

Janne Pihlajamäki

## **Tuotekehitysprojekti: 3D-tulostin**

Opinnäytetyö

Syksy 2011

Tekniikan yksikkö

Tietotekniikan koulutusohjelma



SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

## Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Koulutusohjelma: Tietotekniikan koulutusohjelma

Suuntautumisvaihtoehto: Sulautetut järjestelmät

Tekijä: Pihlajamäki, Janne

Työn nimi: Tuotekehitysprojekti: 3D-tulostin

Ohjaaja: Palomäki, Heikki

Vuosi: 2011

Sivumäärä: 58

Liitteiden lukumäärä: 13

---

Opinnäytetyössä tutustuttiin 3D-tulostamisen teknologiaan. Työssä käytiin läpi 3D-tulostimesta tehty tuotekehitysprojekti. Sen lisäksi esiteltiin yleisellä tasolla tuotekehitysprosessi ja syntyneiden tulosten mahdollisia suojausmenetelmiä.

Tavoitteena tässä työssä oli kehittää markkinoilta jo löytyvää kotitulostin-tasoista 3D-laiteteknologiaa lähemmäksi ammattilaistason ratkaisua. Tavoitteeseen pyrittiin keskittymällä parantamaan laitteella saavutettavaa tulostustarkkuutta ja -nopeutta sekä lisäksi pyrittiin yksinkertaistamaan 3D-tulostimen konstruktiivista rakennetta.

Tuotekehitysprojektin tulokset olivat lupaavia. Työssä onnistuttiin merkittävästi yksinkertaistamaan 3D-tulostimen rakennetta ja teknisiä ratkaisuja. Uusi rakenne ja siihen suunnitellut tekniset ratkaisut parantavat tulostusjälkeä ja -nopeutta sekä helpottavat 3D-tulostimen kokoonpanoa.

Avainsanat: 3D-tulostin, tuotekehitys, piirilevysuunnittelu, mekaniikkasuunnittelu

SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## **Thesis abstract**

Faculty: School of Technology

Degree programme: Information Technology

Specialisation: Embedded systems

Author: Pihlajamäki, Janne

Title of the thesis: Product development project: 3D printer

Supervisor: Palomäki, Heikki

Year: 2011

Number of pages: 58

Number of appendices: 13

---

The purpose of this thesis was to become familiarized with 3D printer technology. The thesis consists of 3D printer development project and also the development project process and result protection methods were presented.

The aim of this project was to improve the performance of already existing amateur 3D printer technology closer to professional printer technology. The main focus to achieve the goal was on major features, printing speed and quality. In addition, developing was done to simplify manufacturability.

The results of the development project were promising. The work succeeded in simplifying the structure of the 3D printer significantly. The new structure along with the other improvements gives better printing quality, speed and simplifies the 3D printer assembly process.

Keywords: 3D printer, product development project, PCB design, mechanics design

# SISÄLTÖ

Opinnäytetyön tiivistelmä.....	2
Thesis abstract.....	3
SISÄLTÖ .....	4
Kuva- ja taulukkoluetelo .....	6
Käytetyt termit ja lyhenteet .....	8
1 JOHDANTO .....	9
2 3D-TULOSTIN .....	11
2.1 Mikä on 3D-tulostin? .....	11
2.2 3D-tulostimen osakokoonpanot ja kustannukset.....	13
2.2.1 Osakokoonpanojen esittely .....	13
2.2.2 Runkorakenteen merkitys .....	13
2.2.3 Mekaaniset komponentit .....	13
2.2.4 Muovipursottimen toiminta .....	14
2.2.5 Lämmitettävän tulostuspöydän merkitys .....	14
2.2.6 3D-tulostimen elektroniikka .....	15
2.2.7 Tulostuskustannukset .....	16
3 TUOTEKEHITYSPROSESSI .....	17
3.1 Esittely .....	17
3.2 Tuotekehityksen työvaiheet.....	18
3.3 Tuotekehitystyön tulosten suojaaminen .....	19
3.3.1 Suojauksen merkitys.....	19
3.3.2 Patentti.....	20
3.3.3 Hyödyllisyysmalli.....	20
3.3.4 Mallisuoja .....	21
3.3.5 Tavaramerkkisuoja.....	21
3.3.6 Mahdolliset suojausmenetelmät kehitettyyn 3D-tulostimeen.....	22
4 TUOTEKEHITYSPROJEKTI: 3D-TULOSTIN .....	23
4.1 Tuotekehityksen lähtökohdat ja käynnistäminen .....	23
4.1.1 Runkorakenteen tavoitteet .....	25
4.1.2 Muovipursottimen tavoitteet .....	25

4.1.3	Lämmitettävän tulostuspöydän tavoitteet .....	26
4.1.4	Lineaarijohteet .....	27
4.1.5	Askelmoottori ja voimansiirto .....	28
4.1.6	Elektroniikka ja sen ominaisuudet.....	29
4.2	Luonnostelu- ja kehittelyvaihe .....	31
4.2.1	Runkorakenne ja mekaniikka .....	31
4.2.2	Muovipursotin.....	34
4.2.3	Lämmitetty tulostuspöytä .....	34
4.2.4	Elektroniikka.....	36
4.2.5	Elektroniikan laiteohjelmisto.....	42
4.3	Viimeistelyvaihe .....	43
4.3.1	Suunnitellut komponentit.....	44
4.3.2	Komponenttien hankinta .....	46
5	PROTOVAIHE .....	47
5.1	Runkorakenteen kokoonpano ja testaus.....	47
5.2	Elektroniikan kokoonpano .....	51
5.3	Protovaiheen hyöty .....	53
6	TULOKSET JA YHTEENVETO .....	54
	LÄHTEET .....	57
	LIITTEET .....	59

## Kuva- ja taulukkoluetelo

Kuva 1. Muste ja paperi mahdollistavat ainoastaan 2D-tulostamisen (Floyd Kelly & Hood-Daniel 2011).....	11
Kuva 2. Muovi tulostusmateriaalina mahdollistaa kolmannen ulottuvuuden (Floyd Kelly & Hood-Daniel 2011).....	12
Kuva 3. STL-tiedostosta luotu G-koodi visuaalisessa formaatissa.....	16
Kuva 4. Esimerkkikappaleen hinta n. 0,33 €. Tulostusaika on n. 17 min. ....	16
Kuva 5. Luonnostelun työvaiheet (Jokinen, 1987). ....	18
Kuva 6: Projektin tavoitteet. ....	24
Kuva 7: Projektin tavoiteaikataulu.....	24
Kuva 8. RepRap Mendel -rakennussarjan runkorakenne. ....	25
Kuva 9. Muovipursottimen rakenne (RepRap 2011). ....	26
Kuva 10. Nichrome-vastuslangan kiinnitys tulostuspöytään. (RepRap 2011). ....	27
Kuva 11. RepRap Mendelin lineaarijohteet.....	28
Kuva 12. X-akselin voimansiirto (RepRap 2011).....	29
Kuva 13. Generation 6 piirilevykortti (Mendel-parts, 2011) ....	30
Kuva 14. Luonnostellut versiovaihtoehdot. ....	32
Kuva 15. Lineaarijohteiden vaihtoehdot (Hiwin & Igus, 2011).....	32
Kuva 16. Komponenttien sijoittelua.....	33
Kuva 17: Mikrokontrollerin kytkentäkaavio.....	38
Kuva 18. A4988 kytkentäkaavio (Pololu 2011).....	38
Kuva 19. Askelmoottorin kelat (Stepperworld, 2011). ....	40
Kuva 20: Rajakytkin. (Futurlec, 2011.).....	42
Kuva 21. Laitteohjelmiston lohko-kaavio.....	43
Kuva 22. Kehitetyn tulostimen 3D-malli. ....	44
Kuva 23. Ensimmäinen elektroniikkavaihtoehto, versio 0.1. ....	45
Kuva 24: Toinen elektroniikkavaihtoehto, versio 0.2. ....	45
Kuva 25. Runkorakenteen kokoonpano.....	48
Kuva 26. Lämmitettävän tulostuspöydän lämmityselementti.....	49
Kuva 27. 3D-tulostimen prototyyppi valmiina testeihin.....	49
Kuva 28. Ensimmäinen tulostus kehitetyn 3D-tulostimen prototyyppillä. ....	50
Kuva 29. Ensimmäinen piirilevyversio valmiina komponenttien käsiladontaan. ....	51

Kuva 30. Piirilevyn toiminnan testailua.....	51
Kuva 31: Projektin tavoiteaikataulu. ....	56
Kuva 32: Projektin aikataulun toteuma.....	56
Taulukko 1. Elektroniikan tavoitetaulukko .....	36
Taulukko 2. Mikroaskelluksen tarkkuuden valinta (Pololu, 2011).....	39
Taulukko 3: Tuotekehitysprojektin tavoitteet ja tulokset. ....	55

## Käytetyt termit ja lyhenteet

<b>LCD</b>	Liquid crystal display, nestekidenäyttö.
<b>PLA</b>	Polylactide (PLA), polylaktidi-muoviseos.
<b>PTFE</b>	Polytetrafluorieteeni, teflon-muoviseos.
<b>USB</b>	Universal serial bus, tietokoneen sarjaväyläarkkitehtuuri.
<b>I/O</b>	Mikrokontrollerin tulo ja lähtö, input ja output.
<b>A/D</b>	Analogia-digitaalimuunnin. Pystytään muuttamaan esimerkiksi jännitteen arvo digitaaliseksi luvuksi.
<b>NTC</b>	Negative temperature coefficient, negatiivisen lämpötilakertoimen omaava termistori.
<b>COM</b>	Communication port, yleinen sarjaliikenneportti lisälaitteiden kytkemiseen tietokoneeseen.



# 1 JOHDANTO

Työn aihevalinta pohjautuu henkilökohtaisiin havaintoihin siitä, että aiemmin piirustuksina tulostetut suunnitelmat tulostetaan tulevaisuudessa valmiina esineenä 3D-tulostimen avulla. Uskoakseni 3D-tulostimet yleistyvät jo lähivuosina. Niitä tulevat käyttämään harrastelijat sekä ammattilaiset eritasoisissa suunnittelutehtävissä. 3D-tulostimet tuovat suunnitteluprosessiin käsin kosketeltavaa konkretiaa. Työssä kannustimena toimi henkilökohtainen halu oppia, kehittää ja testata uudenlaista 3D-tulostusteknologiaa.

Tavoitteena tuotekehitystyössä oli kehittää markkinoilta jo löytyvää edulliseen hintaluokkaan kuuluvaa kotitulostin-tasoista laiteteknologiaa lähemmäksi markkinoilta löytyviä hintavia ammattilaistason ratkaisuja. Tavoitteeseen pyrittiin keskittymällä parantamaan laitteella saavutettavaa tulostustarkkuutta ja -nopeutta sekä yksinkertaistamalla tulostimen konstruktiivista rakennetta.

Tuotekehitystyö käynnistettiin kotitulostin-tasoisien 3D-tulostimen rakennussarjan hankkimisella. Rakennussarjan kokoonpanon ja testauksen aikana tehtiin havaintoja, joiden pohjalta asetettiin tavoitteet kehitettävälle 3D-tulostimelle. Luonnostelu- ja suunnitteluvaiheessa tavoitteisiin pyrittiin etsimällä vaihtoehtoja runkorakenteen konstruktioille, mekaanisen liikkeen mahdollistaville liikekomponenteille ja tulostuspöydän lämmitykseen soveltuville lämmityselementeille. Työn keskeinen osa oli kuitenkin ohjauselektronikan suunnittelu ja toteutus. Ohjauselektronikasta suunniteltiin kaksi erilaista perusratkaisua. Laajempi versio, joka oli ominaisuuksiltaan monipuolisempi, mutta edellytti laiteohjelmistoon mikrokontrollerin ohjaamiseen vaadittavan koko koodikirjaston lisäämistä. Suppeammassa versiossa ominaisuuksia oli noin 20 % vähemmän, mutta versio oli laiteohjelmiston kanssa suoraan yhteensopiva.

Edellä olevista vaihtoehdoista valittiin lupaavimmat ratkaisut ja 3D-tulostimesta rakennettiin prototyyppi. Sitä testattiin käytännössä ja todettiin tulostimen hyvä toimivuus sekä vielä muutoksia edellyttävät kohdat.

Tuotekehitystyön tekemiseen käytettiin aikaa kuusi kuukautta ja noin 1120 työtuntia. Rakennussarjan sekä kehitetyn 3D-tulostimen komponenttihankintoihin käytettiin rahaa yhteensä hieman yli 2000€.

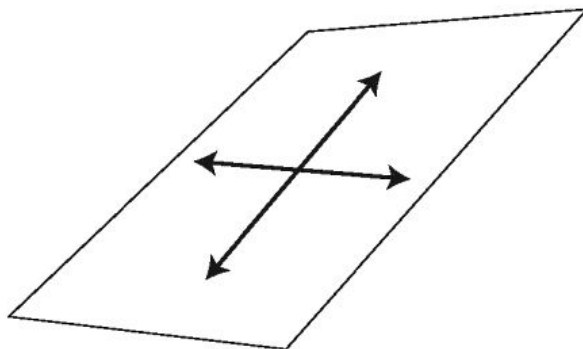
Työn alussa esitellään 3D-tulostamisen tekniikka ja tuotekehitysprosessi. Tämän jälkeen siirrytään tarkastelemaan 3D-tulostimen tuotekehitystä, jonka jälkeen esitellään siitä valmistettu protoversio. Lopuksi käydään läpi työn tulokset ja loppuyhteenveto.

## 2 3D-TULOSTIN

### 2.1 Mikä on 3D-tulostin?

Useimmille ihmisille termi tulostin on itsestään selvyys. Se on pieni, keskikokoinen tai iso laite, jolla ihmiset tekevät kopion paperille digitaalisessa muodossa olevasta tiedostosta. Digitaalisessa muodossa voi olla esimerkiksi word-tekstitiedosto, valokuva, esite, PDF-tiedosto, Internetistä poimittu artikkeli jne. Tulostimia on eri muotoisia, kokoisia ja päätekniikat ovat mustesuihku- ja lasertulostus. (Floyd Kelly & Hood-Daniel 2011, 1.)

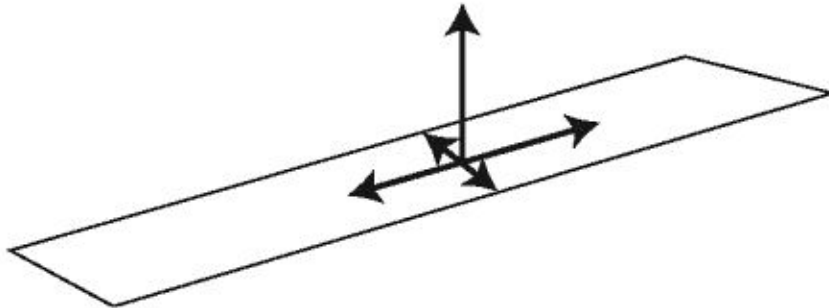
Mustesuihku- ja lasertulostin tulostavat paperille. Tällöin lopputulos on kaksiulotteinen, X- ja Y-akseli (2D). Musteen levittäminen paperille on siis rajattu neljään suuntaan: vasemmalle, oikealle, eteen ja taakse. (Floyd Kelly & Hood-Daniel 2011, 1.)



Kuva 1. Muste ja paperi mahdollistavat ainoastaan 2D-tulostamisen (Floyd Kelly & Hood-Daniel 2011).

Kun esim. mustesuihkutulostimen tuotos on 2D-muodossa, voidaan päätellä 3D-tulostimella olevan kolmas ulotteisuus, Z-akseli, jossa siirrytään Z-akselin suuntaisesti ylöspäin X- ja Y-tasolta. Kolmatta ulottuvuutta ei voida aikaansaada musteella. Musteelle tarvitaan korvaaja. Yksi mahdollinen substituutti on muovi. 3D-tulostin onkin siis laite, mikä levittää sulaa muovia kerroksittain kaikissa kolmessa ulottuvuudessa, jolloin suuntia on kuusi: vasemmalle, oikealle,

eteenpäin, taaksepäin sekä ylös ja alas. Sulaa muovia ei koskaan käytännössä levitetä alaspäin, vaan ainoastaan tasolta ylöspäin. (Floyd Kelly & Hood-Daniel 2011, 2.)



Kuva 2. Muovi tulostusmateriaalina mahdollistaa kolmannen ulottuvuuden (Floyd Kelly & Hood-Daniel 2011).

3D-tulostimella voidaan tulostaa esim. 5 cm korkeita kirjaimia, mutta se ei ole tarkoitus. 3D-tulostinta ei suinkaan käytetä tulostamaan vain kohokirjaimia, vaan sille voidaan löytää useita muita käyttökohteita. Muovin käyttö antaa mahdollisuuden tulostaa kaikenlaisia tavaroita 3D-muodossa konkreettisena esineenä, jotka normaalisti pitäisi esittää kuvana 2D-muodossa. Sillä voi esimerkiksi tulostaa varaosaksi muovisen rataan leikkirobotille tai takista tippuneen napin tilalle uuden napin. Laitteelle on myös kehittyneempää käyttöä. Kultaseppä voi tulostaa pienen medaljongin, jota voi sitten käyttää muotin tekemiseen. Keksijä voi valmistaa halvan prototyypin keksimälleen uudenmalliselle kahvalle ruuvimeisseliin. Robotiikan harrastaja pystyy tekemään tarvittavat osat kehitettyyn robottiin. (Floyd Kelly & Hood-Daniel 2011, 3.)

3D-tulostin on tietokoneohjattu laite ja se tulee kytkeä tietokoneeseen, kuten normaali tulostin. Tulostukseen tarvitaan tarkoituksenmukaiset ohjelmistot ja 3D-malli tulostettavasta esineestä. (Floyd Kelly & Hood-Daniel 2011, 4.)

## **2.2 3D-tulostimen osakokoonpanot ja kustannukset**

Tässä osiossa esitetään 3D-tulostimen osakokoonpanot sekä niiden merkitys ja toiminta. Lopuksi esitetään esimerkki tulostuskustannuksista.

### **2.2.1 Osakokoonpanojen esittely**

3D-tulostimen rakenne koostuu seuraavista osakokoonpanoista: runkorakenne, mekaaniset liikkeet mahdollistavat laitekomponentit, kuumennettava muovipursoitin, lämmitettävä tulostuspöytä sekä em. liikkeitä ja lämpötiloja ohjaava ja säätävä elektroniikka.

CNC on lyhennetty englanninkielisistä sanoista ”computerized numerical control”, joka tarkoittaa että laitetta ohjataan tietokoneen avulla numeerisesti (Pikkarainen 1999, 8).

### **2.2.2 Runkorakenteen merkitys**

Runkorakenteen tehtävä on jäykistää rakennelma, vaientaa mekaanisesta liikkeestä johtuvaa värinää, sekä antaa laitteelle ulkomuoto ja suojakuori. Jotta laitteen tulostustarkkuus olisi hyvä, ja laitteen värähtelyt saataisiin minimoitua, tulee runkorakenteen olla jämäkkä (Pikkarainen 1999, 37).

### **2.2.3 Mekaaniset komponentit**

Kuularuuvin ominaisuus on muuntaa pyörivä liike lineaariseksi liikkeeksi. Kuularuuvilla on muutamia etuja verrattuna trapetsiruuviin tai kierretankoon verrattuna. Kuularuuvin hyötysuhde on >90 %, kun trapetsiruuvilla se on 50-75 % ja kierretangolla vieläkin alhaisempi. Kuularuuvit ovat hinnaltaan kalliimpia, mutta kuularuuvin suorituskyky, tarkkuus ja käyttöikä on huomattavasti parempia. (Overby 2011, 41.)

Linearijohde antaa polun yhdelle, tai useammalle laakeroidulle yksikölle liikkua sitä pitkin (Overby 2011, 23). Linearijohdetta käytetään yhdessä jonkin mekaanisen liikkeen antavan komponentin kanssa. Esimerkiksi kuularuuvien tai hammashinan kanssa. Tämä yhdistelmä mahdollistaa mekaanisen liikkeen X-, Y- ja Z-akseleille.

Hammashihnaa käytetään silloin kun tasaista liike-energiaa pitää pystyä siirtämään pitkälle matkalle. Hammashihna on myös virhesietokykyisempi kohdistusvirheiden suhteen. Hammasratas kiinnitetään moottorin pyörivään akseliin, jolloin moottori pyörittää hammasratasta. (Dustyn 2010, 227.) Hammashihna asetetaan hammasrattaan ympärille, jolloin ratas pyöriessään liikuttaa hihnaa. Hihnaan kiinnitetään lineaarijohteessa oleva laakeroitu yksikkö ja mekaaninen liike saadaan aikaiseksi.

#### **2.2.4 Muovipursottimen toiminta**

Muovipursotin tekee tulostimesta varsinaisen 3D-tulostimen. Muovipursotin on 3D-tulostimen toiminnan ydin. Muovipursotin koostuu osista, joiden avulla muovinauha voidaan sulattaa ja pursottaa pienen suuttimen kautta tarkasti määrättyyn kohtaan tulostuspöydälle. Paikka määräytyy reaaliaikaisesti X-, Y- ja Z-akselien liikkuaessa. (Floyd Kelly & Hood-Daniel 2011, 239.)

PLA-muovinauhaa käytettäessä muovipursotin lämmitetään, jolloin muovi sulaa ja se pystytään pursottamaan pienen suuttimen läpi. Muovipursottimen lämpötilaa mitataan jatkuvasti lämpötila-anturilla ja sen kautta välittyy tieto mikrokontrollerille. Mikrokontrollerilla voidaan ohjata lämmitystä. Lämpötilan säätö on jatkuvaa ja oikea lämpötila on edellytys tarkalle tulostusjäljelle. PLA-muovinauhan sulamislämpötila on  $210\text{ °C} \pm 8\text{ °C}$  (Natureworks LLC, 2011).

#### **2.2.5 Lämmitettävän tulostuspöydän merkitys**

Lämmitettävä tulostuspöytä auttaa välttämään tulostettavan kappaleen mahdollisen vääntymän. Se tasoittaa lämpötilaeroja kuuman muovipursotteen ja

viileämmän tulostuspöydän välillä. Alumiinisen tulostuspöydän pinta on päällystettävä esim. lämmönkestävällä Kapton-teippauksella. Pursotettu kuuma muovi tarttuu siihen hyvin, eikä liiku tulostuksen aikana. Kun tulostus on valmis, kappale jäähdytetään ja se voidaan irrottaa helposti tulostuspöydästä. Tulostuspöydän lämpötilaksi pyritään saamaan PLA-muovia käytettäessä n. 55 °C - 65 °C . Tulostuspöydän lämmityselementtinä voi toimia vastuslanka, lämpövastus tai vaikkapa silitysrauta. (RepRap, 2011.)

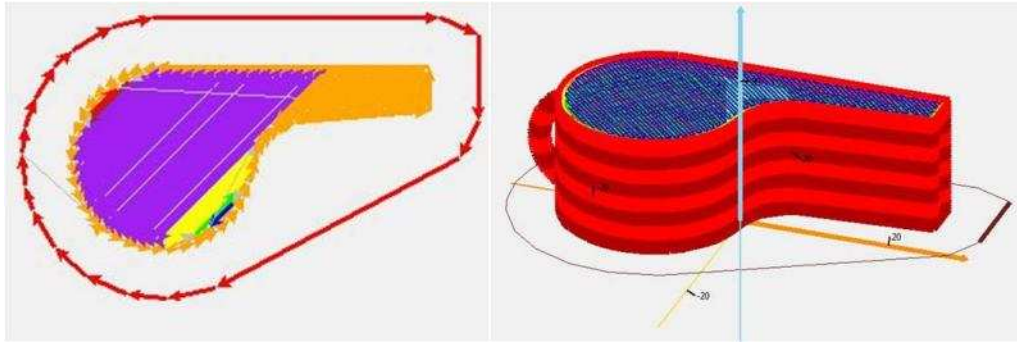
### **2.2.6 3D-tulostimen elektroniikka**

3D-tulostin vaatii fyysisen rakenteen lisäksi elektroniikkaa. Elektroniikan tehtävä on ohjata moottoreita, muovipursotinta, lämmitettävää tulostuspöytää, vastaanottaa G-koodi, sekä hoitaa monia muita ominaisuuksia 3D-tulostimessa. (Floyd Kelly & Hood-Daniel 2011, 285.)

Elektroniikka ohjaa askelmoottoreita, jonka ohjauskielenä toimii G-koodi. 3D-tulostin on siis CNC-ohjattu. G-koodi on kieli, jota CNC-kone ymmärtää. G-koodi antaa koneen ymmärtämät käskyt akselien liikuttamiseen (Alain, 80).

Tulostettava 3D-malli tallennetaan STL-formaattiin. STL-formaatti on tiedostomuoto, jossa 3D-malli on viipaloitu Z-akselin suuntaisesti. STL-formaatista voidaan sen jälkeen muodostaa G-koodi. Viipalointi tehdään, jotta saadaan kappaleen muoto hahmotettua jokaisessa kappaleen kerroksessa . (Mazumder & Steen 2010, 353.)

3D-tulostin valmistaa kappaleen kerroksittain, joten STL-tiedoston jokaisesta paloittelusta kerroksesta muodostetaan G-koodi (LIITE 1), jonka mukaan 3D-tulostin toimii. Tulostettaessa kappaleen kerroksen korkeudeksi määritellään yleensä 0,4 mm. Eli 8 cm koruinen kappale sisältää yhteensä 200 kerrosta. Jokainen kerros saa erikseen omat liikeratansa, jotka määräytyvät STL-tiedoston pohjalta luodusta G-koodista.



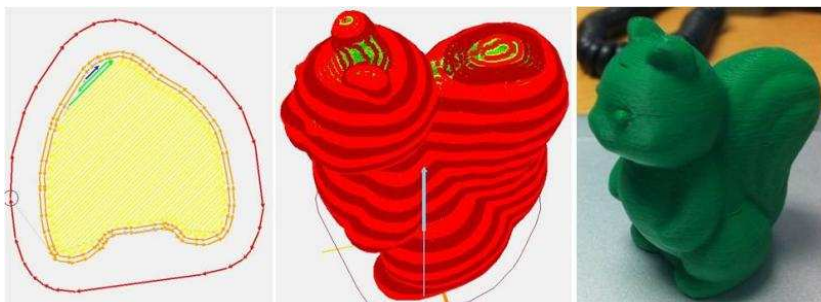
Kuva 3. STL-tiedostosta luotu G-koodi visuaalisessa formaatissa.

### 2.2.7 Tulostuskustannukset

PLA muovinauhan hinta on edullinen. Muovinauhaa myydään yleensä rullana. Esimerkiksi Orbi-Techin tarjoama PLA-muovinauharulla, jossa muovinauhan pituus on >110 m, paksuus 3 mm ja painaa n. 750 g maksaa 23,90 €. (Orbi-Tech, 2011.)

Tässä esimerkissä lasketaan kuvan 4 mallikappaleen valmistuskustannukset. Kappaleen yhden kerroksen korkeus on 0,4 mm. Kappaleessa on 137 kerrosta eli sen korkeus on  $137 * 0,4 \text{ mm} = 54,8 \text{ mm}$ . Esimerkissä lasketaan hinta ainoastaan raaka-aineelle.

G-koodin luontiohjelman mukaan kappaleen tekemiseen kuluu 11,1 g muovinauhaa. Muovinauhan hinta grammaa kohti on n. 0,03 € ( $23,90 \text{ €} / 750 \text{ g} = 0,032 \text{ €} / \text{g}$ ). Kappaleen hinnaksi tulee siis  $11,1 \text{ g} * 0,03 \text{ €/g} = 0,33 \text{ €}$ . Tulostusaika on n. 17 minuuttia. G-koodin luomiseen ja sen pohjalta tehtyjen laskujen tekemiseen käytetty ohjelma oli Skeinforge (LIITE 2).



Kuva 4. Esimerkkikappaleen hinta n. 0,33 €. Tulostusaika on n. 17 min.



## 3 TUOTEKEHITYSPROSESSI

### 3.1 Esittely

Opinnäytetyössä toteutettu tuotekehitysprojekti pyrittiin organisoimaan mahdollisimman selkeästi, jotta työn laajuudesta johtuva suuri työmäärä saataisiin tehtyä rajallisessa ajassa. Organisoinnin apuna käytettiin tuotekehitysprosessiin keskittyntä kirjallisuutta.

Onnistunut tuotekehitysprojekti on keskeinen edellytys jokaiselle yritykselle, joka pyrkii menestymään. Tuotekehityksen on oltava jatkuvaa, sillä tuotteet vanhentuvat. Vanhentuneiden tuotteiden myynti laskee ja loppuu ajan kuluessa kokonaan. (Jokinen 1987, 9.)

Tuotekehitys on prosessi, jossa pyritään kehittämään joko kokonaan uusi tuote tai parantelemaan jo olemassa olevaa tuotetta. Tällöin tuotteesta tulee teknisiltä ominaisuuksiltaan edeltäjänsä parempi ja sen valmistuskustannukset ovat pienemmät. Tuotekehityksen prosesseihin kuuluu tuoteidean löytäminen, kehityssuunnan, markkinakatsauksen ja muiden olennaisten tietojen selvittäminen tuotekehityksen käynnistämiseksi. Prosessi jatkuu tavoitteiden asettamisella, tuotteen luonnosteluvaiheella. Sen jälkeen suoritetaan tekninen suunnittelu, mukaan lukien muotoilu ja aina tuotantomenetelmien valintaan johtavat tärkeät kehitysprosessit. (Jokinen 1987, 9.)

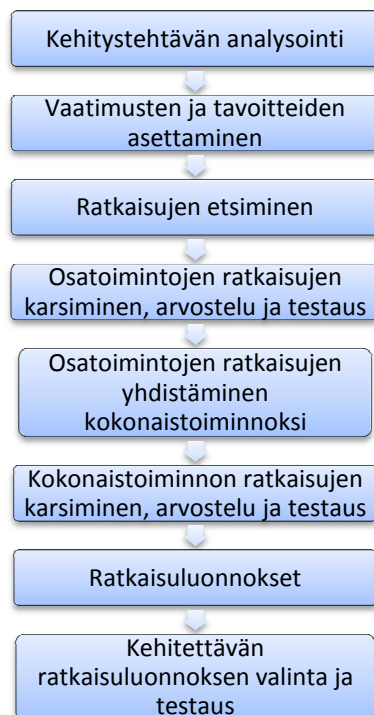
Tuotekehityksen päämääränä on saavuttaa tuotteelle asetetut tavoitteet optimaalisesti. Rajaavana tekijänä ovat usein tekniset ja taloudelliset näkökulmat. Tuotekehitysprosessin aikana ollaan tekemisissä ihmiselämän useilla eri osa-alueilla. Näitä alueita ovat mm. luonnontiedon tuntemus ja kyky käytännön luovaan työhön käytännössä. (Jokinen 1987, 9-10.)

### 3.2 Tuotekehityksen työvaiheet

Tuotekehitysprojekti jaetaan neljään eri vaiheeseen: tuotekehitysprojektin käynnistäminen, luonnostelu, tuotteen kehittelyvaihe sekä lopuksi viimeistelyvaihe. (Jokinen 1987, 14.)

Tuotekehitysprojektin käynnistämisen edellytyksenä on tunnistettava olemassa oleva tarve ja ajatus siitä, että tuote on mahdollista toteuttaa. Näiden lisäksi tarvitaan myös analysointia seuraavilta yrityksen ulkopuolisilta sektoreilta: markkinat, asiakkaat, kilpailijat sekä tekniikan kehityssuunnat. Yrityksen sisäisiltä osa-alueilta tietoa pitää kerätä mm. seuraavilta osa-alueilta: käytettävissä olevat aineelliset ja aineettomat resurssit, tuotantotekniset kysymykset, omat patentit ja lisenssit, sekä yrityksen taloudellinen tila. (Jokinen 1987, 17-20.)

Luonnosteluvaiheessa pyritään löytämään erilaisia ratkaisuvaihtoehtoja tuotteelle. Tässä vaiheessa mahdolliset tuotekuvat ovat ainoastaan suuntaa antavia. Niiden tarkoitus on selventää ratkaisuvaihtoehtoja. Luonnostelu työvaiheena on samankaltainen kuin ongelman ratkaisemisen työvaihe tai päätöksenteon työvaihe. (Jokinen 1987, 21.)



Kuva 5. Luonnostelun työvaiheet (Jokinen, 1987).

Kehittelyvaiheeseen päästään, kun on suoritettu luonnosteluvaiheen lopussa valinta, mikä tuote suunnitellaan yksityiskohtaisesti loppuun asti. Kehitetty tuote analysoidaan teknisillä ja taloudellisilla mittareilla. Mikäli tuotekehitys on olemassa olevan tuotteen parantelua, tehdään sama analysointi vanhaan tuotteeseen ja näitä tuloksia verrataan keskenään. Vertailun tarkoituksena on löytää mahdolliset tekniset ja taloudelliset heikkoudet, jotka pyritään eliminoimaan ennen siirtymistä viimeistelyvaiheeseen. Eliminointi tapahtuu ideoimalla ja luonnostelemalla vaihtoehtoiset ratkaisut. (Jokinen 1987, 89-91.)

Osana kehittelyvaihetta tai jopa luonnosteluvaihetta saatetaan kehitettävästä tuotteesta tai sen jostain komponentista tehdä prototyyppi. Prototyyppi on tuotteen yksittäiskappale, jonka pohjalta voidaan analysoida taloudellisia ja teknisiä ominaisuuksia. (Jokinen 1987, 98.)

Viimeistelyvaiheessa kehitetystä tuotteesta valmistetaan tuotantopiirustukset ym. dokumentit. Dokumenttien lisäksi päätös tehdään tuotteen raaka-aineista, tuotantoteknisistä kysymyksistä, tuotteen pintakäsittelystä ym. asioista. Viimeistelyvaiheen loppuun kehitetty tuote on valmis tuotantoon. Vaikka tuote siirtyy tuotantoon, ei tuotekehitys tuotteen osalta lopu. Tuotekehitystä jatketaan koko tuotteen elinkaaren ajan. (Jokinen 1987, 96-99.)

### **3.3 Tuotekehitystyön tulosten suojaaminen**

Tässä osiossa esitellään tuotekehitysprojektin tulosten suojaamiseen käytettävät erilaiset suojausmenetelmät. Suojausmenetelmien tunteminen on yrityksen tuotekehityksen näkökulmasta suositeltavaa.

#### **3.3.1 Suojauksen merkitys**

Tuotekehitys on resursseja kuluttava prosessi ja tuotekehitys olisi vähäisempää, jos ei olisi mahdollista suojata kehitettyä tuotetta. Lainsäädäntö on rakennettu sellaiseksi, että yksinoikeus kehitetylle tuotteelle on mahdollista saada.

Yksinoikeus estää kilpailijoita käyttämästä kehitettyä tuotetta kaupallisesti hyödykseen. (Jokinen 1987, 137.)

### **3.3.2 Patentti**

Yleinen teknisen laitteen suojausperiaate on patenttisuoja. Patenttisuoja on anottava erikseen, joten patenttisuoja ei automaattisesti ole tuotteen keksijän omistuksessa. Patentin kohteena on oltava keksintö jostain uudesta. Keksinnön tulee olla tekniikkaa edistävä. Keksinnöksi ei kuitenkaan hyväksytä tieteellisiä teorioita, matemaattisia menetelmiä eikä myös liiketoimintaa tai peliä varten kehitettyä menetelmää. (Jokinen 1987, 137-138.)

Jotta patentti voidaan myöntää, ei keksinnöstä voi olla vireillä patenttihakemusta tai patenttia. Patentin myöntämisen esteenä ovat myös keksinnöstä tehdyt julkaisut, esittelyt tai sen käyttö julkisesti. Keksinnön esitleminen yleisölle suuressa tapahtumassa, kuten messuilla, muuttaa keksinnön julkiseksi. Julkiseen keksintöön ei patentin hakeminen onnistu. (Jokinen 1987, 137-139.)

Patentin omistaja omistaa yksityisoikeuden hyväksikäyttää ammattimaisella tavalla keksintöänsä. Valmistaminen, myynti, maahantuonti, vuokraus ja käyttäminen luokitellaan hyväksikäytöksi. Poikkeuksena tähän on yksityinen hyväksikäyttö, joka mahdollistaa keksinnön käyttämisen yksityisesti sekä kokeissa, jotka koskevat itse keksintöä. Patentin voimassaoloaika on enimmillään 20 vuotta. Patentti täytyy hakea erikseen jokaiseen maahan. Patentin ensimmäisen hakuajankohdan jälkeen on hakijalla mahdollisuus yhden vuoden ajan hakea patenttisuojaa myös muihin maihin. (Jokinen 1987, 137-139.)

### **3.3.3 Hyödyllisyysmalli**

Hyödyllisyysmalli voidaan hakea keksinnölle, joka ei riitä täyttämään patentin vaatimuksia. Hyödyllisyysmalli voidaan hakea tekniseen ratkaisuun, jota on mahdollista käyttää teollisesti. Patentin tapaan hyödyllisyysmallin haun kohteena

olevan keksinnön on oltava uusi. Sen on myös erotuttava selkeästi aikaisemmista keksinnöistä. (Jokinen 1987, 144-145.)

Hyödyllisyysmalli on lähes samankaltainen kiello-oikeus, kuin patenti. Hyödyllisyysmallin omistaja voi evätä muilta keksinnön hyväksikäytön ammattimaisesti. Ammattimaiseen hyväksikäyttöön luetaan: valmistaminen, myyminen, käyttäminen ja maahantuonti. Kiello-oikeus on voimassa ainoastaan maissa, joissa hyödyllisyysmallia on anottu ja se on myönnetty. Kiello-oikeus on voimassa rajoitetun ajan, enimmillään 10 vuotta. Hyödyllisyysmallioikeus voidaan haluttaessa myydä tai siihen voidaan myöntää käyttöluva, eli lisenssi. Käyttöluvan saajan tai käyttäjän on maksettava käyttömaksuja, eli ns. rojalteja keksinnön tuottamista tuloista hyödyllisyysmallin omistajalle. (Patentti- ja rekisterihallitus, 2011).

### **3.3.4 Mallisuoja**

Mallisuojan periaate on lähes sama kuin patentilla, mutta eroavaisuutena on suojauksen kohde. Mallisuojaan suojataan esineen tai tuotteen ulkomuoto. Mallisuoja voidaan hakea yhdessä patenttisuojan kanssa. Esimerkkejä kohteista joihin mallisuoja voidaan hakea ovat: talopaketit, autot, renkaiden uraprofiilit, pakkauslaatikot, kotitalouskoneet, uistimet, polttoainebriketit tai jopa proteesit. Pääsääntönä siis on, että tavaraa on kyettävä myymään yksittäisenä tuotteena. Mallisuoja myönnetään vain tuotteen ulkomuodolle. Mikäli tuote voidaan avata, on sen sisältö myös mallisuojan piirissä. (Jokinen 1987, 145-146.)

### **3.3.5 Tavaramerkkisuoja**

Tavaramerkki voi olla yrityksen tuotteen tai palvelun tunnus, jonka tarkoitus on erottaa yrityksen omat tuotteet tai palvelut muista markkinoilla olevista tuotteista tai palveluista. Tavaramerkki on esimerkiksi kirjainyhdistelmä, sanayhdistelmä, numeroyhdistelmä tai kuvio. Tavaramerkkinä voi myös toimia tuotteen ulkokuori tai sen päällysteen erottava asu. (Jokinen 1987, 151-152.)

Tavaramerkki on muiden suojien tavoin rekisteröitävä tai vakiinnutettava. Tavaramerkki on vakiinnutettu, jos se on sille kuuluvassa elinkeino- tai kuluttajapiirissä laajalti tunnettu tietyn yrityksen tuotteiden tavaramerkkinä. Tavaramerkin rekisteröinti kattaa kymmenen vuotta kerrallaan ja se voidaan uusia kymmenen vuoden välein. (Jokinen 1987, 151–152.)

Myös iskulause voi olla tavaramerkki, esimerkiksi ”Nokia – Connecting people”. Iskulauseen rekisteröinti ei ole kuitenkaan mahdollista, vaan sellainen saa suojan ainoastaan iskulauseen vakiinnuttua. (Jokinen 1987, 152.)

### **3.3.6 Mahdolliset suojausmenetelmät kehitettyyn 3D-tulostimeen**

Patentin käyttöä rajoittaa tuotekehitysprojektissa käsitellyn teknologian yleinen tunnettuus, sekä mahdolliset korkeat kustannukset. Tuotteessa saattaa olla rakenneratkaisuja, joiden suojaamiseen hyödyllisyysmalli olisi käytännöllinen ratkaisu. Käyttöä rajaa taas mahdolliset korkeat kustannukset. Mallisuojan käyttöä rajoittaa sen helppo ohittamismahdollisuus, koska jo pienikin muutos tuhoaa suojauksen merkityksen. Helppo ja käyttökelpoisin tälläisen tuotteen suojaamisessa lienee tavaramerkki, johtuen kohtuullisista kustannuksista edellä mainittuihin suojausmuotoihin verrattuna.

## 4 TUOTEKEHITYSPROJEKTI: 3D-TULOSTIN

### 4.1 Tuotekehityksen lähtökohdat ja käynnistäminen

Tuotekehitysprojektissa läpikäyty 3D-tulostin kuuluu pikamallinnustekniikoiden ryhmään. Muita pikamallinnustekniikoita ovat mm. SLS- ja SLA-tekniikka. SLS-tekniikka, eli Selective Laser Sintering on tekniikka, jossa käytetään tehokasta laseria jäykistämään muovijauhetta massaksi. Näin saadaan muodostettua haluttu 3D-muoto. SLA-tekniikka, eli Stereolithography Apparatus on tekniikka, jossa tehokkaalla laserilla kovetetaan valoherkkää nestemäistä hartsia halutun muotoiseksi 3D-kappaleeksi. (Xpress3D, 2011).

Tuotekehitysprojektin lähtökohtana on markkinoilta löytyvä edulliseen hintaluokkaan kuuluva RepRap Mendel 3D-tulostin. Tulostin hankittiin rakennussarjana, joka sisälsi komponentit valmiiseen 3D-tulostimeen. Rakennussarjan kokoonpanon aikana havaittiin paljon parannettavaa ja kehitettävää runkorakenteessa, elektroniikassa, tulostimen toiminnan kannalta tärkeissä komponenteissa sekä osien lukumäärässä. Rakennussarja sisältää n. 1400 yksittäistä osaa.

Kehitettävän 3D-tulostimen päätavoitteet ovat tulostuslaadun parantaminen, nopeuden kasvattaminen, kokoonpanon helpottaminen sekä valmistuskustannusten alentaminen. Tulostuslaatu on riippuvainen tarkasta mekaanisesta liikkeestä sekä lämpötilojen ohjattavuudesta muovin pursottimessa ja lämmitettävässä tulostuspöydässä. Tulostuksen nopeus on riippuvainen toimivasta lämpötilojen säädöstä, laadukkaista lineaarijohteista sekä toimivasta elektroniikasta. Kokoonpanon helpottaminen vaatii runkorakenteen uudelleensuunnittelua, sekä valmiiden kaupallisten osien käyttöä, jolloin käytettävien osien lukumäärää kokoonpanossa voidaan vähentää huomattavasti. Valmistuskustannuksia pystytään alentamaan yksinkertaistamalla tulostimen rakennetta, jolloin myös osien lukumäärä vähenee. Kuluja voidaan alentaa myös suunnittelemalla elektroniikka yksinkertaisemmaksi ja hyödyntämällä valmiita kaupallisia osia niin paljon kuin mahdollista.

Tulostimen kehitystyö jaetaan neljään osakokoonpanoon: runkorakenne ja mekaniikka, elektroniikka, muovipursotin sekä lämmitettävä tulostuspöytä. Protovaiheessa pyritään hyödyntämään jo olemassa olevan rakennussarjan komponentteja, jotta päästäisiin mahdollisimman nopeasti testaamaan tiettyjä osaluueita käytännössä.

	RepRap Mendel	Kehitettävä 3D-tulostin
<b>Osien lukumäärä</b>	n. 1400 kpl	50 kpl
<b>Liiketarkkuus</b>	0,04 mm, 1/8 microstep	0,02 mm, 1/16 microstep
<b>Rakennusalue</b>	170 x190 x 90 (mm)	220 x 220 x 160 (mm)
<b>Nopeus</b>	25 mm/s	75 mm/s
<b>Kokoonpanoaika</b>	n. 35 tuntia	n.10 minuuttia
<b>Fyysinen koko</b>	50 x 40 x 36 (cm)	< 50 x 50 x 50 (cm)

Kuva 6: Projektin tavoitteet.

Projekti: 3D-tulostin\_V0.1  
 Tekijä: Janne Pihlajamäki  
 Ryhmä: KLTITE07SU

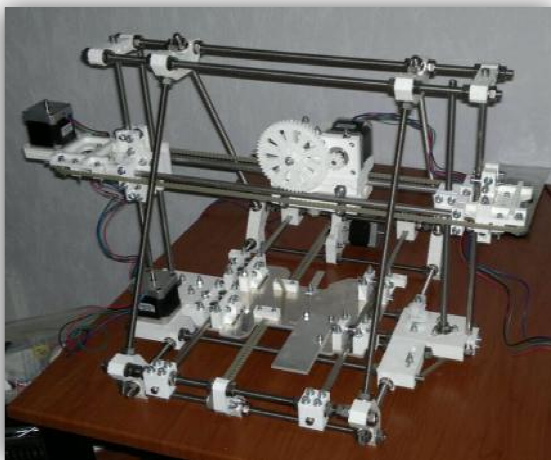
Suunitelma Tehtävä	2011							
	Touko	Kesä	Heinä	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu
RepRap kitin rakentaminen								
RepRap kitin testaus ja analysointi								
Tiedonhankinta markkinoilta								
Tuotekehitysprojektin tavoitteet								
V0.1_Rungon luonnos&suunnittelu								
V0.1_Mekaniikan hankinta&vertailu								
V0.1_Elektroniikan suunnittelu								
V0.1_Lämmitetty tulostuspöytä suun.								
V0.1_Muovipursotin luonnostelu								
Protovaihe								
Komponenttien tilaaminen								
Proton kokoonpano								
Proton analysointi								
Tavoitteet seuraavaan versioon								
ONT-Kirjoitusvaihe								
Valmistuminen								19. joul.

Kuva 7: Projektin tavoiteaikataulu.



#### 4.1.1 Runkorakenteen tavoitteet

RepRap Mendelin runkorakenne on suunniteltu käyttäen ainoastaan metallitankoja, jotka liitetään toisiinsa erilaisilla muovisilla kiinnityskappaleilla, ruuveilla ja muttereilla. Runkorakenteen kokoonpano oli haastava, koska se sisältää paljon osia. Tarkkuus- ja suoruusongelmia syntyy, kun tärkeät kiinnityskappaleet ovat muovisia, jotka antavat periksi kiristettäessä runkoranteen kiristysmuttereita. Runkorakenteen suoruus on perusta tarkan tulostusjäljen saavuttamiseksi.



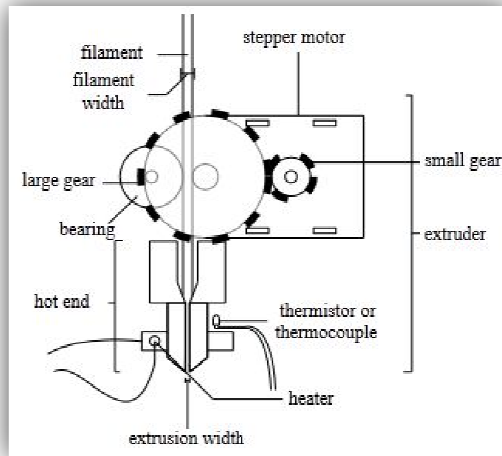
Kuva 8. RepRap Mendel -rakennussarjan runkorakenne.

Runkorakenteen kehityksen tavoite on yksinkertaisuus, joka helpottaa kokoonpanoa sekä vähentää osien lukumäärää kokoonpanossa. Runkorakenteesta pyritään suunnittelemaan tukeva ja tarkka. Nämä ominaisuudet antavat yhdessä perustan laadukkaalle tulostusjäljelle. Valmistuskustannuksen pienentäminen on myös yksi osa tavoitetta.

#### 4.1.2 Muovipursottimen tavoitteet

RepRap Mendelin muovipursotin on suunniteltu sisäänsyöttöpuolelta käyttämään 3 mm:n paksuista PLA-muovinauhaa, joka pursotetaan 0,5 mm:n reikäkoon suuttimen läpi. Suuttimen suuri reikäkoko heikentää tulostusjälkeä ja pienten yksityiskohtien tarkkuutta, koska muovi pursottuu isommalle alueelle. Tämä rajaa

runsaasti pois käyttökohteita, joissa tarvitaan tarkkaa tulostusjälkeä. Muovipursottimen paino on suuren osien lukumäärän ja monimutkaisen rakenteen johdosta 0,67 kg.



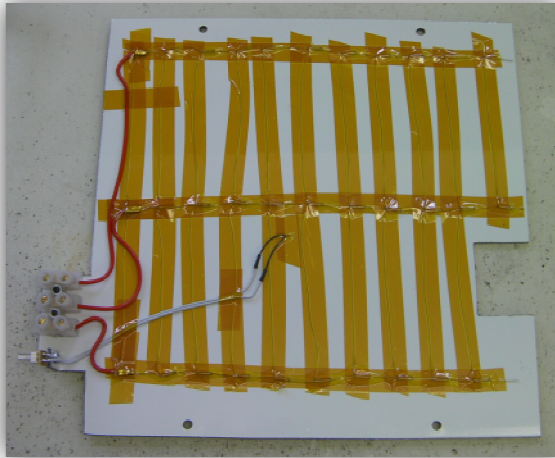
Kuva 9. Muovipursottimen rakenne (RepRap 2011).

Muovipursottimen tavoitteet ovat yksinkertainen ja kevyt rakenne. Yksinkertaisuus helpottaa asennuskokoonpanoa ja vähentää osien lukumäärä. Yksinkertaisen rakenteen avulla on tavoitteena saada painosta n. 20 % pois. Kevyt rakenne mahdollistaa tulostusnopeuden kasvattamisen. Käytettävän PLA-muovinauhan paksuus vaihdetaan 3 mm:n paksuisesta 1,75 mm:n paksuiseksi. Tämä mahdollistaa pienemmän suuttimen käyttämisen, jonka koko on tarkoitus pienentää 0,5 millimetristä 0,35 millimetriin. Pienempi suutinkoko mahdollistaa tarkemman tulostusjäljen saavuttamisen. Tärkein tavoite on tarkka ja luotettava lämpötilan mittausta ja hallinta.

#### 4.1.3 Lämmitettävän tulostuspöydän tavoitteet

Rakennussarjan lämmitettävä tulostuspöytä on todella raskasrakenteinen. Runkorakenteena siinä on kaksi päällekkäin olevaa 5 mm:n paksuista alumiinilevyä, joiden paino on yhteensä n. 1,3 kg. Lämmityselementtinä toimii Nichrome-vastuslanka. Vastuslanka kiinnitetään tulostuspintana toimivan alumiinilevyn pohjaan Kapton-teipillä. Kapton-teippauksen tarkoitus on suojata

oikosuluilta. Tulostusalueelle tehdään myös teippaus Kapton-teipillä, jotta tulostettavat osat eivät jäisi tulostuspöytään kiinni ja hajoaisi irroitusvaiheessa.

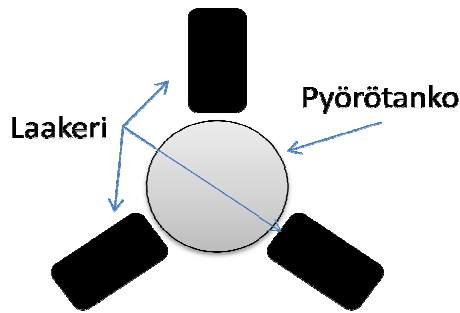


Kuva 10. Nichrome-vastuslangan kiinnitys tulostuspöytään. (RepRap 2011).

Tavoitteet tulostuspöydän osalta ovat painon keventäminen, lämmitystekniikan vaihtaminen ja rakenteen muokkaus. Paino on tavoite saada laskemaan n. 20 % - 30%, jolloin painoksi jäisi n. 0,9 kg – 1,0 kg. Painon pienentäminen mahdollistaa tulostusnopeuden kasvattamisen. Lämmitystekniikka on työläs asentaa, joten sen vaihtaminen yksinkertaisempaan helpottaa asennusvaihetta. Rakennetta on kehitettävä ja siinä käytettyjä materiaaleja on vaihdettava, jotta tulostuspöydän pinnaksi ei tarvitse Kapton-teipattua aluetta. Paras vaihtoehto olisi materiaali, jonka pinta toimisi sellaisenaan tulostuspintana ilman tarttumisongelmia.

#### 4.1.4 Lineaarijohteet

RepRap Mendel rakennussarjassa X- ja Y-akselien lineaarijohteet ovat toteutettu käyttäen pyörötankoa ja rullaluistimen laakereita. Laakerit ovat aseteltu liukukelkan jokaiseen nurkkaan kolmion muotoisesti pyörötangon ympärille (Kuva 11).

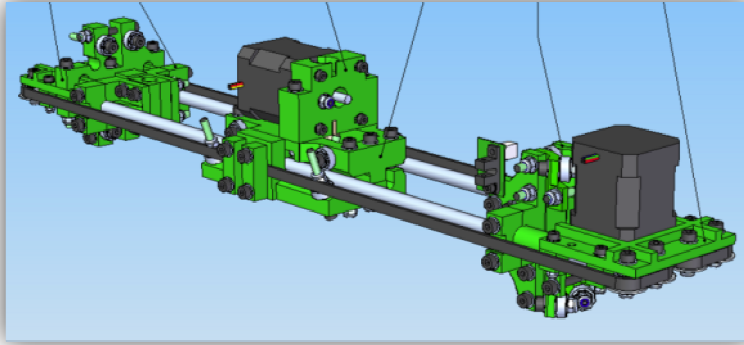


Kuva 11. RepRap Mendelin lineaarijohteet.

Tavoitteena on löytää yksinkertaisempi ratkaisu lineaarijohteiksi jokaiselle X-, Y- ja Z-akselille. Lineaarijohteen tulee olla laadukas, helppo asennettava ja hinnaltaan halpa. Laadun ansiosta liike on välyksetön ja epätasainen liike akseleilla saadaan poistetuksi. Välyksen poistuminen ja tasainen liike ovat tärkeitä ominaisuuksia tulostuslaadun parantamiseksi. Myös nopeutta pystytään kasvattamaan, kun käytössä on laadukkaat lineaarijohteet. Helppo asennettavuus ja yksinkertaistuminen vähentää komponenttien lukumäärää ja pienentää kustannuksia.

#### 4.1.5 Askelmoottori ja voimansiirto

RepRap Mendel rakennussarjan mekaaninen liike saadaan aikaiseksi käyttämällä lineaarijohteita, askelmoottoreita, kuularuuveja tai kierretankoja, hammashihnoja ja -rattaita. Rakennussarjassa X- ja Y-akseli on toteutettu siten, että askelmoottorin akseliin liitetään hammasratas. Askelmoottori pyöriessään liikuttaa hammashihnaa. Hammashihna on kiinnitetty Y-akselilla liikkuvaan lämmitettävään tulostuspöytään ja X-akselilla se on kiinnitetty muovipursottimeen. X- ja Y-akselilla liikkuvat komponentit ovat liitettyinä lineaarijohteisiin, jotka määräävät liikeradan. Z-akselissa askelmoottori pyörittää kierretankoja. Kierretangot toimivat kuten kuularuuvit ja ne muuttavat pyörimisliikkeen lineaariseksi liikkeeksi. Kierretangot ovat edullisempi ratkaisu, kuin kuularuuvit. Ne ovat kuitenkin laadultaan ja hyötysuhteeltaan huonompi vaihtoehto.



Kuva 12. X-akselin voimansiirto (RepRap 2011).

Kuvassa 12 on esitetty X-akselin rakenne havainnollistamaan voimansiirtoa. Keskellä on muovipursottimen liikkeen mahdollistava ”kelkka”, joka liikkuu kuvan oikeassa reunassa olevan askelmoottorin pyörittäessä hammashihnaa. Hammashihna kiertää rakennelman ulkokehällä.

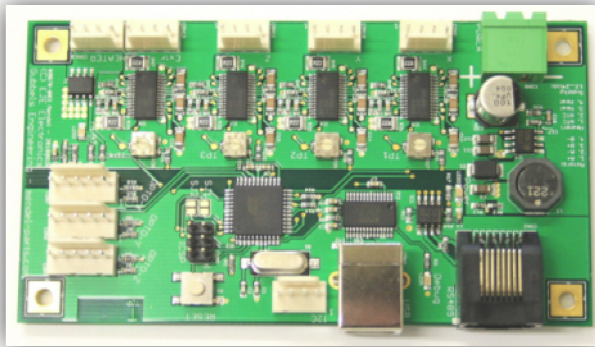
Kehitysprojektin tavoitteena ei ole luopua askelmoottoreista, eikä kokonaan hammashihnoista. Tavoite on yksinkertaistaa rakenteita ja vähentää komponenttejä. X- ja Y-akselit tulevat säilyttämään askelmoottorilla ja hammashihnalla toimivan voimansiirtonsa. Z-akseli on työläin kokoonpanoa ajatellen. Z-akselin voimansiirtoa on mietittävä uudelleen, jotta osien lukumäärää voidaan pienentää sekä kokoonpanoa helpottaa. Yhdessä mahdollisuudessa voimansiirto Z-akselilla tapahtuisi käyttäen ainoastaan askelmoottoreita ja kierretankoa. Tämä edellyttää kuitenkin yhden moottorin lisäämistä, mutta mahdollistaisi hammashihnojen poisjättämisen. Hammashihnan poisjättäminen pienentäisi huomattavasti osien lukumäärää ja helpottaisi kokoonpanoa.

#### 4.1.6 Elektroniikka ja sen ominaisuudet

Elektroniikkaan luetaan kuuluvaksi piirilevy komponentteineen, askelmoottorit, rajakytkimet, LCD-näyttö, napit, liittimet, virtalähde ja lämmityselementit.

Rakennusprojekti käyttää Generation 6 -nimellä kulkevaa elektroniikkaratkaisua. Se on yhden piirilevyn ratkaisu, jossa on 3D-tulostimen käyttöön vaadittavat perusominaisuudet. Piirilevyn fyysinen koko on 110 mm x 60 mm. Generation 6:n

pääominaisuuksiin kuuluu neljän askelmoottorin ohjaus 1/8 mikroaskelluksella, kolme rajakytkintä X-, Y- ja Z-akseleiden nollapisteitä varten, sekä muovipursottimen lämpötilan mittaus ja ohjaus. Generation 6 käyttää Atmelin ATmega644P-mikrokontrolleria. Elektronikan kytkentä tietokoneeseen tapahtuu USB-väylän kautta. Kortilla on FT232R USB-RS232 -mikropiiri, jonka tehtävänä on mahdollistaa ATmega644P-mikrokontrollerin keskusteleminen tietokoneen kanssa käyttäen COM-sarjaliikenneporttia. (FTDI, 2011).



Kuva 13. Generation 6 piirilevykortti (Mendel-parts, 2011)

Tavoitteena elektronikan osalta on kehittää fyysiseltä kooltaan hieman pienempi piirilevy, joka on kuitenkin ominaisuuksiltaan monipuolisempi. Askelmoottoreiden tarkkuuden lisäämiseksi niiden ohjaus vaihdetaan tukemaan 1/16 mikroaskellusta 1/8 mikroaskelluksen sijaan. Se mahdollistaa tarkemman tulostusjäljen ja hiljaisemmän käyntiäänisen voimansiirrolle. Rajakytkimien lukumäärä nostetaan kuuteen, jolloin jokainen X-, Y- ja Z-akseli saavat minimi- ja maksimiraja-arvot. Lämpötila-antureita tulisi olla vähintään kaksi, jotta lämmitettävän tulostuspöydän ja muovipursottimen lämpötilat saadaan tarkasti mitattua. Oikea ja reaaliaikainen lämpötilatieto mahdollistaa tarkan lämpötilan ohjauksen, joka taas vaikuttaa tulostuksen laatuun. Lämpötilan ohjaus muovipursottimelle, sekä lämmitettävälle tulostuspöydälle, on pakollinen. Lämpötilan tarkkailua ja raja-arvojen säätöä varten laitteeseen liitetään pieni LCD-näyttö ja mahdollisesti ohjausnäppäimet.

Elektronikassa käytettävältä mikrokontrollerilta vaaditaan riittävästi I/O-portteja, jotta kaikki ominaisuudet pystytään toteuttamaan. Tämä rajaa pienimmät mikrokontrollerit pois. Projektissa käytetään kahta eri mikrokontrolleria, joista ensimmäisessä versiossa AT90USB647-mikrokontrolleria, jonka ominaisuuksiin

kuuluu integroitu USB-kytkentämahdollisuus. Tämän toiminnon avulla pystytään kommunikointi tietokoneen kanssa hoitamaan ilman erillisiä komponentteja. AT90USB647-mikrokontrollerin käyttö saattaa kuitenkin aiheuttaa ongelmia laiteohjelmiston puolella, koska laiteohjelmisto on toteutettu käyttäen valmiita Arduinon ohjelmointikirjastoja. Arduinolla ei ole valmiina AT90USB647-kirjastoja, joten toiseen versioon valitaan Atmega644P-mikrokontrolleri, jolla on täysi tuki laiteohjelmistossa.

Askelmoottorien ohjaukseen tulee löytää valmis markkinoilla oleva mikropiiri, joka on ominaisuuksiltaan riittävä. Mikroaskelluksen koon on oltava 1/16. Sen on sovelluttava bibolaarisen askelmoottorin ohjaukseen ja maksimitehonsyöttö on oltava 2A.

## **4.2 Luonnostelu- ja kehittelyvaihe**

Tavoitteet tuotekehitysprojektille ovat nyt olemassa. Tässä osiossa luonnostellaan ja ideoidaan erilaisia ratkaisumahdollisuuksia jokaiselle komponenttiryhmälle. Komponenttiryhmiä tulee täyttää asetetut tavoitteet mahdollisimman hyvin. Osion toinen tärkeä toimintavaihe on valmiiden komponenttien vertailu ja hankinta kansainvälisiltä markkinoilta.

### **4.2.1 Runkorakenne ja mekaniikka**

Runkorakenteen täytyy olla yksinkertainen ja valmistettavuudeltaan helppo. Osien lukumäärä on pidettävä alhaisena ja valmistustekniikka täytyy olla sellainen, että tarkkuus olisi mahdollisimman hyvä. Rakenteen miettiminen aloitettiin siitä ajatuksesta, että osat tehtäisiin ohutlevytyönä. Käytettävät materiaalit olisivat 2 – 3 mm kylmävalssattu teräs, sekä 2 - 3 mm alumiini. Hyötynä olisi rakenteiden jäämäkkyys verrattuna muovikomponentteihin. Osat leikattaisiin laserilla, jonka ansiosta tarkkuus olisi erinomainen sekä mahdolliset prässäykset voitaisiin tehdä CNC-ohjatulla laitteella. Valintaa auttoi myös aikaisempi kokemus ohutlevytöiden suunnittelusta.

Erilaisia vaihtoehtoja luonnosteltiin yhteensä 5 versiota, joista yksi valittiin kehittelyvaiheeseen.



Kuva 14. Luonnostellut versiovaihtoehdot.

Luonnostelluista malleista viimeisin (kuvan 14 oikeassa reunassa) oli lupaavin täyttämään kaikki runkorakenteelle asetetut tavoitteet, joita ovat: yksinkertaisuus, tarkkuus ja jämäkyys.

Runkorakenteen lisäksi tarvitaan lineaarijohteet. Lineaarijohteiden tulee olla yksinkertaiset, helpot asentaa, laadukkaat, hinnaltaan edulliset ja valmis markkinoilla oleva ratkaisu.

Tavoitteiden mukaisiksi lineaarijohteiksi kansainvälisiltä markkinoilta löytyi neljä eri vaihtoehtoa. Nämä olivat: Igus Drylin N, Igus Drylin W, HiWin EG ja SMA8-12UU.



Kuva 15. Lineaarijohteiden vaihtoehdot (Hiwin & Igus, 2011).

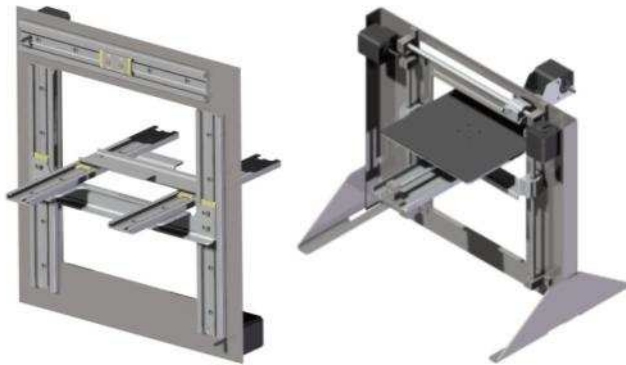
Lineaarijohteeksi valittiin Igus Drylin N-lineaarijohde, joka oli edullinen, helppo asennettava ja tarkka. Matala profiilirakenne oli hyvä ominaisuus asennettavuuden sekä tilavaatimusten kannalta.

Runkorakenteen mallintamiseen käytettiin Solid Edgeä. Solid Edge on yksi alansa johtavia, mekaniikkasuunnitteluun ja 3D-mallien luomiseen tehty ohjelma. Ohjelman avulla pystyy helposti luomaan yksittäisiä komponentteja tai



osakokoonpanoja, jotka voivat koostua jopa tuhansista yksittäisistä osakomponenteista. (Siemens, 2011.)

Runkorakenteen luonnos ja lineaarijohteen valinta mahdollistivat siirtymisen suunnittelutyöhön. Suunnittelu aloitettiin sijoittamalla komponentteja karkeasti paikoilleen ja katsomalla miten komponentit tulisi asetella.



Kuva 16. Komponenttien sijoittelua.

Komponenttien paikka alkoi nopeasti hahmottua, jonka jälkeen osia pystyttiin suunnittelemaan yksityiskohtaisemmin. Rakenteeseen tuli huomattava muutos verrattuna lähtökohtana olleen rakennussarjan ratkaisuihin. Rakennussarjassa Y-akseli on kiinteänä rakenteen alaosassa ja X- ja Z-akseli on sidottuina toisiinsa.

Kehitettävässä ratkaisussa X-akseli on sijoitettu kiinteästi rakenteen yläreunaan ja sen alapuolella on Y-akseli, joka laskeutuu Z-akselin liikkeessä. Tämä mahdollisti hyvin yksinkertaisen rakenteen, jossa pystyttiin laserleikkauksella tekemään jokaiselle akselille tarkasti kiinnityspaikat. Runkorakenne vaati uudenlaisia komponentteja, joita ei aikaisemmassa versiossa ollut ja niitä täytyi jälleen etsiä kansainvälisiltä markkinoilta tai sitten valmistuttaa alihankintana.

Runkorakenne suunniteltiin luonnostelusta valmiiksi tuotteeksi asti 3D-suunnitteluympäristössä, käyttäen Solid Edge-ohjelmistoa. Runkorakenteen kaikki luonnokset ovat esitetty liitteessä 3.

### 4.2.2 Muovipursotin

Muovipursottimen ongelma-alueet olivat sen suuri koko, rakenteen monimutkaisuus ja paino. Näihin pyrittiin löytämään ratkaisu suunnittelemalla rakenteen osia uudelleen, jolloin idea kokonaan uudesta rakenteesta syntyi. Rakennussarjan muovipursottimessa voimansiirto on toteutettu ratastamalla, jonka etuna on vääntömomentin suuruus. Kehitellyssä versiossa voimansiirto toteutettaisiin suoraan askelmoottorin akselilta. Tämä mahdollistaa pienemmän, yksinkertaisemman ja kevyemmän rakenteen.

### 4.2.3 Lämmitetty tulostuspöytä

Lämmitetyn tulostuspöydän lämmitystekniikkavaihtoehdot olivat lämpövastus, vastuslanka tai piirilevystä tehty lämmityselementti. Lämpötila on saatava nopeasti ja tasaisesti 60 °C tuntumaan, jolloin tulostettavalle kappaleelle ei aiheudu kiertymis-efektiä.

Tulostuspöydän rakenne koostuu kahdesta 220 mm x 220 mm kokoisesta ja 2 mm paksuisesta alumiinilevystä, joiden väliin laitetaan lämmityselementti. Alumiininen tulostuspinta vaatii lämmityksen lisäksi ylimääräisenä työnä Kapton-teippauksen, jotta siihen pystytään onnistuneesti tulostamaan. Alumiinin lämmönjohtavuus on 237 W/(m°C), ominaislämpökapasiteetti on 0,900 kJ/(kg°C) sekä tiheys 2700 kg/m<sup>3</sup> (Hautala & Peltonen 2001, 316).

Lämmön johtuminen on fysikaalinen ilmiö, jonka avulla pystytään siirtämään lämpöä kiinteässä aineessa. Esimerkiksi metallitankoa lämmitettäessä toisesta reunasta, kineettinen energia tangossa olevissa atomeissa lisääntyy ja lämpötila kasvaa. Tästä aiheutuu lämpötilaero, joka pyrkii tasoittumaan. Lämpö pyrkii johtumaan kylmästä reunasta lämpimään reunaan tasoittamaan lämpötilaeroa. (Hautala & Peltonen 2001, 165.)

Alumiinin lämmittämiseen 20 °C:sta 60 °C:een vaaditaan lämpöä, joka voidaan tuottaa lämmityselementillä. Jotta kappale saavuttaa esim. lämpötilan 40 °C, tarvitsee kappaleeseen tuoda lämpöä seuraavan kaavan mukaisesti:

$$Q = cm\Delta t \quad (1)$$

jossa Q on tarvittava määrä lämpöä

c on lämmitettävän kappaleen ominaislämpökapasiteetti

m on kappaleen massa

$\Delta t$  on lämpötilan muutos

Tarvittavan lämmön määrä voidaan laskea, kun saadaan selville kappaleen massa. Kappaleen massa voidaan laskea seuraavan kaavan mukaisesti:

$$m = \rho V \quad (2)$$

jossa m on kappaleen massa

$\rho$  on kappaleen tiheys

V on kappaleen tilavuus

Lämmitettävän alumiinilevyn massa on 0,27 kg. Tämän tiedon avulla voidaan laskea sen lämmittämiseen tarvittu lämpömäärä. Alumiinilevyyn on tuotava lämpöä 9,72 kJ (2700 W), jotta lämpötila nousee 40°C:een. Tämän tiedon avulla pystytään mitoittamaan ja kehittämään suuruusluokaltaan riittävä lämmityselementti. Lämmityselementiksi valittiin piirilevystä tehty lämpövastus. Piirilevyn pinnassa oleva kupari toimii tässä tapauksessa lämpövastuksena.

Lämpövastuksen on tuotettava tehoa noin 100 W – 140 W, jotta tulostuspöytä saadaan lämpenemään vaivattomasti 60°C:een. Käytössä on +12V jännite, joten tarvittava lämmityselementin vastus pystytään laskemaan seuraavan kaavan mukaisesti:

$$P = \frac{U^2}{R} \quad (3)$$

jossa P on tuotettu teho

U on käytettävissä oleva jännite

R on lämmityselementin vastus

Kaavan mukaisesti vastuksen tulee olla välillä 1,02 ohm – 1,44 ohm, jotta tuotettu teho olisi välillä 100 W – 140 W.

#### 4.2.4 Elektroniikka

Elektroniikan luonnostelussa tutkittiin kilpailijoiden elektroniikkaratkaisujen ominaisuuksia, sekä rakennussarjan elektroniikkaratkaisun analysoinnin aikana havaittuja ominaisuuksia. Näistä ominaisuuksista kerättiin yhteenveto, jonka pohjalta oli hyvä aloittaa suunnittelutyö.

Taulukko 1. Elektroniikan tavoitetaulukko

Ominaisuus	Generation 6	Kehitelty elektroniikka
Askelmoottorit, Mikroaskellus	4 ulostuloa, 1/8 mikroaskellus	4 ulostuloa, 1/16 mikroaskellus
Rajakytkimet (kpl)	3 (x,y,z – min)	6 (x,y,z – max/min)
Lämpötila-anturit (kpl)	1	3
Lämmitysohjaimet (kpl)	1, MOSFET 4A	2, MOSFET 35A
Näyttö	-	Kyllä, LCD
Näppäimet (kpl)	-	4
Tuulettimen ohjaus	Kyllä	Kyllä
SD_kortinlukija	-	Kyllä
Virtalähde	2x 75W, 12-24V PSU	1x 350W, 12V, ATX PSU
Mikrokontrolleri	ATmega644P	AT90USB647
PC-yhteys	PC -> FTDI -> ATmega644P	PC -> AT90USB647

Elektroniikasta suunniteltiin kaksi eri versiota. Ensimmäinen versio suunniteltiin käyttäen Mentor Graphicsin PADS–piirilevysuunnitteluohjelmistoa ja toinen versio käyttäen Cadsoftin Eagle–ohjelmistoa.

Mentor Graphicsin PADS piirilevysuunnittelu ohjelmisto on maailmanlaajuisesti tunnettu. Se mahdollistaa yksittäisen projektin suunnittelun helppokäyttöisessä ympäristössä. PADSin avulla on mahdollista tehdä piirikaaviot, sekä analysoida niitä. PADSin avulla myös layout-suunnittelu on mahdollista siten, että suunniteltu piirilevy voidaan saada tuotantoon. (Mentor Graphics, 2011.)

Cadsoftin Eagle piirilevysuunnittelu ohjelmisto on käyttäjälähtöinen, tehokas ja halpa ratkaisu suunnittelutyöhön. Se sisältää piirikaaviosuunnittelun ja layout-suunnittelun. Eagle on lyhenne sanoista easily applicable graphical layout editor. (Cadsoft, 2011.)

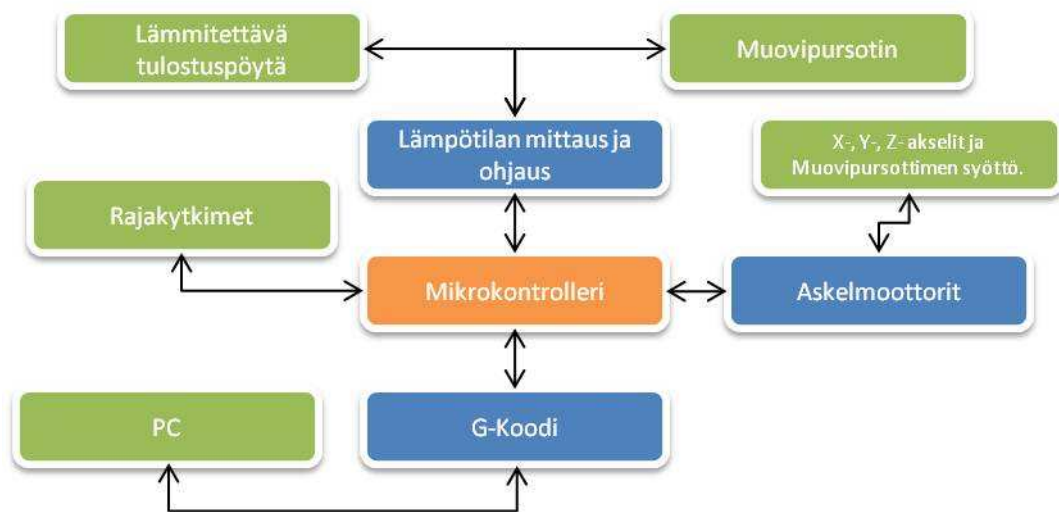
Annettujen määrittelyiden perusteella aloitettiin piirikaavion suunnittelutyö. Ensimmäiseen versioon mikrokontrolleriksi valittiin Atmelin AT90USB647-mikrokontrolleri. Sen ominaisuuksiin lukeutuu mm. 48 I/O-porttia, sekä integroitu USB 2.0-liitäntämahdollisuus. AT90USB647 kuitenkin vaatii laiteohjelmistoon paljon muokkauksia, mutta mahdollistaa enemmän toimintoja. Toisen version mikrokontrolleriksi valittiin Atmega644P-mikrokontrolleri, koska laiteohjelmisto on optimoitu kyseiselle mikrokontrollerille ja se voi myöhemmässä vaiheessa osoittautua helpommaksi käyttöönottaa. Se on ominaisuuksiltaan hieman suppeampi, kuin AT90USB647. Atmega644P sisältää 32 I/O-porttia, mutta se ei sisällä integroitua USB 2.0-liitäntämahdollisuutta.

Ensimmäisen version mikrokontrolleriksi valittu AT90USB647 on Atmel Corporationin valmistama korkean suorituskyvyn omaava 8-bittinen AVR RISC:n perustuva mikrokontrolleri. AT90USB647 sisältää 64 KB Flash-muistia, 2 KB EEPROM-muistia, 4 KB SRAM-muistia, 48 I/O-väylää. Mikrokontrollerissa on neljä 8-bittistä PWM-kanavaa, kuusi 2-16 -bittistä PWM-kanavaa, sekä kahdeksan 10-bittistä A/D-muunninta. Mikrokontrollerin taajuus on 16 MHz. AT90USB647 sisältää integroidun USB-tuen. (Atmel, 2009.)

Toisen version mikrokontrolleriksi valittu Atmega644P on Atmel Corporationin valmistama korkean suorituskyvyn omaava 8-bittinen AVR RISC:n perustuva mikrokontrolleri. Atmega644P sisältää 64 KB Flash-muistia, 2 KB EEPROM-muistia, 4 KB SRAM-muistia, 32 I/O-väylää. Mikrokontrollerissa on kuusi PWM-kanavaa, sekä kahdeksan 10-bittistä A/D-muunninta. Mikrokontrollerin taajuus on 20 MHz. Atmega644P ei sisällä integroitua USB-tukea. (Atmel, 2010.)

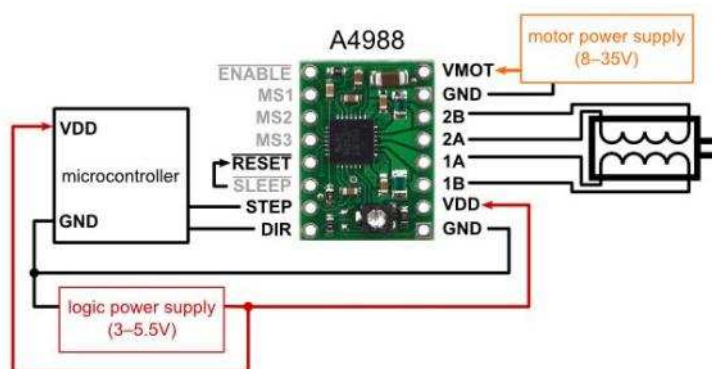
Mikrokontrolleri on koko elektroniikan keskeinen ja ohjaava komponentti. Sen tehtävänä on vastaanottaa G-koodi tietokoneelta ja muuntaa G-koodi askelmoottorien liikkeeksi. Askelmoottorit ohjaavat X-, Y- ja Z-akseleita, sekä muovipursottimen syöttöä. Mikrokontrolleri mittaa tulostuspöydän ja muovipursottimen lämpötiloja termistorien avulla ja ohjaa lämmityslementtejä MOSFET-kytkimillä saadun tiedon ja annettujen raja-arvojen mukaisesti. Se vaatii rajakytkimiä, joiden tarkoitus on rajata akselien liikealue. Ulostulona mikrokontrolleri antaa tietoa käyttäjälle LCD-näytön kautta tulostuksen tilasta ja mitatuista lämpötiloista. Tällöin käyttäjä pystyy tarkkailemaan laitteen toimintaa.

Kaikki elektroniikkaan kuuluvat komponentit ovat yhteydessä joko suoraan tai välillisesti mikrokontrolleriin.



Kuva 17: Mikrokontrollerin kytkentäkaavio.

Askelmoottoriohjaimiksi valittiin A4988 DMOS-askelmoottoriohjaimet. Ohjaimet ovat Allegro Microsystemsin valmistama pienten bipolaaristen askelmoottorien ohjaamiseen tarkoitettu ohjain. Sen ominaisuuksia on yksinkertainen askel- ja suuntaohjaus, viisi erilaista tarkkuutta mikroaskellukselle, säädettävä maksimivirran ulostulo erikokoisia askelmoottoreita varten (maksimi 2A per lähtö). Suojusominaisuuksina on ylikuumenemissuoja sekä oikosulkusuoja. (Allegro Microsystems, 2011.)



Kuva 18. A4988 kytkentäkaavio (Pololu 2011).

Askelmoottoriohjaimet, 4kpl, kytketään mikrokontrollerin lähtöihin. Askelmoottoriohjaimille kytketään yhteinen ENABLE-signaali, yhteiset MS1-, MS2-,

MS3-signaalit sekä jokaiselle erikseen STEP- ja DIR-signaalit. Enable-signaalin avulla voidaan askelmoottoriohjain kytkeä päälle tai pois, tämän avulla voidaan siis säästää virtaa ja estää moottoreita ylikuumentumasta. MS-sarjan signaalit ovat mikroaskelluksen signaaleja. Jokaisessa ohjaimessa käytetään aina samaa mikroaskellusta, joten ne oli hyvä kytkeä yhteen I/O-porttien säästämiseksi mikrokontrollerilla. Haluttu mikroaskellustarkkuus valitaan ohjaamalla taulukon 2 mukaisesti jännite MS1-, MS2- tai MS3-porttiin. Toisessa elektroniikkavaihtoehdossa kaikki MS1-, MS2- ja MS3-portit kytkettiin high-tilaan, ilman mikrokontrollerin ohjausta. Toisen version mikrokontrollerin I/O-nastat eivät olisi muuten riittäneet muille ominaisuuksille.

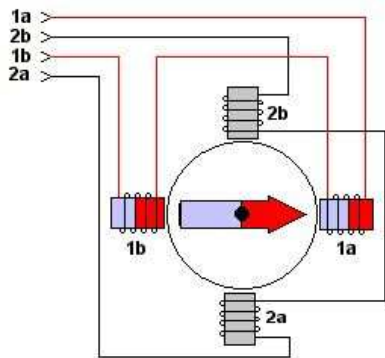
Taulukko 2. Mikroaskelluksen tarkkuuden valinta (Pololu, 2011).

MS1	MS2	MS3	Microstep Resolution
Low	Low	Low	Full step
High	Low	Low	Half step
Low	High	Low	Quarter step
High	High	Low	Eighth step
High	High	High	Sixteenth step

Jokainen askelmoottoriohjain saa omat STEP- ja DIR-signaalinsa, koska niitä on voitava ohjata erikseen. STEP-signaalilla määritellään, montako askelta askelmoottorin on otettava, kun taas DIR-signaalin tehtävä on määrätä kumpaan suuntaan moottori pyörii.

Kuvan 18 VMOT-signaaliin kytketään ATX-virtalähteestä tuleva +12V jännite, joka on moottorien virtalähde. VDD-signaaliin kytketään samasta virtalähteestä tuleva +5V jännite, joka on askelmoottoriohjaimen toimintajännite.

Bipolaarinen askelmoottori kytketään askelmoottoriohjaimen 1A-, 1B-, 2A-, 2B-portteihin. Askelmoottorissa on neljä kelaa (kuva 19), joista jokaista ohjataan erikseen edellämainituilla signaaleilla. Askelmoottorin datalehdessä nähdään kelojen johdotus ja sen tiedon avulla pystytään askelmoottori liittämään oikein askelmoottoriohjaimeen.



Kuva 19. Askelmoottorin kelat (Stepperworld, 2011).

Bipolaarisessa askelmoottorissa on mahdollista ohjata virta kulkemaan moottorin keloissa molempiin suuntiin. Tämän etuna on erinomainen hyötysuhde ja ominaisuuksien kasvaminen. Ne soveltuvat suurta suorituskykyä vaativiin käyttöihin. Askelmoottorin mikroaskelluksessa moottorin perusaskel jaetaan  $1/N$ -osaan. Tällöin virran ohjaus jokaiselle käämille toteutetaan  $N$ -jakoisesti. Mikroaskelluksessa siis jaetaan askelmoottoreille tyypillinen 1,8 asteen askelkulma pienempiin mikroaskeliin. Mikroaskelluksen etuna on moottorin käynnin tarkkuus ja pehmeys. (Wexon, 2011.)

Käytetty A4988-askelmoottoriohjain mahdollista ohjauksen  $1/16$ -mikroaskelluksella. Käytetyt moottorit ovat 1.8 asteen askelkulman omaavia askelmoottoreita. Mikroaskelluksen ollessa  $1/1$  tulee moottorin ottaa 200 askelta kiertääkseen täyden kierroksen. Mikroaskelluksen ollessa  $1/16$  yhden täyden kierroksen saavuttamiseksi tarvitaan 3200 askelta.

Virtalähteenä käytetään Corsairin yleistä ATX-virtalähdettä. Tämä on yleinen tietokoneissa käytetty virtalähde. ATX 24-pin virtalähteessä on +12V, +5V, +3.3V lähtöjännitteet. Virtakapasiteetti yltää 430 W. Tulojännite on 90 – 264 V. (Corsair, 2011.)

Virtalähde kytketään piirilevyyn käyttäen 24-pin-virtaliittintä. Virtaliittimen eri nastoista voidaan ottaa käyttöön piirilevyllä tarvittavat jännitteet. Mikrokontrolleri ja askelmoottoriohjain tarvitsevat +5V jännitteen. Askelmoottoreille ja lämmitysvastuksille johdetaan +12V jännite (LIITE 4).



Lämpötila-antureiksi valittiin Epcosin G560 100 k NTC-termistorit. Termistorit kuuluvat NTC-sarjaan, joten niiden vastusarvo pienenee lämpötilan noustessa (LIITE 5). Termistorin vastusarvo 25 °C lämpötilassa on 100 k  $\pm$ 1%. Termistorin käyttöalue on -50 °C..+300 °C. (Epcos, 2011.)

Termistoreita käytetään mittaamaan muovipursottimen ja lämmitettävän tulostinpöydän lämpötiloja. Tämän tiedon avulla mikrokontrollerilla voidaan MOSFET-kytkinten kautta ohjata lämmityselementtejä päälle tai pois. Näin muovipursottimen ja lämmitettävän tulostuspöydän lämpötilat pysyvät halutussa arvossa. Termistorin kytkentäkaavio on liitteessä 6.

MOSFET-kytkinten, eli kanavatransistorien toiminta perustuu virran kulun ohjaamiseen kahden navan välillä kolmannen navan avulla (LIITE 7). Kanavatransistoreita on kaksi erilaista: JFET ja IGFET, joista jälkimmäistä kutsutaan termillä MOSFET. (Aaltone Kousa & Stor-Pellinen 2004, 145.) MOSFET-kytkimenä käytämme N-kanavatransistori IRFZ44N:ää. Sen valmistaja on Internation Rectifier.

LCD-näytön liittämistä varten lisättiin piirilevylle 10-pin-liitin. LCD-näyttö tarvitsee 8 I/O:ta mikrokontrollerilta, sekä +5V jännitteen ja maatason. LCD-näytöksi riittää 2x16 merkin kokoinen näyttö. LCD-näytön tarkoitus on antaa informaatiota käyttäjälle mitatuista lämpötiloista ja niiden raja-arvoista. Näytön yhteyteen lisätään 4 ohjausnappia, joilla pystyy säätämään lämpötilojen raja-arvoja. Toisessa elektroniikkavaihtoehdossa ohjausnapit jouduttiin jättämään pois mikrokontrollerin I/O-porttien vähyyden vuoksi.

Rajakytkinten tehtävä on määrätä X-, Y-, ja Z-akselien minimi- ja maksimiliikeradat. Rajakytkimet ovat mekaanisia kytkimiä. Kun esimerkiksi X-akselin liike kohtaa rajakytkimen, antaa rajakytkin signaalin mikrokontrollerille. Signaalin saatuaan X-akselin askelmoottori ohjataan pois päältä ja se rajoittaa X-akselin etenemisen.

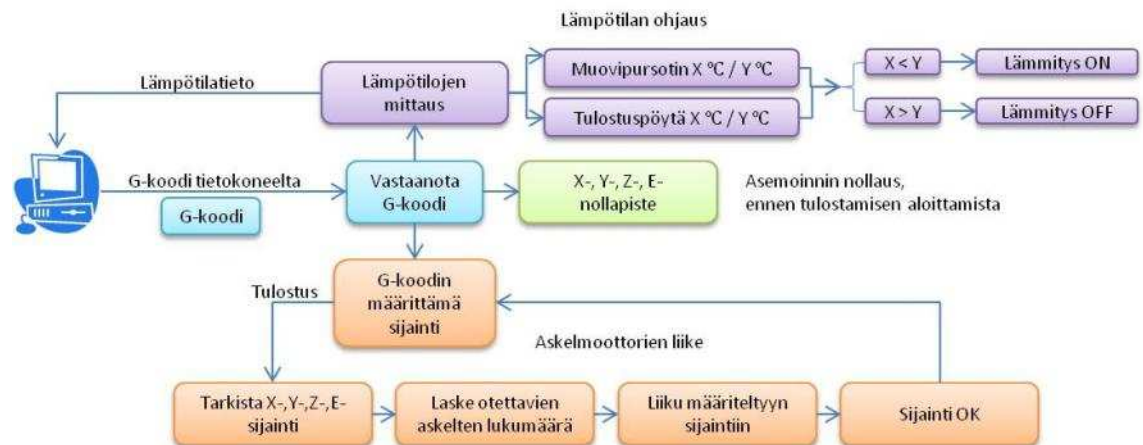


Kuva 20: Rajakytkin. (Futurlec, 2011.)

#### 4.2.5 Elektroniikan laiteohjelmisto

Mikrokontrollerille ladattava laiteohjelmisto on GNU GPL3-lisenssin alainen. Sen ovat kehittäneet tietotekniikkaharrastajat ympäri maailmaa ja sen kehittämisessä on ollut myös suomalaisia mukana. Laiteohjelmistossa on valmiina erilaiset osiot seuraavia ominaisuuksia varten: G-koodin määrittely, G-koodin muuntaminen käskyiksi askelmoottoriohjaimille, erilaiset kalibrointitoiminnot mekaaniselle liikkeelle, termistorin lämpötilataulukot sekä SD-muistikortin lukeminen. Laiteohjelmisto on saatavilla github-palvelusta. Laiteohjelmisto kulkee koodinimellä Sprinter, ja sen pääkehittäjät ovat suomalainen harrastelija, alias Kliment ja toinen harrastelija, alias Caru. (Github/Sprinter, 2011.)

Kehitetty elektroniikka vaatii muutoksia laiteohjelmistoon. LCD-näytön käyttöönottamista ja näytön toimintaa varten tarvittava koodikirjasto tulee lisätä laiteohjelmistoon. LCD-näyttöä pystytään kirjaston lisäämisen jälkeen ohjaamaan laiteohjelmiston koodiin kirjoitettavalla koodipätkällä. Mikrokontrollerille on lisättävä määrittelyt, joissa kerrotaan nastajärjestys laiteohjelmiston määritysosioon. Määrittelyn tarkoitus on kertoa laiteohjelmistolle, että mikä mikrokontrollerin signaalinastoista sisältää tietyn toiminnon. Termistorille täytyy luoda sen datalehden mukainen lämpötilataulukko. Kalibrointiasetuksia tulee myös muokata, koska askelmoottorit tulevat uuden elektroniikan myötä kulkemaan eri mikroaskelluksella. Laiteohjelmistossa on määriteltävä, kuinka monta askelta kunkin akselin moottorin on otettava liikkuakseen yhden millimetrin. Rakennussarjan elektroniikassa asetukset ovat 1/8-mikroaskellukselle, kehitetyssä versiossa askellus on 1/16.



Kuva 21. Laiteohjelmiston lohkokaavio.

3D-tulostukseen käytetyt ohjelmistot käyttävät COM-porttia keskusteluun tietokoneen ja elektronikan välillä. Tästä johtuen tarve mikrokontrollerin kytkemiseen COM-sarjaliikenneporttiin tuli pakolliseksi. Ensimmäiseen elektroniikkavaihtoehtoon ei fyysisesti lisätty mitään komponentteja, koska siinä on integroitu USB-tuki. Laiteohjelmistoon sisällytetään ohjelmakoodi, joka esittää elektronikan virtuaalisesti COM-sarjaliikenneportissa. Tällöin keskustelu tietokoneen kanssa on mahdollista ja sen toteuttaminen helppoa.

AVR272 USB CDC-ohjelmisto pystyy muuntamaan USB-yhteyden virtuaaliseksi sarjaportiksi (COM). Näin toimien pystytään hyödyntämään tätä tietoliikennemenetelmää uudemmissa tietokoneissa, joista sarjaliikenne portti puuttuu kokonaan. (Atmel Corporations, 2011.)

Toisessa elektroniikkavaihtoehdossa Atmega644P-mikrokontrollerin tueksi liitetään FT232R-mikropiiri (LIITE 8). Liitetty mikropiiri muuttaa USB-yhteyden RS232-yhteydeksi, eli COM-sarjaliikenneyhteydeksi.

### 4.3 Viimeistelyvaihe

Kun jokainen osa-alue on käyty läpi, kehitellyt komponentit dokumentoidaan tuotantoa ja arkistointia varten.

Viimeistelyvaiheessa laaditaan yhteenveto suunnittelusta ja esitellään lyhyesti ratkaisut, joihin päädyttiin työn edellisessä vaiheessa.

### 4.3.1 Suunnitellut komponentit

Runkorakenteen komponenttien materiaaleiksi valittiin 2 mm ja 3 mm alumiini, sekä 3 mm kylmävalssattu teräs. Runkorakenne suunniteltiin tuotettavaksi ohutlevyteknikalla. Komponentit leikataan laserilla ja taitokset tehdään CNC ohjatulla prässillä. Etuna oli tarkkuus ja helppo saatavuus. Runkorakenteen komponenteista tehtiin Solid Edgellä tuotantokuvat, joiden avulla pystytään tuotannossa tekemään komponentille vaaditut viimeistelyt (LIITE 9). Jokaisesta teetettävästä komponentista tehtiin myös 2D DXF-kuva, joka on laserleikkauksessa käytetty tiedostoformaatti.



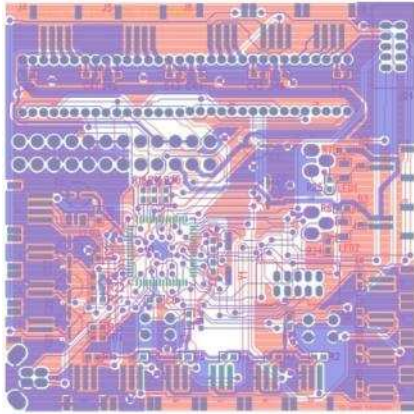
Kuva 22. Kehitetyn tulostimen 3D-malli.

Lämmitettävän tulostuspöydän lämmityselementti valmistetaan FR4-piirilevy materiaalista ja tulostuspinta on 2 mm - 3 mm lasia tai ensimmäisessä protossa 2 mm alumiiniä Kapton-teippauksella. Piirilevyt voidaan valmistuttaa alihankintana, ja niitä varten tehtiin piirilevyjen tuotantokuvat eli gerber-tiedostot (LIITE 10). Lasielementit voidaan tilata 2D DXF-kuvilla vesileikkausta suorittavasta yrityksestä (LIITE 11). Alumiininen tulostuspinta voidaan tilata samasta paikasta, kuin runkorakenteen komponentit.

Muovipursottimen osalta tuotekehitysprojekti jäi vain luonnosteluvaiheeseen. Sitä ei ehditty toteuttaa suunnitellussa aikataulussa.

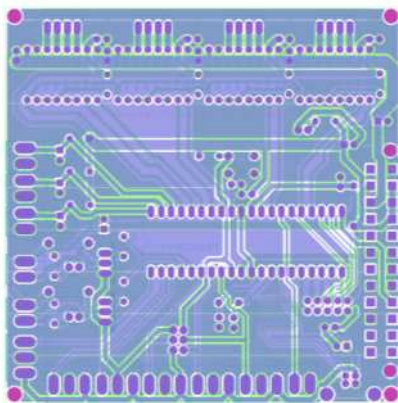
Elektroniikkaan tarvittavat komponentit tilattiin ensimmäiseen versioon Farnellin ja Elfa-elektroniikan nettikaupoista. Protosarjan piirilevy tilattiin suoraan kiinalaisesta

yriyksestä, jonka palveluihin kuuluu pienten noin 10 kappaleen protosarjojen valmistus. Piirilevyn fyysinen koko on 10 cm x 10 cm. Piirilevy on kaksipuolinen ja se on 1,6 mm paksuista FR-4-materiaalia. Ensimmäisessä versiossa on käytetty mahdollisimman paljon pintaliitoskomponentteja.



Kuva 23. Ensimmäinen elektroniikkavaihtoeto, versio 0.1.

Toinen versio suunniteltiin käyttäen ainoastaan läpivientikomponentteja. Komponentit tilattiin thaimaalaisen elektroniikkayrityksen verkkokaupasta. Piirilevy on myös 10 cm x 10 cm kokoinen ja valmistettu samasta materiaalista, kuin ensimmäinen versio. Piirilevyn protosarja tilattiin myös samasta paikasta, kuin ensimmäisen version.



Kuva 24: Toinen elektroniikkavaihtoeto, versio 0.2.

### 4.3.2 Komponenttien hankinta

Kehitettyyn 3D-tulostimeen pyrittiin löytämään jo valmiita kaupallisia komponentteja mahdollisimman paljon. Kaupallisten komponenttien käyttö säästää aikaa suunnittelutyöstä ja vähentää suunnittelutyön määrää. Jo valmiina markkinoilla olevat ratkaisut ovat useimmiten toimintavarmempia. Seuraavaksi on listattu jokaiseen osa-alueeseen tilatut kaupalliset komponentit ja alihankintana teetetyt komponentit.

Runkorakenteen kaupalliset komponentit:

- laakerit (Kiina)
- hammashihnat ja hammasrattaat (USA)
- lineaarijohteet (Saksa)
- kiinnitystarvikkeet (Suomi)

Runkorakenteeseen ja tulostuspöytään alihankintana teetetyt komponentit:

- metalliosat (Suomi)

Elektroniikan kaupalliset komponentit:

- komponentit (Suomi, Iso-Britannia, Thaimaa)
- moottorit (Kiina)
- rajakytkimet ja LCD-näyttö (Thaimaa)
- askelmoottoriohjaimet (Amerikka)

Elektroniikkaan alihankintana teetetyt komponentit:

- piirilevyjen protosarjat (Kiina)
- lämmityselementti tulostuspöytään (Kiina)

Muovipursottimen kaupalliset komponentit:

- voimansiirtoratas (Saksa)
- suutin (Iso-Britannia)

## 5 PROTOVAIHE

### 5.1 Runkorakenteen kokoonpano ja testaus

Kehitetystä 3D-tulostimesta valmistettiin prototyyppi asteittain, samalla hyödyntäen valmiin rakennussarjan komponentteja. Asteittain testattaessa pystyttiin etenemistä nopeuttamaan ja tiettyjä osakokonaisuuksia testaamaan heti toiminnassa. Prototyypin testaus ja valmistus jaettiin neljään osaan, joista tämän työn aikana testattiin kaksi. Osa-alueet ovat: runkorakenne, mekaniikka sisältäen lämmitettävän tulostuspöydän, elektroniikka ja muovipursoitin. Elektroniikka esitellään pintapuolisesti, mutta muovipursoitin jouduttiin rajaamaan työn ulkopuolelle. Rajaus tehtiin, kun todettiin toimivan muovipursoittimen kehittämisen vaativan kohtuuttoman suuren työpanoksen.

Runkorakenteen, mekaniikan ja lämmitettävän tulostuspöydän testaus oli järkevä testata erikseen elektroniikasta ja muovipursoittimesta, koska näin pystyttiin käyttämään jo olemassa olevan rakennussarjan komponentteja. Tämä mahdollisti 3D-tulostimen uuden runkorakenteen kokoonpanon ja käytännön testit heti, kun komponentit olivat suunniteltu ja tilattu. Valmiista rakennussarjasta hyödynnettiin muovipursoitin ja elektroniikka.

Runkorakenteen kokoonpano oli huomattavasti helpompaa, koska osien lukumäärä oli ensimmäisessä protoversiossa saatu vähennettyä jo 320 osaan alkuperäisestä 1400:sta osasta. Lineaarijohteiden asentamisessa oli hieman ongelmia, sillä niille olisi täytynyt työstää asennusurat. Näin ollen ilman asennusuria johteiden asennustarkkuus kärsi ja johteet piti todella tarkasti asetella, jotta ne saatiin suoraan. Pienikin asennusvirhe aiheutti jumiutumista johteissa. Lineaarijohteet saatiin kuitenkin hyvin toimiviksi. Komponenttien liittämässä runkorakenteeseen ei ilmennyt ongelmia, vaan jokainen osa sopi paikoilleen kuten pitikin.



Kuva 25. Runkorakenteen kokoonpanoa

Lämmitettävä tulostuspöytä rakennettiin hyödyntäen uusia lämmityselementtejä. Lämmityselementteinä toimivat FR4-piirilevymateriaalista suunnitellut matalan resistanssin omaavat piirilevyt (Kuva 26). Ne toimivat kuten lämpövastus. Lämmityselementit tehtiin prototyyppiin 10 cm x 10 cm levyistä, joita yhdistettiin toisiinsa 4 kpl, ja ne asetettiin tulostuspinnan pohjaan. Lämmityselementtien resistanssiksi mitattiin sarjaankytkettynä 1,7 ohmia. Lämmityselementtien yhteenlaskettu teho on 84,7W. Lämmitettävän tulostuspöydän yksi tavoite oli painon tiputtaminen n. 20 - 30 %. Lähtöpaino oli n. 1,3 kg ja prototyyppissä lämmitettävän tulostuspöydän paino oli n. 0,9 kg. Tulostuspöydän painoa onnistuttiin tiputtamaan n. 30 %.

Käytännön testeissä lämmityselementit suoriutuivat erinomaisesti. Tarvittava lämpötila tulostuspöydälle on noin 60 °C. Maksimilämpötilaa mitattaessa lämpötilan keskiarvoksi pöydän eri kohdista mitattiin 79,6 °C. Kun uusi elektroniikka saadaan käyttöön, pystytään lämpötilaa ohjaamaan ja se pystytään pitämään 60 °C tuntumassa. Tulostettava materiaali tarttui hyvin tulostuspöydän pintaan ja irtosi jäähtyttyään helposti.





Kuva 26. Lämmitettävän tulostuspöydän lämmityselementti.

Seuraavaksi 3D-tulostin kasattiin toimintakuntoon. Siten päästiin käytännön testeihin. Rakennussarjasta lainattujen komponenttien, kuten muovipursottimen, elektronikan, askelmoottorien yms. osien liittäminen runkorakenteeseen onnistui vaivattomasti.

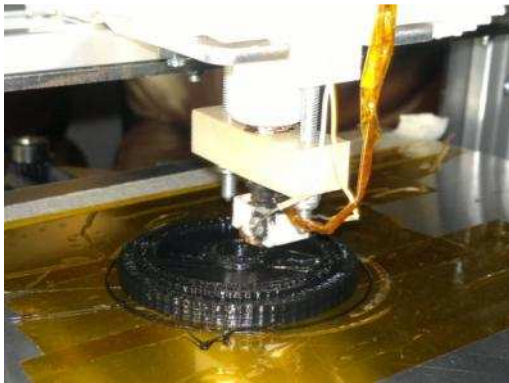


Kuva 27. 3D-tulostimen prototyyppi valmiina testeihin.

Kehitetty 3D-tulostin oli nyt valmis käytännön testeihin. Ensimmäiseksi suoritettiin liikeratojen testaus, joilla pystyttiin todentamaan lineaarijohteiden ja voimansiirron toiminta. Tässä vaiheessa ei havaittu ongelmia ja positiivisena ilmiönä oli mekaanisen liikkeen aiheuttaman melun vähentyminen verrattuna rakennussarjan

version. Rakennusalueen koko tällä kokoonpanolla on 230 mm x 230 mm x 145 mm. Mekaanista liikettä testattaessa kokeiltiin myös tulostimen nopeuksia, nopeudella 120 mm / s, X- ja Y-akselit liikkuvat ongelmitta. Tämä nopeustesti tässä vaiheessa oli riittävä ja sitä suurempia nopeuksia ei vielä tässä vaiheessa testattu.

Seuraavassa vaiheessa 3D-tulostin kalibroitiin vastaamaan uuden voimansiirron asetuksia. Ennen kalibrointia esimerkiksi X-akseli liikkui 215 mm, kun käskyksi annettiin liikkua 100 mm. Kalibroinnin jälkeen samalla käskyllä ajettu 100 mm:n siirto liikkutti X-akselia 100 mm ( $\pm 0,02$  mm). Kalibrointien jälkeen pystyttiin suorittamaan ensimmäiset tulostukset.



Kuva 28. Ensimmäinen tulostus kehitetyn 3D-tulostimen prototyyppillä.

Runkorakenteen, mekaniikan ja lämmitettävän tulostuspöydän osalta jäi kuitenkin kehitettävää. Runkorakennetta pystytään vieläkin yksinkertaistamaan ja osien määrää on tarkoitus pudottaa lähemmäs tavoiteltua 50 osan määrää. Lineaarijohteiden asentamista varten tulisi runkorakenteelle valmistaa erityiset ohjausurat, jolloin ne olisi helppo asentaa suoraan. Lämmitettävä tulostupöytä on rakenteeltaan jo kohtalaisen hyvä ja lämmityselementit toimivat hyvin. Tulostuspöydän korkeutta pyritään kuitenkin madaltamaan, sekä asennettavuutta helpottamaan entisestään.

Kokonaisuudessaan 3D-tulostimen paino on noin 15kg. Tulostimen tukevuus ja jämähkyys ovat erinomaiset, mutta liikuteltavuus on vielä hankalaa. 3D-tulostimen fyysiset ulkomitat ovat 42,5 cm x 38 cm x 45 cm (leveys, pituus, korkeus).

## 5.2 Elektroniikan kokoonpano

Tämän osion tarkoitus on kertoa ensimmäisen elektroniikkavaihtoehdon ominaisuuksista ja toimivuudesta. Piirilevy tilattiin prototylevynä Kiinasta, samalta yritykseltä, kuin lämmityselementit. Piirilevylle ladottavat komponentit tilattiin elektroniikkaliikkeiden verkkokaupoista, sekä muutamat komponentit saatiin koulun komponenttivarastosta.



Kuva 29. Ensimmäinen piirilevyversio valmiina komponenttien käsiladontaan.

Piirilevyn työn jälki oli erinomainen ja siinä ei havaittu tuotannosta aiheutuneita ongelmia. Piirilevy silmäiltiin läpi ja mahdollisia oikosulkuja tai vetojen katkeamisia ei havaittu. Tämän jälkeen pystyttiin suorittamaan komponenttien käsinladonta.



Kuva 30. Piirilevyn toiminnan testailua.

Muutama suunnitteluvirhe pystyttiin korjaamaan hyppylankoja käyttämällä. Pikaisten ensitestien jälkeen pystyttiin toteamaan piirilevyn toimivuus. Mikrokontrollerille ladattiin Atmel Corporationsin AVR272 USB CDC-ohjelmisto. Tämän jälkeen, kun elektroniikka yhdistettiin tietokoneeseen, se tunnistettiin sarjaliikenneportissa ja siihen pystyttiin ottamaan yhteys Pronterface 3D-tulostusohjelmalla (LIITE 12).

Elektroniikka tarvitsi seuraavaksi laiteohjelmiston, joka tarvitsi pientä viilausta, jotta se olisi yhteensopiva uuden kehitetyn elektroniikan kanssa. Laiteohjelmistossa on jo valmiina tuki monelle erilaiselle mikrokontrollerille, joten uuden elektroniikkaratkaisun lisääminen laiteohjelmistoon AT90USB647-mikrokontrollerilla pitäisi onnistua. Tässä tapauksessa laiteohjelmisto vaatiikin paljon enemmän muokkauksia, kuin vain nastojen toimintojen määrittely AT90USB647-mikrokontrollerille. AT90USB647-elektroniikkaratkaisun testaus jouduttiin siirtämään työn ulkopuolelle rajallisen aikataulun vuoksi. Tästä johtuen käytännön testejä ei tällä elektroniikkaratkaisulla pystytty tekemään.

Toinen elektroniikkaratkaisu kehitettiin yhteensopivaksi laiteohjelmistossa jo valmiiksi tuetun mikrokontrollerin kanssa ilman suurempia muokkauksia. Tässä tapauksessa ainoa muokkauksen kohde oli nastojen toimintojen määrittely (LIITE 13). Rajallisesta aikataulusta johtuen tämänkin elektroniikkaratkaisun testaaminen toiminnassa jäi työn ulkopuolelle.

Molempien elektroniikkaratkaisujen etu kehityskohteeseen verrattuna on lämmönmittauksen ja -ohjauksen tuki muovipursottimelle, sekä lämmitettävälle tulostuspöydälle. Ohjaus ensimmäisessä versiossa toteutetaan yksinkertaisen P-säätimen tavoin.

P-säädin pyrkii pitämään mittasuureen säätöalueen sisäpuolella sen sijaan, että se pyrkisi pitämään sen tasan samansuuruisena, kuin ohjesuure on. (Mikkola 1999, 62.)

### 5.3 Protovaiheen hyöty

Protovaiheessa ehdittiin projektin tekoaikana käydä läpi vain runkorakenteen, mekaniikan ja lämmitettävän tulostuspöydän osuudet. Työn ulkopuolelle jäi suoritettavaksi muovipursottimen ja elektroniikan testaaminen.

Valmistettu prototyyppi antoi arvokasta tietoa 3D-tulostimen toiminnasta, sekä siihen liittyvistä ongelmakohdista. Prototyypin avulla pystyttiin toteamaan laitteen toimivuus käytännössä, sekä saamaan tietoa jota ei 3D-suunnitteluohjelmistolla pystynyt havaitsemaan.

Prototyypin rakentamiseen tarvituista komponenteista osa valmistutettiin alihankintana ja osa tilattiin kansainvälisiltä markkinoilta yritysten verkkokaupoista. Alihankintana teetettiin ohutlevytyötä vaativat komponentit, eli pääasiassa runkorakenne. Ohutlevykomponentit tilattiin Lapualaiselta Plate Power Oy:ltä.

Protovaiheen komponentteja tilatessa havaittiin muutama seikka, joka vaikutti komponenttien tilaamiseen. Suomen hintataso on todella korkea. Suurimalla osalla yrityksistä, joista tilattava komponentti olisi löytynyt oli tilaaminen tehty erittäin hankalaksi. Tämä johti siihen, että komponentteja etsittiin ulkomailta, josta tuotteen tilaaminen oli helppoa ja hintataso oli huomattavasti alhaisempi. Esimerkiksi kymmenen FR-4 materiaalista valmistetun piirilevylämmityselementin ostaminen Suomesta olisi maksanut n. 250 €. Kiinasta kymmenen levyä postikuluineen ostettiin 22 € hintaan.

## 6 TULOKSET JA YHTEENVETO

3D-tulostimen tuotekehitysprojekti oli testattujen osa-alueiden osalta onnistunut. Työssä päästiin suurimmalta osin asetettuihin tavoitteisiin. Työn päätavoitteet olivat laiteteknologian kehittäminen keskittymällä tulostusnopeuden ja –laadun parantamiseen sekä yksinkertaistamaan 3D-tulostimen rakennetta.

Työssä runkorakenteelle tavoitteeksi asetettiin yksinkertaistaminen, osien lukumäärän vähentäminen, tukevuus ja helppo asennettavuus. Runkorakenteen osalta rakenne saatiin yksinkertaistettua niin, että osien lukumäärä tippui 1400:sta osasta 320 osaan. Runkorakenteen paino hieman ylitti asetetut tavoitteet. Painon ylittyminen vaikutti negatiivisesti 3D-tulostimen liikuteltavuuteen, mutta paransi sen tukevuutta. Tukeva runkorakenne mahdollistaa laadukkaamman tulostusjäljen ja mahdollistaa tulostusnopeuden kasvattamisen. Runkorakenteen kokoonpanoaika lyheni huomattavasti verrattuna rakennussarjan rakentamiseen.

Lämmitettävän tulostuspöydän ensimmäinen tavoite oli kehittää uusi lämmityselementti korvaamaan Nichrome-vastuslangalla tehty lämpövastus. Lämmityselementiksi kehitettiin piirilevyistä tehty vastus, jonka etuna oli helpompi asennettavuus ja tasainen lämmöntuotto. Toinen tavoite oli tulostuspöydän painon tiputtaminen n. 20 % - 30 %. Painoa onnistuttiin pudottamaan rakennussarjan tulostuspöydän n. 1,3 kg painosta n. 30 %. Kehitetyn tulostuspöydän paino oli n. 0,9 kg. Tämän ansiosta tulostusnopeutta voidaan kasvattaa.

Elektroniikan kehittämisen tavoite oli parantaa tulostustarkkuutta sekä lisätä puuttuvia ominaisuuksia. Rakennussarjan elektroniikalla päästään teoriassa 0,04 mm liiketarkkuuteen. Kehitetyn elektroniikan liiketarkkuus teoriassa on 0,02 mm. Rakennussarjan elektroniikasta puuttui tärkeitä ominaisuuksia. Tästä johtuen kehitettyihin elektroniikkaratkaisuihin lisättiin seuraavat ominaisuudet vanhojen ominaisuuksien lisäksi: 1 kpl lämmitysohjaimia, 3 kpl rajakytkimiä, 1/16 microsteppingiä tukeva askelmoottoriohjain, LCD-näyttö sekä 2 kpl lämpötilaantureita. Kehitetty elektroniikka mahdollistaa paremman lämpötilaohjauksen sekä paremman liiketarkkuuden, joka johtaa parempaan tulostusjälkeen.

Taulukossa 3 käytiin läpi tuotekehitysprojektin yhteenveto. Taulukossa esitetään ensimmäisessä sarakkeessa rakennusprojektin teknisiä tietoja ja ominaisuuksia. Toiseen sarakkeeseen kerättiin tuotekehitysprojektin tavoitteet. Viimeisessä sarakkeessa esitellään tuotekehitysprojektin tulokset.

Taulukko 3: Tuotekehitysprojektin tavoitteet ja tulokset.

	RepRap	Tavoite	1. Prototyyppi
<b>RUNKORAKENNE</b>			
Osien lukumäärä	n. 1400	50	320
Liiketarkkuus	0,04 mm, 1/8 MS	0,02 mm, 1/16 MS	0,02 mm, 1/16 MS
Rakennusalue	170 x 190 x 90 (mm)	230 x 230 x 160 (mm)	230 x 230 x 145 (mm)
Nopeus	25 mm/s	75 mm/s	50 - 75 mm/s
Koko	50 x 40 x 36 (cm)	< 50 x 50 x 50 (cm)	42,5 x 38 x 45 (cm)
Paino	13kg	10 kg	15 kg
<b>ELEKTRONIIKKA</b>			
Askelmoottorit	4 lähtöä	4 lähtöä	V1 & V2 4 lähtöä
Rajakytkimet	3 kpl	6 kpl	V1 & V2 6 kpl
Lämmitysohjaimet	1 kpl	2 kpl	V1 & V2 2 kpl
Lämpötila-anturit	1 kpl	3 kpl	V1 & V2 3 kpl
Näytön tuki	-	Kyllä, LCD	V1 & V2 Kyllä, LCD
Tuulettimen ohjaus	Kyllä	Kyllä	V1 & V2 Kyllä
SD_Kortinlukija	-	Kyllä	V1 Kyllä, lisäkortilla V2 Ei
Virtalähde	2x 75W 12-24V	ATX 12V PSU	ATX 12V PSU
Mikrokontrolleri	ATmega644P	AT90USBxxx	V1 AT90USB647 V2 ATmega644P
Ohjausnapit	-	2-4 kpl	V1 4 kpl, V2 0 kpl

Tuotekehitysprojekti oli mielenkiintoinen, laaja ja haastava kokemus. Projektissa työskenneltiin uuden ja mielenkiintoisen laiteteknologian parissa. Kokemusta tuli lisää jokaiselta työssä tarvittua osa-alueelta: projektin hallinta, tuotekehitys ja -suojaus, mekaaninen suunnittelu, elektroniikan suunnittelu, ohjelmointi, kaupankäynti komponenttivalmistajien kanssa kansainvälisillä markkinoilla sekä tuotannon suunnittelu. Aihealue oli laaja ja työtunteja käytettiin paljon projektin tekemiseen. Projektin tavoiteaikataulu ja aikataulun toteutuma ovat esitety kuvissa 31 ja 32.



Projekti: 3D-tulostin\_V0.1  
 Tekijä: Janne Pihlajamäki  
 Ryhmä: KLTITE07SU

Suunnitelma Tehtävä	2011							
	Touko	Kesä	Heinä	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu
RepRap kitin rakentaminen								
RepRap kitin testaus ja analysointi								
Tiedonhankinta markkinoilta								
Tuotekehitysprojektin tavoitteet								
V0.1_Rungon luonnos&suunnittelu								
V0.1_Mekaniikan hankinta&vertailu								
V0.1_Elektroniikan suunnittelu								
V0.1_Lämmitetty tulostuspöytä suun.								
V0.1_Muovipurstotin luonnostelu								
Protovaihe								
Komponenttien tilaaminen								
Proton kokoonpano								
Proton analysointi								
Tavoitteet seuraavaan versioon								
ONT-Kirjoitusvaihe								
Valmistuminen								19.joulu

Kuva 31: Projektin tavoiteaikataulu.

Projekti: 3D-tulostin\_V0.1  
 Tekijä: Janne Pihlajamäki  
 Ryhmä: KLTITE07SU

Toteutuminen Tehtävä	2011								2012
	Touko	Kesä	Heinä	Elo	Syys	Loka	Marras	Joulu	Tammi
RepRap kitin rakentaminen									
RepRap kitin testaus ja analysointi									
Tiedonhankinta markkinoilta									
Tuotekehitysprojektin tavoitteet									
V0.1_Rungon luonnos&suunnittelu									
V0.1_Mekaniikan hankinta&vertailu									
V0.1_Elektroniikan suunnittelu									
V0.1_Lämmitetty tulostuspöytä suun.									
V0.1_Muovipurstotin luonnostelu& suun.									
Protovaihe									
Komponenttien tilaaminen									
Proton kokoonpano									
Proton analysointi									
Tavoitteet seuraavaan versioon									
ONT-Kirjoitusvaihe									
Valmistuminen								19.joulu	

Kuva 32: Projektin aikataulun toteuma.



## LÄHTEET

Aaltonen, J., Kousa, S & Stor-Pellinen, J. 2004. Elektroniikan perusteet. 4. korjattu. p. Helsinki: Limes ry.

Alain, A. Understanding CNC routers. FPInnovations.

Allegro Microsystems. 2011. A4988 stepper driver datasheet. [www-dokumentti]. Allegro Microsystems. [Viitattu 02.10.2011]. Saatavissa: [http://www.allegromicro.com/en/Products/Part\\_Numbers/4988/4988.pdf](http://www.allegromicro.com/en/Products/Part_Numbers/4988/4988.pdf)

Atmel Corporations. 2008. AVR272 USB CDC datasheet. [www-dokumentti]. Atmel Corporations. [Viitattu 25.10.2011]. Saatavissa: [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc7619.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc7619.pdf)

Atmel Corporations. 2009. AT90USB647 datasheet, revision K, updated 11/09. [www-dokumentti]. Atmel Corporations. [Viitattu 24.10.2011]. Saatavissa: [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/doc7593.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/doc7593.pdf)

Atmel Corporations. 2010. Atmega644P datasheet, revision A. [www-dokumentti]. Atmel Corporations. [Viitattu 22.11.2011]. Saatavissa: [http://www.atmel.com/dyn/resources/prod\\_documents/8011S.pdf](http://www.atmel.com/dyn/resources/prod_documents/8011S.pdf)

Cadsoft, 2011. Eagle PCB design software. [Verkkosivu]. Cadsoft. [Viitattu 22.11.2011]. Saatavissa: <http://www.cadsoftusa.com/eagle-pcb-design-software/product-overview/?language=en>

Corsair, 2011. Product page CX430W. [Verkkosivu]. Corsair. [Viitattu 21.10.2011]. Saatavissa: <http://www.corsair.com/power-supply-units/builder-series/builder-series-cx430.html>

Dustyn, R. 2010. Making things move DIY mechanisms for inventors, hobbyists, and artists. McGraw-Hill Professional.

Epcos. 2009. Thermistor G590 datasheet. [www-dokumentti]. Epcos. [Viitattu 14.10.2011]. Saatavissa: [http://www.epcos.com/inf/50/db/ntc\\_09/Glass\\_enc\\_Sensors\\_\\_B57560\\_\\_G560\\_\\_G1560.pdf](http://www.epcos.com/inf/50/db/ntc_09/Glass_enc_Sensors__B57560__G560__G1560.pdf)

Floyd Kelly, J. & Hood-Daniel, P. 2011. Printing in plastic: build your own 3D printer. Apress.

FTDI, Future Technology Devices International, 2011. FT232R – USB UART IC. [Verkkosivu]. FTDI. [Viitattu 09.10.2011]. Saatavissa: <http://www.ftdichip.com/Products/ICs/FT232R.htm>

Hautala, M. & Peltonen, H. 2001. Insinöörin (AMK) fysiikka osa 1. 6. p. Jyväskylä: Lahden Teho-Opetus Oy.

Jokinen, T. 1987. Tuotekehitys. 6. korjattu. p. Helsinki: Otatieto Oy.

Karjalainen, J. 1999. Prototyyppien käyttö – Hyötyjen ja kustannusten arviointi. Helsinki: Metalliteollisuuden kustannus Oy.

Mentor Graphics, 2011. Pads PCB design program. [Verkkosivu]. Mentor Graphics. [Viitattu 17.10.2011]. Saatavissa: <http://www.mentor.com/products/pcb-system-design/products/pads-suites/>

Mikkola, J-M. & Värjä, P. 1999. Uusi kiinteistöautomaatio. Elimäki: Korja.

Natureworks LLC. 2011. PLA 4043D technical datasheet. [www-dokumentti]. Natureworks LLC, 1. [Viitattu 27.10.2011]. Saatavissa: [http://www.natureworkslc.com/Product-and-Applications/~-/media/Technical\\_Resources/Technical\\_Data\\_Sheets/Technical\\_DataSheet\\_4043D\\_films\\_pdf.pdf](http://www.natureworkslc.com/Product-and-Applications/~-/media/Technical_Resources/Technical_Data_Sheets/Technical_DataSheet_4043D_films_pdf.pdf)

Orbi-Tech. 2011. Transparent PLA filament, round, 3mm. [Verkkosivu]. Orbi-Tech. [Viitattu 15.10.2011]. Saatavissa: <http://www.orbi-tech.de/shop/Plastic-Welding-Rod/PLA/Transparent-PLA-filament-round-3-mm::256.html>

Patentti- ja rekisterihallitus. 2011. Hyödyllisyysmalli. [Verkkosivu]. Patentti- ja rekisterihallitus. [Viitattu 23.11.2011]. Saatavissa: <http://www.prh.fi/fi/hyodyllisyysmallit.html>

Pikkarainen, E. 1999. NC tekniikan perusteet. Helsinki: Opetushallitus.

Siemens. 2011. Solid Edge overview. [Verkkosivu]. Siemens. [Viitattu 27.10.2011]. Saatavissa: [http://www.plm.automation.siemens.com/fi\\_fi/products/velocity/solidedge/overview/index.shtml](http://www.plm.automation.siemens.com/fi_fi/products/velocity/solidedge/overview/index.shtml)

Sprinter. 2011. Firmware for 3D printer electronics. [Verkkosivu]. Github, Sprinter. [Viitattu 7.10.2011]. Saatavissa: <https://github.com/kliment/Sprinter>

Wexon. 2011. Askelmoottorit. [Verkkosivu]. Wexon. [Viitattu 18.10.2011]. Saatavissa: <http://www.wexon.fi/sivu.php?id=86>

Xpress 3D. 2011. Rapid Prototyping process comparasion. [Verkkosivu]. Xpress 3D. [Viitattu 8.12.2011]. Saatavissa: <http://www.xpress3d.com/Processes.aspx?sh=1>

# LIITTEET

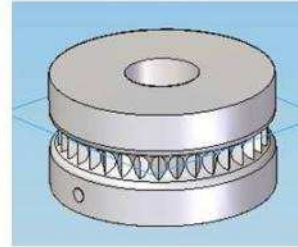
## LIITE 1 G-koodi malliesimerkki

```

1  G92 E0
2  G1 E3 F1200
3  G1 E2 F1200
4  G92 E0
5  G1 X5.0 Z0.9 F3000
6  G92 E0
7  G90
8  G21
9  G92 E0
10 ; S25.0
11 G1 X92.496 Y50.545 Z0.4 F7800.0
12 G1 F1200.0
13 G1 E6.0
14 G1 F7800.0
15 G92 E0
16 G1 X92.964 Y53.235 Z0.4 F1500.0 E0.085
17 G1 X94.487 Y56.319 Z0.4 F1500.0 E0.1921
18 G1 X97.021 Y58.82 Z0.4 F1500.0 E0.303
19 G1 X99.438 Y60.116 Z0.4 F1500.0 E0.3883
20 G1 X102.264 Y60.77 Z0.4 F1500.0 E0.4787
21 G1 X125.665 Y60.771 Z0.4 F1500.0 E1.2073
22 G1 X128.298 Y60.703 Z0.4 F1500.0 E1.2893
23 G1 X130.91 Y59.967 Z0.4 F1500.0 E1.3738
24 G1 X133.459 Y58.459 Z0.4 F1500.0 E1.466
25 G1 X135.259 Y56.608 Z0.4 F1500.0 E1.5464
26 G1 X136.731 Y54.068 Z0.4 F1500.0 E1.6378

10939 G1 X98.362 Y46.213 Z8.0 F1500.0 E0.0508
10940 G1 F1200.0
10941 G1 E-0.2538
10942 G1 F1500.0
10943 G91
10944 G92 E0
10945 G1 E-2 F900
10946 G1 Z2.0 F400
10947 G1 Z2.0 F5000
10948 G90
10949 G1 X5.0 Y5.0 F3000.0
10950 M84

```

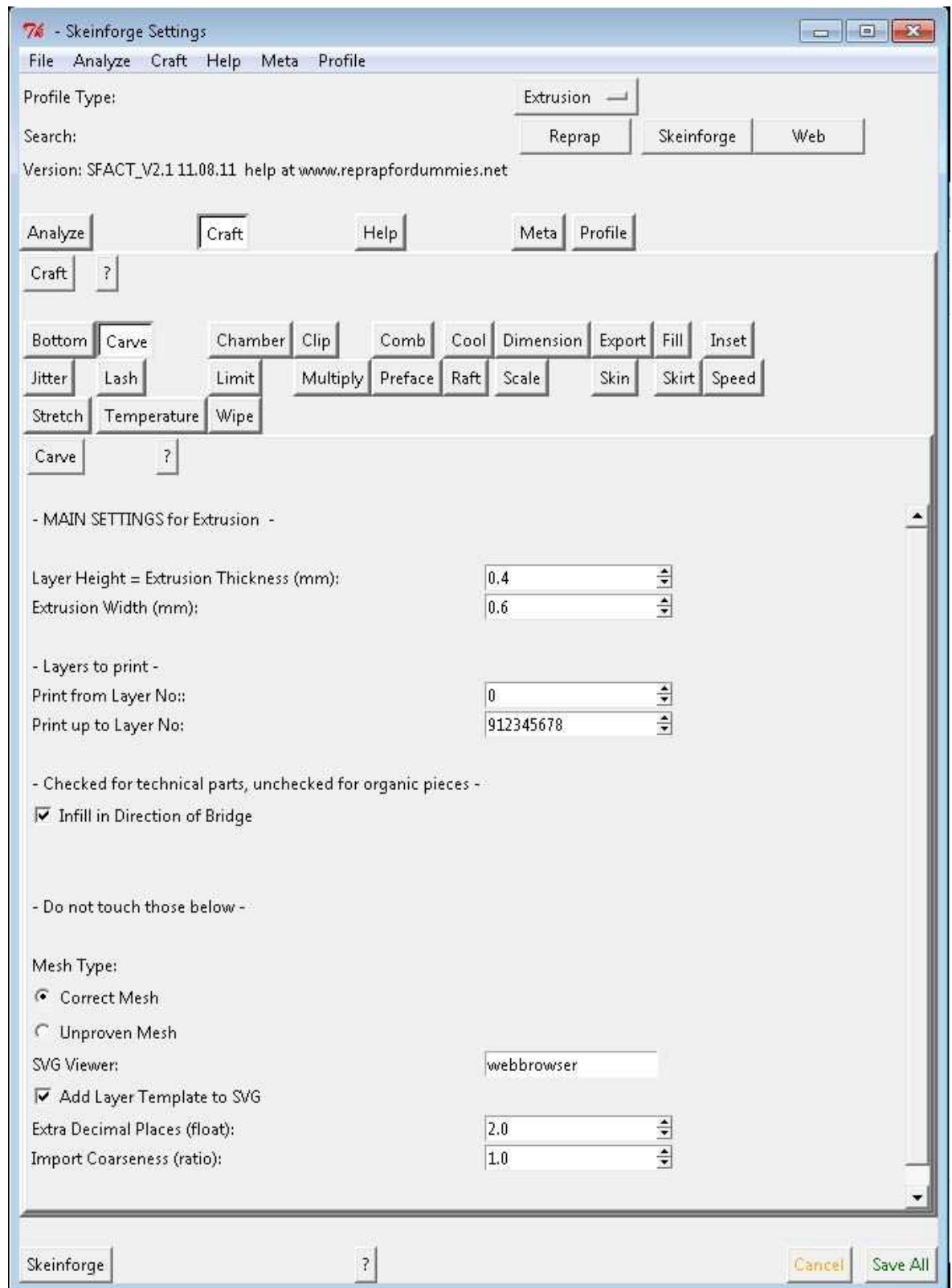


Tässä kappaleen G-koodin esittely.

Kappaleen tulostamiseen generoitiin yhteensä

10950 riviä G-koodia. Kappaleen koko on R7,5mm x 8 mm.

## LIITE 2 Skeinforge

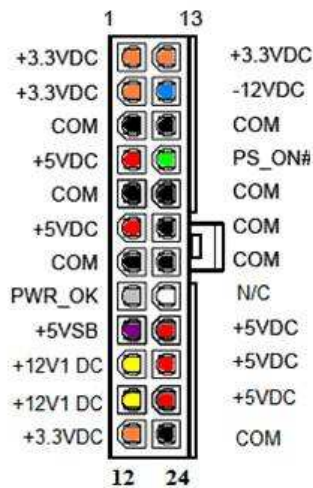
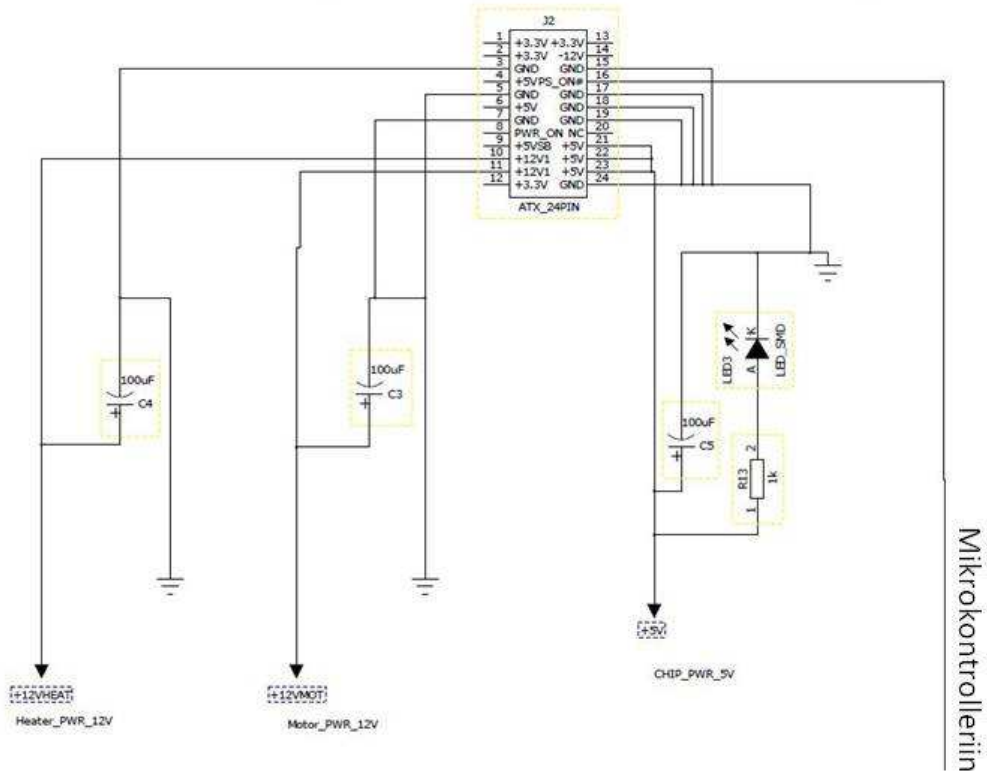


## LIITE 3 Runkorakenteen luonnoksia



LIITE 4 Virtaliitin ja virransyötön kytkentäkaavio

# CHIP\_MOTOR\_HEATER\_POWER





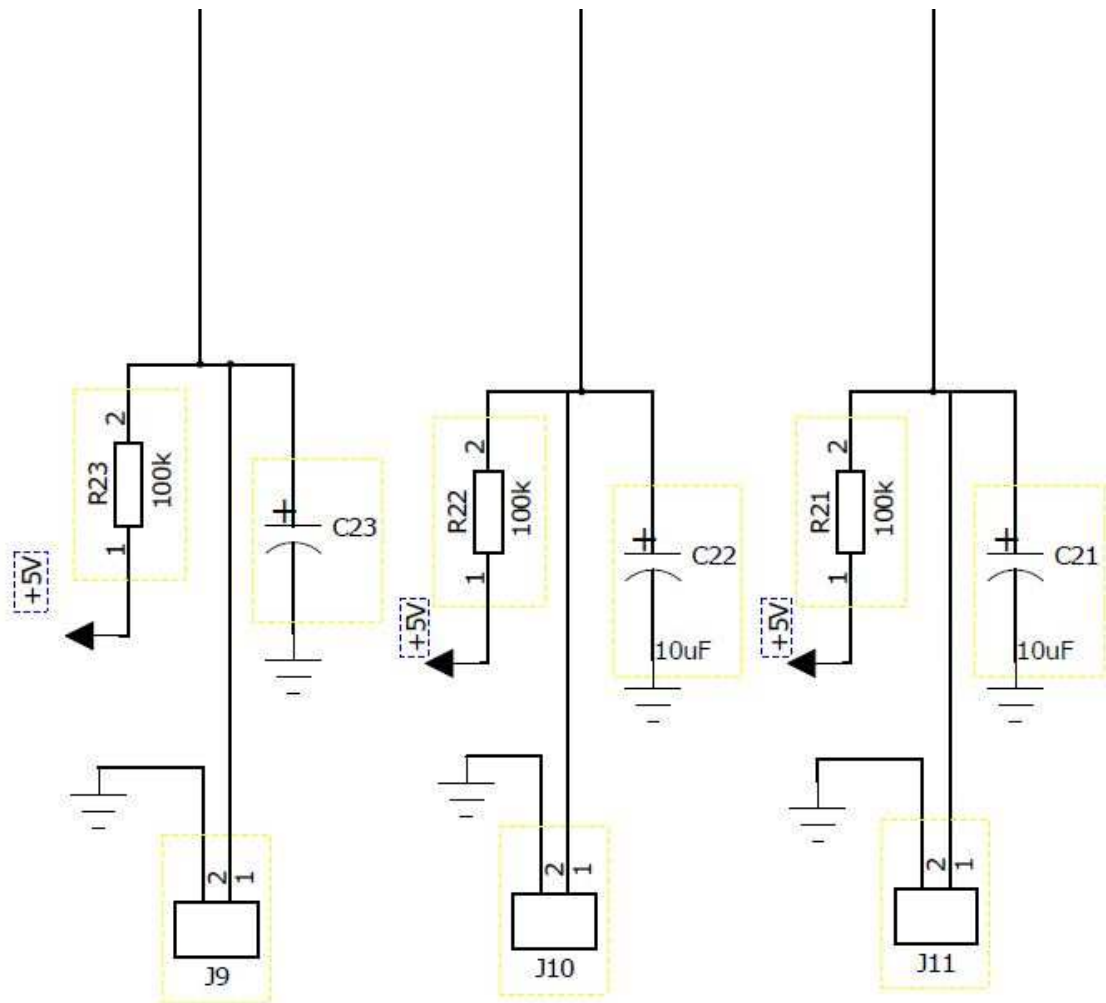
## LIITE 5 Epcos G560 NTC thermistor

## R/T characteristics

R/T No.	7002		7003		8304	
T (°C)	B <sub>25/100</sub> = 3988 K		B <sub>25/100</sub> = 3625 K		B <sub>25/100</sub> = 4092 K	
	R <sub>T</sub> /R <sub>25</sub>	α (%/K)	R <sub>T</sub> /R <sub>25</sub>	α (%/K)	R <sub>T</sub> /R <sub>25</sub>	α (%/K)
-55.0	96.33	7.4	63.225	6.7	100.11	7.4
-50.0	66.866	7.2	45.46	6.5	69.56	7.2
-45.0	47.037	6.9	33.07	6.3	48.945	6.9
-40.0	33.508	6.7	24.324	6.0	34.853	6.7
-35.0	24.156	6.4	18.081	5.8	25.102	6.5
-30.0	17.613	6.2	13.575	5.6	18.275	6.2
-25.0	12.98	6.0	10.29	5.4	13.443	6.0
-20.0	9.6643	5.8	7.8716	5.3	9.9853	5.9
-15.0	7.2656	5.6	6.0739	5.1	7.4867	5.7
-10.0	5.5129	5.4	4.7258	4.9	5.6636	5.5
-5.0	4.22	5.3	3.7062	4.8	4.3212	5.3
0.0	3.2575	5.1	2.9287	4.6	3.324	5.2
5.0	2.5348	4.9	2.3311	4.5	2.5769	5.0
10.0	1.9876	4.8	1.8684	4.4	2.0127	4.9
15.0	1.5699	4.6	1.5075	4.2	1.5834	4.7
20.0	1.2488	4.5	1.224	4.1	1.2542	4.6
25.0	1.0000	4.4	1.0000	4.0	1.0000	4.5
30.0	0.80594	4.3	0.82176	3.9	0.80239	4.3
35.0	0.65355	4.1	0.67909	3.8	0.64776	4.2
40.0	0.53312	4.0	0.56422	3.7	0.52598	4.1
45.0	0.43735	3.9	0.47122	3.6	0.4295	4.0
50.0	0.36074	3.8	0.3955	3.5	0.35262	3.9
55.0	0.29911	3.7	0.33355	3.4	0.291	3.8
60.0	0.24925	3.6	0.2826	3.3	0.24136	3.7
65.0	0.20872	3.5	0.24049	3.2	0.20114	3.6
70.0	0.17558	3.4	0.20553	3.1	0.16841	3.5
75.0	0.14837	3.3	0.17637	3.0	0.14164	3.4
80.0	0.12592	3.2	0.15195	2.9	0.11963	3.3
85.0	0.10731	3.2	0.13141	2.9	0.10147	3.3
90.0	0.091816	3.1	0.11406	2.8	0.086407	3.2
95.0	0.078862	3.0	0.099352	2.7	0.073867	3.1
100.0	0.067988	2.9	0.086837	2.7	0.063383	3.0
105.0	0.058824	2.9	0.076149	2.6	0.054584	3.0
110.0	0.051071	2.8	0.066989	2.5	0.04717	2.9
115.0	0.044489	2.7	0.059112	2.5	0.040901	2.8
120.0	0.03888	2.7	0.052316	2.4	0.035581	2.8
125.0	0.034084	2.6	0.046433	2.4	0.03105	2.7
130.0	0.02997	2.5	0.041327	2.3	0.027179	2.6
135.0	0.02643	2.5	0.03688	2.3	0.023861	2.6
140.0	0.023373	2.4	0.032998	2.2	0.021008	2.5
145.0	0.020727	2.4	0.029598	2.2	0.018548	2.5
150.0	0.018429	2.3	0.026612	2.1	0.016419	2.4
155.0	0.016427	2.3	0.023984	2.1	0.014573	2.4

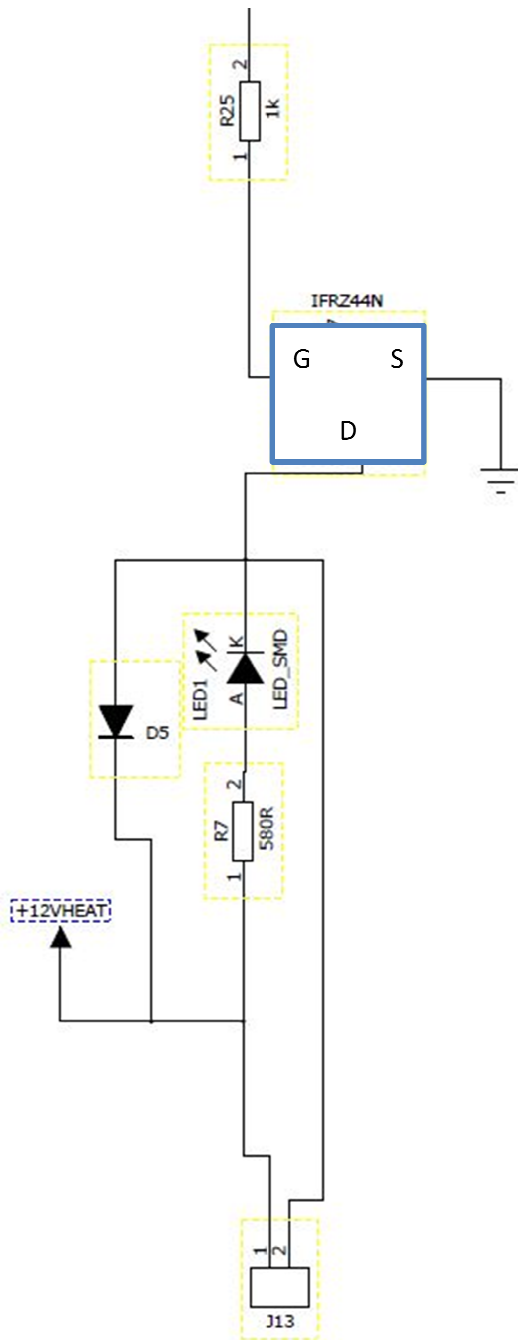


## LIITE 6 Termistorin kytkentäkaavio

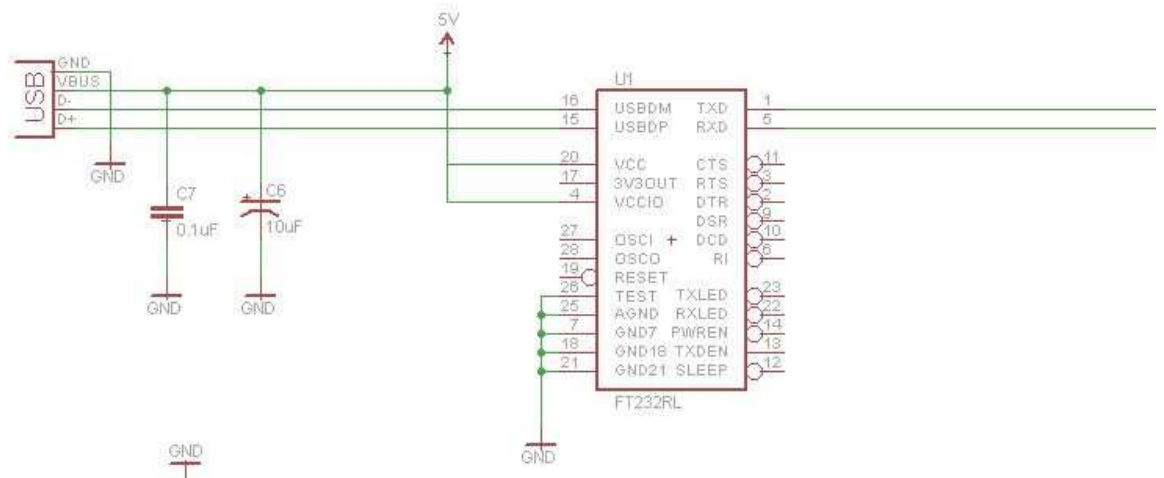


# Temp\_sensors

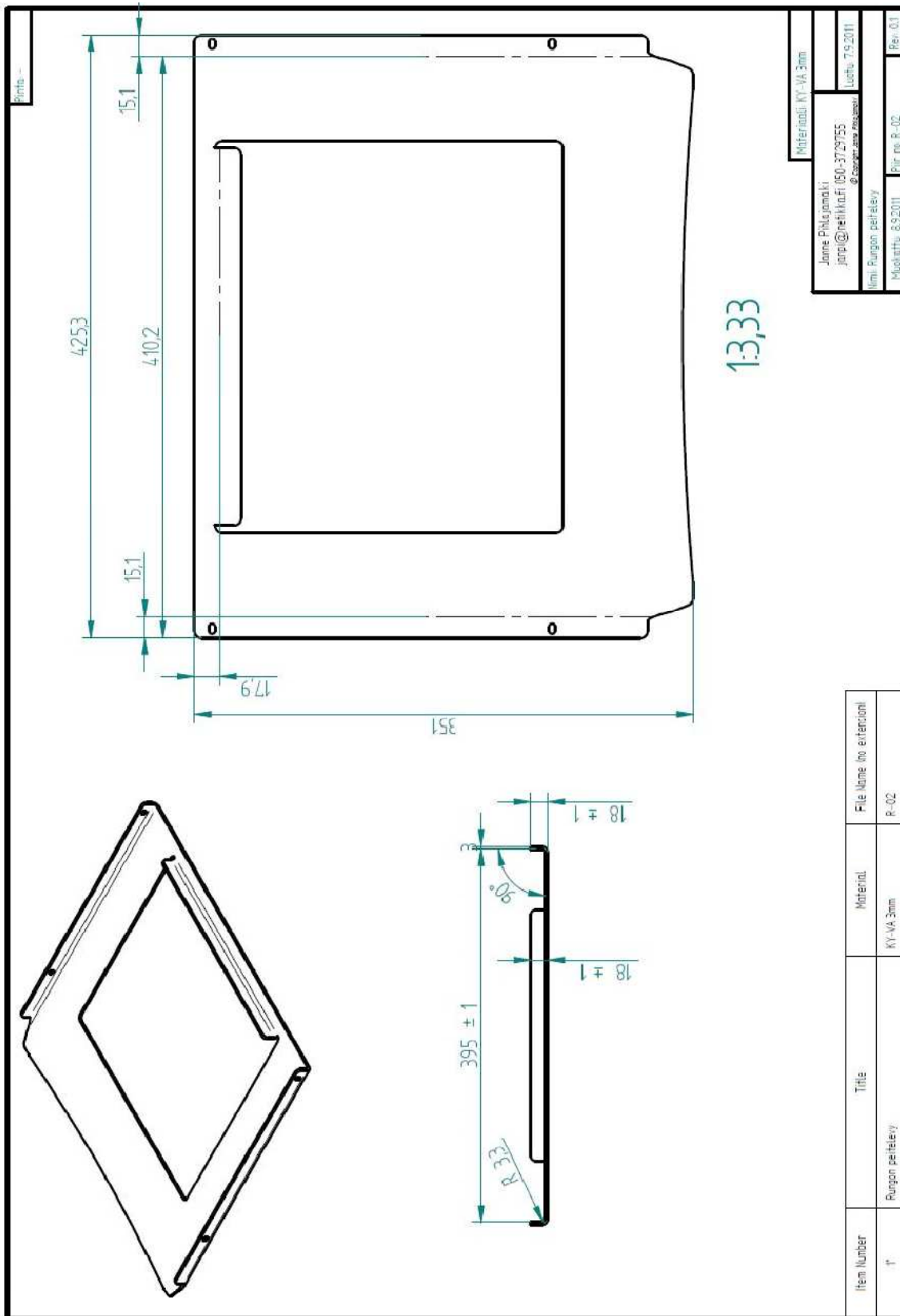
## LIITE 7 Lämmitys-elementin kytkentäkaavio (MOSFET)



## LIITE 8 FT232 kytentäkaavio



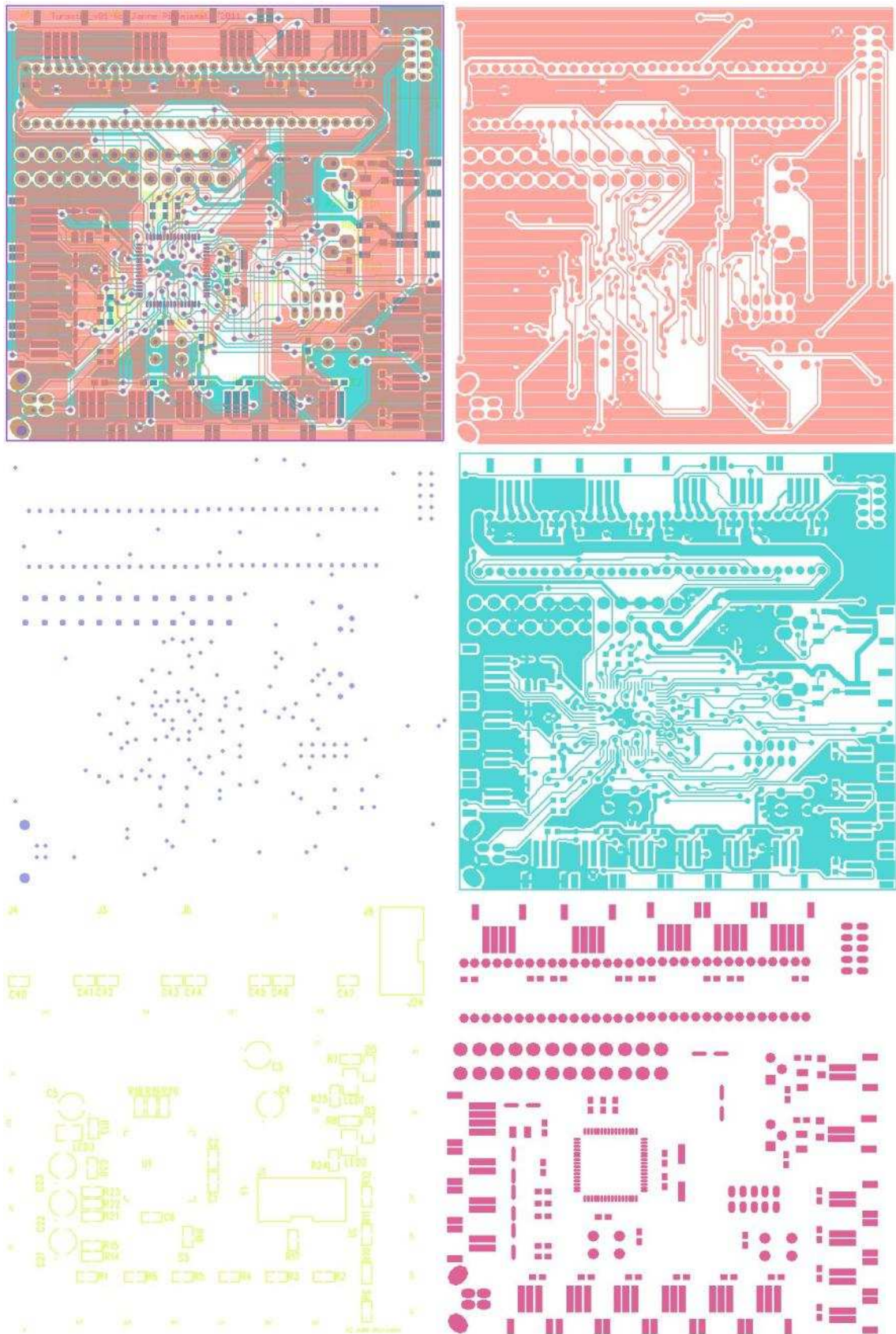
LIITE 9 Runkorakenteen komponentin tuotantokuva



Materiaali KY-VA 3mm	
Janne Pitkämäki janpi@tehtava.fi (050-3729755) © Copyright 2011 Tehtävä	Luo: 7.9.2011
Ilmi Rungon periteley	
Muokattu 6.9.2011	Piir no: R-02
	Rev: 0.1

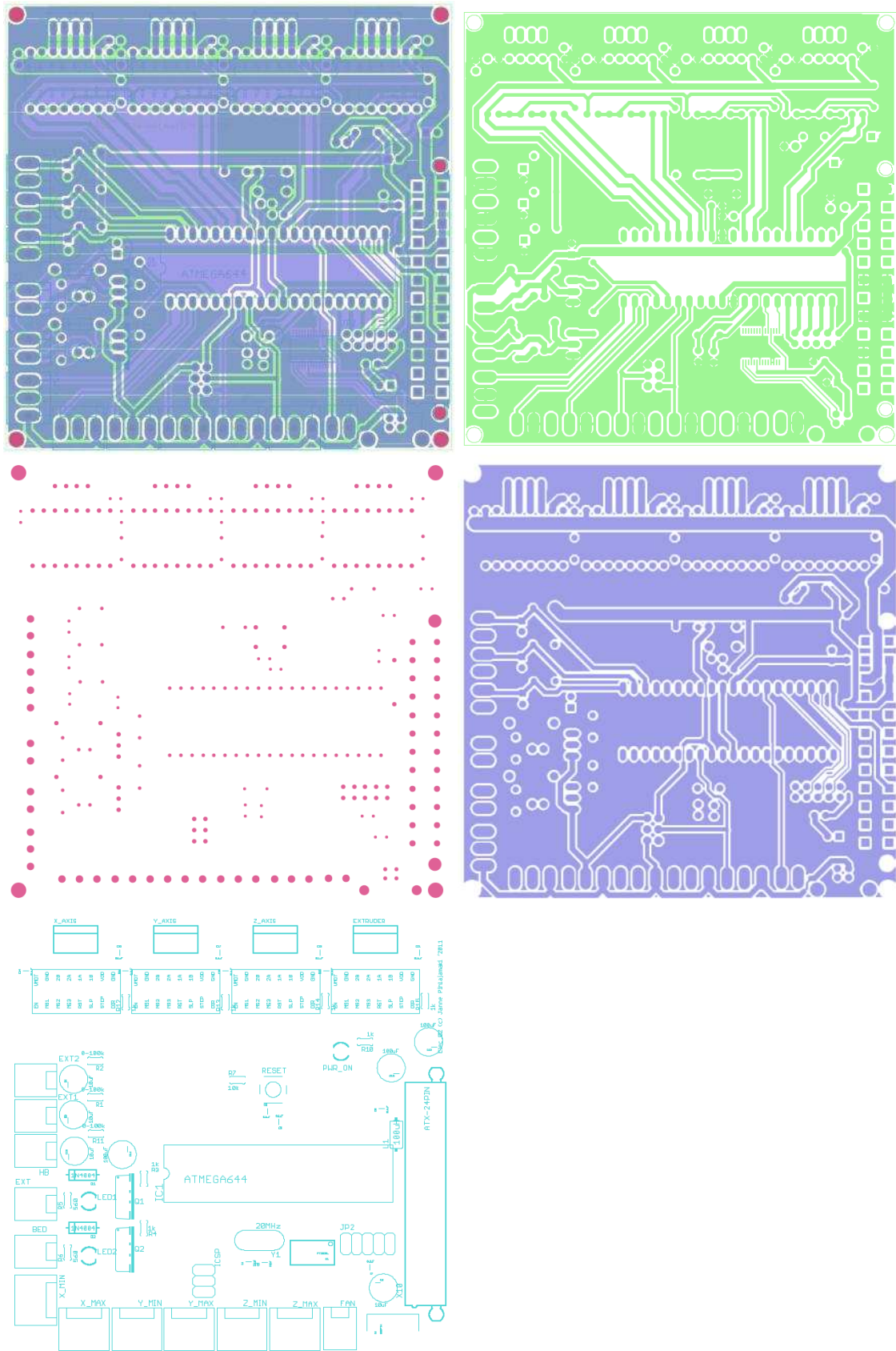
Item Number	Title	Material	File Name (no extension)
1	Rungon periteley	KY-VA 3mm	R-02

## LIITE 10 Elektroniikan gerber tuotantokuvat



Ensimmäisen elektronikkaversiokaverin gerber-tiedostot.

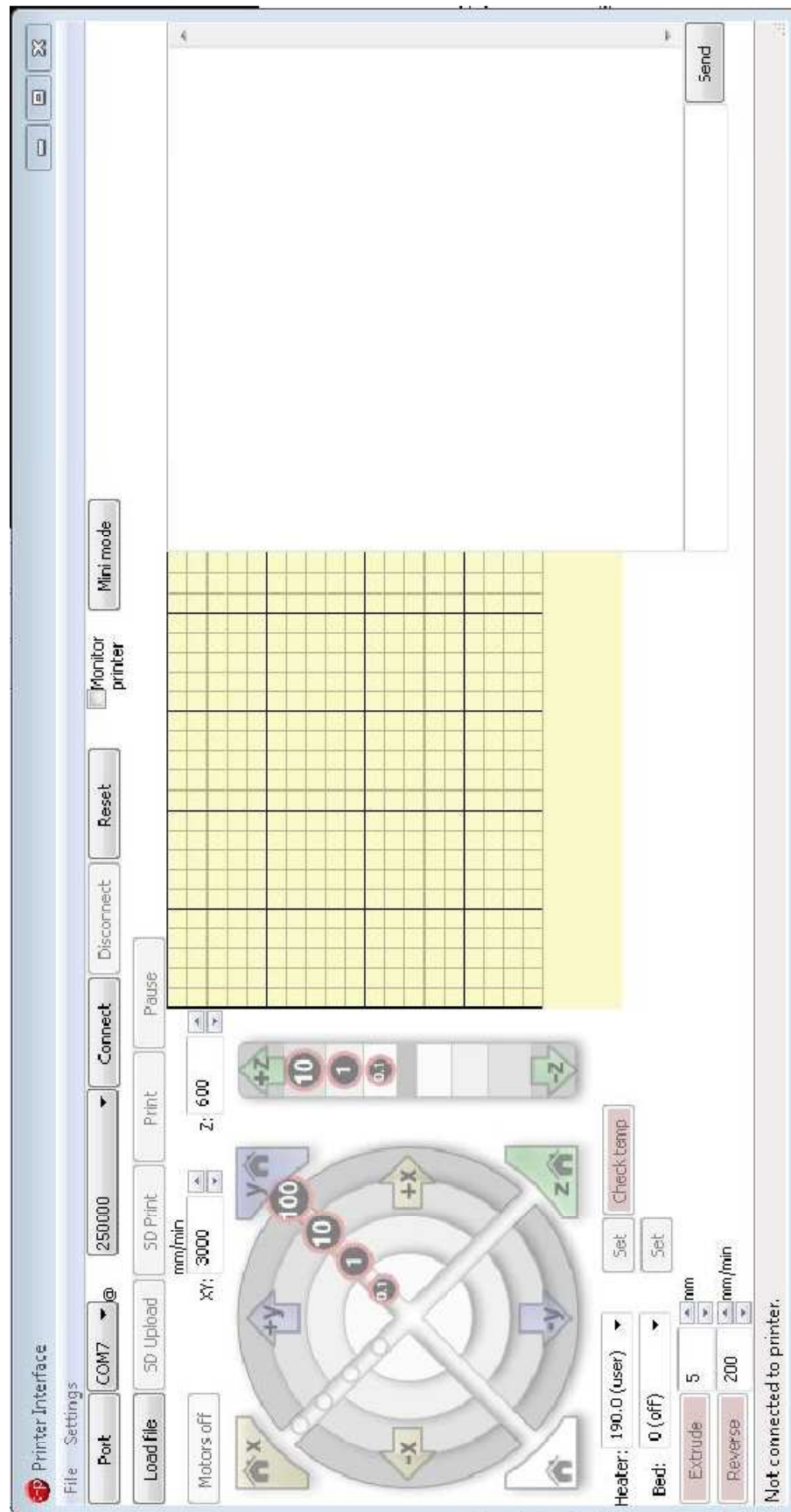




Toisen elektronikkaversio gerber-tiedostot.

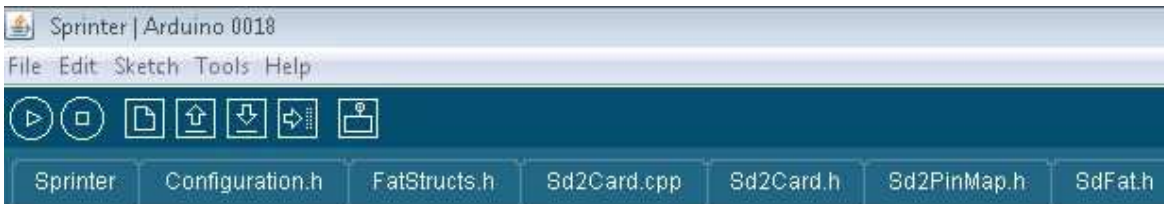
**LIITE 11 Lämmitettävän tulostupöydän 2D DXF kuva**

## LIITE 12 Pronterface tulostusohjelma





## LIITE 13 Atmega644P nastojen toimintojen määrittely laiteohjelmistossa



```

Sprinter | Arduino 0018
File Edit Sketch Tools Help

Sprinter Configuration.h FatStructs.h Sd2Card.cpp Sd2Card.h Sd2PinMap.h SdFat.h

#if MOTHERBOARD == 676
#define KNOWN_BOARD 1

#if !defined(__AVR_ATmega644P__) && !defined(__AVR_ATmega1284P__)
#error Oops! Make sure you have 'Sanguino' selected from the 'Tools -> Boards' menu.
#endif

#define X_STEP_PIN      27
#define X_DIR_PIN      26
#define X_ENABLE_PIN   28
#define X_MIN_PIN      0
#define X_MAX_PIN      1

#define Y_STEP_PIN      25
#define Y_DIR_PIN      24
#define Y_ENABLE_PIN   28
#define Y_MIN_PIN      2
#define Y_MAX_PIN      5

#define Z_STEP_PIN      23
#define Z_DIR_PIN      22
#define Z_ENABLE_PIN   28
#define Z_MIN_PIN      6
#define Z_MAX_PIN      7

#define E_STEP_PIN      19
#define E_DIR_PIN      18
#define E_ENABLE_PIN   28

#define SDPOWER         -1
#define SDSS             -1
#define LED_PIN         -1
#define FAN_PIN         21
#define PS_ON_PIN       15
#define KILL_PIN        -1
#define ALARM_PIN       -1

#define HEATER_0_PIN    3 // Heater BED
#define HEATER_1_PIN    4 // Heater Extruder
#define TEMP_0_PIN      31 // Temp_sensor Bed
#define TEMP_1_PIN      30 // Temp_sensor Extruder 1
#define TEMP_2_PIN      29 // Temp_sensor Extruder 2

#endif

```