



Jussi Torppa

## **PAINETTUIJEN JOHTIMIEN OMINAISUUKSIEN MÄÄRITTÄMINEN**

**PAINETTUIJEN JOHTIMIEN OMINAISUUKSIEN  
MÄÄRITTÄMINEN**

Jussi Torppa  
Opinnäytetyö  
Syksy 2012  
Tietotekniikan koulutusohjelma  
Oulun seudun ammattikorkeakoulu

## TIIVISTELMÄ

Oulun seudun ammattikorkeakoulu  
Tietotekniikan koulutusohjelma, elektroniikan suunnittelu ja testaus

---

Tekijä(t): Jussi Torppa  
Opinnäytetyön nimi: Painettujen johtimien ominaisuuksien testaus  
Työn ohjaaja(t): Jussi Huikari  
Työn valmistumislukukausi ja -vuosi: Syksy 2012  
Sivumäärä: 40 + 1 liitettä

---

Opinnäytetyön aiheena oli määrittää painetun johtimen ominaisuuksia Valtion teknilliselle tutkimuslaitokselle Oulussa. Työssä pyrittiin saamaan selville johtimen eri ominaisuuksia, kuten tehonkestoa, olosuhteidenkestokykyä ja mekaanisia rajoitteita. Samalla tutustuttiin painettuun älykkyyteen ja tutkittiin painettua johdinta yleisesti sekä painotekniikoita ja niiden mahdollisuuksia.

Työssä suoritettut testit tehtiin suurimmaksi osaksi Oulun seudun ammattikorkeakoulun tekniikan yksikön tiloissa. Olosuhdetestit toteutettiin Especin olosuhdetestikaapilla. Suurin osa testituloksista, kuten resistanssit ja lämpötilat, mitattiin Fluken yleismittareita käyttäen.

Työssä tehtyjen testien avulla saatiin kohtuullisen tarkasti selvitettyä johtimen eri ominaisuuksia, vaikka painotapahtuman saanto jäi odotettua heikommaksi. Testitulokset selventävät, että painettuja johtimia on mahdollista hyödyntää tulevaisuudessa painetun elektroniikan sovelluksissa. Samalla sain selkeän kuvan elektroniikan painoteollisuudessa käytettävistä painotekniikoista ja niiden mahdollisuuksista.

---

Asiasanat:  
painettu älykkyys, johtimet, R2R-tekniikka, elektroniikan testaus

## ALKULAUSE

Insinööriyöni tilaajana toimi Valtion teknillisen tutkimuslaitoksen Oulun yksikkö. Työn valvojana VTT:n puolelta on toiminut Mikko Paakkolanvaara. Oulun seudun ammattikorkeakoulun tekniikan yksiköstä ohjaavana opettajana on toiminut Jussi Huikari. Tekstin ohjaajana on toiminut lehtori Tuula Hopeavuori.

Haluan mitä nöyrimmin kiittää työtäni ohjanneita henkilöitä. Suuret kiitokset myös kanssatyöntekijöilleni Laura Leinoselle, Jari Varjukselle ja Jouni Räisäselle, jotka osaltaan yhteistyötaidoillaan edesauttoivat insinööriyöni valmistumista.

Lopuksi haluan kiittää rakkaita vanhempiani henkisestä tuesta ja taloudellisesta avusta, joita ilman työni tekeminen olisi ollut huomattavasti hankalampaa.

Oulussa 12.10.2012

Jussi Torppa

# SISÄLLYS

TIIVISTELMÄ	3
ALKULAUSE	4
1 JOHDANTO	7
2 PAINETTU ÄLYKKYYS	8
2.1 Painomenetelmät	8
2.1.1 Syväpaino	9
2.1.2 Fleksopaino	10
2.1.3 Silkipaino	12
2.1.4 Kuumapuristus	13
2.1.5 Mustesuihku	14
2.1.6 Elektrofotografia	15
2.2 Painomateriaalit	16
3 R-2-R-TEKNIikka	18
4 PAINETTU JOHDIN	20
4.1 Materiaalit	20
4.2 Toimintaa kuvaavat parametrit	20
4.2.1 Resistanssi	20
4.2.2 Tehonkesto	21
4.2.3 Toimintaolosuhteiden vaikutus	21
5 PAINOTAPAHTUMA JA PAINOPARAMETRIT	23
5.1 Painomateriaalit	24
5.2 Painoparametrit	25
5.3 Geometriat	25
6 MITTAUKSET	27
6.1 Resistanssimittaukset	27
6.2 Olosuhdetestit	30
6.3 Tehonkesto ja lämpötilan nousu käytössä	32
6.4 Taivutustestit	34
7 YHTEENVETO	38
LÄHTEET	40

## LIITTEET

Liite 1 Johtimien tietolomake

# 1 JOHDANTO

Painetun älykkyyden kehittämisen motivaationa on uusien toiminnallisuuksien tuottaminen painoalustoille. Se konkretisoituu uudenlaisten ja jokapäiväisiin tuotteisiin tarvittavien toiminnallisuuksien kustannustehokkaana valmistamisena. Painetulla johtimella tarkoitetaan painokoneilla painoalustalle johtavalla väriaineella painettua sähköä johtavaa johdinta.

Opinnäytetyön aiheena oli painettujen johtimien ominaisuuksien määrittäminen Oulun VTT:lle ja samalla tutustuminen painettuun älykkyyteen. Työssä tutkittiin myös olemassa olevia painotekniikoita ja niiden mahdollisuuksia.

Työn suorittamisosaan sisältyi painotapahtumaan perehtyminen, joka toteutuikin omien komponenttien painamisen seuraamisena VTT:n tiloissa. Painoprosessin jälkeen johdinten ominaisuuksia kartoitettiin erilaisilla testeillä, jotka indikoivat niiden toimintakykyä eri olosuhteissa. Painetuista johtimista on todella vähän jo olemassa olevaa tutkimusmateriaalia, joten työstä saatuja tuloksia pystytään varmasti hyödyntämään tarvittaessa tulevaisuudessa.

Saadut mittaustulokset ja johdinten spesifit tiedot kerättiin yhteen tietolomakkeeksi (liite 1), jotta työssä aikaansaadut tulokset saatiin realisoitua yhdeksi lyhyeksi kokonaisuudeksi. Tietolomakkeen avulla voidaan haluttaessa vertailla tulevaisuudessa saatavia testituloksia jo aikaisemmin saatuihin tuloksiin.

## 2 PAINETTU ÄLYKKYYS

Painettua älykkyyttä saadaan, kun painoteknisin menetelmin painetaan kerroksia, jotka tuovat uusia toiminnallisuuksia pohjamateriaaliin. Painettua älykkyyttä valmistetaan painokoneilla, jotka ovat painotekniikoiltaan verrattavissa painoteollisuudessa käytettäviin painokoneisiin. Painettu älykkyyks on oma teknologiansa, joka yhdistää elektroniikan, kemian ja painoteollisuuden osaamisia uudeksi teknologiaksi. (1.)

Painettu älykkyyks mahdollistaa aivan uudenlaisten innovaatioiden kehittämisen, koska se sallii kestävän, ohuen ja taipuisan materiaalin valmistamisen. Tällaista painettua älykkyyttä ovat esimerkiksi yksinkertaiset painetut elektroniikan komponentit ja kertakäyttöiset sensorit, mutta painamalla on myös mahdollista valmistaa orgaanisia aurinkokennoja ja valoa emittoivia diodeja. (1)

Painetussa älykkyydessä painetuista kerroksista halutaan saada yhtenäisiä alueita, kun taas painoteollisuuden painotaloissa tehdään monia yksittäisiä pisteitä.

### 2.1 Painomenetelmät

Painettua älykkyyttä on mahdollista painaa monenlaisilla eri menetelmillä sen mukaan, minkälaista painotuotetta halutaan valmistaa. Painomenetelmät voidaan yleisesti jakaa kahteen luokkaan: mekaanisiin ja digitaalisiin painomenetelmiin. (2.)

Mekaaniset menetelmät ovat perinteisiä menetelmiä, jotka perustuvat halutun kuvion täsmälliseen puristamiseen kalvolle. Painamisessa käytetään materia eli painolevyä tai -sylinteriä. Mekaanisia painomenetelmiä ovat muun muassa fleksopaino, syväpaino ja silkkipaino. (2, s. 46.)

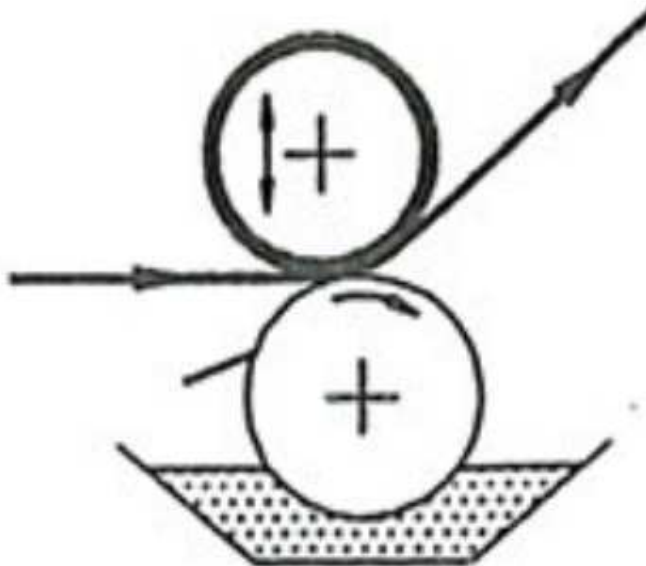
Digitaaliset menetelmät ovat uudenaikaisempia, sillä niissä painaminen tapahtuu ilman materia ja puristusta. Haluttu kuvio saadaan aikaan digitaalisesta materiaalista, joka mahdollistaa kuvioinnin muuttamisen



painotapahtuman aikana eli peräkkäiset kuviot voivat olla erilaisia. Digitaalisiin menetelmiin kuuluvat esimerkiksi mustesuihku ja elektrofotografia. (2, s. 46.)

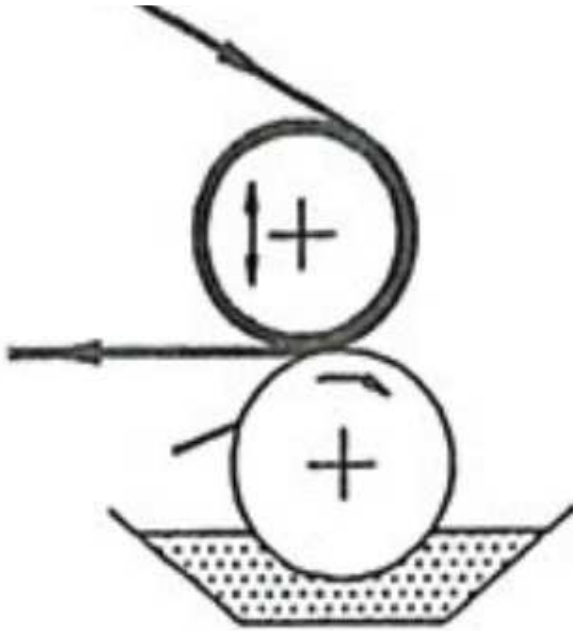
### 2.1.1 Syväpaino

Syväpaino on mekaaninen painomenetelmä, joka käyttää painolevyä kuvioiden tuottamiseen. Kuva 1 havainnollistaa syväpainotekniikkaa eteenpäin ajettuna. Syväpainotekniikkaa on mahdollista ajaa myös taaksepäin kuvan 2 mukaisesti. Painettava aihe kaiverretaan halutun kokoisilla kupeilla kuparipintaiselle sylinterille. Kuppien kaiverrus toteutetaan käyttämällä mekaanista työstöä, laserkuviointia tai syövytystä. Painettaessa sylinterin pinta kastetaan juoksevalla painovärillä, jolloin se siirtyy telan kaiverrettuihin kuppeihin sylinterin pintaan. Ylimääräinen väri poistetaan metallisella raakeliterällä. Näin ollen painoväri jää vain halutuille alueille eli painopintaan tehtyihin syvennyksiin. Lopulta painoväri painetaan sylinterin painonipiltä painettavalle alustalle. (2, s. 64; 3, s. 9.)



KUVA 1. Syväpainotekniikka eteenpäin ajettuna (3)

Syväpainomenetelmän käyttämisen edullisuus korostuu, kun painomäärät nousevat suuriksi, koska aloituskustannukset ovat suuret. Niihin kuuluu painosylinterin valmistaminen, joka maksaa paljon, mutta sylinteri on toisaalta hyvin pitkäikäinen. Sen värintoisto on hyvä ja värinsiirto yksinkertaista, joten sen hallinta on helppoa. Syväpainotekniikkaa käytetään esimerkiksi optisten aurinkokennojen ja Organic Light Emitting Dioidien painamiseen. (2, s. 73; 3.)



*KUVA 2. Syväpainotekniikka takaperin ajettuna (3)*

### **2.1.2 Fleksopaino**

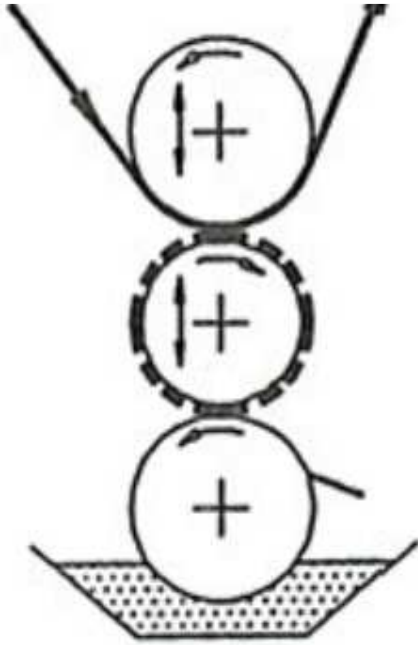
Fleksopaino on erityisesti pakkausteollisuuden käyttämä kohopainomenetelmä, jossa käytetään painolevyjä ja -laattoja. Fleksopainomenetelmä mahdollistaa monipuolisen painomateriaalin valmistuksen, koska sillä voidaan painaa monille erilaisille materiaaleille. Painolaatta mahdollistaa joustavuutensa ansiosta painamisen niin karheille kuin päällystetyillekin pinnoille. (2, s. 75.)

Fleksopainolla valmistetaan mm. tarraetikettejä ja pakkauspapereita. Fleksopainatus on tekniikkansa vuoksi erillisen prosessin osa, jolloin

valmistettavat tuotteet painetaan rullalta rullalle. Sen jälkeen ne voidaan siirtää prosessin seuraavaan vaiheeseen eli esimerkiksi tuotteen pakkausvaiheeseen tai laminointiin. (2, s. 76.)

Fleksopainossa painettava kuvio on kohokuviona painolevyllä tai laatalla, joka on valmistettu joustavasta materiaalista. Menetelmässä käytetään juoksevaa painoväriä, joka annostellaan painolevylle rasteri- eli anilox-telalta. Anilox-tela valmistetaan samalla tavalla kuin syväpainotela, sillä rakenteellisella muutoksella, että anilox-telassa väriä siirtäviä kuppeja on koko telan painopinnalla. Painoväri siirretään painolevyn koholla oleville pinnoille ja edelleen painonipiltä painomateriaalille kuvan 3 mukaisesti. Painolaadun kannalta on tärkeää, että painonipin puristaminen hallitaan oikein. Liian voimakkaasta puristamisesta voi aiheutua painolevyn mekaanisia muutoksia. Puristaminen tarpeellista pienemmällä voimalla näkyy rasteripisteiden vähyytenä ja värinsiirron heikentymisenä. (2, s. 76; 3, s. 9.)

Fleksopainolaite on yksinkertainen käyttää muiden menetelmien painolaitteisiin nähden ja sen käyttöönotto on helppoa. Sillä voidaan painaa monille erityyillisille materiaaleille edullisesti, mutta painolaatan pehmeiden takia kuvissa joudutaan käyttämään suhteellisen harvaa rasteria. (2, s. 87–88.)

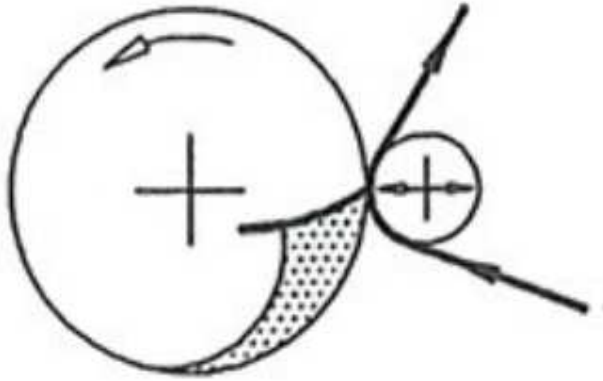


KUVA 3. *Fleksopainotekniikka (3)*

### 2.1.3 Silkkipaino

Silkkipaino on kaikkein monipuolisin painomenetelmä, koska sillä voidaan painaa mm. tarroja, tekstiilejä, elektroniikan komponentteja ja elintarvikkeita. Painaminen onnistuu myös suoraan valmiisiin tuotteisiin ja monenlaisille pinnoille. (2, s. 88.)

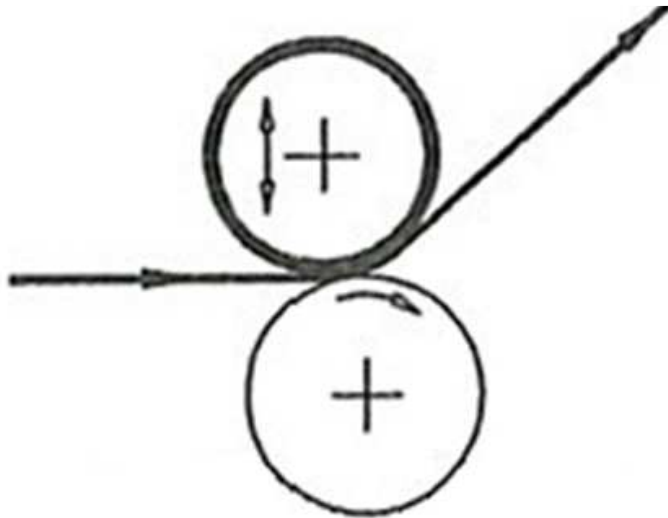
Silkkipainotekniikassa painokaavio eli sapluuna, joka sisältää painoaiheen, kiinnitetään painomustetta läpäisevään seulakankaaseen. Muste siirretään seulakankaan päälle, josta se painetaan raakelilla seulakankaan läpi painettavalle alustalle, kuten kuva 4 osoittaa. Seulakankaan tiheys, musteen juoksevuus, raakelikulma ja nopeus vaikuttavat oleellisesti painettavan materiaalin laatuun. (2, s. 90.)



*KUVA 4. Silkkipainotekniikka (3)*

#### **2.1.4 Kuumapuristus**

Kuumakouristustekniikassa painoaihe muodostetaan painosylinterin hyvin pienillä mikro- tai nanokuvioilla. Kuumapuristussylinteri ja sen vastasylinteri lämmitetään yleensä kuumennetun öljyn tai sähkön avulla. Kuumapakotuksella painettaessa painosubstraattia vasten painetaan kuumennettu sylinteri, jonka pinnalla olevilla nanokuvioilla aikaan saadaan lämmön ja paineen vaikutuksesta haluttu painokuvio kuvan 5 mukaisesti. Tekniikalla valmistetaan mm. teollisuudessa pakkausten ekologisia hologrammeja. (3.)



KUVA 5. Kuumapainatustekniikka (3)

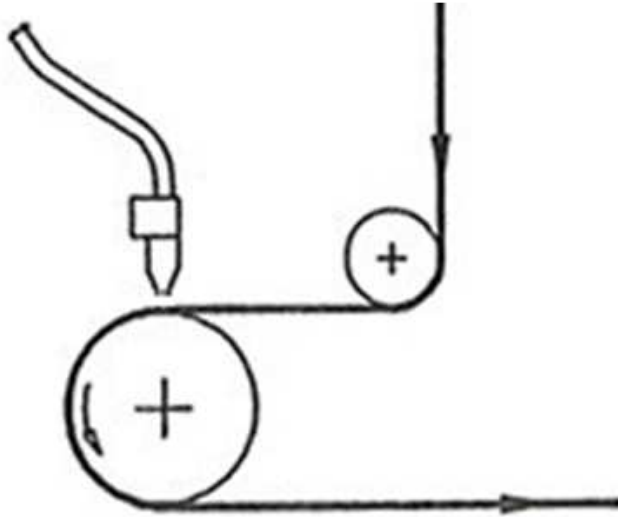
### 2.1.5 Mustesuihku

Mustesuihku- eli inkjet-tulostuksessa digitaalisessa muodossa oleva informaatio tulostetaan tietokoneen muistilta painettavalle alustalle ilman väriä siirtävää fyysistä kontaktia kuvan 6 osoittamalla tavalla. Tämä ominaisuus mahdollistaa toisenlaisen painamisen joustaville ja jopa kolmiulotteisille pinnoille. Inkjet-tulostaminen luo mahdollisuuden informaation muuttumiseen jokaisen painotapahtuman aikana, koska siinä ei käytetä painokuviota tuottavaa painolevyä. Mustesuihkulla valmistetaan esimerkiksi elintarvikealan pakkauksiin lisättäviä laatuindikaattoreita ja painettavassa älykkyydessä käytettäviä todella ohuita johdinrakenteita. (2, s. 92.)

Mustesuihkutulostus perustuu väriaineena käytettävän musteen pisaroimiseen ja kuvasignaalin avulla johtamiseen painettavalle materiaalille. Mustesuihkun tulostama muste muodostaa halutun painojäljen pisara kerrallaan.

Mustesuihkutekniikka käyttää kahta erilaista menetelmää pisaravirran muodostamiseen, jatkuvan ja epäjatkuvan pisaroituksen menetelmää. Nimensä mukaisesti jatkuvan pisaroituksen menetelmät perustuvat jatkuvaan, tasaiseen pisaravirtaan. Ylimääräiset, ei-haluttuihin paikkoihin tulostetut pisarat poikkeutetaan ohjainlevyjien avulla, jotka ovat sähköisesti varattuja, ja pisarat

ohjataan jätevärisäiliöön. Epäjatkuvan pisaroituksen menetelmienn periaatteena on väriaineen tulostaminen vain painoinformaation määräämiin pisteisiin. Lämpöenergialla saadaan muste pisaroitumaan joko elektrostaattisesti tai pietsosähkön avulla. (2, s. 98–99.)



KUVA 6. Mustesuihkutekniikka (3)

### 2.1.6 Elektrofotografia

Elektrofotografia eli lasertulostus on tällä hetkellä eniten käytetty digitaalinen tulostustekniikka mustavalko- ja väritulostuksessa. Aluksi elektrofotografiassa on muodostettava latentti eli näkymätön kuva, joka sisältää sähköisen varauskuvion fotojohteisella materiaalilla. Väriainehiukkaset, jotka ovat vastakkaismerkkisesti varautuneet kuvakohtaan varausten kanssa, tarttuvat kuvakohtiin, mistä ne siirretään joko suoraan tai siirtomedian kautta painoalustalle. Elektrofotografinen tulostaminen pystytään erittelemään viiteen eri vaiheeseen, jotka sisältävät värin siirron ja kuvan muodostamisen. (2, s. 95.)

Ennen ensimmäistä varsinaista vaihetta fotojohteella päällystetty pinta varataan sähköisesti. Varaus muodostetaan käyttämällä koronaperiaatetta. Siinä muodostetaan fotojohteen pinnalle positiivinen varauskenttä, joka muodostuu siihen lentävistä varatuista ioneista. (2, s. 95.)

Ensimmäisessä vaiheessa eli valotuksessa aikaisemmin aikaan saatua tasaista varauskuviota aletaan purkaa. Valoa saaneiden ionien varaukset purkautuvat ja syntyy latentti. Valottamisen valolähteinä käytetään yleensä laseria tai LED-valoja. (2, s. 95.)

Kehityksessä kuva muutetaan näkyväksi johtamalla latentille kuvalle värítőoneri, jonka partikkelit ovat vastakkain varattuja kuvakohdan varausten kanssa. Seuraavaksi sähkökenttää apuna käyttäen värit siirretään painoalustalle. (2, s. 97.)

Kun värinsiirto on suoritettu, poistetaan ylimääräiset värihiukkaset ja sähkövaraukset rummulta joko sähköstaattisesti tai magneettiharjoin. Puhdistettu fotojohde varataan ja kuva valotetaan uudelleen. (2, s. 97.)

## **2.2 Painomateriaalit**

Painettu älykkyys ja varsinkin elektroniset komponentit muodostuvat yleensä monikerroksellisista rakenteista. Painettavana materiaalina käytetään painomusteita ja materiaali, jolle painetaan on pohjamateriaali, painoalusta tai substraatti. Kerrokset koostuvat erilaisista painomateriaaleista ja niiden muodostamat kokonaisuudet mahdollistavat painetulle älykkyydelle halutut toiminnallisuudet. (4.)

Painettavien tuotteiden valmistuksessa tarvitaan erilaisia painovärejä, jotka kannattaa valita tuotteen ja painotarkoituksen mukaan. Esimerkiksi johtimien painamisessa käytetään hyvin johtavia painovärejä, kuten hopeapastaa, johtavuuden maksimoimiseksi. (4.)

Kelan ja kondensaattorin toimivan rakenteen aikaansaamiseksi painettavia kerroksia on useampia, esimerkiksi kaksi johdinkerrosta, joiden välissä on eristekerros. Eristekerroksessa voidaan käyttää esimerkiksi Polymeric Tight Film- tai Ultra Violet -eristemusteita. PTF-eristemusteet ovat yleisesti käytettyjä musteita painetun älykkyuden luomiseen. UV-eristemusteet taas ovat painotapahtumassa erillisellä UV-kovettimella kovetettavia musteita.



Painettavien komponenttien ominaisuuksia muokataan käyttämällä eri musteita ja muuttamalla niiden sekoitussuhteita, jolloin niihin saadaan tarkasti halutut ominaisuudet. Painettavaan vastukseen saadaan haluttu resistanssi vastuspastan musteiden sekoitussuhteita muuttamalla. Vastuspastana käytetään esimerkiksi hiilipohjaisia PTF-eristemusteita. (4; 5.)

Myös painotekniikka vaikuttaa oleellisesti painamisessa käytettäviin painomateriaaleihin. Esimerkiksi syväpainotekniikalla painettaessa käytetään yleensä väriaineita, joita ovat syväpainovärit ja tolueenipohjaiset lakat. Niissä liuotinpitoisuus nousee yleensä yli 50 prosenttiin. Silkkipainotekniikassa painovärit koostuvat useista vaikuttavista aineista: pigmentistä, sideaineesta, liuottimesta ja lisäaineista. Digitaalisissa painomenetelmissä kuten elektrofotografiassa käytetään pulverimaisia tai nestemäisiä toonereita. Pulverimaiset eli kiinteät toonerit koostuvat yleensä 2-komponenttisista sekoituksista. Niiden pigmentoidun väriaineen sekaan on lisätty erillinen kantoaine, jona toimii magnetoituva rautaoksidi. Nestemäisissä toonereissa käytetään suspensiota eli pienten pigmenttipartikkeleiden ja sähköä eristävien nesteiden seosta. (2, s. 97.)

Painettaviin materiaaleihin lukeutuvat myös painoalustat eli painotapahtumassa painovärien alusmateriaaleina toimivat materiaalit. Painoalustan valinta riippuu täysin painettavasta tuotteesta ja siinä käytettävistä painomateriaaleista. Painettua älykkyyttä painettaessa käytetään yleensä taipuisia ja kestäviä materiaaleja, kuten muovipolyesteriä. Painetun älykkyyden painaminen ennalta käsitellyille kuten päällystetyille ja kiilloitetuille pinnoille mahdollistaa usein paremman painojäljen. Painettaessa elintarvikepakkauksia tai niihin tulevia tarroja ja hologrammeja painoalustoina käytetään kartonkia tai niiden päälle tulevia pakkausmuoveja. (6.)

### 3 R-2-R-TEKNIikka

Roll-to-roll eli rullalta rullalle -tekniikka on painokoneissa käytetty tekniikka, jossa painettava alusmateriaali on ennen tuotantolinjan käynnistämistä rullalla sen aloituspisteessä. Kun tuotanto käynnistetään, rulla alkaa kelautua painokoneen läpi, jossa siihen painetaan haluttu painoaihe ja se kuivataan kelaamalla se uunien läpi. Painetussa elektroniikassa painoväreinä käytetään erilaisia musteita ja painamiseen voidaan käyttää monia eri painotekniikoita vaihdellen halutun toiminnallisuuden ja painoväriin mukaan. Rullalta rullalle-tekniikassa tärkeässä asemassa on kelausnopeus ja rullan tensio eli kelausjännite, jotka osaltaan ratkaisevat painojäljen tasaisen ja hyvän laadun. Lopulta tuotannon loppuessa rulla on kokonaan kelautunut alkuperäiseen muotoonsa tuotantolinjan päätepisteeseen. (1.)

Rullalta rullalle -tekniikan käyttäminen elektroniikan komponenttien painamiseen on vielä kehitysvaiheessa, mutta nyt on jo olemassa niin sanottuja R2R-pilot -tuotantoympäristöjä. Ne mahdollistavat elektroniikan komponenttien ja prototyyppien painamisen teollisessa mittakaavassa. Tällainen tuotantoympäristö löytyy esimerkiksi VTT:n Oulun yksiköstä, jossa on neljä erilaista R2R-painokonetta, kuten mm. NICO R2R -tyypikaasuatmosfääripainokone, ROKO-painokone, jossa on neljä painoyksikköpaikkaa, ja R2R-jälkikäsitteilykone. R2R-linjalle asennettu laserlaitteisto löytyy VTT:n Lappeenrannan toimipisteestä. (1.)

R2R-tekniikka soveltuu myös muihin valmistusprosesseihin kuin vain painamiseen. Sitä voidaan käyttää myös laserprosesseissa esimerkiksi leikkaamiseen ja sintraamiseen eli painetun painoväriin kuivattamiseen painoprosessin jälkeen. Sintrauksella voidaan siis korvata uuneilla tapahtuva kuivausprosessi. (1.)

Rullalta rullalle -tekniikan ja siinä käytettävien painomateriaalien jatkuva kehittäminen mahdollistaa tulevaisuudessa elektroniikan komponenttien painamisen pienemmillä tuotantokustannuksilla. Tuotantotehokkuus perustuu

siihen, että tuotantolinjojen ulostulojen suuruudella saadaan työosuuden suhde kustannuksista laskettua hyvin alhaiseksi. R2R-kehitystyö saattaisi myös mahdollistaa aivan uudenlaisten elektroniikan sovellusten ja innovaatioiden valmistamisen tuotantoympäristössä. (1.)

## 4 PAINETTU JOHDIN

Painettu johdin on sähköä johtavasta materiaalista painokoneilla tuotettu lankamainen johdin. Painettu johto painetaan taipuisalle painoalustalle kuten muoville, jolloin sen käyttömahdollisuudet kasvavat suhteessa elektroniikkateollisuuden kiinteisiin, piirilevyissäkin käytettäviin johtimiin. (6.)

Johdon ominaisuutta liikuttaa elektroneja määritetään konduktanssilla  $G$ , joka kuvaa johtimen kykyä johtaa virtaa. Johtimen konduktanssi on sen resistanssin käänteisarvo, eli mitä pienempi johtimen resistanssi on, sitä parempi sen konduktanssi on. (7, s. 49-50.)

### 4.1 Materiaalit

Johtimien painamisessa käytetään mahdollisimman hyvin sähköä johtavia materiaaleja, jotta johtimen resistanssi eli virranvastustuskyky saataisiin mahdollisimman alas. Hopeapasta on painoteollisuudessa eniten käytetty johtimien painomateriaali johtuen sen hyvästä virranjohtokyvystä.

Johdinmateriaalina on myös mahdollista käyttää kuparipohjaisia musteita. (6.)

### 4.2 Toimintaa kuvaavat parametrit

Toimintaa kuvaavilla parametreillä tarkoitetaan ominaisuuksia, jotka vaikuttavat painettuun johtimeen käyttötilanteessa. Niillä tarkoitetaan myös ns. painotoleranssia eli sitä, kuinka varmasti johtimien painotapahtuma pystytään toistamaan niin peräkkäisillä toistopituuksilla kuin eri rullien välilläkin. (6.)

#### 4.2.1 Resistanssi

Johtimen tehtävä on kuljettaa mahdollisimman hyvin elektroneja eli sähkövirtaa. Elektronien liikkeessa johtimessa niihin vaikuttaa kitkan tapainen vastustava voima, jota kutsutaan resistanssiksi. Sen suurennus on  $R$  ja mittayksikkö ohmi, tunnus  $\Omega$ . Mitä isompi johdon resistanssi on, sitä huonommin se kuljettaa elektroneja ja sitä matalalatautisempi se siltä osin on. Resistanssiin vaikuttaa

suoraan verrannollisesti johtimen pituus ja kääntäen verrannollisesti sen poikkipinta-ala. Mitä pidempi ja ohuempi johdin on, sitä suuremmaksi siis resistanssi muuttuu. Lisäksi resistanssiin oleellisesti vaikuttavat johdinaine ja toimintalämpötila. Kaikille johdinaineille on määritelty resistiivisyys  $\rho$  eli ominaisvastus. Painettujen kuvioiden resistiivisyyttä ilmaistaan usein neliövastuksina, jonka johtavien painovärien toimittajat kertovat painetulle ja kuivalle kerrokselle tietyille kerrospaksuuksille. Ominaisvastuksen johtimelle saa laskettua kaavalla 1. (7 s. 46; 8, s. 40; 9.)

$$\rho = R \frac{A}{l}$$

KAAVA 1

$\rho$  = resistiivisyys ( $\Omega\text{m}$ )

$R$  = resistanssi ( $\Omega$ )

$A$  = poikkipinta-ala (mm)

$l$  = johtimen pituus (cm)

#### 4.2.2 Tehonkesto

Monet asiat vaikuttavat painetun johtimen kykyyn kestää tehoa. Sekä sen painoalustan että painomusteen materiaalit ratkaisevat osaltaan sen tehonkestokyvyn. Painoalustan materiaalina R2R-prosessissa toimivat yleensä muovit, jotka kestävät hyvin kohtuullisten isojen tehojen aiheuttamat lämpötilat. Tehonkesto on vaikuttaa myös johtimen geometria eli sen pituus ja poikkipinta-ala, sillä mitä paksumpi se on, sitä parempi sen tehonkestokyky on. (6.)

#### 4.2.3 Toimintaolosuhteiden vaikutus

Painetun johtimen tulee kestää erilaisia toimintaolosuhteita ja niiden muutoksia, jotta sitä voitaisiin käyttää mahdollisimman laajasti erilaisissa sovelluksissa ja

innovaatioissa. Toimintaolosuhteet vaikuttavat suurilta osin johtimen resistanssiin ja lämpötilaan ja sitä kautta sen toimintaparametreihin.

Resistanssin muutokseen vaikuttavat oleellisesti sekä lämpötila että ilmankosteus. Lämpötilan kohotessa resistanssikin alkaa suurentua atomien ja molekyylien värähtelyn lisääntymisen vuoksi, niiden törmäillessä enemmän atomeihin. Toisaalta lämpötilan kasvaminen myös lisää vapaiden elektronien määrää atomeissa, jolloin niiden johtamiskyky paranee. Riippuu siis käytetystä aineesta, kuinka suurelta osin lämpötilan muutokset vaikuttavat resistanssiin.

(6.)

## 5 PAINOTAPAHTUMA JA PAINOPARAMETRIT

Suunnitellut komponentit painettiin Oulun VTT:n tiloissa. Painaminen toteutettiin ROKO:lla (kuva 7), jolla on mahdollista painaa syväpaino-, fleksopaino- ja silkkipainotekniikoilla. ROKO:lla maksimipainonopeus on 10 metriä minuutissa ja se sisältää laminointiyksikön. Kuivaus voidaan suorittaa ilmalla, UV-valolla tai IR-säteilyllä. Komponenttien painamiseen valittiin silkkipainotekniikka, joka mahdollisti suunniteltujen komponenttien painamisen. (4.)

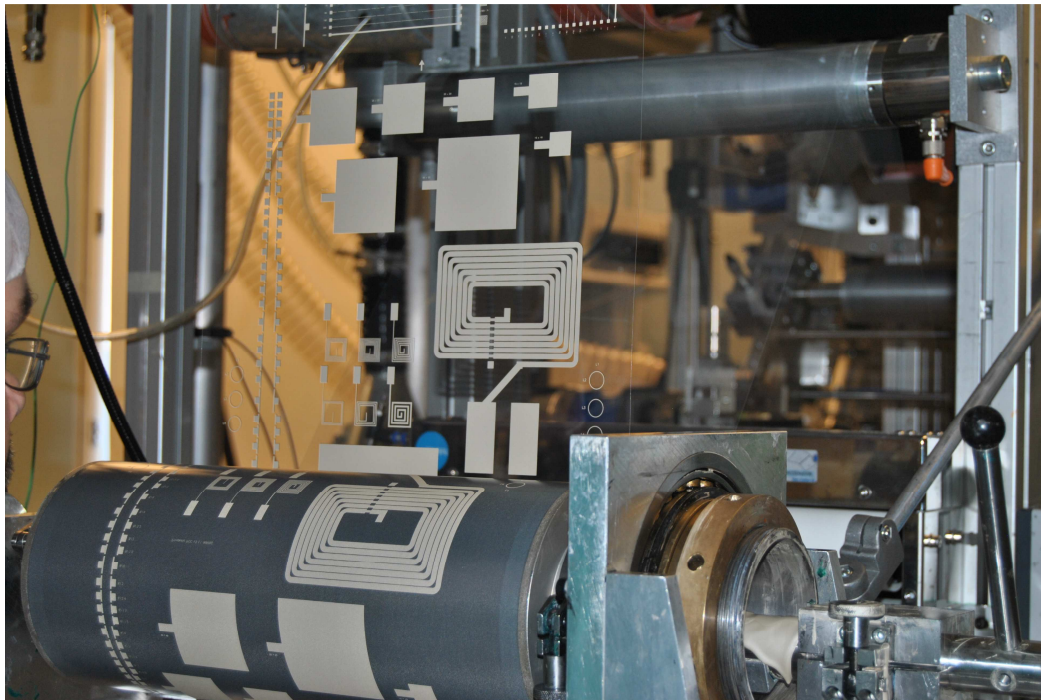


*KUVA 7. ROKO-pilot-painolinjasto*

Ennen komponenttien painamisen aloittamista tulee kartoittaa kaikki komponenteille halutut ominaisuudet. Kun komponentit on suunniteltu ja halutut ominaisuudet määritetty, valitaan painomateriaalit ja määritellään painoparametrit. Painomateriaalit valitaan niin, että komponenteille saadaan

halutut ominaisuudet. Painoparametrit valitaan painomateriaalien ja painotekniikan mukaan, jotta painojälki ja painetut komponentit olisivat mahdollisimman laadukkaita. (4.)

Painotapahtuman (kuva 8) aikaansaannoksena valmistui yhteensä 32 onnistunutta layout-kokonaisuutta, ns. toistopituutta, joissa kussakin on kaksi johdinta, eli prosessin aikana saatiin tuotettua yhteensä 64 painettua johdinta. Jokaisessa toistopituudessa on sekä painosylinterin suuntaisesti eli vaakasuuntaan että pystysuuntaan painettu johdin. (4.)



*KUVA 8. Painotapahtuma käynnissä*

## **5.1 Painomateriaalit**

Painoalustan materiaalina käytettiin Melinexin ST506:ta, joka on kirkasta ja pintakiillotettua 125 mikrometriä paksua polyesterifilmiä. Sen ominaisuudet mahdollistavat hyvin painotapahtuman, sillä se on hyvin taipuisaa ja lämpöä kestävä materiaali. Substraatti säilytti hyvin muotonsa ja kokonsa, vaikka se joutui painotapahtuman aikana kulkemaan neljän uunin läpi painomusteiden



kuivumisen takaamiseksi. Se soveltuu monien materiaalien painamiseen substraatin pintaan, kuten esimerkiksi erilaisten liuotinpohjaisten graafisten musteiden, lakkojen sekä johtavien ja eristävien musteiden. (4.)

Johdinrakenteiden painamiseen käytetään mahdollisimman hyvin sähköä johtavia materiaaleja. Johtimien painamiseen käytettiin SunChemicals CRSN2442-hopeamustetta, johon oli lisätty saman valmistajan hidastinta 503-99033 3 m%. (4.)

## **5.2 Painoparametrit**

Painonopeus vaikuttaa oleellisesti painettavan materiaalin laatuun. Silkkipainolla nopeus ei saa olla liian kova, jotta painettavuuden tarkkuus ei kärsisi. Toisaalta syväpainotekniikkaa käytettäessä liian hidas painonopeus laskee painojäljen laatua. Nopeus vaikuttaa myös siihen, kuinka kauan painetulla materiaalilla on aikaa kuivua kuivausuuneissa. Painomusteille määritetyt kuivauslämpötilat ja -ajat määräävät suurilta osin kuivausuuneissa käytetyt lämpötilat. Johtimia painettiin rullalle kaksi metriä minuutissa. Hitaalla painamisnopeudella pyrittiin saavuttamaan mahdollisimman tarkka painojälki ja riittävä kuivaus. (6.)

Painotapahtuman aikana painetut musteet kuivataan ennen niiden päätymistä takaisin rullaan painotapahtuman lopussa. Painomusteet ovat kuivattava, jottei ne tahriisi toisiaan rullaksi kelautuessaan. Myös niiden toiminnallisuus kärsisi, koska märkään musteeseen saattaa jäädä liuotinainetta. Kuivaus suoritettiin käyttäen neljää kuivausuunia, joiden lämpötilat olivat kussakin 130 celsiusastetta. (6.)

## **5.3 Geometriat**

Työssä painetun johtimen geometriset ominaisuudet ovat varsin yksinkertaiset, niin kuin johtimien yleensäkin. Johdin koostuu suorasta johtavasta langasta, jonka päissä on neliönmuotoiset suurennetut johdinalueet suoritettavien mittauksien helpottamiseksi. Painotapahtuman paksuimmat ja ainoat

onnistuneet johtimet olivat leveydeltään 1000 mikrometriä eli yhden millin. Johdinaineena käytettyä hopeapastaa ei saatu toimimaan halutulla tavalla, sillä testikuvioidin pienimmät numerot sekä lähes kaikki linjat silkkipainoseulassa 1000 mikrometriin asti olivat ummessa. Painon aikana seulaa jouduttiin aukaisemaan SunChemicalin 503-99033-hidastimella.

Johtimen lankamaisuuden takia sen geometriset ominaisuudet ovat todella yksinkertaiset, kuten kuva 9 osoittaa. Työssä suunniteltu johtimet ovat pituudeltaan 93,9893 millimetriä. Ainoastaan leveimpien johtimien painaminen onnistui, koska käytetty hopeapasta ei toiminut toivotulla tavalla painossa. Johtimet olivat leveydeltään 0,9863 millimetriä.



*KUVA 9. Johtimen periaatekuva*

## 6 MITTAUKSET

Kun itse suunniteltu johdin oli saatu painettua, sille suoritettiin testejä, jotta saataisiin mahdollisimman monipuolinen kuva sen parametreista ja toimintakyvystä eri tilanteissa. Heti painotapahtuman jälkeen mitattiin johtimien virranvastustuskyky eli resistanssi, jotta näitä alkuarvoja voitaisiin vertailla myöhemmin testattujen komponenttien kanssa. Tavoitteena oli myös selvittää, kuinka hyvin johdin kestää toimiessaan lämpöä ja tehoa. Johtimen olosuhteidenkestokykyä testattiin sen ollessa passiivisena, ja myös sen mekaanista kestävyyttä testattiin taivutustesteillä.

### 6.1 Resistanssimittaukset

Ensimmäinen mittaus, joka johtimille suoritettiin, oli niiden resistanssien mittaaminen. Resistanssit mitattiin Fluken yleismittarilla, käyttäen pistinmäisiä ja teräviä mittapäitä, jotka yhdistetty banaani johdoilla. Kuten taulukosta 1 huomataan, johtimien painaminen on onnistunut hyvin, koska resistansseissa ei ole suurempia yksittäisiä poikkeamia. Resistanssien painaminen absoluuttisesti samoihin arvoihin on mahdotonta, koska pientä varianssia esiintyy aina painotapahtuman aikana.

TAULUKKO 1. Johtimien resistanssit ennen kalanterointia

Painettu dia	Vaakataso	Pystytaso	
1	6,3	6,5	Ω
2	6,3	6,6	Ω
3	6,3	6,6	Ω
4	6,3	6,6	Ω
5	6,1	6,6	Ω
6	6,2	6,5	Ω
7	6,3	6,5	Ω
8	6,3	6,5	Ω
9	6,4	6,6	Ω
10	6,2	6,1	Ω
11	6,2	6,1	Ω
12	6,2	6,2	Ω
13	6,3	6,3	Ω
14	6,3	6,3	Ω
15	6,3	6,2	Ω
16	6,3	6,3	Ω
17	6,3	6,3	Ω
18	6,2	6,5	Ω
19	6,2	6,4	Ω
20	6,3	6,5	Ω
21	6,4	6,4	Ω
22	6,4	6,5	Ω
23	6,3	6,4	Ω
24	6,2	6,3	Ω
25	6,3	6,4	Ω
26	6,4	6,5	Ω
27	6,5	6,5	Ω
28	6,4	6,5	Ω
29	6,4	6,4	Ω
30	6,3	6,5	Ω
31	6,3	6,4	Ω
32	6,3	6,3	Ω
Keskiarvo	6,296875	6,415625	Ω

Kuten taulukko 2 osoittaa, johtimien resistanssimittauksien jälkeen laskettiin niille keskiarvot sekä toleranssit, jotka määräytyvät isoimman poikkeaman tehneestä johtimesta.

TAULUKKO 2. Johtimien ominaisuuksia ennen kalanterointia

	Min	Max	Min%	Max%	Keskiarvo	Toleranssi% +/-
Vaakataso	6,1	6,5	3,126551	3,225806	6,296875	3,225806
Pystytaso	6,1	6,6	4,91963	2,873843	6,415625	4,91963

Resistanssit mitattiin uudelleen, kun kaikki komponentit olivat kalanteroitu, jotta saataisiin selkeä kuva siitä, miten se vaikuttaa johtimien resistansseihin. Komponentit kalanteroitiin eli tiivistettiin paineen ja lämmön avulla, jotta niiden rakenteet saataisiin mahdollisimman hyviksi. Kuten taulukko 3 osoittaa, kalanteroinnilla oli selvä vaikutus johtimien resistanssien arvoihin. Resistanssit nousivat noin 1,2 ohmilla eli vajaalla 20 prosentilla molempiin suuntiin painetuilla johtimilla.

*TAULUKKO 3. Johtimien resistanssit kalanteroinnin jälkeen*

Painettu dia	Vaakataso	Pystytaso
1	6,2	6,5
2	6,8	6,6
3	7,9	6,6
4	-	-
5	7,3	7,7
6	7,7	8
7	7,4	8,2
8	7,3	8,4
9	7,7	8,2
10	7,7	8
11	7,7	7,2
12	7,7	7,8
13	7,9	7,9
14	7,9	7,9
15	7,7	7,3
16	7,8	7,8
17	7,4	7,9
18	7,3	7,4
19	7,9	7,8
20	7,8	7,8
21	7,8	7,8
22	8	7,8
23	7,6	7,6
24	7,6	7,2
25	7,6	7,7
26	7,6	7,7
27	8	7,8
28	7,8	7,7
29	8,2	7,7
30	7,7	8
31	8	7,7
32	6,9	7,7
Keskiarvo	7,609677419	7,658064516

Taulukko 4 kertoo kalanteroitujen johtimien resistanssit, keskiarvot ja toleranssit.

TAULUKKO 4. Johtimen arvoja kalanteroinnin jälkeen

	Min	Max	Min%	Max%	Keskiarvo	Toleranssi
Vaakataso	6,2	8,2	18,5248	7,7575244	7,60967742	18,5248
Pystytaso	6,5	8,4	15,12216	9,6882898	7,65806452	15,12216

## 6.2 Olosuhdetestit

Olosuhdetestit suoritettiin Especin SH-240-olosuhdetestikaapilla. Ensimmäinen testi suoritettiin IEC 60068-2-67-standardin mukaisesti, jonka tarkoituksena oli selvittää johtimien lämmön- ja kosteudensietokykyä. Testi suoritettiin vakiolämpötilalla ja -kosteudella, jotka olivat 85 °C ja 85 %RH. Testin pituus oli 730 tuntia eli vajaat 30 päivää.

Taulukko 5 osoittaa, että pystysuoraan painettujen johtimien resistanssit eivät nousseet oleellisesti testin aikana, vaikka ne altistuivat 85 asteen lämpötilalle yli 700 tunnin ajan. Johdin siis pystyy sietämään tällaisia lämpötilaolosuhteita todella hyvin ja se pystyy vielä säilyttämään johtamisominaisuutensa lähes samanlaisina. Johdinten alusmateriaalina toimiva muovi käpristyi hiukan lämmön vaikutuksesta, mutta se ei vaikuttanut johtimien toimintaan oleellisesti. Myöskään kosteus ei vaurioittanut johtimia eikä se synnyttänyt pahempia ulkoisia muutoksia muovissa.

Kuten taulukosta 5 huomataan, vaakasuoraan painetun johtimen resistanssit alkavat nousta ja kasvavat huomattavan korkeiksi testin edetessä. Nämä resistanssien mittausravot eivät ole luotettavia, sillä testin aikana on tapahtunut virhe, joka vaikuttaa mitattuihin arvoihin. Virheet syntyivät mittapään heikentyneestä kiinnityksestä testin aikana.

TAULUKKO 5. Johtimien resistanssit olosuhdetestin edetessä

Aika (tuntia)	Vaakasuoraan painettu	Pystysuoraan painettu	Resistanssi
10	6,3	6,8	Ω
25	7,2	7,7	Ω
50	19,8	8,3	Ω
100	100,7	8,5	Ω
195	133,6	8,6	Ω
335	332,8	8,6	Ω
407	373,2	8,5	Ω
503	417,2	8,5	Ω
579	304,2	8,6	Ω
700	623	8,5	Ω

Johtimille tehtiin myös niin sanottu syklistesti, jolla testattiin niiden kestävyyttä lämpötilan muuttuessa nopeasti useita kertoja. Taulukosta 6 huomataan, että lämpötilan muutokset vaikuttavat suurilta osin johtimen resistanssin arvoihin. Toisaalta testistä huomataan myös, ettei johdin testin alettua kerkeä palautua lähellekään alkuarvojaan, vaikka lämpötilat käyvät testin aikana pakkasen puolella. Johdin siis kuormittuu koko ajan enemmän ja enemmän testin edetessä, resistanssin ollessa jo 31 ohmia testin loppuvaiheessa 75 celsiusasteen lämpötilassa.

TAULUKKO 6. Johtimen resistanssit syklitestin aikana

Lämpötila	%RH	Resistanssi
25	24	8,4
50	42	8,9
75	43	12
50	53	18,2
25	41	17,7
0	0	17,2
-25	0	16,5
0	0	17,1
25	32	17,8
50	35	19
75	37	31
50	47	21,8
25	40	20,7
0	0	20,2
-25	0	19,2
0	0	19,8
25	33	20,8

### 6.3 Tehonkesto ja lämpötilan nousu käytössä

Johtimille tehtiin tehonkestotestejä, jotta saataisiin mahdollisimman tarkka tietämys niiden tehonkestokyvystä. Johtimen läpi syötettiin tasajännitettä ja -virtaa vakiosuuruudella, jotta selviäsi, kuinka korkeaa tehoa se pystyy kestämaan ja kuinka kauan. Testien aikana tarkkailtiin myös johtimen lämpötilan vaihtelua, että saataisiin tieto siitä, miten tehon nousu vaikuttaa lämpötilan muutoksiin. Tehon ja lämpötilan nousujen vaikutuksia tutkittiin niin johdinmateriaaliin kuin sen painoalustaan eli painettavaan muoviin.



Kuten taulukosta 7 huomataan, johdin kestää sille syötetyn pienen tehon hyvin eikä edes sen lämpötila nouse testin aikana oleellisesti. Johtimeen ei synny testin aikana minkäänlaisia ulkoisia vaurioita eivätkä sen toimintaomaisuudetkaan kärsineet.

*TAULUKKO 7. Johtimen lämpötilan nousu testin edetessä*

Jännite	1	V
Virta	0,118	A
Teho	0,1	W
Kosteus	55,3	%RH
Komponentin lämpötila	Aika	min
23	0	
24,6	10	
24,7	20	
24,8	30	
25	45	
25,1	60	

Johdin kestää myös hyvin yhden watin tehon, kuten taulukko 8 osoittaa. Lämpötilan nousu johtimen pinnalla testin aikana tosin alkaa jo vaikuttaa huomattavan suurelta. Vaikka lämpötila on 44 celsiusasteessa melkein tunnin ajan, sen rakenteessa ei kuitenkaan näy minkäänlaisia muutoksia. Johdin siis todennäköisesti pystyisi kestäämään tämän suuruisia tehoja huomattavan pitkiä aikoja.

*TAULUKKO 8. Johtimen lämpötilan nousu testin edetessä*

Jännite	3,05	V
Virta	0,315	A
Teho	1	W
Kosteus	55,3	%RH
Komponentin lämpötila	Aika	min
24	0	
41,5	10	
42,5	20	
44	30	

Kolmannessa tehonkestotestissä käytettiin 3,5 watin tehoa. Taulukko 9 osoittaa, että johtimen lämpötila nousee testin loppuvaiheessa korkealle. Sen takia testin

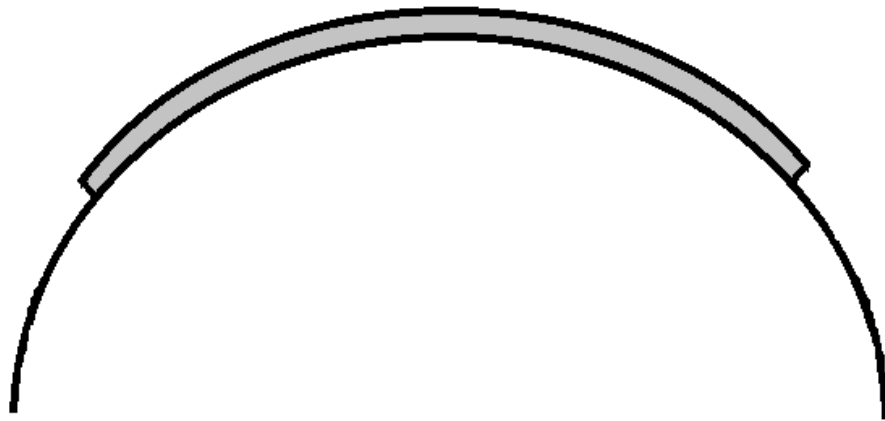
aikana painomateriaalina käytetty muovi käpristyi vähän kulmista. Silti testi pystyttiin suorittamaan normaalisti loppuun asti eikä johtimen toiminta heikentynyt testin aikana. Kun tehon aiheuttama lämpötila alkaa nousee taulukon 9 suuruiseksi, ei johtimen toimintakykyä enää pystytä takaamaan pitkiksi ajoiksi, koska substraatin pinnan muodon muutokset voivat aiheuttaa toiminnallisia muutoksia.

*TAULUKKO 9. Johtimen lämpötilannousu suurella teholla*

Jännite	5,2	V
Virta	0,656	A
Teho	3,5	W
Kosteus	55,3	%RH
Komponentin lämpötila	Aika	min
24	0	
70,4	0,5	
73	1	
76,1	2	
80,7	5	
81	10	
81,1	30	

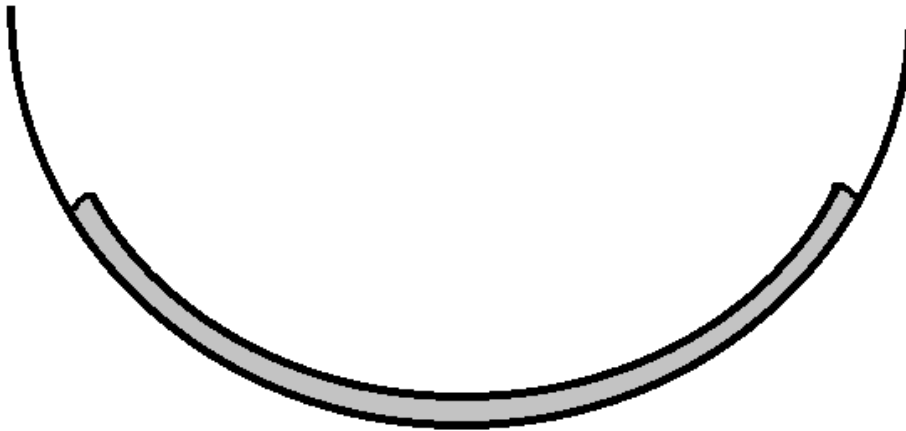
## 6.4 Taivutustestit

Taivutustestejä tekemällä tavoitteena oli saada selville, miten johtimen toimintakyky muuttuu taivutuksen aikana. Testien aikana tapahtuvien taivutuksien maksimitaivutuskulmia on vaikeaa saada selville, koska komponentti ei taivu symmetrisesti. Johtimelle tehtiin sekä kompressio- että tensiotestit. Tensiolla tarkoitetaan sitä, että johdin joutuu venyvään liikkeeseen aivan kuten painotapahtuman aikana painosylinterin venyttämänä. Johdinmateriaali on siis tensiossa, kun substraatin puolet, joissa ei ole painatusta, lähenevät toisiaan (kuva 10).



*KUVA 10. Johdin tensiossa*

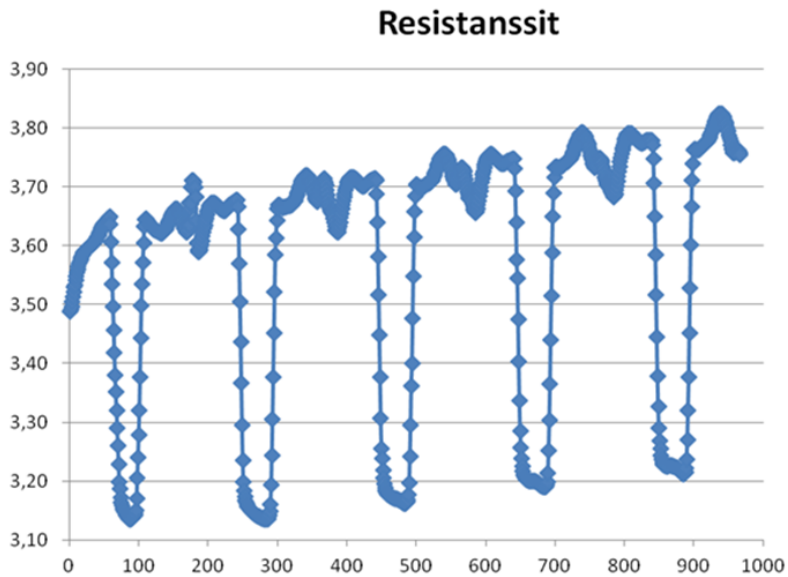
Kompressio on tension vastakohta eli johdinta niin sanotusti painetaan kasaan. Testit suoritettiin viidellä syklillä eli testeissä oli useampi taivutus ja suoristus, jotta taivuttamisen seurauksista saataisiin toistuvampi kuva. Yhdessä syklissä on noin 200 mittauspistettä ja koko testissä siis 1000 mittauspistettä. Mittauspiste on tässä tapauksessa ajankohta, jolloin testeri mittaa johtimen seuraavan resistanssin arvon. Taivutustesteri ottaa mittauspisteet tasaisin aikavälein.



*KUVA 11. Johdin kompressiossa*

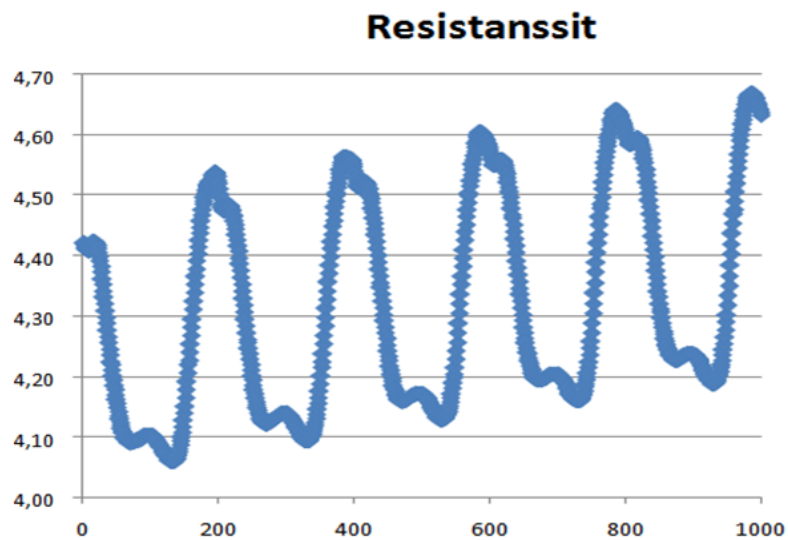
Ennen testien aloittamista johdin jouduttiin puolittamaan, koska se oli liian pitkä taivutustesterille. Tästä johtuen testien mittausravot ovat arvoiltaan noin puolet aikaisemmassa resistanssimittauksissa saaduista arvoista.

Kuten kuvasta 12 huomataan, taivutus vaikuttaa selvästi johtimen resistanssiin sen toiminnan aikana. Ennen taivutuksen aloittamista johtimen resistanssi on suurimmillaan. Kun taivuttaminen aloitetaan, johtimen tensio suurenee ja ilmenee, että resistanssi alkaa pienentymään. Tension ollessa suurimmillaan resistanssi on pienimmillään.



KUVA 12. Johtimen resistanssin muutokset tensiotaivutuksen aikana

Myös kompressiotestin tuloksista havaitaan, että johtimen resistanssi laskee taivutuksen lisääntyessä. Kuvasta 13 huomataan, että resistanssit vaihtelevat testin aikana noin puolella ohmilla, sen mukaan, missä vaiheessa testi on käynnissä.



KUVA 13. Johtimen resistanssin muutokset kompressiotaivutuksen aikana

## 7 YHTEENVETO

Insinööriyön tavoitteena oli saada määriteltyä painetun johtimen ominaisuuksia. Työssä saavutettiin sille määrätty tavoitteet kohtuullisen hyvin. Testeillä saatiin hyvin selville johtimen eri ominaisuuksia, joiden perusteella voidaan todeta, että niiden käyttömahdollisuudet painetun älykkyyden sovelluksissa ovat tulevaisuudessa olemassa. Osa testeistä suoritettiin jo olemassa olevien standardien mukaisesti, mutta osassa testeissä ongelmana oli tietämättömyys kannattavista testiasetuksista.

Ensimmäiset testeissä suoritettavat mittaukset määrittivät johdinten resistanssien arvoja ja niissä tapahtuneet muutokset kalanteroinnin seuraksena. Kalanterointi ei suhteellisesti vaikuttanut kovinkaan paljoa johdinten resistansseihin. Sen huomattiin muokkaavan johtimien resistansseja nostattavasti, sillä keskiarvallisesti johtimien resistanssit kasvoivat 1,2 ohmilla eli noin 20 prosentilla, alkuarvojen ollessa noin 6,3 ohmia.

Painetut johtimet altistettiin kovaan rääkkiin olosuhdetestejä hyväksi käyttäen. Näiden testien tarkoituksena on varmistaa, että johdinten toimintakyky ei heikkene liikaa ns. kenttäolosuhteissa, joihin ne altistuvat, jos niitä hyödynnetään tulevaisuuden sovelluksissa. Ensimmäisessä olosuhdetestissä testattiin johtimien kykyä kestää pitkäaikaista kuumuuden ja kosteuden aiheuttamaa stressiä. Ne altistuivat 85 celsiusasteen ja 85 prosentin suhteelliseen kosteuteen yli 700 tunnin ajan. Ainut oleellinen johtopäätös, jonka testistä saaduista tuloksista voidaan eritellä, on että johdinmateriaali ja substraatti kestävät sekä kuumuuden että kosteuden aiheuttamat seuraamukset ilman niiden toimintakyvyissä havaittavia selkeitä muutoksia. Johtimille suoritettiin myös toinen olosuhdetesti eli ns. syklistesti, koska sen huomattiin tuovan haluttuja nyansseja monipuolistamaan testeistä saatavia tuloksia. Testissä johtimet altistettiin nopeasti muuttuville lämpötiloille, jotka jaksotettiin toisiaan vastaaviksi sykleiksi. Testin lämpötilat vaihtelivat -25 pakkasasteen ja +75 lämpöasteen välillä rajulla nopeudella. Toisaalta tulokset olivatkin hyvin

samankaltaisia kuin edellisessä olosuhdetestissä, eli johdinmateriaalit eivät menettäneet toimintakykyänsä vaadittavia ominaisuuksia. Testin tuloksista voidaan myös huomata, että johdinten resistanssien arvot ovat suurimmillaan korkeimmissa lämpötiloissa.

Tehonkestotesteillä määritettiin johtimen kykyä kestää käytössä syntyviä tehoja ja lämpötiloja. Testin suorittamiseen haluttujen standardien ja spesifikaatioiden puuttuminen vähensi sen tieteellistä arvoa, koska testien tulokset eivät välttämättä ole vertailukelpoisia muiden tekemien tehonkestotestien kanssa. Testissä, jossa tehollisarvona käytettiin 3,5 wattia, johtimien alusmateriaalina käytetty muovi alkoi muuttua muotoaan käpristymällä. Huomattavaa oli, että vaikka käpristyminen tapahtui heti testin alussa, sen johtamisominaisuudet eivät kärsineet.

Työssä tutkittiin myös taivutuksen tuomia vaikutuksia johtimien ominaisuuksissa. Testeistä selvisi, että taivutuksilla on selvä vaikutus johtimien kykyyn johtaa virtaa. Riippuen johtimen asennosta ja taivutussuunnasta voidaan todeta, että taivutuksella oli selkeä vaikutus sen toimintaan. Johtimien resistanssit muuttuivat taivutuksien aikana molemmat puolin sen keskiarvolukemista.

Tekemäni työn tuloksista ilmenee muutamia painetun johtimen ominaisuuksia opinnäytetyön vaatimien tavoitteiden mukaisesti. Tavoitteissa siis onnistuttiin ainakin kohtuullisesti riippuen tietysti saatujen tuloksien hyödyllisyydestä ja luotettavuudesta, jotka paljastuvat mahdollisissa jatkotyöskentelyissä. Uskon, että tehdystä työstä voi tulevaisuudessa olla mahdollista hyötyä, jos ei jatkotutkimuksien arvoisesti niin ainakin vertailukohtana muille tutkimuksille. Työnaihe vastasi sekä koulutusalaani että suuntautumisvaihtoehtoani. Tätä lähtökohtaa hyödyntäen saatiin sekä opiskelun aikaiset tiedot että taidot käyttöön ja opinnäytetyö jouhevasti valmiiksi.

## LÄHTEET

1. Rullalta rullalle prosessi. 2012. Saatavissa:  
[http://www.vtt.fi/service/roll\\_to\\_roll\\_processing.jsp](http://www.vtt.fi/service/roll_to_roll_processing.jsp). Hakupäivä 25.6.2012.
2. Viluksela, Pentti – Ristimäki, Seija – Spännäri, Toni 2007. Painoviestinnän tekniikka. Opetushallinto.
3. Paakkolanvaara, Mikko. Printed intelligence pilot factory. VTT:n painotehtaan esittelymateriaali keväällä 2012.
4. Oulun VTT:n painoprosessiraportti suunnitelluille johtimille kesällä 2012.
5. Conductive inks. 2012. Saatavissa:  
<http://www.sunchemical.com/products/printed-circuit-products/products/conductive-inks>. Hakupäivä 25.6.2012.
6. Paakkolanvaara, Mikko 2012. Senior Scientist, VTT Oulun yksikkö. Opinnäytetyön ohjauskeskustelut kesällä 2012.
7. Aura, Lauri – Tonteri, Antti J. 1996. Teoreettinen sähkötekniikka. Porvoo: WSOY.
8. Ahoranta, Jukka 1995. Sähkötekniikka. Helsinki: WSOY
9. Resistivity and Conductivity. Saatavissa: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/electric/resis.html#c2>. Hakupäivä 10.9.2012.



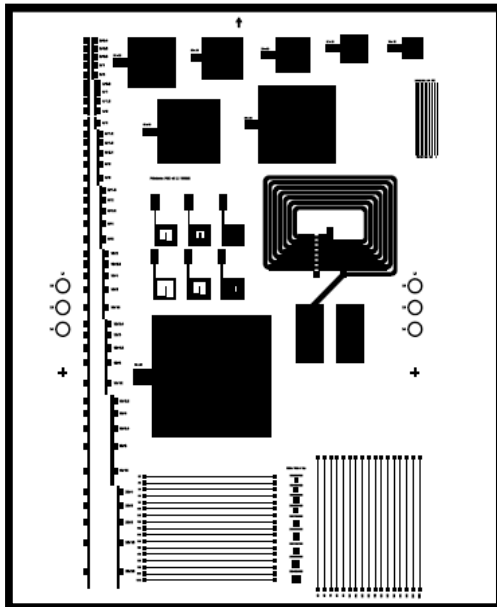
## Tietolomake

Tähän lomakkeeseen on kerätty painotapahtumassa käytetyt parametrit ja testeissä aikaan saadut tulokset.

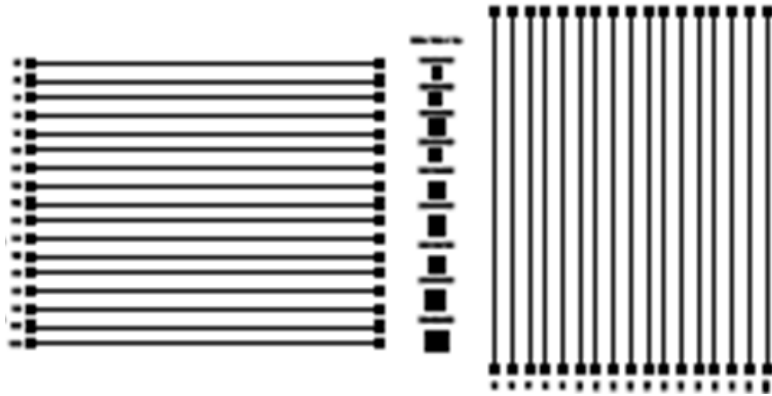
### Painoparametrit(johdin):

Painotekniikka	Rotary Screen (silkkipaino)
Painoalusta	Melinex ST506 125µm/300mm
Painomateriaali	Sunchemical CRSN2442 (hopeamuste)
	Sunchemical Hidastin 503-99033
Painonopeus	2 m/min
Kuivaus	4 uunia, kukin 130 celsiusastetta

### Suunniteltujen komponenttien layout:



*KUVA 1. Komponenttien suunniteltu layout*



*KUVA 2. Suunniteltujen johtimien layout*

Johtimen pituus: 93,9893 mm ja leveys: 0,9863 mm. Vain paksuimmat johtimet onnistuivat painotapahtuman aikana.

**Testien tulokset:***Taulukko 1. Johtimien resistanssit ennen kalanterointia*

Painettu	Vaakataso	Pystytaso	
1	6,3	6,5	Ω
2	6,3	6,6	Ω
3	6,3	6,6	Ω
4	6,3	6,6	Ω
5	6,1	6,6	Ω
6	6,2	6,5	Ω
7	6,3	6,5	Ω
8	6,3	6,5	Ω
9	6,4	6,6	Ω
10	6,2	6,1	Ω
11	6,2	6,1	Ω
12	6,2	6,2	Ω
13	6,3	6,3	Ω
14	6,3	6,3	Ω
15	6,3	6,2	Ω
16	6,3	6,3	Ω
17	6,3	6,3	Ω
18	6,2	6,5	Ω
19	6,2	6,4	Ω
20	6,3	6,5	Ω
21	6,4	6,4	Ω
22	6,4	6,5	Ω
23	6,3	6,4	Ω
24	6,2	6,3	Ω
25	6,3	6,4	Ω
26	6,4	6,5	Ω
27	6,5	6,5	Ω
28	6,4	6,5	Ω
29	6,4	6,4	Ω
30	6,3	6,5	Ω
31	6,3	6,4	Ω
32	6,3	6,3	Ω
Keskiarvo	6,296875	6,415625	Ω

*Taulukko 2. Johtimien arvoja ennen kalanterointia*

	Min	Max	Min%	Max%	Keskiarvo	Toleranssi
Vaaka	6,1	6,5	3,126551	3,2258065	6,296875	3,225806
Pysty	6,1	6,6	4,91963	2,8738432	6,415625	4,91963

Taulukko 3. Johtimien resistanssit kalanteroinnin jälkeen

Painettu	Vaakataso	Pystytaso
1	6,2	6,5
2	6,8	6,6
3	7,9	6,6
4	-	-
5	7,3	7,7
6	7,7	8
7	7,4	8,2
8	7,3	8,4
9	7,7	8,2
10	7,7	8
11	7,7	7,2
12	7,7	7,8
13	7,9	7,9
14	7,9	7,9
15	7,7	7,3
16	7,8	7,8
17	7,4	7,9
18	7,3	7,4
19	7,9	7,8
20	7,8	7,8
21	7,8	7,8
22	8	7,8
23	7,6	7,6
24	7,6	7,2
25	7,6	7,7
26	7,6	7,7
27	8	7,8
28	7,8	7,7
29	8,2	7,7
30	7,7	8
31	8	7,7
32	6,9	7,7
Keskiarvo	7,609677419	7,658064516

Taulukko 4. Johtimien arvoja kalanteroinnin jälkeen

	Min	Max	Min%	Max%	Keskiarvo	Toleranssi
Vaaka	6,2	8,2	18,5248	7,7575244	7,60967742	18,5248
Pysty	6,5	8,4	15,12216	9,6882898	7,65806452	15,12216

IEC 60068-2-67 standardin mukainen olosuhdetesti:

*Taulukko 5. Johtimien resistanssit olosuhdetestin edetessä*

Aika(tuntia)	vaakasuoraan painettu	pystysuoraan painettu	Resistanssi
10	6,3	6,8	Ω
25	7,2	7,7	Ω
50	19,8	8,3	Ω
100	100,7	8,5	Ω
195	133,6	8,6	Ω
335	332,8	8,6	Ω
407	373,2	8,5	Ω
503	417,2	8,5	Ω
579	304,2	8,6	Ω
700	623	8,5	Ω

Syklitesti:

*Taulukko 6. Resistanssit syklitestin aikana*

Lämpötila	%RH	Resistanssi
25	24	8,4
50	42	8,9
75	43	12
50	53	18,2
25	41	17,7
0	0	17,2
-25	0	16,5
0	0	17,1
25	32	17,8
50	35	19
75	37	31
50	47	21,8
25	40	20,7
0	0	20,2
-25	0	19,2
0	0	19,8
25	33	20,8

Tehonkestotestit:

*Taulukko 7. Johtimen lämpötilannousu testin edetessä*

Jännite	1	V
Virta	0,118	A
Teho	0,1	W
Kosteus	55,3	%RH
Komponentin lämpötila	Aika	min
23	0	
24,6	10	
24,7	20	
24,8	30	
25	45	
25,1	60	

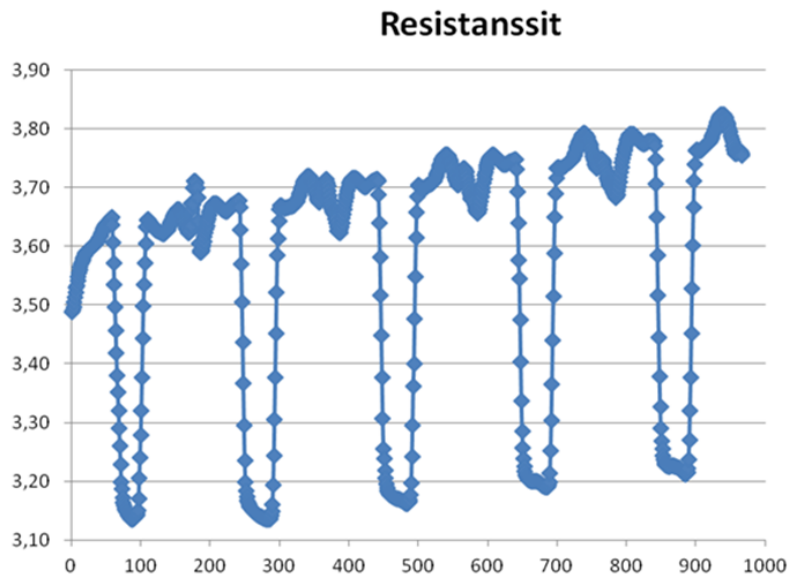
*Taulukko 8. Johtimen lämpötilannousu isomalla teholla testin edetessä*

Jännite	3,05	V
Virta	0,315	A
Teho	1	W
Kosteus	55,3	%RH
Komponentin lämpötila	Aika	min
24	0	
41,5	10	
42,5	20	
44	30	

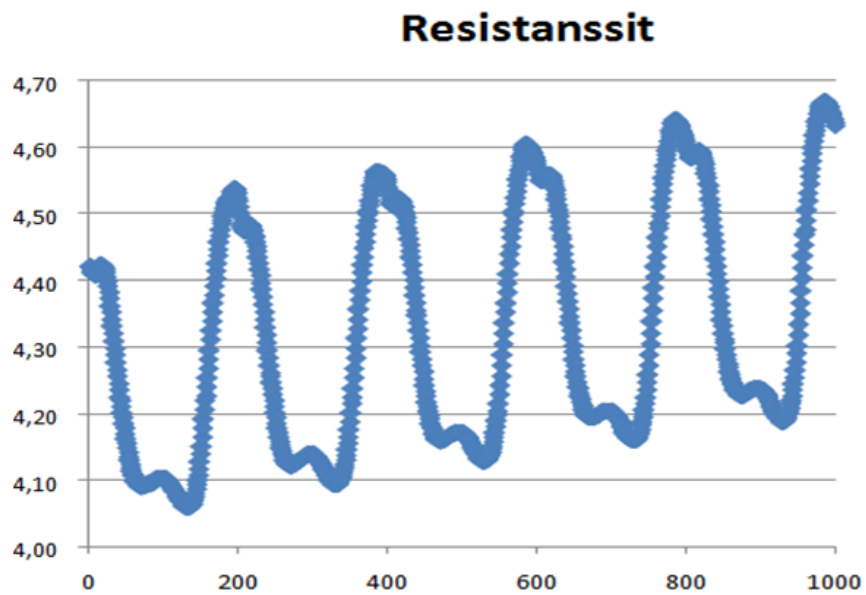
*Taulukko 9. Johtimen lämpötilannousu suurella teholla*

Jännite	5,2	V
Virta	0,656	A
Teho	3,5	W
Kosteus	55,3	%RH
Komponentin lämpötila	Aika	min
24	0	
70,4	0,5	
73	1	
76,1	2	
80,7	5	
81	10	
81,1	30	

Taivutustestit:



*KUVA 3. Resistanssit tensiotaivutuksen aikana*



*KUVA 4. Resistanssit kompressiotestin aikana*