvat värähtelevistä sähkö- ja magneettikentistä. Kentän ominaisuudet riippuvat lähteestä, väliaineesta ja välimatkasta lähteen ja havainnointipisteen välillä. Lähteen lähellä kentän ominaisuudet riippuvat suurimmaksi osaksi vain lähteen ominaisuuksista, kun taas kaukana lähteestä ominaisuudet riippuvat väliaineesta. Kenttä voidaan jakaa siis kahteen alueeseen: kauko- ja lähikenttään. Suuremman matkan kuin aallonpituuden λ jaettuna 2π :llä, kutsutaan kaukokentäksi ja sitä pienempää matkaa lähikentäksi.

Sähkökentän voimakkuuden E ja magneettikentän voimakkuuden H suhdetta kutsutaan aaltoimpedanssiksi Z_w

$$Z_w = \frac{E}{H}. \quad (1)$$

Lähikentässä sähkö- ja magneettikenttiä käsitellään erikseen, koska niiden suhde ei pysy vakiona. Kaukokentässä sähkö- ja magneettikenttä muodostavat tasoallon, jonka impedanssi on vakio. Väliaineen ominaisaalloimpedanssi Z_0 saadaan johdettua muotoon

$$Z_0 = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma + j\omega\varepsilon}}, \quad (2)$$

Missä ω on kulmataajuus, μ on permeabiliteetti, σ on johtavuus ja ε on permittiivisyys. Johteelle on voimassa $\sigma \gg j\omega\varepsilon$, tällöin impedanssia kutsutaan suojausimpedanssiksi, jolloin impedanssi on

$$Z_s = \sqrt{\frac{j\omega\mu}{\sigma}} \Rightarrow |Z_s| = \sqrt{\frac{\omega\mu}{\sigma}}. \quad (3)$$

Johteiden johtavuus on suuri, joten esimerkiksi kuparille 1 kHz:llä suojausimpedanssi on $1,16 \cdot 10^{-5} \Omega$. Eristeelle taas $\sigma \ll j\omega\varepsilon$, jolloin kaava 2 menee muotoon

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu}{\varepsilon}}. \quad (4)$$

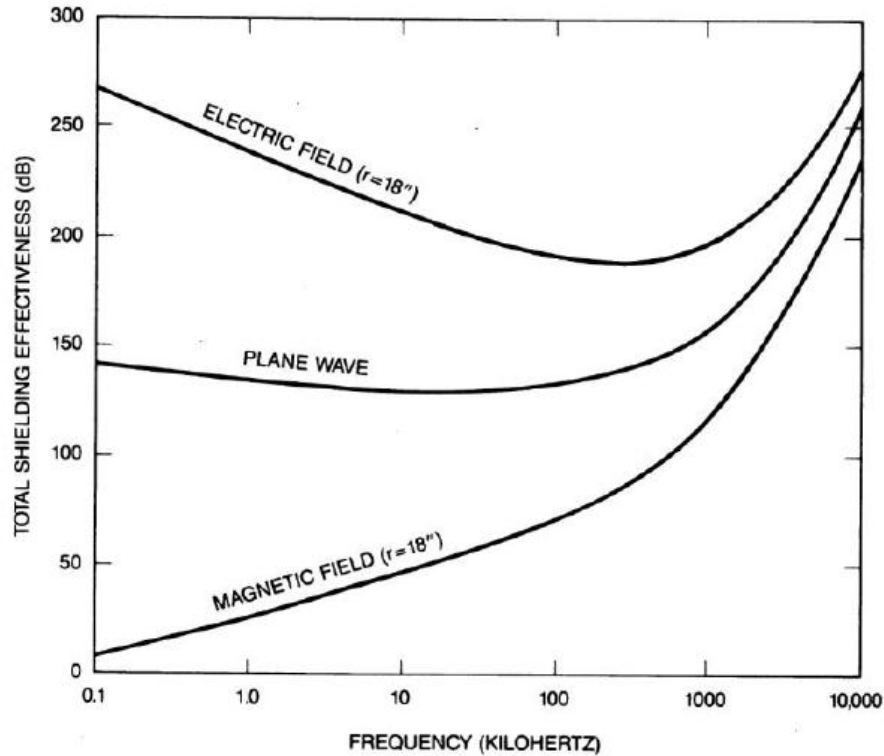
[15.]

Kotelolla pystytään estämään sähkömagneettisen aallon pääsyn koteloon tai pois kotelosta. Elektromagneettisen aallon osuessa kotelon seinään osa siitä absorboituu, heijastuu tai kulkeutuu kotelon läpi. Suojan kokonaistehokkuus S (dB) voidaan laskea materiaalin vaimentuvista häviöistä S_A , heijastuneista häviöistä S_R ja useiden heijastusten korjauskertoimesta S_B .

$$S = S_A + S_R + S_B \quad (5)$$

Elektromagneettisen aallon kulkeutuessa johtavassa väliaineessa se synnyttää virtoja, jotka kuluttavat aallon energiaa ohmisina häviöinä ja materiaalin lämmittämiseen kuluva energiana. Vaimentuvat häviöt kasvavat suuresti taajuuden kasvaessa. Heijastuminen johtuu materiaalien erilaisista ominaisimpedansseista. Aallon kulkeutuessa kotelon

läpi se kokee kaksi heijastumista, ensin saapuessaan koteloon ja poistuessaan sieltä. Kotelon sisällä tapahtuva heijastuminen aiheuttaa lisää heijastuksia, jotka otetaan huomioon korjauskertoimessa. Sähköisessä lähikentässä ominaisimpedanssi on suuri, minkä takia pienelläkin taajuudella heijastuneet häviöt ovat suuret. Magneettisessa lähikentässä taas on pieni ominaisimpedanssi, minkä takia heijastuneet häviöt ovat pienet. Alumiinisuojan kokonaissuojaus on esitetty desibeleissä kuvassa 2. [15.]



Kuva 2: Sähkökentän, magneettikentän ja tasoallon kokonaissuojaus 0,02 tuuman alumiinikotelolle [15].

Aallon pysäyttämiseksi tarvitaan vain ohut johtava materiaalikerros, joka vaimentaa sekä kaukokentän että sähköisen lähikentän. Magneettijohtavalla materiaalilla voidaan kasvattaa absorptiohäviöitä, mutta tällöin johtavuuden kasvaessa heijastumishäviöt pienenevät. Pelkästä magneettikentästä koostuvaa kenttää ei voida vaimentaa, mutta sitä voidaan ohjailta korkea permeabiliittisellä suojilla. Eristeillä on hyvin pieni johtavuus, joten absorptiosta aiheutuvat häviöt ovat pienet. Absorptiota voi kuitenkin tapahtua dielektristen häviöiden takia (molekyylit virittyvät ylimmille tasoille). Eristeessä ominaisimpedanssi on vain hieman tyhjiön ominaisimpedanssia pienempi, minkä takia myös heijastumishäviöt ovat pienet. [13; 15.]

ESD tapahtuu kahteen eri potentiaaliin varastoituneiden kappaleiden välillä. Varaus voi purkautua kipinä purkauksena johteiden välillä, koronapurkauksena ilmaan terävistä reunoista, huiskupurkauksena johteen ja eristeen välillä tai liukupurkauksena eristeiden välillä. Vaarallisempia ovat johteiden välillä syntyvät purkaukset, koska niissä siirtyvät suuret energiat hyvin nopeasti. Eristeiden välillä syntyvässä purkauksessa on taas kyseessä hyvin suuret jännitteet, joiden energia on pieni. Jos kahta alussa neutraalia (yhtä paljon positiivisia ja negatiivisia varauksia) eristettä hangataan toisiaan vasten, varaus

siirtyy eristeestä toiseen. Kun materiaalit viedään toisistaan eroon, ne varautuvat, toinen positiiviseksi ja toinen negatiiviseksi. Varauksen määrä riippuu monista asioista, mutta varauksen suuruutta voidaan määrittää triboelektrisellä sarjalla, joka kertoo aineiden varautumisasteen ja varauksen luonteen, sarja on esitelty taulukossa 1.

Taulukko 1: Triboelektrinen sarja [13].

Eniten positiivinen	
Ilma	
Ihmisen iho	
Kanin turkki	+++
Lasi	
Villa	
Kissan turkki	+
Silkki	
Alumiini	
Paperi	
Puuvilla	Neutraali
Puu	
Teräs	
Kovakumi	-
Epoksi-lasi	
Nikkeli, kupari	
Polyesteri	
Selluloidi	---
Polyvinyl chloride (PVC)	
Pii	
Teflon	
Eniten negatiivinen	

Triboelektrinen sarja kertoo mitkä materiaalit antavat elektroneja ja varautuvat positiiviseksi ja mitkä vastaanottavat niitä ja varautuvat negatiiviseksi. Esimerkiksi hankaamalla villaa tefloniin aiheuttaa elektroninen siirtymistä villasta tefloniin. Triboelektrinen sarja on vain suuntaa antava, koska siirtynyt varaus riippuu monesta asiasta kuten pintojen tasaisuudesta, pintojen puhtaudesta, kosketuspinnasta, kosketusvoimakkuudesta, hankaussuunnasta, ja kappaleiden erottamisnopeudesta. ESD purkaantuu kun kappaleet tuodaan tarpeeksi lähelle toisiaan, jolloin tapahtuu sähkökentän läpilyönti. Taulukossa 2 on listattu varautuvia jännitteitä ja jännitteitä jotka riittävät rikkomaan komponentteja.

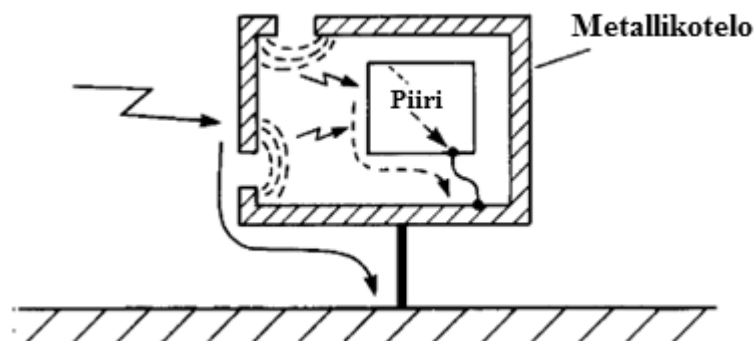
Taulukko 2: ESD:n kannalta merkityksellisiä potentiaaleja [16].

Jännite	Tapahtuma
30 V	Herkimmät komponentit vioittuvat
100 V	MOSFET ja JFET vaurioituvat
1000 V	Lähes kaikki komponentit alttiita vaurioille
3000 V	Ihminen voi tuntea ESD pulssin
4000 V	Ihminen voi kuulla ESD pulssin
5000 V	Ihminen voi nähdä ESD pulssin
Aiheutuva maksimijännite	Tapahtuma
6000 V	Työskentely työtason ääressä
15000 V	Aerosolin suihkutusta komponentille
18000 V	Istumisen keinoaineisella tuolilla
20000 V	Muovitaskujen käsittely
35000 V	Kävely tekokuitumatolla

ESD pulssi voi vahingoittaa tai tuhota komponentteja neljällä eri pulssin jälkitapahtumalla:

1. Suora johtuminen elektroniikan läpi
2. Jälkipurkaus uloimmasta pinnasta sisäpintaan
3. Kapasitiivinen kytkentyminen elektroniikkaan
4. Induktiivinen kytkentyminen elektroniikkaan

ESD:ltä suojautumisessa voidaan estää varauksen johtaa purkaus hallitusti maahan. Yhtenäinen metallinen koteloointi johtaa pulssin maahan. Kaikki metalliosat pitäisi maadoittaa kotelon maatasoon, jotta jälkipurkauksia ei syntyisi elektroniikkaan. Kuvassa 3 on esitelty elektrostaattisen purkauksen mahdollisia kulkureittejä.

**Kuva 3:** ESD kulkeutuminen avonaisessa kotelossa [13].

ESD:ltä voidaan myös suojautua eristämällä metalliosat kosketukselta. Eristeen läpi-lyöntijännite E_d ja suurin mahdollinen syntyvä varaus V_{\max} (usein ihmiseen kertyvä maksimivaraus) määrittävät kuinka lähellä d_{\min} elektroniikka voi olla koteloa.

$$d_{\min} = \frac{V_{\max}}{E_d}, \quad (6)$$

Esimerkiksi ilman läpilyöntijännite on noin $3 \cdot 10^6$ V/m, jolloin esimerkiksi ihmiseen varautuneen jännitteen 3000 V purkautuminen maatasoon riittää 1 mm etäisyys. Elektromagneettisen säteilyn pakkauksissa on myös tärkeää, ettei ESD pulssia pääse syntymään pakkauksen sisällä. Komponenttien pakkaukseen käytetäänkin antistaattisia materiaaleja, kuten polyeteenipusseja, joiden pintaresistiivisyys on $10^9 \Omega$. Tällöin staattinen varaus jakaantuu nopeasti pussin pinnalle, estäen varauksen kertymisen tietylle alueelle. Eristeiden suuren resistiivisyyden takia sähkövaraus ei pääse purkautumaan tarpeeksi nopeasti, jolloin varaus voi nousta liian suureksi. [15.]

3.2 RF-suunnittelu

Sähkömagneettinen säteily on poikittaista aaltoliikettä, joka etenee valon nopeudella tyhjiössä. Aallonpituus tarkoittaa sähkömagneettisen aallon etenemisnopeuden ja sen sykkimistaajuuden suhdetta. Sähkömagneettisen säteilyn spektri jaetaan osiin aallonpituuden tai taajuuden mukaan. Radioaaltoiksi kutsutaan säteilyä, jonka taajuus on alle 3 THz (aallonpituus suurempi kuin 0,1 mm). Radiotekniikka käsittelee elektroniikkaa radioaaltojen (Radio Frequency, RF) taajuuksilla, sovellutuksia ovat esimerkiksi televisiolähetykset, matkaviestintä, satelliittitietoliikenne ja RFID (Radio Frequency Identification), jonka avulla voidaan etälukea ja -kirjoittaa tietoa. Sähköiset piirit ja laitteet, joissa sähköilmiön äärellinen etenemisnopeus pitää ottaa huomioon kuuluvat radiotekniikan piiriin. Tämä tarkoittaa sitä, että jos ilmiöiden pituus on aallonpituuden luokkaa, se kuuluu radiotekniikkaan. [17.]

Aaltojohtoja käytetään signaalien ja tehon siirtämisessä sekä niistä voidaan muodostaa komponentteja, joilla signaaleita käsitellään. Aaltojohtoja on erilaisia eritarkoituksia varten, esimerkiksi aaltoputket, koaksiaalikaapeli, parikaapeli ja mikroliuskajohto. Mikroliuskajohtoa käytetään kuljettamaan signaalia piirilevyllä, se muodostuu piirilevyn maatasosta ja eristekerroksen kannattamasta metalliliuskasta. Aaltojohdosta saadaan siirtojohtomalli kun sitä käsitellään jännitteiden ja virtojen avulla. Siirtojohtomallissa aalto etenee äärellisellä nopeudella sarjainduktanssin L ja rinnakkaiskapasitanssin C takia, ja sarjaresistanssi R sekä eristemateriaalin pienestä johtavuudesta aiheutuva rinnakonduktanssin G aiheuttavat häviöitä. Siirtojohtimen ominaisimpedanssiksi saadaan

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R + j\omega L}{G + j\omega C}}. \quad (7)$$

Jos aaltojohdossa on epäjatkuvuuskohta, esimerkiksi muutos johdon geometriassa tai kuorman epäsojovasta impedanssista, impedanssi muuttuu ja syntyy heijastus, joka pienentää kuormassa kuluva tehoa. Impedanssin sovittaminen aaltojohtoon on RF-suunnittelijan kohtaama tehtävä. Kapasitansseja ja induktansseja saadaan korvattua tietyn pituisilla aaltojohdoilla. Aaltojohdon ominaisimpedanssi riippuu johdon eristeaineen

permittiivisyydestä, taajuudesta sekä geometrioista, kuten johtimen leveydestä, johtimen paksuudesta ja eristeen paksuudesta. [17; 18.]

Aallon syntymiseksi ja vastaanottamiseksi tarvitaan radiolähettimet ja vastaanottimet. Antenneilla voidaan lähettää ja vastaanottaa radioaaltoja. Aaltojohdossa etenevä lähetysteho pyritään siirtämään antennilla mahdollisimman tehokkaasti väliaineeseen, sekä väliaineesta toiseen aaltojohtoon ja tämän kautta vastaanottimeen. Antennien suorituskykyä kuvataan tavallisesti sen säteilyominaisuuksilla, kuten säteilykuviollla ja vahvistuksella. Piirianalyysin kannalta tärkeitä parametreja ovat esimerkiksi impedanssi, hyötysuhde ja kaistanleveys. Antenni voidaan valmistaa myös halvemmallalla suoraan piirilevyille, jolloin piirilevymateriaalin ominaisuudet vaikuttavat antennin toimintaan. Antenneista on kirjoitettu paljon ja niistä löytyy helposti kirjallisuutta.

3.3 Lämpösuunnittelu

Elektroniikkalaitteen lämpösuunnittelun tavoitteena on suunnitella laitteen lämmönsiirtyminen, jotta laite toimisi luotettavasti. Lämpötila muuttaa materiaalien ominaisuuksia ja liian korkeat lämpötilat tai lämmönmuutokset aiheuttavat yhdessä kosteuden kanssa suurimman osan elektroniikkalaitteen vikaantumisista. Elektroniikan piireissä teho muuttuu lämmöksi, joka pitää johtaa komponenteista ulos, etteivät ne kuumentu liikaa ja menisi rikki. Lämmönvaihtelu aiheuttaa komponenteissa myös lämpölaajentumista ja lämpötilan laskiessa komponentti ei ehkä enää palaudu samaan pituuteen mitä se oli ennen lämpenemistä, jolloin komponentit eivät enää sovi yhteen. Materiaalin eri lämpölaajenemiset saattavat myös rikkoa niiden välisiä liitoksia, koska toinen materiaali voi laajentua paljon enemmän kuin toinen. Elektroniikassa komponenttien pakkaustiheys on noussut niin korkeaksi, ettei syntyvää lämpöä saada enää siirtymään tarpeeksi ilman lämpösuunnittelua. Lämpö voi siirtyä johtamalla, konvektiolla ja säteilemällä. Lämpösuunnittelussa kiinnitetään huomiota mahdollisuuksiin tuotteessa eri lämmönsiirtomekanismeja. Onko esimerkiksi mahdollista käyttää väliaineen virtausta ja väliaineen faasimuutoksia. Ilman kierrättäminen kotelossa on hyvä tapa lisätä lämmönsiirtoa ulos kotelosta. Komponenteista lämpö siirtyy pääasiallisesti johtamalla komponentin kotelon läpi. Lämmönsiirtoa voidaan lisätä jäähdytyslevyillä tai lämpöputkilla. Lämpösuunnittelu pitää tehdä yhdessä sähkö- ja mekaniikkasuunnittelun kanssa laitteen toiminnallisten ominaisuuksien kontrolloimiseksi. Myös koteloon laitettavien tuuletusreikien pituus on tärkeä ottaa huomioon EMC-suunnittelun kannalta. [19.]

Lämmönjohtavuus λ tarkoittaa millä nopeudella lämpö siirtyy lämpötilaeron takia materiaalin läpi.

$$\frac{dQ}{dt} = \lambda \frac{A\Delta T}{l} \quad (8)$$

Missä dQ on siirtynyt energia, dt on missä ajassa, A on pinta-ala, l on pituus ja dT on lämmön muutos. Materiaalille lämpöresistanssi määritetään seuraavasti

$$R_{th} = \frac{l}{\lambda A}, \quad (9)$$

josta saadaan siirtyvälle lämpöteholle kaava

$$\frac{dQ}{dt} = P = \frac{\Delta T}{R_{th}}, \quad (10)$$

missä P on siirtyvä lämpöteho. Lämpö voi joutua siirtämään usean eri materiaalikerroksen läpi ulkoilmaan, joten lämpöresistanssit voidaan laskea yhteen. Lämpösuunnittelussa pitää tietää komponenttien ja laitteiden kestävä maksimi lämpötila, ja eri materiaalien lämmönsiirtymisteho. Näitä tietoja voidaan käyttää hyväksi valitessa oikea lämpöstrategia suunnittelun alussa. [19; 20.]

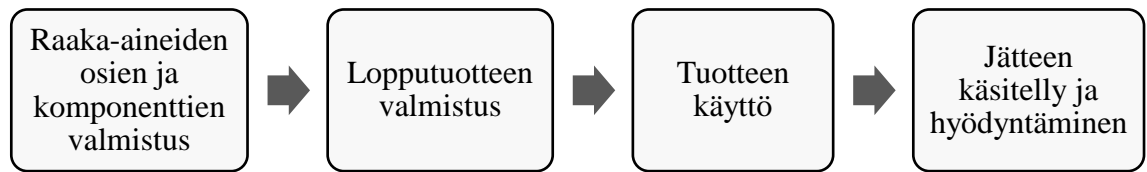
3.4 Ympäristönäkökohdat

Tuotesuunnittelussa tehdyt ratkaisut vaikuttavat kaikkiin tuotteen elinkaaren vaiheisiin ja siten myös tuotteen aiheuttamien ympäristövaikutusten määrään ja kokonaiskustannuksiin. Tuotesuunnittelun alussa voidaan vaikuttaa jopa 80–90 % tuotteen elinkaaren aikaisista kustannuksista. Ympäristömyönteistä suunnittelua (Design for Environment, DFE) käytetään liittämään ympäristöasiat osaksi tuotesuunnittelua. Kuva tuotteen ympäristövaikutuksista saadaan tekemällä tuotteelle elinkaariarviointi, jossa käydään läpi tuotteen aiheuttamat ympäristövaikutukset komponenttien valmistamisesta tuotteen käytöstä poistoon asti.

Syitä ympäristöasioiden huomioonottoon ovat

- Kilpailutekijä sekä osa toiminnan ja tuotteiden kokonaislaatua.
- Tulevaisuuden odotusten tunnistaminen ja riskien hallinta (markkinat ja lainsäädäntö).
- Ympäristöasioiden huomioonotto voi tuoda kustannussäästöjä lyhyellä ja pitkällä aikavälillä.
- Tärkeää on että suurimmat ympäristöasiat on katsottu läpi, jotta pystyttäisiin reagoimaan hallitummin vaatimuksiin, eikä tehtäisi hätiköityjä päätöksiä.
- Tuotteiden ympäristölaatu on osa yrityksen yhteiskuntavastuuta. Ympäristönäkökohdat kiinnostavat myös omistajia, sijoittajia ja työntekijöitä.

Teknologiakehitys tarjoaa monia mahdollisuuksia sähkö- ja elektroniikkateollisuudessa ympäristömyönteisen tuotesuunnittelun toteuttamiselle, esimerkiksi energiatehokkuuden, modulaarisuuden sekä integroitujen ja pienempien komponenttien kautta. Elektroniikan komponenttien kehitys, ohjelmoitavien komponenttien merkitys ja elektroniikan pakkaustekniikka kehittyvät nopeasti, mikä mahdollistaa entistä ympäristöystävällisemmät tuotteet. On myös tärkeää tutkia kuinka ympäristöystävällisempiä materiaaleja pystyttäisiin käyttämään korvaamaan perinteisiä materiaaleja. Älymateriaalit ja biotekniikka voivat tarjota täysin uusia mahdollisuuksia materiaalitekniikan alueella. [21.]



Kuva 4: Tuotteen elinkaari [21].

Kuvassa 4 on esitetty tuotteen elinkaari. Elinkaaren ensimmäisessä vaiheessa tehdään tuotteen suunnittelu ja kehitys koko elinkaarta ajatellen. Samalla valitaan myös valmistajat ja alihankkijat. Kuljetukset lohkojen välillä pitää myös suunnitella. Viimeisessä vaiheessa vastuu pitää kantaa tuotteen jätehuollosta soveltuviin osiin. [21.]

4 UUSIUTUVIEN MATERIAALIEN OMINAISUUDET

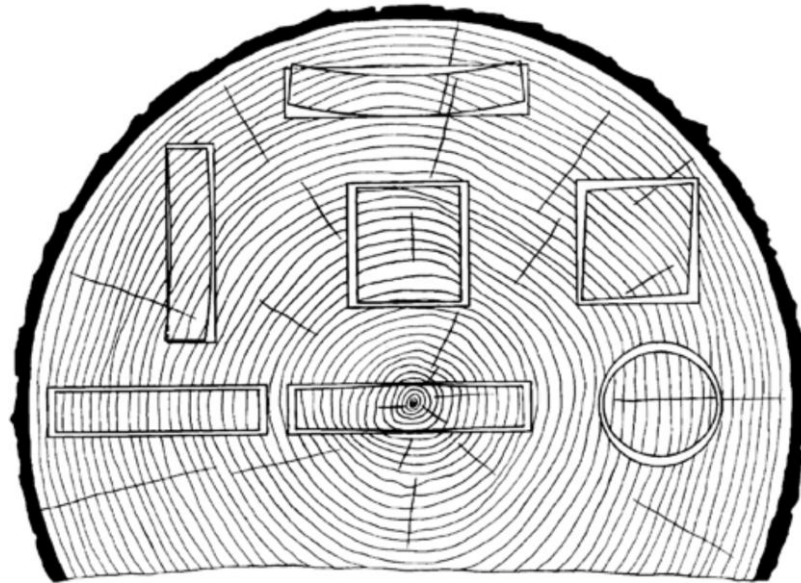
Puu on orgaaninen aine, joka koostuu selluloosasta, ligniinistä, hemiselluloosasta ja pienistä määristä (5-10 %) muita materiaaleja solurakenteessa. Näiden aineiden ominaisuuksien ja määrien vaihtelusta riippuvat puun ominaisuudet, kuten massa, joustavuus ja kovuus. Eri puulajeilla on eri ominaisuudet, minkä takia puulajin valinnalla on merkitystä. Tietyn puulajin ominaisuudet ovat melko vakioita tietyn toleranssin sisällä. Puun ominaisuudet vaihtelevat myös puun sisällä, kuten oksien, pinta- ja sydänpuun ominaisuudet ovat hieman erilaiset toisistaan. Puusta saadaan tehtyä erilaisia materiaaleja kuten vanereja, laminaatteja, erilaisia komposiittimateriaaleja (muun muassa lastulevyt ja paperi), joiden ominaisuuksia voidaan muuttaa valmistusprosessissa. [22; 23.]

Paperi ja kartonki valmistetaan kuituista, joita saadaan esimerkiksi puuvillasta tai pellavasta, mutta yleisimmin käytetty materiaali on puumassa. Paperit jaetaan kuitukoostumuksensa mukaan puupitoisiin papereihin, jotka valmistetaan mekaanisella menetelmällä, ja sellupapereihin, jotka valmistetaan kemiallisilla menetelmillä. Paperin tai kartongin valmistuksessa sekoitetaan tarvittavat materiaalikomponentit vesipitoiseksi massaksi, joka levitetään rainoihin. Paperi ja kartonki pysyvät kasassa kuitujen vetysidosten avulla, jotka syntyvät kuivatuksessa. Rainan muodostuksessa määrätty neliömassa, kuitujen suuntautuminen, tasaisuus sekä kuitu- ja täyteainejakauma. Raina puristetaan ja kuivataan, jotka vaikuttavat paperin tai kartongin sileyteen, symmetriaan, pölyävyyteen, huokoisuuteen ja tiheyteen. Kuivauksessa vettä poistetaan haihduttamalla, mikä vaikuttaa hieman karheuteen, lujuusominaisuuksiin, venymiseen ja vaaleuteen. Paperi ja kartonki vielä jälkikäsitellään leikkaamalla ne halutun pituisiksi ja mahdollisesti pintaliimataan tai päällystään, mitkä parantavat tuotteen lujuusominaisuuksia, ulkonäköä ja painettavuutta. Paperin ja kartongin ero on kuitukerrosten määrässä. Paperilla kuitukerroksia on yleensä yksi ja kartongilla taas enemmän. Tällöin kartongin neliömassa on suurempi kuin paperin.

4.1 Kosteus

Puu, kuten monet luonnolliset materiaalit, on hygroskooppinen materiaali, eli se imee kosteutta ympäröivästä ympäristöstä. Kosteuden siirtyminen puun ja ilman välillä riippuu ilman lämpötilasta ja kosteudesta sekä kyseisellä hetkellä veden määrästä puussa. Kosteudella on suuri vaikutus puun ominaisuuksiin ja suorituskykyyn. Kosteus voi olla puussa vapaana vetenä (nestemäistä vettä tai vesihöyryä puun putkiloissa tai onteloissa) tai sitoutuneena molekyylien sisäisten vetovoimien avulla soluseiniin. Siinä kosteussuh-

teessa, missä soluseinämät ovat kokonaan saturoituneet, mutta vettä ei ole putkiloissa, kutsutaan kuidun saturaatiopisteeksi MC_{fs} . Kuidun saturaatiopiste voidaan ajatella olevan se piste, mistä kosteussuhteen nousu ei vaikuta puun fysikaalisiin ja mekaanisiin ominaisuuksiin. Saturaatiopisteen keskiarvo on noin 30 %, mutta joillakin lajeilla se voi vaihdella muutamalla prosenttiyksiköllä. Suurin mahdollinen kosteus saadaan kun putkilot ja soluseinämät ovat täysin märkiä. Puulla on myös tasapainokosteus (Equilibrium Moisture Content), jolloin se ei luovuta tai ota vastaan kosteutta ympäristöstä. Puu on mittasuhteiltaan vakio kun kosteussuhde on suurempi kuin saturaatiopiste. Saturaatiopisteen alapuolella puu paisuu kun se saa kosteutta ja kutistuu kun se menettää kosteutta, koska soluseinämän tilavuus riippuu sitoutuneen veden määrästä. Puu on anisotrooppinen materiaali, joten sen ominaisuudet eri suuntiin ovat erilaiset. Pituuden muutokset ovat suurimmat kasvurenkaiden tangentin suuntaan, noin puolet edellisestä kasvurenkaiden säteen suuntaan ja vain vähän syiden suuntaan (puun pituuden suuntaan). [22]. Kuvassa 5 on poikkileikkaus puusta ja kutistumisen vaikutuksesta rungon eri osiin.



Kuva 5: Kosteuden vaikutus puun elämiseen [22].

Koska paperi valmistetaan puusta, sen ominaisuudet riippuvat myös ympäröivästä kosteudesta. Paperin ja pahvin päästessä kostumaan ne kiertyvät ja haurastuvat, koska osa kuitujen välisistä vetysidoksista korvautuu hydroksyyliyhymien ja vesimolekyylien välisistä sidoksista. Kuivuessaan paperin ja pahvin pölyävyydet lisääntyvät. Lastulevyissä, paperissa ja kartongissa puusyyt ovat kääntyneet sattumanvaraiseen suuntaan, joten kutistuminen tai paisuminen on joka suuntaan yhtä suuri. Joillakin valmistusmenetelmillä syyt kääntyvät johonkin tiettyyn suuntaan, jolloin materiaali voi kutistua ja laajentua enemmän.

Kosteussuhde merkitään MC (Moisture Content), missä m_{vesi} on materiaalissa olevan veden massa ja m_{tot} on materiaalin kokonaismassa.

$$MC = \frac{m_{vesi}}{m_{tot}} \cdot (100\%) . \quad (11)$$

Toisaalta kosteussuhde voidaan määrittellä uunikuivan massan m_{kuiva} ja mitattavan $m_{märkä}$ massojen avulla.

$$MC = \frac{m_{märkä} - m_{kuiva}}{m_{kuiva}} \cdot (100\%). \quad (12)$$

Tiheys ρ_d määritellään aineen massan m ja tilavuuden V suhteena

$$\rho_d = \frac{m}{V}. \quad (13)$$

Materiaaleille, jotka eivät ime kosteutta, tiheys on vakio tietyssä paineessa ja lämpötilassa, kuten metalleilla. Puutuotteilla taas kosteuden muuttuessa sekä massa että tilavuus muuttuvat. Taulukossa 3 näkyy suomen yleisempien puulajien tiheyksiä ja kutistumisprosentteja. [22.]

Taulukko 3: Suomen yleisempien puulajien tiheydet ja kutistumiset [24].

Materiaali	Tiheys (kg/m^3)	Kutistuminen tuoreesta uunikuivaan		
		Säteen suuntaan (%)	Tangentiaalinen (%)	Syiden suuntaan (%)
Mänty	490	4,0	7,7	0,4
Kuusi	430	3,6	7,8	0,3
Koivu	600	5,3	7,8	0,6

Paperille ja pahville tiheyden sijasta annetaan neliömassa, joka tarkoittaa paperin painoa grammoina neliometriä kohden (g/m^2). Jos paperin paksuus tiedetään, voidaan tiheys laskea jakamalla neliömassa paksuudella. Paperin neliömassa riippuu paperin laadusta. Perus toimistopaperin neliömassa on $80 g/m^2$ ja paperien neliömassa voi kasvaa aina $225 g/m^2$, jonka jälkeen se muuttuu pahviksi. Paperin dimensiot muuttuvat suhteellisen kosteuden 0–100 % välillä syiden suunnassa noin 1 % verran ja sivuttain noin 20 % [25].

4.2 Mekaaniset ominaisuudet

Materiaalien mekaanisia ominaisuuksia pitää ottaa huomioon, jotta tiedettäisiin mitä voimia materiaalit kestävät. Puun mekaaniset ominaisuudet ovat lujia, mutta puu on kuitenkin helposti työstettävä materiaali. Puu on myös hyvin kestävä ja sen käytettävyys on tehokasta, koska siitä voidaan helposti tehdä erilaisia tuotteita eri tarpeisiin. Puu on myös joustavaa ja taipuvaa, mutta kuitenkin vahvaa, että sitä pystytään käyttämään rakennusmateriaalina. Paperin ja pahvin ominaisuudet ovat helposti muokattavia ja niistä saadaan valmistettua eri tarpeisiin. Paperi on kestävä ja helposti mekaanisesti muokattavaa.

Kimmokerroin osoittaa, kuinka jäykkää materiaali on ja kuinka suuria taipumia palkkeihin syntyy jollakin kuormituksella. Kuormituksen edelleen lisättäessä suhteellisuusrajan jälkeen, muodon muutos ei enää palaudu ja lopulta päästään murtumisrajaan

asti. Taivutuslujuus (modulus of rupture) mitataan yleensä vain puun syitä vastaan, koska se vastaa käyttösovelluksissa tarvittavaa lujuutta. Murtovetolujuus (tensile strength) kertoo sen voiman mikä tarvitaan vetämään kappale rikki kohtisuoraa syitä vastaan (annettu keskiarvona tangentin ja säteen suuntaan). Puristuslujuus (compressive strength) tarkoittaa suurinta voimaa minkä kappale kestää murskautumatta. Leikkauslujuus (shear strength) tarkoittaa kappaleen kykyä vastustaa kappaleen halkaisemista syiden suuntaan. Taulukossa 4 on koottu suomalaisten puiden mekaanisia ominaisuuksia. Puiden tiheydelle on annettu keskiarvo ja vaihteluvälit uunikuiva - keskimääräinen - tasapainokosteus.

Taulukko 4: Suomen yleisempien puiden mekaanisia ominaisuuksia [24].

Materiaali	Tiheys (kg / m ³)	Taivutuslujuus (MPa)	Kimmo-kerroin (MPa)	Murtovetolujuus (MPa)	Puristuslujuus syiden suuntaan (MPa)	Leikkauslujuus (MPa)
Mänty	300	40	6,8	1,0	34	6,0
	490	98	11,8	2,9	54	9,8
	860	202	19,7	4,3	92	14,0
Kuusi	300	48	1,4	1,5	34	3,9
	430	76	10,8	2,7	49	6,6
	640	133	1,8	3,9	79	11,8
Koivu	460	75	14,2		37	12
	600	144		6,9	50	
	800	152	16,2		98	14

Paperin ja pahvin mekaanisia ominaisuuksia on tarkasteltu taulukossa 5 (murtovetolujuus on muutettu kPa). Murtolujuus (bursting strength) tarkoittaa millä voimalla materiaali hajoaa ja rikkoutumispituus tarkoittaa kuinka pitkä materiaalin pitää olla, jotta sen oma paino aiheuttaa roikkumisessa rikkoutumisen. MD tarkoittaa kuitujen suuntaan (machine direction) ja CD kohtisuoraan kuitujen suuntaan (cross-machine direction).

Taulukko 5: Paperi ja pahvi laatujen ominaisuuksia [26].

Materiaali	Tiheys (kg / m ³)	Murtovetolujuus (kPa)	Rikkoutumis- pituus (km)	Murtovetolujuus (kPa)
LWC paperi	1275	100	MD: 4,73 CD: 1,75	MD: 2,56 CD: 0,97
Puuvapaa paperi	740	150	MD: 5,25 CD: 2,05	MD: 4,30 CD: 1,67
Paperikassi	660	350	MD: 7,50 CD: 5,15	MD: 5,23 CD: 3,57
Kartonki (Boxboard)	630	550	MD: 5,75 CD: 1,85	MD: 16,37 CD: 5,37

4.3 Sähköiset ominaisuudet

Puun ja paperin sähköiset ominaisuudet riippuvat suuresti materiaalin kosteussuhteesta. Sähköiset ominaisuudet muuttuvat jopa kymmenen kertaa suuruudeltaan mahdollisten kosteussuhteiden välillä. Puusta valmistetut materiaalit ovat kaikki sähköeristeitä eli dielektrisiä aineita. Eristeessä on vähän sähkövarauksen kuljettajia, joten sen resistiivisyys on suuri.

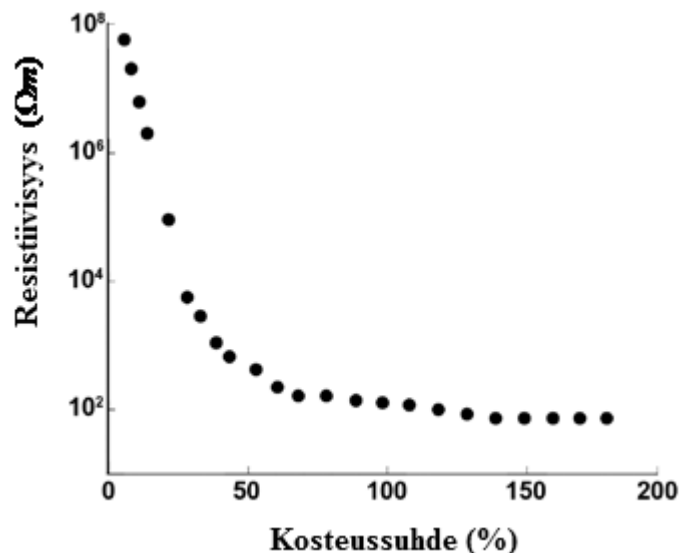
Resistanssi R saadaan piirianalysissä käytettävän Ohmin lain mukaan sähköisen potentiaalieron U ja virran I avulla

$$R = \frac{U}{I}. \quad (14)$$

Resistanssin käänteisluku on johtavuus, jota merkitään σ :llä. Resistanssi voidaan myös määrittää kappaleelle, jos tiedetään sen resistiivisyys ρ_r , pituus ℓ , jonka virta kulkee ja poikkileikkaus pinta-alan A , jonka läpi virta kulkee.

$$R = \rho_r \frac{\ell}{A}. \quad (15)$$

Puun johtavuus riippuu myös lämpötilasta, syiden suunnasta ja vesiliukoisista suoloista. Kuvassa 6 on esitetty *Pinus elliottii*:n resistiivisyys kosteuden suhteen, siitä nähdään, että resistiivisyys pienenee nopeasti kosteussuhteen kasvaessa uunikuivasta. Saturaatiopisteen jälkeen resistiivisyys pienenee enää vähän. Toisinkuin metalleilla, puun johtavuus kasvaa lämpötilan noustessa. Johtavuus on suurempi syiden myötäisesti kuin poikittain syiden läpi, ja hieman enemmän radiaaliseen suuntaan kuin tangentialiseen suuntaan. Suhteellinen johtavuus on eri suuntiin noin syiden suuntaan: 1,0, radiaaliseen suuntaan: 0,55 ja tangentialiseen suuntaan 0,50. [22.]



Kuva 6: *Pinus elliottii* (slash pine) resistiivisyys suhteessa kosteussuhteeseen [22].

Pintaresistanssi R_s määritetään ohuille pinnoille, jossa virta kulkee pääasiallisesti materiaalin pinnalla. Lisäksi ohuista kappaleista on helpompi mitata pintaresistanssi kuin tilavuudesta riippuva resistanssi. Pintaresistanssin yksikkö on Ω/\square . Pintaresistanssi

on materiaalin ominaisuutta kuvaava suure, jonka mittausjärjestelyissä mittaustulosten geometrian vaikutus otetaan huomioon mittaustuloksessa. Esimerkiksi johtavien musteiden ja liimojen resistanssit ilmoitetaan usein pintaresistanssin avulla.

Kun sähköinen potentiaali tai sähkökenttä tuodaan eristeen eri päihin, virtaa ei kulje paljoa, mutta varausta kertyy materiaalin päihin. Kapasitanssi määritellään varautuneen sähkövarauksen Q ja systeemin sähköisen potentiaalieron E suhteen

$$C = \frac{Q}{E}. \quad (16)$$

Väliainekaavassa sähkövuontiheys riippuu sähkökentästä seuraavasti

$$D = \epsilon E, \quad (17)$$

missä D on sähkövuontiheys. Permittiivisyys voidaan määrittää myös suhteellisen ja tyhjiön permittiivisyyden ($\epsilon_0 = 8,854187817 \cdot 10^{-12}$ F/m) avulla

$$\epsilon = \epsilon_r \epsilon_0 \quad (18)$$

Ideaalinen dielektrinen materiaali vapauttaa kaiken sitomansa energian kun sähkökenttä poistetaan, mutta todellisuudessa osa energiasta kuluu dielektrisinä häviöinä. Materiaali ei myöskään ole täydellistä eristettä, vaan materiaalissa tapahtuu myös ohmisia häviöitä. Elektromagneettinen aalto (sähkö- ja magneettikenttä) kääntää dipoli-molekyylejä ja kuljettaa varautuneita hiukkasia kentän suuntaan. Jos taajuutta kasvatetaan, varautuneiden hiukkasten liike-energia hidastaa hiukkasten liikettä ja hiukkaset eivät pääse liikumaan taajuuden kanssa samassa vaiheessa. Tämä aiheuttaa vaimentumista, jonka kumoamiseen tarvitaan työtä eli syntyy dielektrisiä häviöitä materiaalissa. Permittiivisyydestä käytetään kompleksista arvoa ϵ_c , jolla kuvataan dielektrisiä häviöitä. Jos vain ohmiset häviöt otetaan mukaan, saadaan permittiivisyydeksi, jossa ω on kulmataajuus

$$\epsilon_c = \epsilon - j \frac{\sigma}{\omega}. \quad (19)$$

Tässä imaginaariosa kertoo ohmisista häviöistä. Jos otetaan huomioon myös sekä dielektriset ja ohmiset häviöt, kompleksisesta permittiivisyydestä saadaan

$$\epsilon_c = \epsilon' - j\epsilon'', \quad (20)$$

Missä ϵ' on reaalinen permittiivisyys ja ϵ'' imaginaarinen permittiivisyys, jossa on sisällä sekä ohmiset että dielektriset häviöt. Näitä termejä kuvataan häviötangentilla (Loss Tangent). Häviötangentti mittaa reaktiivisen tehon muunnettuna tehoksi, joka kuluisi lämpönä. Mitä pienempi häviötangentti, sitä ideaalisempi on eriste ja sitä vähemmän syntyy tehohäviöitä. Häviötangenttia kutsutaan myös häviökertoimeksi.

$$\tan \delta = \frac{\epsilon''}{\epsilon'}. \quad (21)$$

Dielektrinen voimakkuus kertoo materiaalin kyvystä kestää sähkökentän läpilyöntiä. Jännitteen suuruus jolla läpilyönti tapahtuu, riippuu sähkökentän voimakkuudesta (V/m). Aineella on vielä magneettista käyttäytymistä kuvaava suure nimeltään permeabiliteetti μ , mutta se ei poikkea tyhjiön permeabilititeesta muuta kuin ferromag-

neettisillä aineilla, kuten esimerkiksi raudalla tai ferriitillä. Taulukkoon 6 on koottu puun ja paperin sähköisiä ominaisuuksia. [27.]

Taulukko 6: Materiaalien sähköisiä ominaisuuksia (materiaalin paksuuden suuntaan).

Materiaali	Resistanssi ($m\Omega$)	Suhteellinen Permittiivisyys	Häviökerroin	Dielektrinen voimakkuus (MV/m)
Paperi [20; 28]	10^{16}	1,9–2,9 @ 50Hz 3.5 @ kHz	0,005 @ 50Hz 0,007 @ kHz	18
Puu [22; 28]	$10^{15} - 10^{16}$ (kuiva) $10^3 - 10^4$ (märkä)	1,4–4 100 @ 10 KHz	0,01 0,95 @ 10KHz	10–20

4.4 Termiset ominaisuudet

Puun ja puumateriaalien lämmönjohtavuus on paljon pienempi kuin metallien. Lämmönjohtavuus on sama tangentin ja säteen suuntaan, mutta syiden suuntaan se on suurempi (keskiarvoltaan 1,8). Lämpötilan vaikutus on suhteellisen pieni verrattuna kosteuden vaikutukseen, vain 2–3 % muutos pituudessa 10 °C muutoksessa. Lämpötilan noustessa kosteus poistuu puusta, joten puun tilavuus saattaa pienentyä lämpölaajenemisesta huolimatta. Lämpölaajentuminen ΔL voidaan laskea kaavalla

$$\Delta L = \alpha \Delta T L_0, \quad (22)$$

missä α on lämpölaajenemiskerroin ja L_0 on alkuperäinen pituus. Jos lämpötilaa nostetaan tarpeeksi, puu ja puupohjaiset materiaalit syttyvät palamaan. Tätä lämpötilaa kutsutaan syttymislämpötilaksi, joka riippuu muun muassa kappaleen koosta, lämmönjohtavuudesta ja millä teholla kappaletta lämmitetään. Kemialliset sidokset alkavat rikkoutua yli 100 °C, jolloin puu haurastuu. Kuivan selluloosan lasittumislämpötila on 230 °C, hemiselluloosan 180 °C ja ligniinin 200 °C. 100–200 °C välillä puu kuivuu, ja tuottaa vesihöyryä ja muita ei syttyviä kaasuja kuten hiilidioksidia. 200–300 °C välillä puun osat kokevat pyrolyysin vahinkoja ja se synnyttää kaasuja, jotka syttyvät ulkoisen sytytysenergian avulla (leimahduspiste). Lämpötilaa nostettaessa puu ja puumateriaalit alkavat yhtymään happeen ja syttyvät palamaan. Paperin syttymislämpötila on 450 °C ja leimahduspiste 350 °C. Taulukossa 7 on esitetty termisiä ominaisuuksia [22; 29.]

Taulukko 7: puun ja paperin termisiä ominaisuuksia.

Materiaali	Lämmönjohtavuus ($W/(mK)$)	Lämpölaajenemiskerroin ($10^{-6} \cdot 1/K$)
Paperi [29]	0,06–2	MD: 3,6–7,5 CD: 8,7–16,2
Puu [22]	0,7–1,0	3,1–4,5 (syiden suunta) 31–45 (tangentti) 15,5–22,5 (radiaalinen)

5 UUSIUTUVIEN MATERIAALIEN KÄYTTÖ ELEKTRONIKKALAITTEISSA

Puu ja paperi ovat eristeitä ja niillä ei voida korvata johteita. Elektroniikassa tarvitaan kuitenkin paljon muitakin materiaaleja esimerkiksi eristeitä ja puolijohteita. Puolijohteet rakennetaan lisäämällä esimerkiksi piihin III tai V ryhmän alkuaineita, jolloin saadaan n- tai p-tyypin puolijohteita, jotka vierekkäin rakennettuna muodostavat pn-liitoksen. Selluloosasta ja nanokiteistä muodostuvia puolijohteita on tutkittu niiden fluoresoivien ominaisuuksien takia sekä mahdollista käyttöä kaasui- tai bioantureina. Puuta ja paperia voidaan käyttää eristeenä, estämään ei toivotun virrankulun johtavien osien välillä. Piirilevyn tukikerros eli substraatti vaikuttaa merkittävästi piirilevyn sähköisiin ominaisuuksiin ja sen tehtävä on tukea komponentteja ja johtimia. Substraatti materiaalin valinnalla voidaan vaikuttaa myös antennien ja siirtojohtojen ominaisuuksiin. Puusta ja paperista saadaan myös valmistettua suoja-aineita tuotteille rakentamalla niille koteloita. Kotelointiin liittyy merkittävästi myös elektroniikkatuotteen käyttöliittymä. Uusiutuvia materiaaleja voidaan käyttää myös komponenttien, esimerkiksi kondensaattoreiden valmistuksessa.

5.1 Materiaalien sähköisten ominaisuuksien käyttö

5.1.1 Eriste

Metalleissa varauksenkuljettajia ovat metallisidoksen elektronit, jotka liikkuvat vapaasti metalleissa, minkä takia ne johtavat hyvin sähköä. Muissa kiinteissä materiaaleissa varauksenkuljettajina voivat toimia ionit tai elektronit. Sähköeristeessä varauksenkuljettajat eivät pääse kulkemaan sähkökentän suuntaan. Eristeissä ionit ovat sidottuja kidehiltaan, jolloin elektronien valenssivyö on täynnä ja ulkoista varausta ei synny. Elektro-neille voidaan kuitenkin antaa energiaa, jolloin ne nousevat johtavuusvyölle, ja materiaali alkaa johtaa sähköä.

Puun ja paperin dielektrisyys riippuu materiaalin kosteudesta, lämpötilasta ja kuinka paljon niihin on sitoutunut erilaisia suoloja. Selluloosa on todella hyvä eriste, joten puusta saadaan tehtyä parempi eriste tekemällä siitä paperia. Tällöin puuaineksesta saadaan poistettua johtavat ionit ja myös polaariset ligniini. Samalla paperia voidaan jälkikäsitellä, esimerkiksi lisäämällä siihen ESD- tai kosteudensuoja-aineita. Puu ja paperi polarisoituvat kun ne tuodaan sähkökenttään. Polarisoituminen johtuu molekyylien varauksen jakautumisesta ja kääntymisestä sähkökentän suuntaan. Vesi on polaariset aine, joten pienikin määrä kosteutta riittää kasvattamaan permittiivisyyden ja häviötangentin suureksi. Selluloosan polarisoituminen ja sitä kautta permittiivisyys riippuu hy-

vin paljon tiheydestä. Mitä huokoisempaa materiaali on, sitä enemmän materiaalissa on ilmaa ja ilman suhteellinen permittiivisyys on yksi. Selluloosakuidulle on saatu 5,5 suhteellinen permittiivisyys 10 KHz taajuudella, kun taas paperille, josta kuitu otettiin, saatiin 1,35 [30].

Puun suhteellinen permittiivisyys on suurempi kuin paperin, koska puussa on ligniiniä ja epäpuhtauksia enemmän kuin paperissa. Materiaalissa, kuten paperi ja puu, on molekyyliyhdistä koostuva pysyvä dipolimomentti, kuten hydroksyyli- ja karboksyyli-ryhmät ligniinissä tai selluloosassa. Ligniini on hyvin polaarinen, joten se vaikuttaa dielektrisiin häviöihin enemmän, kuitenkin tutkimuksessa on osoitettu, että alle 2 % ligniinimäärällä häviökerroin kasvaa [31]. Pienellä taajuudella dipolit ja varauksenkuljettajat vaikuttavat dielektrisyysvakioon. Taajuuden kasvaessa dipolit eivät ehdi kääntymään taajuuden tahdissa, vaan jäävät paikalleen (relaksoituvat). Tällöin ne eivät enää vaikuta dielektrisyysvakion reaaliosaan. Relaksoituneet dipolit vaikuttavat kuitenkin vielä häviökertoimen kasvuun. Vapaat varauksenkuljettajat relaksoituvat ensimmäisenä, seuraavana pysyvät dipoli-ryhmät (radiotaajuuksilla) ja viimeisenä ioniset ja elektroniset polarisaatiot, jotka vaikuttavat vielä infrapuna taajuuksilla. Hydroksyyliyhdistillä selluloosaketjussa uskotaan olevan suuri vaikutus dipolimomenttiin, kun ne eivät ole osana samaan suuntaan järjestäytyneitä eli kiteytyneitä aluetta. Karboksyyliyhdistet pitävät helposti sisällään ioneita, minkä takia ne vaikuttavat hyvin paljon häviökertoimeen. Teorian mukaan myös karboksyyliyhdistien vähentäminen lisää vapaita ioneita, jotka lisäävät johtavia häviöitä ja samalla häviötangenttia. Lämpötilan noustessa reaalin permittiivisyys ϵ' kasvaa huomattavasti ja laskee taajuuden kasvaessa. Vapaat ionit aiheuttavat häviökertoimen kasvun, koska materiaalin johtavat häviöt kasvavat. Pienikin määrä vettä kasvattaa johtavia häviöitä suuresti, koska ionit pääsevät helpommin liikkumaan nesteessä. Paperissa ja puussa vapaita ioneita ovat alkalimetallit. Kuitujen suuntautumisen vaikuttaa polaaristen ryhmien kääntymiseen, jolloin paperin ja puun dielektrisyysvakiot vaihtelevat hieman erisuuntiin. [30; 31.]

Eristeen suunnittelu on tärkeä osa suunnittelua, jotta tuotteista saataisiin hyvä laatuisia ja kestäviä. Eristeen merkitys kasvaa sitä enemmän mitä korkeampia jännitteitä käytetään. Jännite-aika käyttäytyminen on tärkeä osa jännitteen ja läpilyöntiajan yhteydelle. Yleensä energiaa tarvitaan materiaalin läpilyönnin aikaansaamiseksi, tällöin läpilyöntijännite ja aika riippuvat toisistaan. Mitä suurempi jännite, sitä pienempi aika tarvitaan läpilyöntiin. Eristeen läpilyöntikestävyys riippuu suuresti lämpötilasta. Kun vaihtojännitettä kytketään eristeeseen, sen lämpötila nousee, dielektristen häviöiden takia. Lämpötila nousee siihen asteeseen, jossa haihtuva ja syntyvä lämpö ovat tasapainossa. Lämpötilan noustessa eristeen johtavuus kasvaa, jolloin virta kasvaa, mikä aiheuttaa taas suurempaa eristeen lämpenemistä. Eristeen läpilyöntikestävyys siis pienenee ajan myötä, kun eriste on sähkökentässä. Dielektrinen läpilyönti voi tapahtua neljällä tavalla:

1. Intrinsiittinen läpilyönti on elektronien kulkeutuminen eristeen läpi.
2. Terminen läpilyönti aiheutuu johtavuuden muuttumisesta lämpötilan noustessa.

3. Purkautumisläpilyönti johtuu aukoista materiaalirakenteessa. (Kaasussa läpilyönti tarvitsee pienemmän potentiaalin kuin kiinteissä aineissa.)
4. Elektromekaaninen läpilyönti johtuu sähköisen rasituksen aiheuttamasta mekaanisesta muodonmuutoksesta.

Paperi ja puu ovat huokoisia materiaaleja, joten purkautumisläpilyönti on ongelma. Ne voidaan kummikin kyllästyä öljyeristeellä tai lakata eristävällä aineella, jolloin läpilyöntikestävyys kasvaa. Parhaita paperilaatuja olisi hyvin pieneen tilavuuteen painettu, puhdistettu ”voima” (kraft) -paperi.

Taulukko 8: Paperin hyvät ja huonot ominaisuudet [31].

Hyvät ominaisuudet	Huonot ominaisuudet
Halpa	Suuret dielektriset häviöt (suurissa lämpötiloissa tai suurilla taajuuksilla)
Mekaaniset ominaisuudet	Suuri paksuus
Paksuuden tasaisuus	
Kemiallisesti tasapainossa (pitkä ikä)	
Hyvät sähköiset ominaisuudet kuivana	
Suuri dielektrinen voimakkuus öljyittynä	
Hyvä nesteiden kulkeutuminen (printattavuus)	
Hyvät itsekorjautuvuus-ominaisuudet	

Itsekorjautuvuus tarkoittaa, että kun paikallinen läpilyönti tapahtuu, syntyy johtava kanava elektrodien välille ja virta kasvaa tällöin suureksi siihen pisteeseen asti, jossa eriste ja metalli kanavan lähellä höyrystyvät, jolloin eriste korjaa itsensä takaisin ei-johtavaksi. Tutkimusten mukaan paperilla on paras itsekorjautuvuus-ominaisuus [31]. Puu on muuten samanlainen materiaali kuin paperi, mutta sen sähköiset ominaisuudet ovat hieman huonompia, koska paperin valmistuksessa rakennetta voidaan muokata. Paperin ominaisuuksia on koottu taulukkoon 8. Puu on myös hieman erilainen materiaali mekaanisesti, eikä sen sisäinen rakenne ole niin tasainen.

Paperia ja puuta on käytetty aikaisemmin paljon eristeenä, mutta muovista valmistetut eristeet kuten polyeteenitereftalaatti (PET), polyeteeni, polypropeeni ja polyesteri ovat korvanneet niitä parempien sähköisten ominaisuuksien takia. Suurilla tasajännitteillä tehokaapeleissa paperi on vielä hyvä valinta eristeeksi. Kulutuselektronikassa, jossa tuotteiden elinikä ei ole paria vuotta pidempi, uusiutuvat materiaalit olisivat halvempi ja ympäristöystävällisempi ratkaisu. Kulutuselektronikassa jännitteet eivät myöskään ole suuret, jolloin eristeiltä ei vaadita parhaita ominaisuuksia.

Joissakin tapauksissa paperista halutaan johtavaa, kuten komponenttien ESD-pakkauksissa. Tämä saadaan aikaan lisäämällä nokea paperin täyteaineeksi tai käsittelemällä paperi johtavalla aineella. Noki on hyvin tarttuva ja läpäisevä aine, joten paperi-

koneen peseminen kestää jopa muutamia viikkoja ennen kuin sillä voidaan tehdä valkoisia papereita. [32.]

5.2 Sovellukset

5.2.1 Komponentit

Uusiutuvat materiaalit voivat toimia eristeenä johtimille, kelojen käämityksille tai kaapeleille. Keloista saadaan myös tehtyä muuntajia.

Kondensaattori

Paperikondensaattorit rakennetaan ohuista metalliliuskoista, jotka on eristetty vahatulla tai öljytyllä paperilla. Kondensaattorin piirrosmerkintä näkyy kuvassa 7, polarisaation suunta voidaan myös merkitä kuvaan (polarinen kondensaattori, kuten ELKO ei kestä väärinpäin kytkettyä jännitettä).



Kuva 7: Kondensaattorin piirrosmerkki.

Kondensaattorin toiminta perustuu yksinkertaisesti kahteen johtavaan levyyn ja niiden väliseen eristeeseen. Levykondensaattorin kapasitanssi voidaan laskea kaavalla

$$C = \varepsilon_r \varepsilon_0 \frac{A}{d}, \quad (23)$$

missä A kondensaattorin levyjen pinta-ala ja d on levyjen välinen etäisyys. Kaavasta nähdään, että mitä suurempi on suhteellinen permittiivisyys, sitä suurempi on kondensaattorin kapasitanssi. Huomioitavaa on myös levyjen välinen etäisyys, se tulisi saada mahdollisimman pieneksi, mutta materiaalin dielektrinen voimakkuus ja materiaallinen mahdollinen paksuus tulee vastaan. Paperilla on vaikea saada tehtyä ohuita kondensaattoreita. Paperin permittiivisyys on lisäksi melko pieni verrattuna keraamisiin kondensaattoreihin joiden suhteellinen permittiivisyys voi olla välillä 25–15000, joten paperisten kondensaattoreiden mahdolliset kapasitanssin arvot ovat välillä nanofaradeista muutama mikrofaraadiin. Paperin permittiivisyys myös vaihtelee lämpötilan mukaan, joten paperikondensaattorin kapasitanssi voi muuttua myös suuresti. Suurista kondensaattoreista on vaikea tehdä pintaliitos-malleja, joten paperista valmistetut kondensaattorit ovat usein läpiladottavia. Kondensaattori voidaan vielä kiertää rullalle, jolloin siitä tulee pienempi. Hyviä puolia ovat, että paperikondensaattorit ovat halpoja, luotettavia ja ne kestävät suuria jännitteitä. [33]

Kela

Kela rakennetaan kiertämällä johdetta lenkeille. Johtavat lenkit pitää eristää toisistaan, muuten lenkit vain oikosulkevat toisensa ja induktanssia ei pääse muodostumaan. Kelan piirrosmerkki näkyy kuvassa 8.

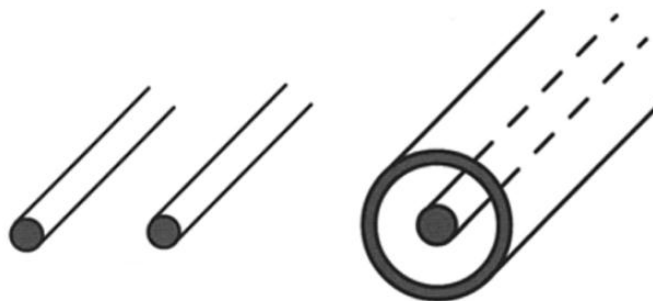


Kuva 8: Kelan piirrosmerkki.

Kelassa lenkkien välille syntyy parasitiittistä kapasitanssia, koska lenkit ovat vierekkäin samalla tavalla kuin kondensaattoreiden levyt. Paperilla on suhteellisen pieni suhteellinen permittiivisyys, joten parasitiittinen kapasitanssi olisi pienempi. Pienissä keloissa paperin paksuus on ongelma, jos jokainen kierros jouduttaisiin eristämään paperiliuskalla. Lakattu tai päällystetty johdin käy pienten kelojen kieputtamiseen paremmin. Keloista voidaan rakentaa isoja suurjännitemuuntajia, jolloin öljytty paperi toimii hyvin eristeenä.

Kaapeli

Kaapelien avulla siirretään tietoa tai tehoa piiristä toiseen. Elektroniikassa voidaan käyttää tiedon tai pienen jännitteen siirtämiseen esimerkiksi parijohtoa tai koaksiaalikaapelia. Parijohdon ja koaksiaalikaapelin on esitetty kuvassa 9. Parijohto on usein päällystetty siten, että molemmat johtimet menevät vierekkäin tai kierrettyinä samassa rakenteessa. Koaksiaalikaapelin sisäjohtin on eristetty ulommasta maajohtimesta.



Kuva 9: Parijohdon ja koaksiaalikaapelin rakenne [34].

Kaapelien kestävyys on oltava hyvä, että niitä voitaisiin käyttää esimerkiksi antennitorneissa, jolloin kaapelin on kestävä monien kymmenien metrien kaapelin paino ja rasitus. Paperi ei sovi pelkästään johtimien kuoreksi, koska se ei kestä yksin ympäristön rasituksia. Eristeen sisimmissä kerroksissa voidaan käyttää paperia, koska silloin siihen kohdistuvat rasitukset eivät ole niin suuret. Paljon liikuteltaviin ja vapaasti koskettaviin kaapeleihin kuitenkin voi tulla niin paljon ulkoisia rasituksia, että paperi ei kestä niitä. Tällöin on muovi sen kestävyysominaisuuksien takia parempi vaihtoehto.

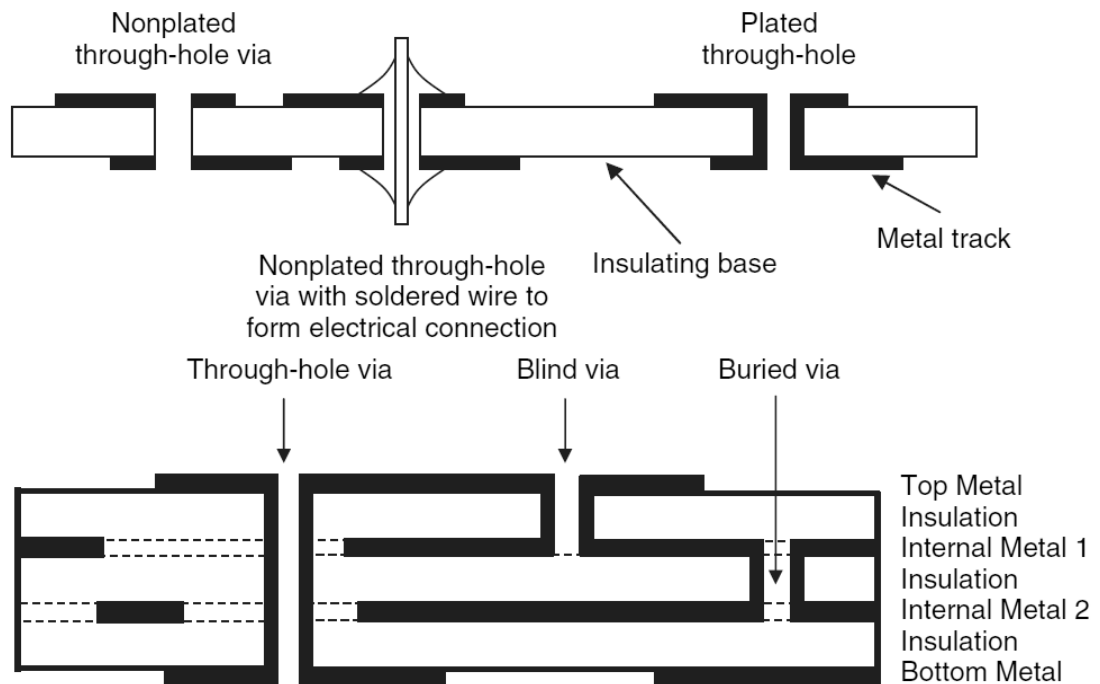
Suurilla taajuuksilla kaapelin parasitiittiset ominaisuudet pitää ottaa huomioon, koska parasitiittinen induktanssi ja kapasitanssi vaikuttavat kaapelin impedanssiin. Esimerkiksi koaksiaalikaapelin ominaisimpedanssille saadaan kaava

$$Z_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0 \epsilon_r}} \ln(D/d), \quad (24)$$

missä D on ulkojohtimen halkaisija (sisäpinnasta), d on sisäjohtimen halkaisija ja ϵ_r on eristemateriaalin suhteellinen permittiivisyys. Kaapelia valmistaessa voidaan impedanssi säätää halutuksi eristemateriaalin ja johtimien halkaisijoiden avulla.

5.2.2 Substraatti

Substraatti tarkoittaa elektroniikassa ohutta alustaa jonka päälle voidaan rakentaa puoli-johdekomponentit tai piirilevyn (PCB, Printed Circuit Board) sähköeristekerros. Piirilevyn substraatti on tärkeä osa elektroniikkatuotteen pakkausta. IC-piirien valmistus- ja kokoamisteknologiat vaativat kokoajan substraatilta entistä enemmän. Piirilevyn tarkoitus on tukea komponentteja ja kiinnitysvälineitä kuten ruuveja, joilla piirilevy kiinnitetään koteloon. Tärkeä tehtävä on myös yhdistää piirit toisiinsa piirilevylle kuvioituilla metallipoluilla ja antaa kiinnityskohdat, eli padit, komponenttien jaloille. Mikroelektronikan kehitys johtaa entistä suurempiin piireihin pienemmässä pinta-alassa ja entistä pienempiin pakkauksiin. Pintaliitoskomponentit korvaavat suuret läpiladottavat komponentit, kun komponenttien koko on tärkeintä. Komponentteja pyritään valmistamaan valmiiksi substraatin pinnalle ja lopulta myös substraatin sisään. Monimutkaistuvat piirit vaativat enemmän johtimia, joten tarvitaan monikerrospiirilevyjä ja substraatin pitää kestää suurta johdintiheyttä. Kerrosten välille tarvitaan siten myös liitoksia ja suunnittelusta tulee kolmiulotteista. Kuvassa 10 näkyy kaksipuolisen- ja nelikerrospiirilevyn poikkileikkaus. [35; 36.]



Kuva 10: Kaksipuolinen piirilevy ja nelikerrospiirilevy[36].

Piirilevysubstraatin valintaan vaikuttavat materiaalin ominaisuudet. Substraatilta vaaditaan seuraavia asioita [35]:

1. Pientääkseen signaalin etenemisviivettä tarvitaan pienempi permittiivisyys.
2. Pientääkseen parasiittisiä ominaisuuksia (L, C, R) täytyy johtimien olla mahdollisimman lyhyitä, materiaalin magneettinen johtavuus mahdollisimman pieni ja permittiivisyyden mahdollisimman pieni.
3. Pientääkseen ylikuulumista, johtimet eivät saa kulkea vierekkäin ja materiaalin permittiivisyyden pitää olla pieni.
4. Signaalin heijastuminen pitää estää sovittamalla impedanssit.

Sähköisten ominaisuuksien lisäksi materiaalia pitää pystyä muokkaamaan. Termiset ominaisuudet pitää myös ottaa huomioon, esimerkiksi lämmönjohtavuus ja lämpölaajeneminen. Lämpölaajeneminen pitää sovittaa myös muiden materiaalien laajenemisen mukaan.

Piirilevy voidaan valmistaa poistavalla tai lisäävällä menetelmällä. Poistavalla menetelmällä piirilevy valmistetaan ensin luomalla metallikerrokset (yleensä kuparista) eristekerroksen päälle. Johdotuskuviot valmistetaan poistamalla ylimääräinen johde kemiallisesti etsaamalla, mekaanisesti kaivertamalla tai laserilla. Lisäävät menetelmät ovat jäykälle piirilevylle yleensä galvanointia tai suorametallointia. Painettavassa elektroniikassa voidaan käyttää myös mekaanisia painoja tai mustesuihkuja. Läpiviennit porataan substraattikerroksen läpi, jonka jälkeen ne voidaan vielä metalloida. Etsausprosessin takia piirilevymateriaalin pitää kestää nesteitä perinteisessä piirilevyvalmistuksessa.

Perinteisesti piirilevy koostuu hartsista, vahvikkeesta ja johdinmateriaalista. Taulukossa 9 on esitelty käytettyjä piirilevy materiaaleja ANSI:n (American National Standards Institute) ja NEMA:n (National Electrical Manufacturers Association) luokitusten mukaan. Eniten käytetyt luokat ovat CEM-1 (Composite Epoxy Material), CEM-3, FR-2 ja FR-4 (Flame Retardant). FR-2 koostuu useasta kerroksesta paperia, jotka on kyllästetty tulta kestäväällä fenoli-hartsilla. Siihen tehtävät reiät saadaan tehtyä lävistämällä se neulalla ja se on suhteellisen halpa. Sitä käytetään tyypillisesti halvimmissa kulutus-elektroniikan tuotteissa kuten radioissa, laskimissa tai leluissa, missä pituuksien stabiilius tai sähköinen suorituskyky ei ole tärkeää. CEM-1:ssä käytetään paperi substraattia, jonka päällä on kudottua lasikuitua, ja ne on kyllästetty epoksi-hartsilla. Tällöin piirilevy voidaan vielä lävistää helposti, mutta sen fyysiset ja sähköiset ominaisuudet ovat parempia. CEM-3 erona CEM-1 on, että paperin tilalla käytetään kutomatonta lasikuitua. CEM-3 on hieman CEM-1 kalliimpi, mutta sille voidaan tehdä paremmin pinnoitettuja läpivientejä.

Taulukko 9: ANSI:n ja NEMA:n piirilevyluokituksia [37].

Luokka	Harts	Vahvike	Palamisen suoja
XXXPC	Fenoli	Paperi	Ei
FR-1	Fenoli	Paperi	Kyllä
FR-2	Fenoli	Paperi	Kyllä
FR-3	Epoksi	Paperi	Kyllä
FR-4	Epoksi	Lasikuitu	Kyllä
FR-5	Epoksi	Lasikuitu	Kyllä
FR-6	Polyesteri	Lasikuitu	Kyllä
G-10	Epoksi	Lasikuitu	Ei
CEM-1	Epoksi	Puuvilla paperi / Lasikuitu	Kyllä
CEM-2	Epoksi	Puuvilla paperi / Lasikuitu	Ei
CEM-3	Epoksi	Lasikuitu	Kyllä
CEM-4	Epoksi	Lasikuitu	Ei
CRM-5	Polyesteri	Lasikuitu	Kyllä
CRM-6	Polyesteri	Lasikuitu	Ei
CRM-7	Polyesteri	Lasikuitu	Kyllä
CRM-8	Polyesteri	Lasikuitu	Ei

Yleisin käytetty piirilevy materiaali on FR-4, joka on valmistettu lasikuidusta ja epokista. Sillä on hyvät sähköiset, mekaaniset ja termiset ominaisuudet, joten sitä voidaan käyttää tietokoneissa, telekommunikaatiossa, lentokoneissa, teollisuudessa ja autoissa. Materiaaleihin voidaan myös lisätä epäorgaanisia aineita muokkaamaan piirilevyn ominaisuuksia kuten lämpölaajenemista ja palamisen estoa. [37.]

Vuonna 2003 Euroopan Unioni antoi direktiivin 2002-95-EY eli RoHS 1 - direktiivin, joka rajoittaa vaarallisten aineiden käyttöä elektroniikkateollisuudessa. Direktiivin mukaan sähkö- ja elektroniikkalaitteet eivät saa sisältää missään homogeenisessa aineessa enempää kuin 0,1 painoprosenttia lyijyä, elohopeaa, kuuden arvoista kromia, polybromibifenyylä, polybromidifenyylieetteriä eikä enempää kuin 0,01 painoprosenttia kadmiumia. Muutamia poikkeuksia on kuitenkin olemassa [38]. RoHS 2 direktiivi 2011-65-EU tulee voimaan 2.1.2013, ja se tarkoittaa määritelmiä ja annettuja menettelyitä, joilla osoitetaan sähkö- ja elektroniikkalaitteiden vaatimustenmukaisuus. Myös valmistajan, valmistajan valtuutetun edustajan, maahantuojan ja jakelijoiden velvollisuudet on tuotu direktiiviin. [39.]

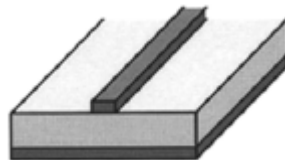
Yleisin materiaali on FR-4, joten taulukossa 10 on koottu FR-4 ja sen osa materiaalien tärkeimpiä sähköisiä ominaisuuksia.

Taulukko 10: Perinteisten piirilevymateriaalien sähköisiä ominaisuuksia [37].

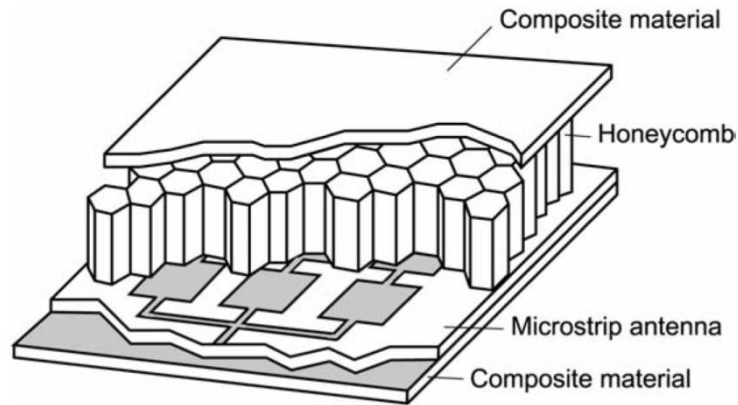
Materiaali	Resistiivisyys (Ωm)	Suhteellinen permittiivisyys	Häviökerroin	Dielektrinen voimakkuus (MV / m)
FR-4 Epoksi	10^8	4,7 @ 1MHz 4,3 @ 1GHz	0,025 @ 1MHz 0,016 @ 1GHz	49
E-lasikuitu		6,6 @ 1MHz 6,1 @ 1GHz	0,002 @ 1MHz 0,0035 @ 1GHz	
Epoksi ja E-lasikuitu		4,4 @ 1MHz 3,9 @ 1GHz	0,02 @ 1MHz 0,018 @ 1GHz	

Piirilevyltä vaaditaan pieni häviötangenti ja dielektrisen vakion yhtenäisyys koko piirilevyn alueella. Substraateista pitää pystyä valmistamaan myös ohuita, eivätkä ne saa muuttaa muotoaan valmistusprosesseissa tai niiden jälkeen. Kuoriutumisoimakkuus pitää myös olla vahva, etteivät ohuet johtimet irtoa piirilevystä. Piirilevyn pitää olla tarpeeksi vahva, jotta se kestää rasituksia. Piirilevyä pitää pystyä myös leikkaamaan ja poraamaan reikiä.

Piirilevyn sähköiset ominaisuudet ovat tärkeitä suurtaajuustekniikassa. Piirilevyllä signaaleita kuljetetaan johdinvedoissa, mutta suurilla taajuuksilla johdinvetojen muoto ja rakenne ovat hyvin ratkaisevia signaalin kulkeutumisen kannalta. Mikroliuska on käytetyin tasomaisista siirtojohdoista, koska se voidaan helposti rakentaa suoraan piirilevyn päälle ja siihen on helppo liittää komponentteja. Mikroliuska siirtojohdon rakenne näkyy kuvassa 11. Mikroliuska koostuu johtavasta liuskasta ja maakerroksesta joiden välissä on substraattikerros.

**Kuva 11:** Mikroliuska [34].

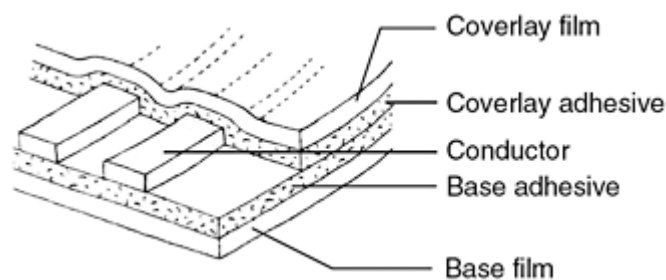
Mikroliuskan impedanssiin voidaan vaikuttaa liuskan pituudella, liuskan paksuudella, substraatin paksuudella ja substraatin dielektrisyysvakiolla. Sähkökenttä ei kulje pelkästään substraatissa, joten efektiivinen permittiivisyys on substraatin ja ympäröivän aineen (yleensä ilman) väliltä. Orgaaniset puu ja paperi eivät ole optimaalisia materiaaleja sähköisiltä ominaisuuksiltaan suurta tarkkuutta ja suorituskykyä vaativiin tuotteisiin. Paperilla saadaan kuitenkin permittiivisyys lähelle ilman permittiivisyyttä kuvan 11 mukaisella hunajakennorakenteella. Suurtaajuustekniikassa on hankala valmistaa suuren tai pienen permittiivisyyden substraatteja halvalla tai tekemättä kompromisseja muiden ominaisuuksien suhteen.



Kuva 12: Mikroliuska-antenni hunajakkenno substraattilla [39].

Mikroliuskasta voidaan tehdä myös halpoja antennoja, jolloin piirilevyn ominaisuudet vaikuttavat myös antennien ominaisuuksiin. Kuvan 12 rakennetta voidaan käyttää rakentamaan laajakaistaisia antennoja. Antennin pituus tosin kasvaa kun vaihdetaan pienempään dielektrisyys vakion omaavaan materiaaliin. Rakenteen ansiosta sähkömagneettinen aalto ei juuri vaikuta piirilevyn substraattiin, jolloin häviöt ovat pienet ja antennin painoa saadaan pienennettyä. [38.]

Piirilevyistä voidaan tehdä myös joustavia, jolloin niitä voidaan paremmin muovata haluttuun asentoon, käyttää liikkuvissa osissa tai käyttää mahdollisimman ohuina piirilevyinä. Nämä asiat ovat hyvin tärkeitä sulautetuissa järjestelmissä, jossa järjestelmä on pyritty piilottamaan käyttäjältä. Joustavat piirilevyt voivat koostua esimerkiksi ohuesta joustavasta substraattista, joka on päällystetty sideaineella. Sideaineeseen saadaan kiinnitettyä johtava metallikerros. Joustava piirilevy voidaan vielä päällystää sideaineella ja substraattilla suojaamaan komponentteja ja johtimia. Esimerkki joustavan yksikerrospiirilevyn rakenteesta näkyy kuvassa 13. Substraattina käytetään usein PET-kalvoa, jolla on hyvä kestävyys ja sähköiset ominaisuudet.

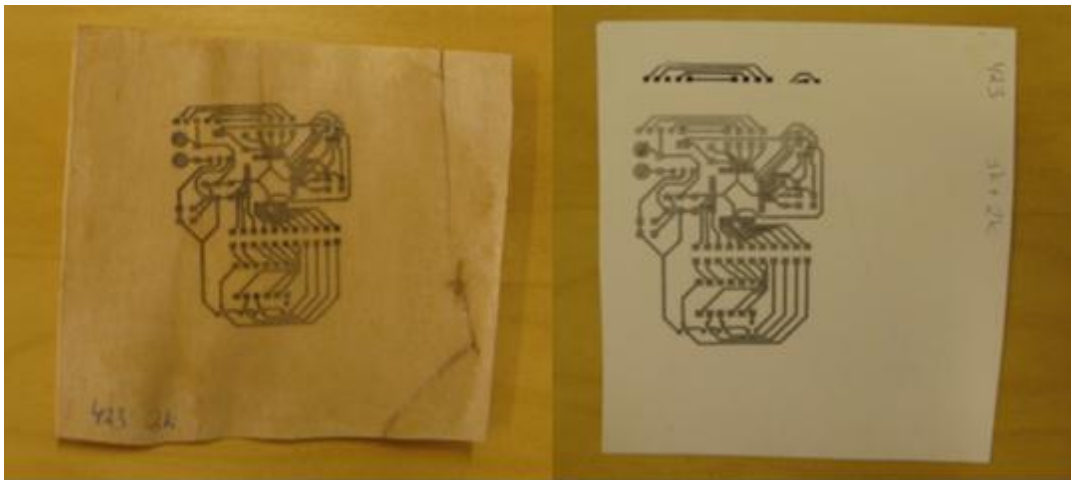


Kuva 13: Joustavan piirilevyn rakenne [37].

Joustavan piirilevyn johdinkuviot voidaan lisätä esimerkiksi tyhjiökasvatuksella, galvanisella pinnoituksella, höyrypinnoituksella, sputteroimalla, etsaamalla tai painamalla. Etsausta ja painamista pidetään kuitenkin parhaiten soveltuvana johtimien lisäämiseen niiden nopeuden ja kapasiteetin takia. Johtimien lisäksi passiivikomponentteja, sensoreita ja RF-piirejä voidaan painaa suoraan piirilevylle. Painotekniikoita ovat silkkipaino (screen printing), syväpainatus (gravure printing), pad printing, fleksopaino (flexography), offset-litografia (offset lithography) ja inkjet-tulostus. Painotekniikat

ovat materiaaleja lisääviä, yksinkertaisia ja nopeita prosesseja. Ne kuluttavat vähemmän materiaaleja kuin materiaaleja poistavat menetelmät, kuten etsaus, joten ne ovat ympäristöystävällisempiä. Painamisen jälkeen muste pitää kuivata eli sintrata. Kuivaaminen voidaan tehdä esimerkiksi ilman ja lämmön avulla uunissa. Sintraamisessa liuottimet haihtuvat, jolloin johtavat hiukkaset tulevat lähemmäksi toisiaan ja muodostavat johtavia teitä varauksenkuljettajille. [28,37]

Paperille ja puulle voidaan myös painaa johdinkuviot kuten kuvassa 14. Kuvat on printattu inkjet-tulostuksella Tampereen teknillisen yliopiston elektroniikan laitoksella Dimatix DMP-2800 Inkjet materiaalitulostimella [41]. Musteena käytettiin Hariman hopeamustetta [42]. Mustekerroksen lisäämisen jälkeen muste sintrattiin uunissa 120 °C:ssa yhden tunnin ajan. Haasteena oli musteen imeytyminen huokosiin materiaaleihin, joten mustekerroksia jouduttiin lisäämään useampia. Kohdistaminen ja musteen leviäminen muodostuu sitten haasteeksi. Paperille ja puulle suoraan printtaaminen olisi ympäristöystävällisempää ja halvempaa kuin PET alustalle tulostaminen. PET-materiaali on suhteellisen kallista ja lisäksi PET kalvo usein puhdistetaan myrkyllisillä aineilla, jotta materiaalin pinta saataisiin mahdollisimman tasaiseksi. Komponenttien kiinnittämiseen ei yleensä käy perinteinen tinalla kolvaaminen vaan komponentit kiinnitetään johtavalla liimalla.



Kuva 14: Piirikaavio printattuna inkjet-menetelmällä puulle ja pahville.

Puulle ja paperille suoraan inkjet-tulostamisessa on kuitenkin ongelmana materiaalien huokoisuus. Johtavat hiukkaset eivät olleet tarpeeksi tiheässä muodostaakseen johtavia reittejä. Johtavuutta saataisiin parannettua pinnoittamalla puu ja paperi. Menetelmä olisi hyvä sen hinnan ja ympäristöystävällisyyden takia. Se voisi sopia antureiden, RFID-tagien ja pienten piirien lisäämiseen tuotteisiin. Suoraan puulle on saatu tulostettua antennoja inkjet-menetelmällä, joten sama voisi toimia myös paperille. Samalla tavalla saataisiin valmistettua myös joustavia rakenteita. Musteenlevitysprosessi pitää tarkasti säätää, jotta löydetään juuri sopivat parametrit kuten pisarakoko, jotta tulostus onnistuisi parhaiten. Liian isolla pisarakoolla ja liialla musteella muste leviää helposti ja liian pienellä määrällä mustetta ei ole tarpeeksi tekemään johtavia pintoja. Sintrausaika ja -lämpötila ovat myös tärkeitä parametreja, ja niitä muuttamalla voisi saada musteen joh-

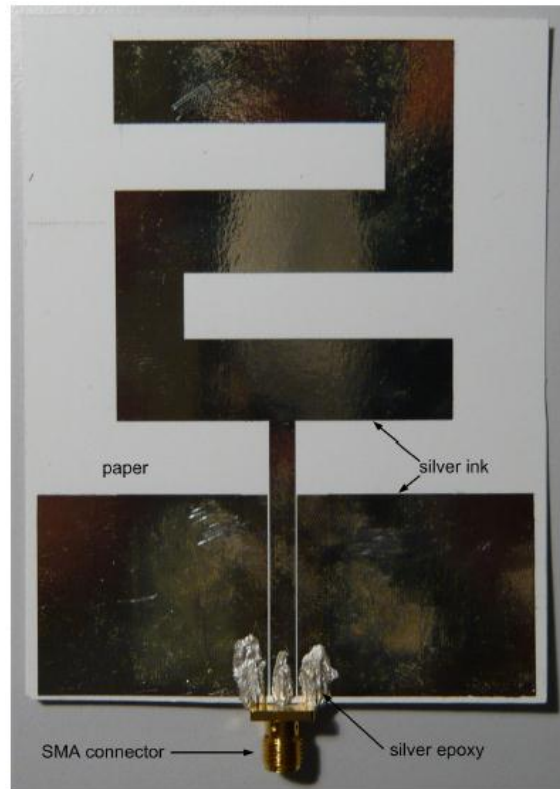
tamaan paremmin. Paperille johtavien vetojen printtaus voi tarvita kuitenkin pinnoituksen, koska paperin imee mustetta sisäänsä. Tämä ei kumminkaan haittaisi jos muste johtaisi paperin sisällä. Johtavat partikkelit ovat tällöin luultavasti niin kaukana toisistaan, että tarpeeksi johtavia rakenteita ei pääse muodostumaan. Lisäksi vierekkäiset johtimet saattaisivat yhdistyä toisiinsa musteen levitessä paperin sisällä.

RFID-tagien ja RF-rakenteiden painamista puu ja paperi substraateille on tutkittu nopeaan ja hyvin halpaan massatuotantoon [43; 44, 45]. Artikkelissa [43] käsitellään 0,4 mm paksuisen koivuvaneri substraatin vaikutusta RFID-tagin toimintaan eri kosteussuhteissa ja taivutuskokeissa. Kuvassa 15 näkyy koivuvanerille silkkipainolla painettu RFID-tag. Tuloksina saatiin, että vaneri soveltuu RFID-tunnisteiden substraattimateriaaliksi. Testien perusteella voidaan sanoa, että tagien pitäisi toimia myös käytännön sovelluksissa.



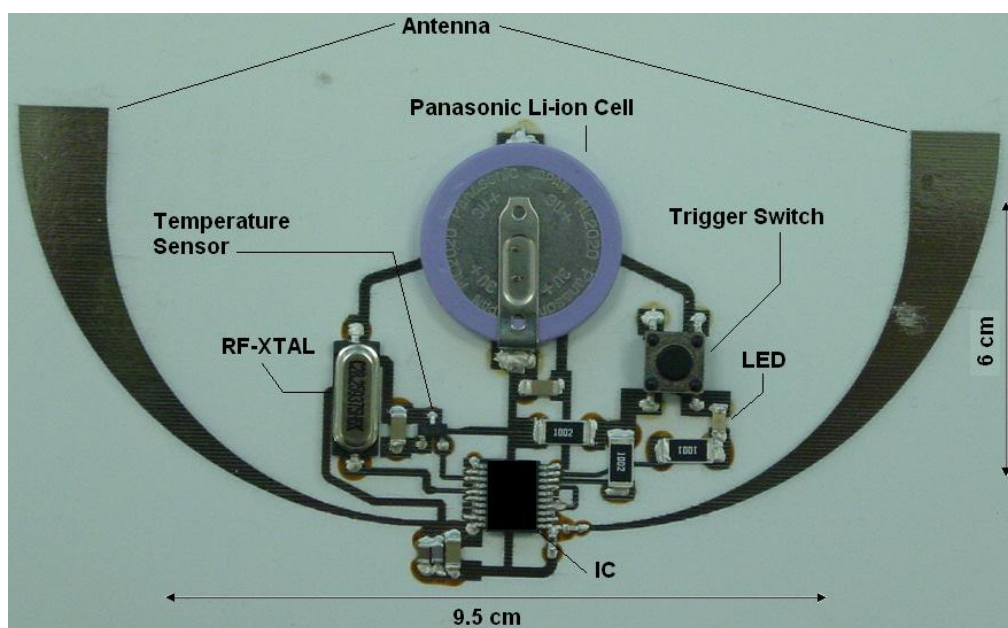
Kuva 15: RFID-tag painettuna [42].

Artikkelissa [44] käsitellään inkjet-tulostimella valmistettujen antennien ja sovituspiiri-
en toimintaa paperisubstraatilla UHF (Ultra High Frequency) -taajuudella. Paperin permittiivisyyttä ja häviökerrointa mitattiin mikrolisuuska rengasresonaattorilla. Käytetty paperi oli kaupallista nesteen kestävä paperia, jonka paksuus oli $260 \pm 3 \mu\text{m}$, ja se päällystettiin $18 \mu\text{m}$ kuparifoliolla lämpökiinnittämällä. Kuviot muodostettiin fotolitografialla. Tulokseksi saatiin suhteelliselle permittiivisyydelle 3,28 ja häviökertoimelle 0,061 taajuudella 0,71 GHz, ja vastaavasti 1,44 GHz taajuudelle saatiin 3,20 ja 0,053. Artikkelissa valmistettiin myös Z-muotoinen monopoliantenni inkjet-menetelmällä ja kupariteipillä päällystettynä, inkjet:illä valmistettu antenni näkyy kuvassa 16.



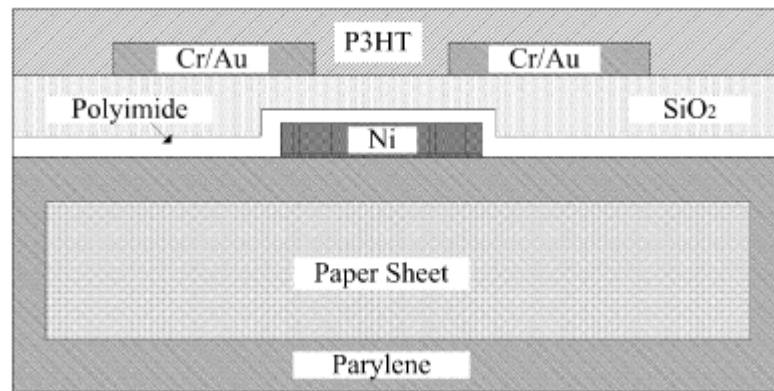
Kuva 16: Monopoliantenni painettu inkjet-tulostimella [44].

Tuloksena saatiin, että antennit toimivat ainakin USA:n 902–928 MHz UHF RFID alueella ja inkjet-tulostimella painettu antenni toimii myös Euroopan 866–868 MHz UHF RFID taajuudella. Artikkelissa tehtiin lisäksi langattomia sensoreita integroituna RDIF-tageihin. Mikrokontrollerilla luettiin analogista lämpöanturia ja lähetettiin tieto lämpötilasta antennin avulla 900 MHz taajuudella. Kuva painetusta piirilevystä paperilla näkyy kuvassa 17



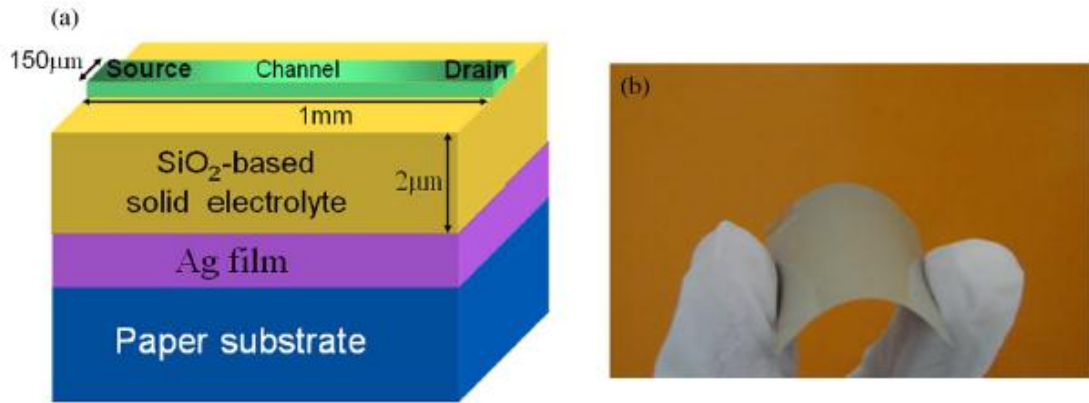
Kuva 17: Langaton sensori paperisubstraatilla inkjet-tulostimella painettuna [44].

Paperia voidaan käyttää myös puolijohteiden alustana. Paperille on rakennettu ohutkalvotransistoreita (TFT, Thin-film Transistor) [46]. Tyhjiökasvatuksella paperi on päällystetty paryleenillä, joka suojaa paperia kosteudelta kosteissa kemiallisissa prosesseissa. Orgaaniset transistorit (OTFT, Organic TFT) ovat hyvin halpoja paperi substraattilla, joita voidaan käyttää joustavissa, halvoissa ja kertakäyttöisissä elektroniikkalaitteissa. Artikkelissa [46] valmistetun transistorin rakenne näkyy kuvassa 18. Transistorin kanta (gate) on rakennettu nikkelistä sputteroimalla. Polymidi toimi kannan eristeenä. Lähde (source) ja nielu (drain) rakennettiin kromista ja kullasta. Tämän jälkeen rakennettiin aktiiviseksi kerrokseksi 3-heksyyli tiofeeni (P3HT). Artikkelin kaikki kuvioinnit tehtiin fotolitografialla ja märkäetsauksella. Paperin pinnan tasaisuus on liian pieni suoraan käytettäväksi, epätasaisuuden tehollisarvo (RMS) oli enemmän kuin 31 nm. Pinnan epätasaisuus johtaa huonoihin dielektrisiin ominaisuuksiin ja transistorin huonompaan suorituskykyyn.



Kuva 18: Orgaaninen ohutkalvotransistori paperisubstraattilla [46].

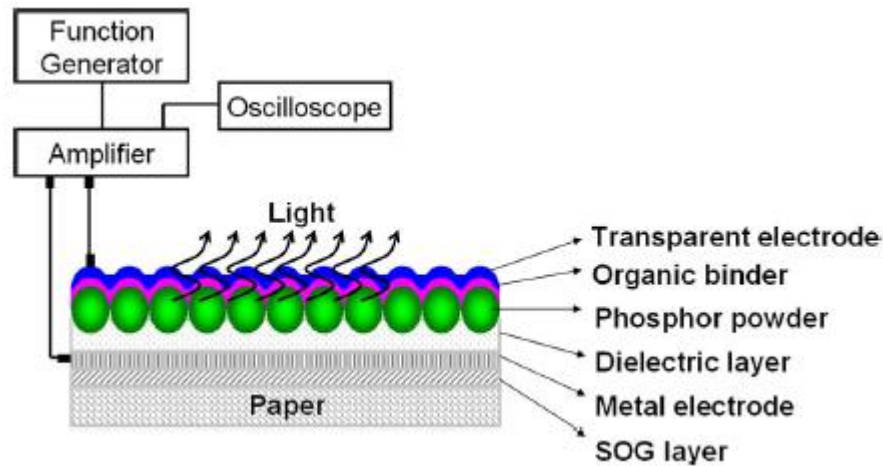
Transistorin varausten liikkuvuus (Field Effect Mobility) oli $0,086 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$ ja päälle/pois -suhde oli 10^4 . Toisessa artikkelissa [47] lähde ja nielu tehtiin indium-tinaoksidiksi (ITO) kalvolle ilman liitoskohtaa. Kanta on tehty hopeasta ja aktiivinen kerros on tehty piioksidiksi (SiO_2) perustuvasta elektrolyytistä. Transistorin rakenne näkyy kuvassa 19. Transistori on rakennettu ensin liittämällä hopeakalvo sputteroimalla, jonka jälkeen piioksidikerros muodostettiin tyhjiökasvattamalla. ITO-kerros muodostettiin sputteroimalla ja nikkelimaskilla.



Kuva 19: a) Liittymätön ohutkalvotransistori paperisubstraatilla b) Joustava paperi TFT riveillä [47].

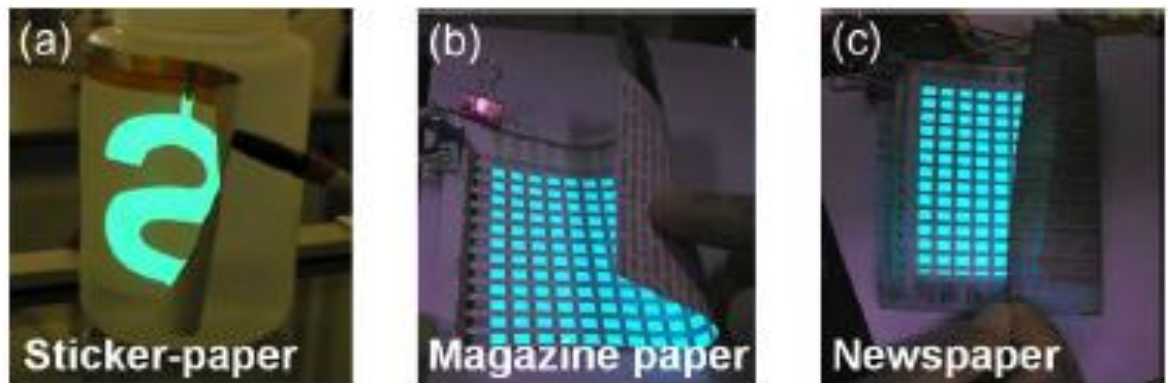
Kuvan 19 transistorin päälle/pois suhde on $2 \cdot 10^6$ ja varausten liikkuvuus $22,7 \text{ cm}^2 / \text{V} \cdot \text{s}$. Huomioitavaa artikkelissa on, että paperia ei tarvinnut päällystää millään, koska paperi substraatti ei joutunut kosteisiin olosuhteisiin.

Transistorien lisäksi paperisubstraattia on käytetty elektroluminanssiin perustuvissa valonlähteissä. Artikkelissa [48] valmistettiin elektroluminenssi laitteita. Niitä voitaisiin käyttää ohuina näyttöinä (flat-panel display). Tyhjiökasvatukseen perustuvien menetelmien sijaan käytettiin ”paksu-kalvo”-prosessia, kuten silkkipaino tai spin-counting-tekniikoita muodostamaan paperin päällä oleva eriste, dielektrinen kerros, fluoroisoiva jauhe ja orgaaninen sideaine. Elektrodit valmistettiin sputteroimalla. Jauhe EL-laitteita (PEL) käytetään nestekidenäyttöjen tai kosketusnäyttöjen taustavalona. Yleensä EL-laitteet rakennetaan muoveille, mutta paperin joustavuus ja halpa hinta houkuttelee rakentamaan laitteet paperille. Paperilaatuina artikkelissa käytettiin kiiltopaperia, tarrapaperia, lehtipaperia ja sanomalehtipaperia. Paperin hauraudesta huolimatta saatiin hyviä tuloksia: EL-laitteet toimivat melkein yhtä hyvin paperilla kuin muoveilla. Näyttöjen substraattit vaativat hyvää termistä tasapainoa, pientä veden imeytymistä, pientä kemiallista koskemattomuutta ja pinnan tasaisuutta. Paperi ei pysty täyttämään kaikkia näitä vaatimuksia, kuten märkiä kemiallisia ja kuumennus prosesseja valmistuksessa. Paperin pinta on myös liian karhea tässä kokoluokassa. Näiden syiden takia paperi substraatti olisi hyvä päällystää. Artikkelissa valittiin Spin-on-glass (SOG) -tekniikka. SOG kerros parantaa termisiä ominaisuuksia ja estää kemikaalien aiheuttaman vahingon paperille. SOG-kerros toimii myös hyvänä adheesiokerroksena paperisubstraatin ja elektrodikerrosten välillä. EL-laitteen rakenne näkyy kuvassa 120.



Kuva 20: Elektroluminenssin perustuva valonlähde paperi substraattilla [48].

Rakenteella saatiin aikaan 120 cd/m^2 kirkkaus kun PET-kalvolle on saatu 210 cd/m^2 . Laitteen toiminta näkyy kuvassa 21.



Kuva 21: Elektroluminenssiin perustuvia näyttöjä paperi substraattilla [48].

5.2.3 Kotelointi ja käyttöliittymä

Kotelon tehtävä on suojata ja toimia kiinnitysalustana sen sisällä oleville osille. Kotelo suojaa mekaanisilta, kemiallisilta ja sähköisiltä häiriöiltä. Kotelon on oltava käytännöllinen, jotta se olisi helppo avata ja sisäisiin osiin olisi helppo päästä käsiksi. Koteloon on tultava sisälle myös liitännät muihin laitteisiin ja käyttöliittymälle. Puulla voitaisiin korvata joitakin muovi- ja metallikoteloita, jolloin tuotteet olisivat ympäristöystävällisempiä. Puu saattaa kuitenkin tuottaa lämpöongelmia, koska puu on hyvä lämpöeriste. Puu pitäisi myös käsitellä, jotta se ei reagoisi ilmankosteuteen. Kuvassa 22 on esitelty muutamia esimerkkejä mahdollisista elektroniikkalaitteiden koteloista. Elektroniikkatuote on hyvä koteloida, ettei ihminen tai mikään muukaan pääse aiheuttamaan piirilevylle oikosulkuja tai ESD-purkauksia. Kotelo on myös hyvin tärkeää tuotteen muotoilussa, koska se tuo parhaassa tapauksessa lisäarvoa tuotteelle ja lisää sen haluttavuutta. Puu tai paperi kotelo on haastava rakentaa elektroniikkatuotteelle, koska usein tuotteista halutaan mahdollisimman pieniä. Puu saattaa helposti haljeta, jos siitä tehdään liian ohut. Esimerkiksi kännyköiden kuorissa muoveilla ja metalleilla päästään paljon ohuempiin rakenteisiin niiden mekaanisten ominaisuuksien ansiosta.



Kuva 22: Elektroniikkalaitteille puusta valmistettuja koteloita [49; 50; 51; 52].

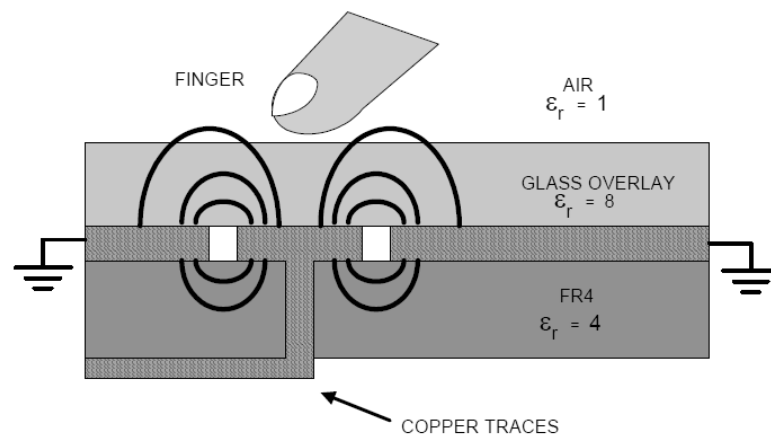
Paperi ja pahvi ovat hauraita materiaaleja käsittelyssä, joten puu sopii paremmin elektroniikkalaitteen koteloksi. Puulla ei kuitenkaan voida korvata metallikoteloiden EMC-suojia. Metallikuori voidaan kuitenkin päällystää haluttaessa puulla. Tämä kyllä taas vaikuttaa kotelon lämmönsiirtoon, jolloin koteloon voidaan joutua tekemään tuuletusaukkoja, jotka vaikuttavat heikentävästi tuotteen EMC-suojaukseen. Sähkömagneettiselta aalloilta suojautuminen tarvitsee yhtenäisen metallikerroksen, joten esimerkiksi vanerikerroksen väliin voitaisiin tehdä ohut metallikerros. EMC-ongelmat esiintyvät kuitenkin yleensä sähkömoottoreissa, tietokoneissa ja muissa paljon tehoa vievissä laitteissa. Huonolla suunnittelulla voidaan tosin saada pieniinkin laitteisiin EMC-ongelmia.

Tavallisiin pakkauksiin voidaan lisätä myös älyä laittamalla niihin elektronisia laitteita. Painettavalla elektroniikalla johtimet voidaan painaa suoraan pakkausmateriaaliin. Pakkausmateriaaleihin saadaan lisättyä erilaisia antureita, joilla voidaan tarkkailla tuotteen ominaisuuksia ja esittää tietoa esimerkiksi ledeillä tai äänimerkeillä. Elektroniikka tarvitsee tehonlähteen, jotta sulautetut järjestelmät toimisivat. Tehonlähteenä voitaisiin käyttää ohuita tai jopa suoraan pakkausmateriaalille painettuja pattereita [53]. Kannettavassa elektroniikassa olisi käyttöä ohuille, kevyille ja joustaville pattereille.

Käyttöliittymä on tärkeä osa elektroniikkalaitetta. Käyttöliittymä koostuu sisäänmenoista kuten näppäimistä ja ulostuloista kuten näytöstä. Näppäimet ja näytöt voidaan upottaa puuhun tai käyttöliittymä voidaan tehdä puun läpi valaisemalla tarvittava tieto puun läpi tai käyttämällä esimerkiksi kapasitiivisia sensoreita puun alla. Esineistä saa-

daan älykkäitä lisäämällä niihin sensoreita ja elektroniikkaa. Sensoreilla voidaan mitata ympäristöä ja syöttää elektroniikan avulla lisätietoa käyttäjälle.

Kapasitiiviset sensorit perustuvat ihmisen sormen ja metallitason väliin muodostuvaan kapasitanssiin. Kun ihmisen sormi on lähellä kapasitiivistä kosketusnäppäintä, kapasitanssiin varastoituu enemmän energiaa kuin ilman, että sormi olisi näppäimen lähellä. Kun kapasitanssiin varastoitunut energia puretaan vastuksen kautta maahan, sormella painettua napin purkamisessa kestää enemmän aikaa, jolloin esimerkiksi mikro-ohjaimella AD-muunnoksesta (Analog to Digital) saatujen signaalitasojen avulla voidaan huomata ero napin purkautumisajassa ja tällöin tiedetään, että nappia on painettu. Syntyvä kapasitanssi on riippuvainen kaavan 23 mukaan väliaineen dielektrisydestä ja paksuudesta sekä ”levyjen” pinta-alasta. Kosketusnäppäimen rakenne näkyy kuvassa 23.



Kuva 23: Kapasitiivisen näppäimen rakenne lasi päällysteellä [55].

Kapasitiivinen sensori toimii ilman suoraa kosketusta ja se toimii myös materiaalin läpi, jolloin niiden ei tarvitse olla suorassa kosketuksessa mitattavan kappaleen kanssa. Kapasitiivisiä sensoreita voidaan käyttää esimerkiksi nestetason tarkkailuun, näppäimenä, läheisyyden mittaamiseen, liikkeen tai kulman tarkkailussa, tasapainon tarkkailussa ja mittaamaan materiaalien ominaisuuksia. Materiaalien dielektrinen vakio ja häviötangentti muuttuvat lämpötilan ja taajuuden funktiona, joten tietty materiaali saadaan tunnistettua koskematta siihen. Kosketussensoreiden rakentaminen paperille esimerkiksi painamalla olisi nopeaa ja halpaa. Paperi on myös tähän tarkoitukseen suhteellisen ohutta, jolloin sensoreista saadaan pieniä. Sensoreita voitaisiin lisätä esimerkiksi tarroihin, jolla voitaisiin mitata ympäristön kosteutta. Sensorit tarvitsevat elektroniikan, joka mitaa sensoriin muodostuvan kapasitanssin. [54; 55.]

Näyttöillä saadaan annettua käyttäjälle graafista tietoa esimerkiksi kuvina tai tekstinä. Paperille voidaan rakentaa valaisevia ominaisuuksia kuten kuvassa 21. Valo myös läpäisee ohuita ja huokoisia paperilaatuja tai jopa puuta, jolloin LED:eillä voitaisiin valaista tekstiä materiaalien läpi. Tällä tavalla saataisiin lisättyä tuotteisiin älykkyyttä, jolloin se voisi tarjota lisäinformaatiota tuotteesta käyttäjälle. Läpivalaisulla ei ole järkevää rakentaa suuria näyttöjä, koska osa LED:ien valosta ei läpäise materiaalia, jolloin kirkkaat LED:it tarvitsisivat suunnattoman paljon tehoa. Esimerkiksi mikro-ohjain voi

kuluttaa virtaa yhden milliampeerin kun taas tavallinen LED voi kuluttaa esimerkiksi 20 milliampeeria.

Puulla on hyvät akustiset ominaisuudet, joten siitä saadaan hyvä kotelointi kaiuttimille. Materiaali värähtelee ääniaaltojen tahdissa ja äänilähteen sammuttamisen jälkeen materiaali luovuttaa värähtelyenergiaansa äänenä ja sisäisenä lämpenemisenä. Puu kuitenkin luovuttaa suurimman osan energiastaan äänenä, joten se on hyvä materiaali akustisiin tuotteisiin. Jokaisella puulajilla on oma resonanssitaajuutensa, jolla se värähtelee helpointen, joten erilaisille äänille ja soittimille voidaan valita sopivin puulaji. Värähtely aiheuttaa myös kaiuttimissa kotelon värähtelyä, joka saadaan estettyä rakentamalla kaiutin painavasta materiaalista.

6 LAITTEET

6.1 Esittely

Tähän työhön rakennettiin myös esimerkkilaitteita, joissa käydään läpi lyhyesti elektronikkatuotteiden suunnitteluvaiheita. Tuotteissa on kokeiltu puun ja paperin mahdollisuuksia korvata perinteisiä materiaaleja. Esimerkkituotteina on tehty yksinkertainen LED kello ja MP3-soitin. Rakensin edellä mainitut tuotteet itse alusta asti, piirikaavion suunnittelusta, komponenttien valintaan, layout-suunnitteluun ja kokoamiseen asti. Työn aiheen takia suunnitteluprosessia ei ole oleellista käydä niiltä osin läpi, joilta uusiutuvia materiaaleja ei voitu käyttää, kuten piirikaavion- ja layout-suunnittelua.

6.2 Kello

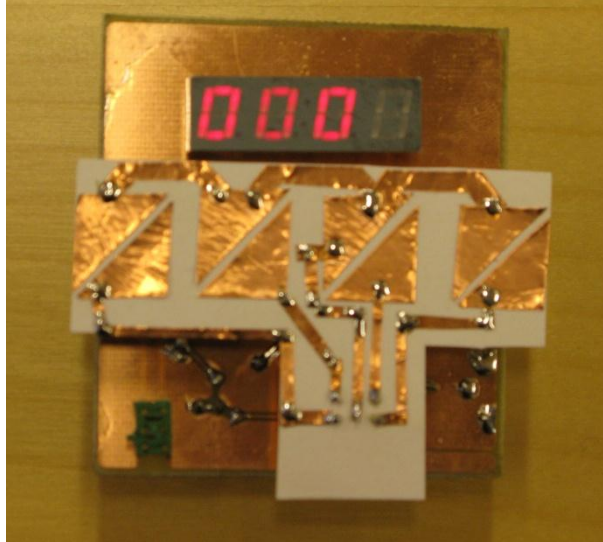
Kellon piirilevynä yritettiin ensin käyttää paperia ja puuta. Kellon ensimmäisen version layout on rakennettu puulle ja paperille, jotka näkyivät jo aiemmin kuvassa 14. Printtaus ei kumminkaan onnistunut käytetyille materiaaleille, koska johtimien resistiivisyys oli liian suuri. Mikro-ohjain olisi varmaan toiminut, mutta LED:ien tarvitsema virta olisi ollut liian suuri, jolloin resistiivisistä häviöistä olisi tullut liian suuria ja LED:it eivät olisi syttyneet ollenkaan. Piirilevynä käytettiin sitten perinteistä FR4. Kellon piirikaavio on liitteenä 1 ja layout liitteenä 2.

Kellossa on käytetty näyttönä 7-segmentti LED näyttöjä. Näyttö koostuu neljän 7-segmenttinäytön moduulista, jotta sillä voitaisiin näyttää tunnit ja minuutit. Kellolla on tarkoitus kokeilla miten LED:it ja kapasitiiviset näppäimet toimisivat paperin läpi käyttäliittymänä. Kapasitiivisiä näppäimiä printattiin suoraan pahville, jotka näkyvät kuvassa 24.



Kuva 24: Kapasitiiviset näppäimet ja johtimia.

Näppäiminä kokeiltiin myös johtavaa hopeakynää [56], jolla voidaan piirtää johteita piirilevyjen päälle. Paperia käytettiin myös johdinten eristämiseen toisistaan pujottelemalla paperi liuska johtimien välistä. Pahvin päälle rakennettiin myös kupariteipillä kapasitiiviset näppäimet, jotka näkyvät kuvassa 25.



Kuva 25: Kello kupariteipistä tehdyillä kapasitiivisilla näppäimillä.

Kapasitiivisten näppäinten tulkintaan käytettiin Analog Devicen AD7142ACPZ IC-piiriä, joka ilmoittaa keskeytyksellä mikro-ohjaimelle, milloin jotain nappia on painettu. Mikropiiri keskustelee mikro-ohjaimen kanssa SPI-väylän avulla. Painettavasta elektronikasta pitäisi pyrkiä tekemään mahdollisimman pientä, jolloin johtimista tulisi mahdollisimman lyhyitä. Kellossa valitut komponentit ovat liian suuria ja esimerkiksi mikro-ohjaimen pinneistä suurin osa jäi käyttämättä, jolloin tilaa meni hukkaan.

Painettavassa elektronikassa on olemassa erilaisia painomahdollisuuksia, joten niiden ominaisuudet olisi hyvä tietää, jotta osattaisiin valita parhaat työkalut. Yleisempiä painotekniikoita ovat silkkipaino ja inkjet-menetelmä. Inkjet-tulostuksessa tiputetaan pieniä mustepisaroita substraatin päälle. 500 fl – 2 nl kokoinen pisara muodostetaan kirjoituspäähän ja lasketaan materiaalin päälle. Inkjet:illä voidaan käyttää pienen viskositeetin omaavia musteita, mikä on tärkeää, koska se mahdollistaa musteen, jossa on pelkästään johtavaa materiaalia ja liuotinta ilman sideainetta. Musteesta saadaan tällöin johtavampaa. Inkjet mahdollistaa myös halvan ja kontaktittoman valmistusprosessin. Kuva saadaan painettua suoraan tietokoneelta, joten sen muokkaus on nopeaa ja halpaa. Inket-menetelmä on kuitenkin hidas, koska kirjoituspäätä pitää liikuttaa koko ajan, varsinkin, jos tarvitsee tulostaa useita kerroksia. Nopeutta saadaan kuitenkin lisäämällä kirjoituspäitä rinnakkain. Yhden pään rikkoutuminen saattaa kuitenkin aiheuttaa koko kuvan pilaantumisen. Pisaroiden pudotuksella, nesteen paineella ja painoalustan tai kirjoituspään liikkeellä voidaan säätää painojälkeä. Pisanamuotoa ja pudotusnopeutta kontrolloidaan kirjoituspään parametreilla, ja oikeat arvot riippuvat substraatin ominaisuuksista. Tulostusolosuhteet pitää myös olla oikeat samoin kuin tulostuskulma. [57.]

Silkkipainossa muste painetaan kangasruudun läpi substraatille lastalla. Alueet, jolle ei haluta mustetta estetään sapluunalla ja johtavat alueet jätetään avoimeksi. Silkkipaino voidaan tehdä tasopainolla tai pyörivällä sylinterillä. Pyörivällä telalla saadaan painettua hyvin nopeasti ja se mahdollistaa rullalta rullalle-menetelmän. Silkkipainolla saadaan painettua 0,02–100 µm paksuista jälkeä. Painojälkeen vaikuttaa muun muassa painon nopeus, voima ja lastan asento. Silkkipainossa muste koostuu johtavasta täyteaineesta, sideaineesta, liuottimesta ja lisäaineista. Sideainetta tarvitaan pitämään mustetta kasassa kun sitä levitetään. Sideaineen takia muste ei ole niin hyvin johtavaa. [58; 59.]

Inkjet-tulostusta käytetään kun halutaan painaa pieni, mutta tarkka kuvio. Jokaista kuvaa voidaan muokata nopeasti. Inkjet:illä pystytään lisäksi muokkaamaan painojälkeä enemmän kuin silkkipainolla. Inkjet:illä voidaan painaa epätasaisille ja eri paksuisille pinnoille. Jos taas halutaan painaa suurille alueille nopeasti, mutta tarkkuuden ei tarvitse olla niin hyvä, voidaan käyttää silkkipainoa. Silkkipainolla saadaan myös levitettyä paksu kerros mustetta kerralla, kun inkjet:illä voi tarvita useampaa vetoa. Substraatti vaikuttaa myös painamiseen. Se saattaa määrittää pienimmän mahdollisen viivanleveyden ja eristevälit, jotta johtimet saadaan tarpeeksi hyvin johtamaan, mutta eivät kumminkaan yhdisty toisiinsa. Huokoiset materiaalit saattavat myös imeä mustetta itseensä, jolloin materiaalit pitää päällystää.

6.3 MP3-soitin

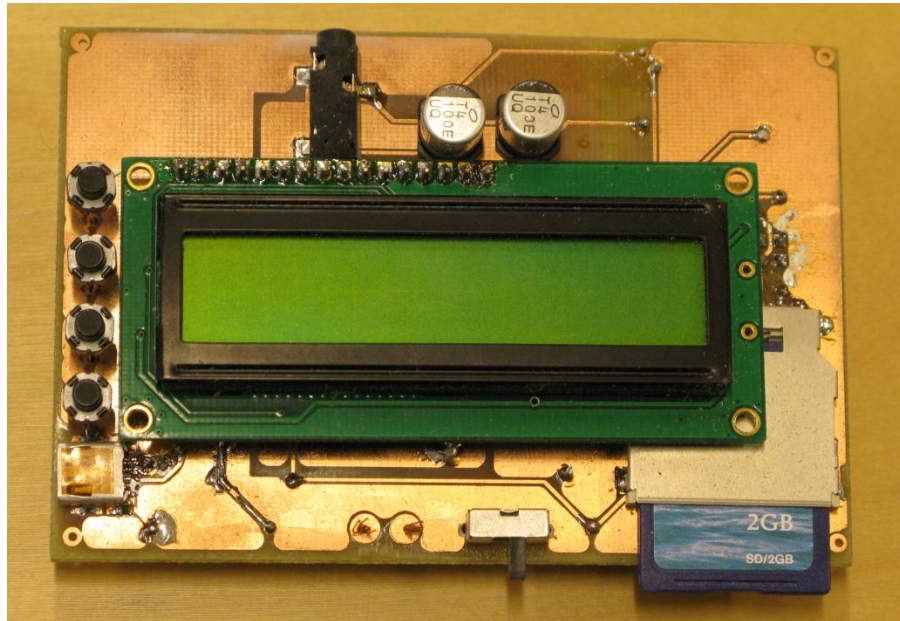
MP3-soittimen piirilevy ajateltiin ensin myös printata pahville, mutta jo kellossa havaittujen ongelmien takia piirilevynä käytettiin perinteistä FR4. Soittimen kotelo tehtiin puusta, joka näkyy kuvassa 26.



Kuva 26: MP3-soitin koteloituna.

Kuvassa 27 näkyy MP3-soittimen piirilevyn yläpuoli koottuna. MP3-soittimessa käytettiin käyttöliittymänä 2·16 merkin LCD-näyttöä ja mekaanisia kytkimiä. MP3-soittimessa testattiin mitä ongelmia elektroniikkalaitteen koteloinnissa puulla voisi tulla.

Kotelo valmistettiin ohuesta puuviilusta, mikä osoittautui hyvin helposti halkeilevaksi. Myös viilun eläminen tuotti ongelmia, koska puukappaleet käpristyivät. MP3-soitin toimii kännykän akulla, jota pystytään lataamaan tietokoneen USB-portista.



Kuva 27: MP3-soitin.

Mikro-ohjain hakee kappaleet SD-muistikortilta ja lähettää kappaleet VLSI VS1011b IC-piirille dekodattavaksi. IC-piiri kääntää tiedostot audiosignaalksi, joka syötetään audioliittimeen kuulokkeilla kuunneltavaksi. Koteloon on lisäksi tehty aukot USB-liittimelle, audioliittimelle, muistikortille ja virtakytkimelle.

Puukotelo ajaa hyvin asiansa sähköeristeenä, mutta ongelmia syntyi puukotelon suunnittelemisessa. Muovista voidaan suunnitella erilaisia liittimiä, joilla kotelon saisi pysymään kiinni samalla tavalla kuin kännykän takakuoren. Puusta tällaisten pienten rakenteiden tekeminen ei ole järkevää, koska siihen tarvittaisiin paljon aikaa ja sen kustannukset olisivat suuret. Puisten pienten liikuteltavien osien kestävyys ei myöskään ole niin hyvä kuin metalleilla tai muoveilla. MP3-soittimessa etukansi ja sivut liimattiin yhteen ja takakuori ruuvataan kiinni piirilevyyn. Puukoteloita ei paljoa valmistettu elektroniikan tuotteisiin. Kuvan 22 kotelot ovat joko prototyyppisiä tai selvästi kalliimpia kuin muoviset koteloinnit. Puukotelolla uusimmissa tuotteissa on lähinnä haettu näyttävyyttä ja niitä nähdään harvoin tavallisissa kulutustuotteissa.

Komponenttien koteloinnissa käytetään muoveja, keraameja ja metalleja. Yleensä komponentit rakennetaan keraamialustalle, josta vedetään johtimet kotelon pinneihin. Kotelo täytetään ja sinetöidään yleensä muovilla tai epoksilla. Edellä on jo mainittu kuinka paperi sopisi substraatiksi, mutta komponenttien kotelomateriaaliksi se on liian heikkoa. Paperi johtaa huonosti lämpöä, joten sekin saattaa tulla ongelmaksi paljon lämpeneville komponenteille. Tavalliset komponentit myös juotetaan kiinni korkeassa lämpötilassa, mitä paperisubstraatti ei välttämättä kestä. Muita mahdollisuuksia komponenttien kiinnittämiseen on kyllä erilaiset johtavat liimat ja epoksit.

7 TULOKSET JA KOMMENTIT

Puu ja paperi ovat haasteellisia materiaaleja, mutta niille löytyy useita käyttökohteita elektroniikassa. Puusta valmistettavat materiaalit yhdistettynä materiaaleja lisääviin menetelmiin saadaan hyvin ympäristöystävällisiä ja edullisia tuotteita. Puun ja paperin mekaanisia, termisiä ja kemiallisia menetelmiä on tutkittu paljon, mutta puun sähköisistä ominaisuuksista on hankala löytää lähteitä. Varsinkin RF-taajuuksilla puun ja paperin ominaisuuksille on saatu hyvin erilaisia tuloksia niin permittiivisyyden kuin häviötangentin osalta. Paperi- ja puulaatuja on kuitenkin hyvin erilaisia ja niitä saadaan muokattua sopimaan eri tarpeisiin. Paperia ja puuta on helppo työstää ja niitä voidaan käsitellä kestävästi kosteutta ja lämpöä.

Hyödyllisin käyttötarkoitus puulle ja paperilla on niiden käyttö substraatteina. Paperi ja puu voidaan kilpailemaan piirilevymateriaalina FR4 vastaan, kuten FR1 ja FR2 käytetään. FR4:ää käytetään paljon ja sen ominaisuudet tunnetaan tarkasti. Sillä on hyvät mekaaniset ja sähköiset ominaisuudet peruskäyttöön, joten sitä on vaikea korvata millään muulla piirilevy materiaalilla. Ajankohtaista olisikin miettiä miten paperille ja puulle voitaisiin suoraan printata piirikuvia. Etuna olisi nopeus, jolloin voitaisiin tulostaa piirikuvioita niin sanotusti ”rullalta rullalle”-menetelmällä (Reel-to-reel). Puulle ja paperille voidaan rakentaa kevyitä sulautettuja järjestelmiä, jolloin tavallisille tuotteille saadaan älyä, esimerkiksi ne voivat esittää käyttäjälle tietoa tuotteesta. Komponentit liimattaisiin johtavalla liimalla piirilevyille, jolloin niitä ei tarvitse käyttää kuumassa uunissa. Joustavassa elektroniikassa paperi sopisi piirilevysubstraatiksi. Puu ja paperi eivät haittaa merkittävästi RF-piirien ja komponenttien toimintaa.

Työssä olisi ollut hienoa saada puulle ja paperille printatut johtimet johtamaan tarpeeksi hyvin. Inkjet-menetelmällä on kuitenkin mahdollista valmistaa tarkkoja ja hyvin johtavia piirikuvioita kunhan vain tulostimen parametrit saataisiin kohdilleen. Muitakin painotekniikoita ja musteita voitaisiin testata, jotta löydettäisiin parhaimmat ratkaisut puulle ja paperille painamiseen. Paperi ja puu ovat hygroskooppisia materiaaleja, joten niille on hyvä käyttää päällysteitä, jotta ne saataisiin hylkimään vettä. Päällystäminen parantaa myös painettaessa musteiden johtavuutta, koska pinnasta saadaan tasaisempi. Jotta tuotteesta saataisiin kokonaan orgaaninen, pitäisi löytää myös orgaaninen päällyste materiaaleille.

8 YHTEENVETO

Tuotesuunnittelussa pitää ottaa materiaalien ominaisuudet tarpeeksi ajoissa huomioon. Materiaalien ominaisuuksia pitää ottaa huomioon jo suunniteltaessa piirikaaviota ja layout:ta. Materiaali ja valmistustekniikka määräävät esimerkiksi mahdolliset viivanleveydet, eristevälit ja mahdolliset läpiviennit.

Käytännöllisin ja mielenkiintoisin käyttötarkoitus puulle ja paperille elektroniikan tuotteissa on niiden käyttö piirilevy- tai puolijohdealustana. Paperi on uusiutuva, halpa ja ympäristöystävällinen ratkaisu. Paperi mahdollistaa myös joustavia rakenteita. Uudet tuotteet paperisubstraateilla olisivat esimerkiksi orgaaniset ohutkalvotransistorit, elektroluminenssiin perustuvat orgaaniset valonlähteet, patterit, erilaiset sensorit, antennit ja RFID-tagit. Näitä ratkaisuja voitaisiin käyttää valmistamaan paperi- tai puupakkauksista erilaisia älypakkauksia. Materiaalit sopivat hyvin kertakäyttöisiin tuotteisiin, jotka voidaan käytön jälkeen vain heittää pois tai kierrättää.

Piirilevymateriaalille rakennettavat RF-piirikomponenttien ominaisuudet riippuvat käytetystä substraatista. RF-tekniikassa kiinnostavaa olisi pienen tai hyvin suuren permittiivisyyden omaavat materiaalit. Paperille on mitattu hyvin pieniä permittiivisyyksiä pienillä taajuuksilla, mutta suurilla taajuuksilla voitaisiin vielä tutkia saadaanko paperista valmistettua lähelle ilman permittiivisyyttä olevia materiaaleja.

Sähköisiltä ominaisuuksiltaan paperi on parempaa kuin puu ja sitä saadaan muokattua helpommin kuin puuta. Puu sisältää enemmän vapaita ioneja ja polaarisia aineita. Paperista voidaan poistaa vapaat ionit ja polaarisia aineita. Lisäksi paperiin voidaan lisätä erilaisia aineita muokkaamaan paperin ominaisuuksia. Tämän takia uusiutuva materiaali kannattaa valmistaa paperiksi ja käyttää sitä elektroniikan tuotteissa. Paperin hyviä ominaisuuksia ovat sen edullisuus, mekaaniset ominaisuudet, hyvät sähköiset ominaisuudet kuivana ja printattavuus. Haasteita tuovat paperin paksuus, koska selluloosa paperista on vaikea tehdä hyvin ohuita ja kestäviä. Elektroniikkatuotteiden koteloksi puuta voitaisiin käyttää, mutta ongelmia saattaa tulla puun reagoimisen kosteuden ja lämmön haihtuvuuden kanssa. Puuhun voidaan kiinnittää erilaisia RFID-tageja samalla tavalla kuin paperiin.

LÄHTEET

- [1] Cross, N. 3rd edition. Engineering Design Methods - Strategies for Product Design, England 2000, John Wiley & Sons. 212 p.
- [2] Cloud, Giffen, Larson & Swan, Designing Cost-Effective Space Missions: An Integrated, Systems Engineering Approach, Teaching Science and Technology, Inc., 1999.
- [3] Pecht, M. Product Reliability, Maintainability and Supportability Handbook, Boca Raton 1995, CRC Press. 413 p.
- [4] Pfeifer, M. Materials Enabled Designs - The Materials Engineering Perspective to Product Design and Manufacturing, 2009, Elsevier. 324 p.
- [5] Baily, B., Martin, G. & Piziali, A. ESL Design and Verification - A prescription for Electronic System Level Methodology, 2007, Elsevier. 488 p.
- [6] Cadance, OrCAD Pspice A/D and Advanced Analysis. [WWW]. [Viitattu 30.3.2012]. Saatavissa: www.cadance.com
- [7] Agilent Technologies, Advanced Design System (ADS). [WWW]. [Viitattu 30.3.2012]. Saatavissa: www.home.agilent.com
- [8] Mentor Graphics, ModelSim. [WWW]. [Viitattu 30.3.2012]. Saatavissa: www.mentor.com
- [9] Mentor Graphics, PADS Suites. [WWW]. [Viitattu 30.3.2012]. Saatavissa: www.mentor.com
- [10] Tikkanen, H. PADS Piirilevysuunnitteluopas II, Jyväskylä 2004, DS-Design systems Oy. 291 p.
- [11] Savitch, W. 7th edition, Problem Solving with C++, 2008, Addison-Wesley. 1072 p.
- [12] Maynes, C. Choosing Carrier and Cover Tape for Tape-and-Reel, SMT Online (2009)10.
- [13] Clayton R. P. 2nd edition. Introduction to Electromagnetic compatibility, Hoboken, New Jersey, 2006, John Wiley & Sons. 983 p.

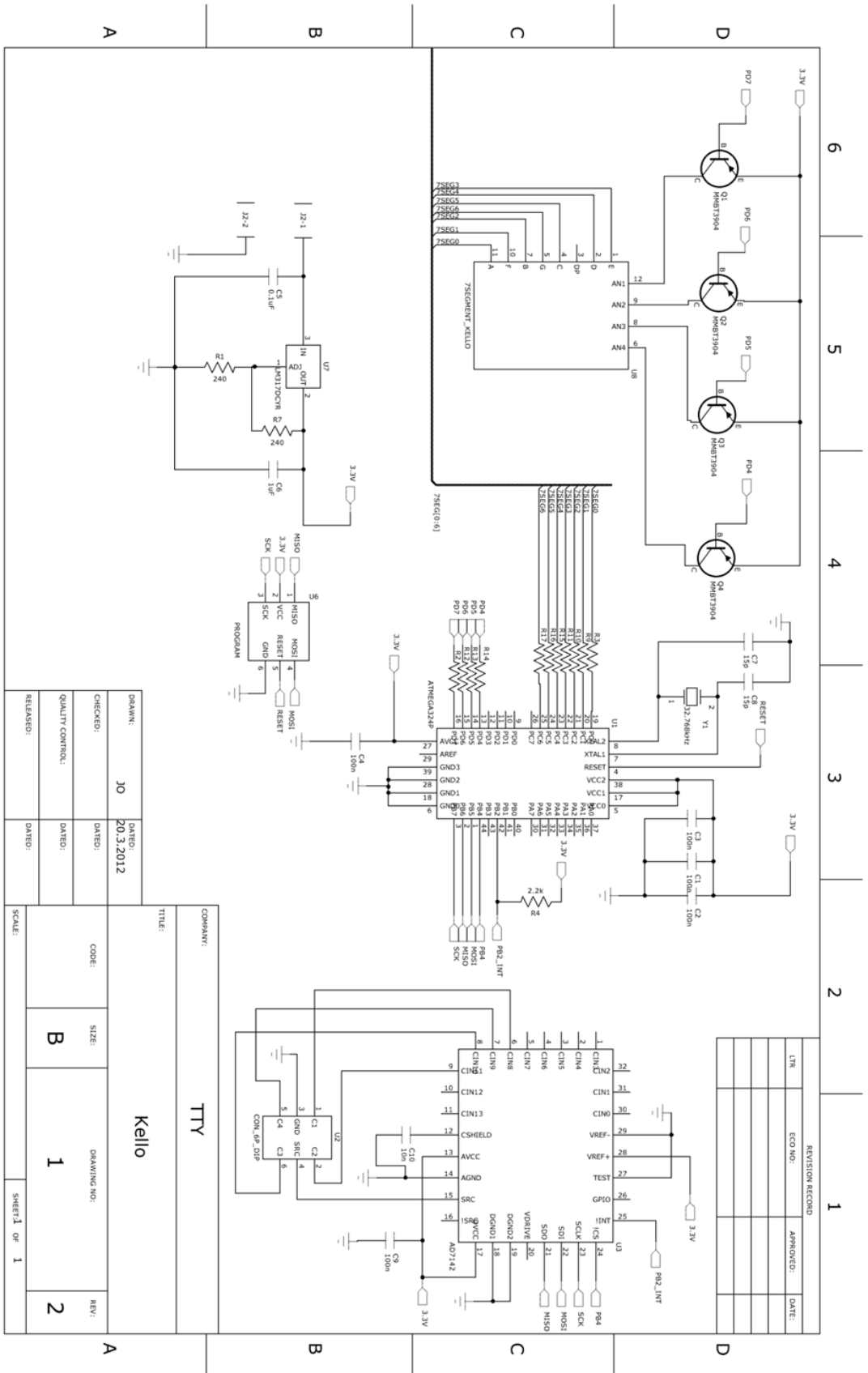
- [14] Tukes, Sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC). [WWW]. [Viitattu 30.3.2012]. Saatavissa: www.tukes.fi
- [15] Ott, H. W. 2nd edition. Noise Reduction Techniques in Electronic Systems, 1988, John Wiley & Sons. 426 p.
- [16] Uusitalo, J-P. SMG-5260 Sähkömagneettiset häiriöt, EMI. Tampereen Teknillinen Yliopisto. Kurssimateriaali.
- [17] Räisänen, A., Lehto, A. 12th edition. Radiotekniikan perusteet, Helsinki 2007, Otatieto Helsinki University Press. 287 p.
- [18] Ludwig & Bretchko. RF Circuit Design - Theory and Applications, New Jersey 2000, Prentice-Hall, Inc. 642 p.
- [19] Hienonen R., Karjalainen, M. & Lankinen, R. Elektroniikkalaitteen lämpösuunnittelun verifiointi. Espoo 1997, VTT. VTT Julkaisuja - Publikationer 824. 98 p.
- [20] Dorf, R. C. 2nd edition. The Electrical Engineering Handbook, Boca Raton 1997, CRC Press. 2719 p.
- [21] Kärnä, A. Ympäristömyötäinen Tuotesuunnittelu - Opas sähkö- ja elektroniikkateollisuuden yrityksille, 2001, SET Sähkö- ja elektroniikkateollisuusliitto. 125 p.
- [22] Bergman, R. et al. Wood Handbook - Wood as an Engineering Material, Madison, USA 2010, U.S. Department of Agriculture. 509 p.
- [23] Kettunen, Wood - Structure and properties, Tampere 2006, Trans Tech Publications Ltd. 401 p.
- [24] Isomäki, Koponen, Nummela & Suomi-Lindberg, Puutoteollisuus 2 - raaka-aineet ja aihiot, 2002, Opetushallitus. 154 p.
- [25] Alava, M. & Niskanen, K. The physics of paper. Reports on progress in physics 69(2006)3, p. 669-723.
- [26] Editor Holik, H. Handbook of Paper and Board, Weinheim 2008, Wiley-vch. 505 p.

- [27] Buschow K. H. J. (editor), Cahn R. W. (editor), Flemings M. C. (editor), Ilshner B. (editor), Kramer E. J. (editor), Mahajan S. (editor), Encyclopedia of Materials - Science and Technology, Volumes 1 -11, Elsevier, 2001.
- [28] Merilampi, S. The Exploitation of Polymer Thick Films in Printing Passive UHF RFID Dipole Tag Antennas on Challenging Substrates, Tampere 2011, Tampereen Teknillinen Yliopisto. 118 p.
- [29] Bohmer, E. Thermal Properties. In: Habager, C. C., Lyne, M. B., Mark, R. E. & Borch, J. Handbook of Physical Testing of Paper, Vol. 2, 2001, CRC Press.
- [30] Gary A. Baum, Electrical Properties: I. Theory. In: Charles C. Habager, M. Bruce Lyne, Richard E. Mark & Borch, J. Handbook of Physical Testing of Paper, Vol. 2, 2001, CRC Press.
- [31] Simula, S. Electrical Properties: II. Applications and Measurement. In: M. Bruce Lyne, Richard E. Mark & Borch, J. Handbook of Physical Testing of Paper, Vol. 2, 2001, CRC Press.
- [32] Filanovsky I. M. Capacitance and Capacitors. In: Whitaker, J. C. The Electronics Handbook, Vol. 2, 2005, CRC Press.
- [33] Paulapuro, H. Papermaking Science and Technology: Book 18, Paper and Board Grades, 2000 Jyväskylä, Fapet Oy, pp. 134.
- [34] Weisshaar, A. Transmission Lines. In: Rajeev Bansal, Handbook of Engineering Electromagnetics, vol 1, 2004, CRC Press.
- [35] Jin, Y., Wang, Z., & Chen, J. Introduction to Microsystem Packaging Technology, 2010, CRC Press. 214 p.
- [36] Grout, I. Digital Systems Design with FPGAs and CPLDs, 2008, Elsevier. 784 p.
- [37] Coombs, C. F. 5th edition, Printed Circuits Handbook, 2008 New York, The McGraw-Hill Companies.
- [38] Tukes, RoHS -direktiivit 2002/95/EY ja 2011/65/EU. [WWW]. [Viitattu 13.4.2012]. Saatavissa: www.tukes.fi

- [39] You, C. & Hwang, W. 2007. Antenna Integration with Composite Sandwich Structures using Gain Enhancement Methods. 41, 9, pp. 1037-1048.
- [40] Gardiol, F. Microstrip Circuits, 1994 New York, John Wiley & Sons, Inc.
- [41] Fujifilm, Dimatix DMP-2800 Materials Printer, Overview. [WWW]. [Viitattu:18.4.2012]. Saatavissa: http://www.fujifilmusa.com/products/industrial_inkjet_printheads/deposition-products/dmp-2800/index.html
- [42] Harima, NPS-JL Silver Nanoparticle Ink, NanoPaste series, Metal Paste for Thin Film Formation, Datasheet. [WWW]. [Viitattu: 18.4.2012] Saatavissa: <http://www.harima.co.jp/en/products/pdf/16-17e.pdf>,
- [43] Virkki, J., Merilampi, S., Ukkonen, L. & Sydänheimo, L. Performance of UHF RFID Tags Printed Directly on Plywood Structures, accepted to International Journal of RF Technologies: Research & Applications.
- [44] Rida, A., Li, Y. Vyas, R & Tentzeris, M. M. 2009. Conductive Inkjet-Printed Antennas on Flexible Low-Cost Paper-Based Substrates for RFID and WSN Applications. Antennas and Propagation Magazine, IEEE 51, 3, pp.13-23.
- [45] Orecchini, G., Alimenti, F., Palazzari, V., Rida, A., Tentzeris, M. M. & Roselli, L. 2011. Design and fabrication of ultra-low cost radio frequency identification antennas and tags exploiting paper substrates and inkjet printing technology. Microwaves, Antennas & Propagation, IET 5, 8, pp. 993-1001.
- [46] Kim, Y-H., Moon, D-G. & Han, J-I. 2004. Organic TFT Array on a Paper Substrate. IEEE Electron Devices Letters, 25, 10, pp. 702-704.
- [47] Jiang, J., Sun, J., Dou, W. & Wan, Q. 2012. Junctionless Flexible Oxide-Based Thin-Film Transistors on Paper Substrates. IEEE Electron Devices Letters 33, 1, pp. 65-67.
- [48] Kim, J-Y., Park, S. H., Jeong, T., Bae, M. J., Song, S. & Lee, J. In: Han, T., Jung, D. & Yu, S. 2010. Paper as a Substrate for Inorganic Powder Electroluminescence Devices. IEEE Transactions on Electron Devices 57, 6, pp. 1470-1474.

- [49] Vers, Shellcase for iPad I. [WWW]. [Viitattu: 22.4.2012]. Saatavissa: <http://versaudio.com/versipadspec.html>
- [50] Hacao, Full Ki-Board. [WWW]. [Viitattu: 22.4.2012]. Saatavissa: <http://www.hacao.com/contents/products/fullkiboard.html>
- [51] Cameraphones Plaza, Maple Phone, Grezzo. [WWW]. [Viitattu: 22.4.2012]. Saatavissa: <http://www.cameraphonesplaza.com/wood-phones/>
- [52] Unica Home, I.D.E.A - TO:CA 'Wood' LED Clock by Kouji Iwasaki. [WWW]. [Viitattu: 22.4.2012]. Saatavissa: <http://www.unicahome.com/p23982/kikkerland/to-ca-wood-led-clock-by-kouji-iwasaki.html>
- [53] Hu, L., Wu, H., Mantia, F. L., Yang, Y. & Cui, Y. Thin, Flexible Secondary Li-Ion Paper Batteries. *Acsnano*, 4(2010)10, pp. 5843-5848.
- [54] Baxter, L. K. *Capacitive Sensors - Design and Applications*, 1997 Wiley - IEEE press. p. 302.
- [55] Lee, M. *The Art of Capacitive Touch Sensing*, 2007, Cypress Semiconductor.
- [56] ITWChemtronics, CircuitWorks Conductive Pen. [WWW]. [Viitattu: 24.4.2012]. Saatavissa: <http://www.chemtronics.com/products/product.asp?id=7>
- [57] Subramanian, V. et al. Printed electronics for low-cost electronics systems - Technology status and application development. *Solid-State Device Research Conferenec*, Edinburgh, UK, 15-19 Sept. 2008. Berkley, USA 2008, pp. 17-24
- [58] Landers, T. L., Brown D. B., Fant E. W., Malstrom E. M. & Schmitt N. M., *Electronics Manufacturing Processes*, 1994, Prentice Hall. 564 p.
- [59] Blayo, A. & Pineaux, B. Printing Process and Their Potential for RFID printing. *Joint sOc -EUSAI conference*, Grenoble, France, 2005. New York, USA 2005, ACM. pp. 27 -30

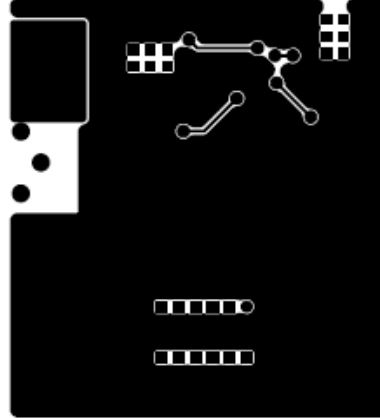
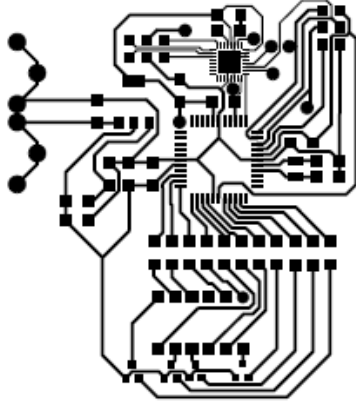
LIITE 1: KELLON PIIRIKAAVIO



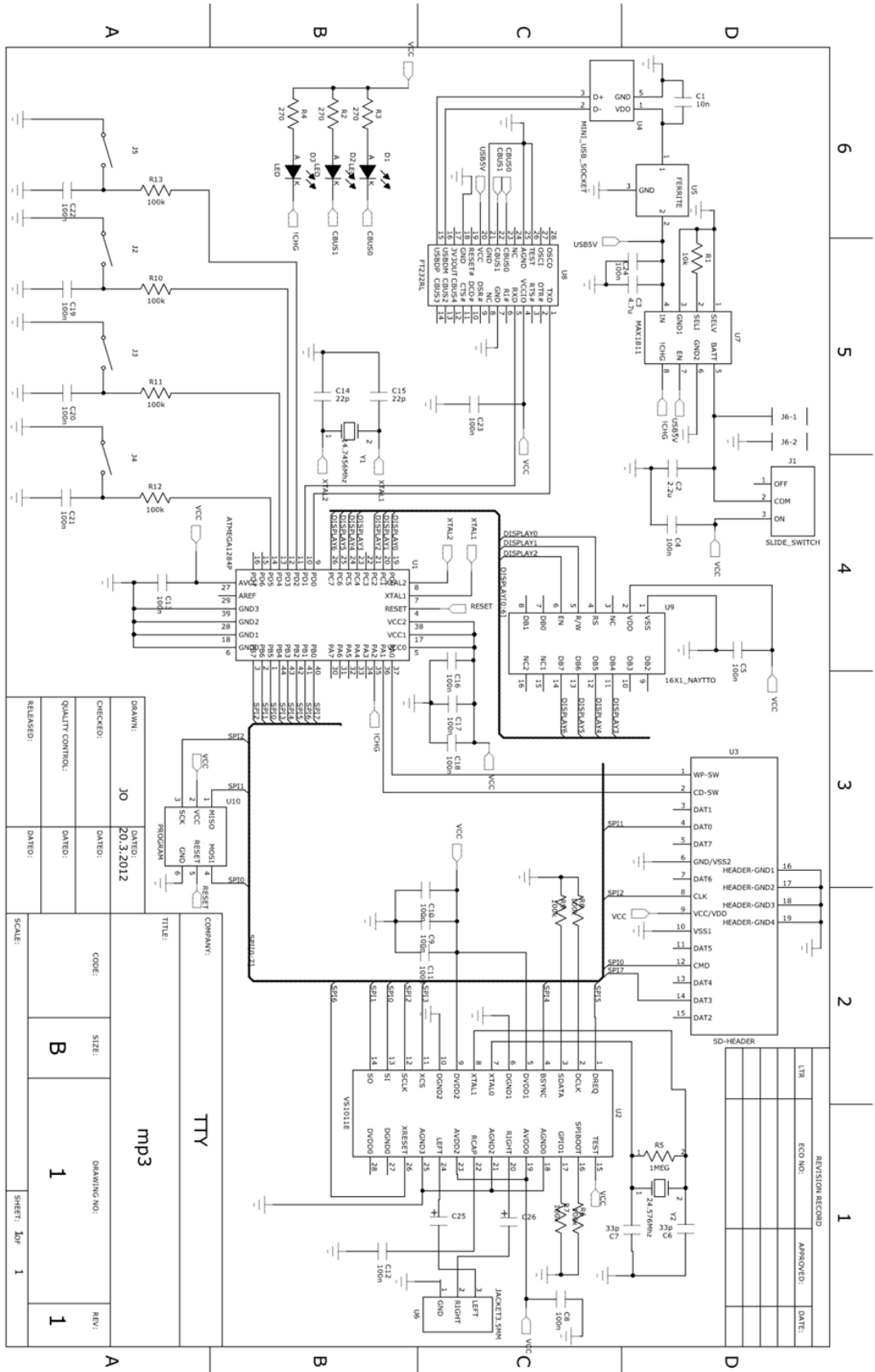
DRAWN:	JO	DATE:	20.3.2012
CHECKED:		DATE:	
QUALITY CONTROL:		DATE:	
RELEASED:		DATE:	

COMPANY:		TTY	
TITLE:		Kello	
DRAWING NO.:	B	SIZE:	1
SCALE:		REV.:	2
SHEET: 1 OF 1			

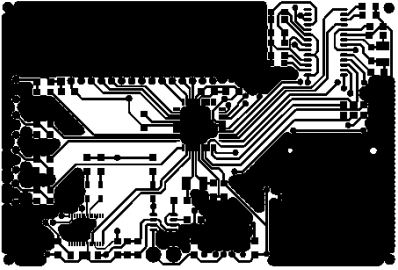
LIITE 2: KELLON LAYOUT

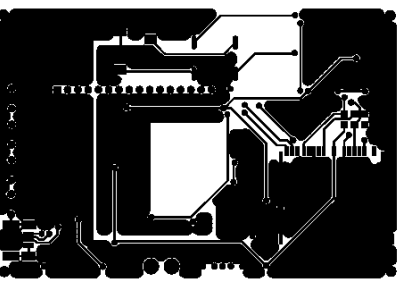


LIITE 3: MP3 -SOITTIMEN PIIRIKAAVIO



LIITE 4: MP3 -SOITTIMEN LAYOUT

	6	5	4	3	2	1					
D						REVISION RECORD					
						LTR	ECO NO:	APPROVED:	DATE:		D
C											
B											
A	DRAWN: Joni Orre DATED: 1.1.2012 CHECKED: DATED: QUALITY CONTROL: DATED: RELEASED: DATED:		COMPANY: TTY TITLE: MP3				CODE: 1 SIZE: a4 DRAWING NO: 1 REV: 0	A			
	SCALE: 1 : 1					SHEET: 1 OF 1					

	6	5	4	3	2	1					
D						REVISION RECORD					
						LTR	ECO NO:	APPROVED:	DATE:		D
C											
B											
A	DRAWN: Joni Orre DATED: 1.1.2012 CHECKED: DATED: QUALITY CONTROL: DATED: RELEASED: DATED:		COMPANY: TTY TITLE: MP3				CODE: 1 SIZE: a4 DRAWING NO: 1 REV: 0	A			
	SCALE: 1 : 1					SHEET: 1 OF 1					