

Henri Kauppinen

# Tietoliikennetekniikan opetuslevyn kehittäminen

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Elektroniikan koulutusohjelma

Insinöörityö

20.5.2013

Tekijä Otsikko	Henri Kauppinen Tietoliikennetekniikan opetuslevyn kehittäminen
Sivumäärä Aika	36 sivua + 14 liitettä 24.5.2013
Tutkinto	insinööri (AMK)
Koulutusohjelma	elektroniikka
Suuntautumisvaihtoehto	elektroniikkasuunnittelu
Ohjaaja	lehtori Janne Mäntykoski
<p>Tässä insinööriytyössä oli tavoitteena kehittää XBee-radiomoduuleille alusta tietoliikennetekniikan opetukseen Metropolia Ammattikorkeakoulussa. Piirilevy suunniteltiin EAGLE-piirilevynsuunnitteluohjelmiston ilmaisella versiolla. Levyn kehittämisen lisäksi työhön kuului kirjoittaa englanninkielinen ohje, jonka avulla opiskelijat voivat käyttää oppilaitoksen piirilevyjyrsintä EAGLEllä suunniteltujen levyjen jyrsimiseen. Lisäksi selostettiin ohjeen sisältöä sekä avattiin tiedostojen sisältöä. Tiedostoja käytetään piirilevyjen valmistuksessa.</p> <p>Työssä selvitettiin myös lyhyesti USB 2.0:n määritelmiä virransyötössä. Piirilevyä ei suunniteltu täyttämään kyseisiä määritelmiä, minkä ei kuitenkaan pitäisi vaikuttaa levyn toimintaan. Lyhyen selvityksen perusteella todettiin, että on olemassa vastaavia kaupallisia laitteita, jotka eivät täytä määritelmiä.</p> <p>Piirilevystä tehtiin monikäyttöinen, jolloin sitä voidaan tarvittaessa käyttää myös muuhun kuin pääasialliseen tarkoitukseensa. Radiomoduulien nastat kytkettiin liittimelle samoin kuin levyllä olevan USB-UART-piirin nastat. Digitaalisia tuloja ja lähtöjä varten levyllä laitettiin ledejä ja kytkinvärähtelyiltä suojattuja liukukytкимиä. Analogisia tuloja varten levyllä tuli yksi potentiometri. Piirilevyllä olevan regulaattorin käynnistymistä viivästettiin RC-piirillä.</p> <p>Piirilevystä tehtiin oppilaitoksen jyrsimellä prototyyppi, jolla kytkennän toiminnallisuutta testattiin. Erityisesti tarkastelun kohteena oli RC-piirin toiminta sekä ledien toiminta pienellä virralla. RC-piirin viive osoittautui olevan alle puolet suunnitellusta, ja ledien kirkkaus oli suhteellisen heikko.</p> <p>Alustan parantamiseksi jäi RC-piirin poistaminen tai toiminnan muuttaminen sekä ledien kirkkauden parantaminen. Ledien muuttaminen pintaliitosmallisiksi ja lukumäärän lisääminen voisivat olla myös mahdollisia muutoksia. Komponenttien sijoittelua olisi myös parannettava käytännöllisempään suuntaan.</p>	
Avainsanat	tietoliikennetekniikka, xbee, eagle, opetuslevy, gerber, usb

Author Title Number of Pages Date	Henri Kauppinen Development of a Education Platform for Telecommunication Studies. 36 pages + 14 appendices 24 May 2013
Degree	Bachelor of Engineering
Degree Programme	Electronics
Specialisation option	Electronics Design
Instructor	Janne Mäntykoski, Senior Lecturer
<p>The goal of this graduate study was to develop a platform for XBee-radiomodules to be used in telecommunication studies at Metropolia University of Applied Sciences. The circuit board was designed using a freeware version of the EAGLE-PCB design program. One part of this study was to write a guide in English about how to use EAGLE with Metropolia's milling machine. With the help of that guide, students should be able to mill PCBs designed with EAGLE. In addition, the guide's content is explained and the content of the files is opened. Files are used in the manufacture of PCBs.</p> <p>A USB 2.0 specification about power delivery was briefly studied. The platform was not designed to meet these specifications, which should not affect how the platform works. After a short clarification, it was found out that there exist also commercial equipment that does not meet USB's power delivery specifications.</p> <p>Circuit board was made to be multifunctional, and it can be used to other purposes if needed. Pins of the radiomodules were connected to connectors, likewise USB-UART-circuit's pins. Leds and switching bounce protected slide switches were placed on the board for digital I/O. One potentiometer came for analog inputs. Onboard regulator's starting was delayed with an RC-circuit.</p> <p>A prototype was made with the university's milling machine, and its functionality was tested. Especially how RC-circuit works and how leds work with low current were studied. RC-circuit's delay was under a half from designed and the brightness of the leds was relatively weak.</p> <p>As suggestions for the platform's improvement, removing RC-circuit or changing its function and improving led's brightness are put forward. Other possible modifications could be changing leds to SMD-versions and increasing their number. Placement of components should also be improved to be more practical.</p>	
Keywords	telecommunication, xbee, eagle, education platform, gerber, usb

## Sisällys

Tiivistelmä

Abstract

Sisällys

Lyhenteet ja käsitteet

1	Johdanto	1
2	EAGLE-ohje	2
2.1	EAGLE-ohjeen sisältö	2
2.2	CAM-tiedostojen luonti	5
2.3	CAM-tiedostojen tuonti CircuitCAM:iin	7
3	Gerber- ja Excellon-tiedostomuodot	7
3.1	Gerber-tiedostomuodosta yleisesti	7
3.2	Gerber-koodien tulkinta	9
3.3	Excellon EAGLEssä	15
4	USB:n virtaominaisuudet	17
5	Opetuslevyn kehittäminen	21
5.1	Langattomat moduulit	21
5.2	Levynsuunnittelun lähtökohdat	24
5.3	Opetuslevyn suunnittelu	24
5.4	Opetuslevyn prototyyppi	30
5.5	Kustannusarvio	32
6	Yhteenveto	33
	Lähteet	34
	Liitteet	36

## Lyhenteet ja käsitteet

AD	<i>Aperture Definition</i> ; Gerber-tiedostoissa käytettävä parametri valotusaukkojen määrittämisessä
AM	<i>Aperture Macro</i> ; Gerber-tiedostoissa käytettävä parametri makrojen määrittämisessä
ASCII	<i>American Standard Code for Information Interchange</i> ; tietokonemerkistö, jossa on 128 paikkaa; yhden merkin esittämiseen käytetään 7 bittiä
CAM	<i>Computer-Aided Manufacturing</i> ; tietokoneavusteista valmistusta tarkoittava lyhenne
CR	<i>Carriage Return</i> ; ASCII-merkistössä esiintyvä ohjausmerkki, joka palauttaa kursorin rivin alkuun
CTS	<i>Clear-To-Send</i> ; tiedonsiirrossa käytetty ohjaussignaali
DR	<i>Design Rules</i> ; suunnittelusääntöjä, joilla määritellään erilaisia parametreja piirilevynsuunnitteluohjelmistoissa
DRC	<i>Design Rule Check</i> ; toiminto, joka testaa, täyttääkö suunnittelu säännöissä annetut parametrit
FFD	<i>Full-Function Device</i> ; laite, joka voi toimia monissa eri tehtävissä
FTDI	<i>Future Technology Devices International</i> ; skotlantilainen puolijohdekomponenttien valmistaja
Hubi	laite, joka jakaa USB-portin useammaksi portiksi
ICUSB	<i>InterChip USB</i> ; Standardi-USB:n pienitehoinen variantti
IEEE	<i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> ; Kansainvälinen tekniikan alan järjestö

LF	<i>Line Feed</i> ; ASCII-merkistössä esiintyvä ohjausmerkki, joka aloittaa uuden rivin
NPTH	<i>Non-Plated Through Hole</i> ; piirilevyssä oleva reikä, jota ei ole läpikuparoitu
PPTC	<i>Polymeric Positive Temperature Coefficient</i> ; virranrajoitukseen käytettävä passiivinen komponentti
PTH	<i>Plated Through Hole</i> ; piirilevyssä oleva reikä, joka on läpikuparoitu
P2P	<i>Peer-to-Peer</i> ; vertaisverkosta käytettävä lyhenne
RFD	<i>Reduced-Function Device</i> ; laite, jolla on rajatut toimintaominaisuudet
RTS	<i>Request-To-Send</i> ; tiedonsiirrossa käytetty ohjaussignaali
SOF	<i>Start-of-Frame</i> ; USB:n isäntäohjaimen lähettämä paketti
SP	<i>Space</i> ; ASCII-merkistössä esiintyvä ohjausmerkki, joka tekee välilyönnin
SPI	<i>Serial Peripheral Interface</i> ; molempiin suuntiin samanaikaisesti toimiva synkroninen sarjaliikenneväylä
SSD	<i>Solid-State Drive</i> ; tietokoneen massamuisti, jossa ei ole liikkuvia osia
UART	<i>Universal Asynchronous Receiver Transmitter</i> ; usein mikropiireissä esiintyvä asynkroninen sarjaliikennepiiri
WiFi	nimeä käytetään usein puhuttaessa langattomista lähiverkoista
WLAN	<i>Wireless Local Area Network</i> ; lyhennettä käytetään langattomista lähiverkoista
XBee	Digi Internationalin tuotenimi pienikokoisille langattomille radiomoduuleille

## 1 Johdanto

Tämä insinööri työ on tehty Metropolia Ammattikorkeakoululle. Työssä esitellään alusta, johon voidaan kiinnittää langattomia XBee-moduuleita. Moduulit on tarkoitus kiinnittää tietokoneeseen USB-portin kautta, ja tästä syystä alustaan tarvitaan sopiva piiri hoitamaan tietoliikenne moduulien ja tietokoneen välillä. Oppilaitoksen käytössä on ennestään adaptoreita, joilla moduulit voidaan kytkeä tietokoneeseen. Niiden ainoa tehtävä on muodostaa kommunikaatioyhteys moduulin ja tietokoneen välille. Työssä kehitettävään levyyn on tarkoitus laittaa loistediodeja, kytkimiä ja potentiometri, jota voidaan hyödyntää A/D-muuntimien ja PWM-toimintojen kanssa.

Tietoliikennetekniikan opettamiseen tarvitaan välineitä, jotta opetukseen saadaan myös käytännön osuutta teorian lisäksi. Erilaisten valmiiden moduulien käyttäminen opetuksessa on yleistä. Moduulit eivät kuitenkaan ole aina sellaisinaan käyttökelpoisia, vaan ne tarvitsevat alustan, johon ne voidaan kiinnittää. Alustoja on olemassa paljon erilaisia, mutta yhteistä niille on se, että yleensä ne sisältävät vaihtelevan määrän ominaisuuksia, kuten kytkimiä, liittimiä ja painonappeja. Liittimien avulla toteutetaan halutut kytkennät moduulin ja alustan ominaisuuksien välillä.

Piirilevyn suunnittelu on tarkoitus toteuttaa käyttämällä ilmaista versiota EAGLE-piirilevynsuunnitteluohjelmistosta. Lopulliset piirilevyt on suunniteltu tilattavaksi piirilevynvalmistajalta, mutta kokeiluversio jyrksitään käyttämällä oppilaitoksen piirilevyjyrsintä. Koska käytettävä suunnitteluohjelmisto ei ole oppilaitoksessa virallisessa käytössä, ei ole myöskään olemassa ohjeita, joiden avulla ohjelmalla suunnitellut levyt voitaisiin jyrksiä oppilaitoksen jyrsimellä. Tästä syystä työhön sisältyy myös sellaisen ohjeen laatiminen, jonka avulla pitäisi olla mahdollista jyrksiä myös EAGLEllä suunnitellut levyt.

Työssä myös perehdytään samalla jyrsinohjelmistojen käyttämiin tiedostomuotoihin ja niiden tärkeimpiin parametreihin, jotta käyttäjät tietäisivät paremmin, mitä tiedostot sisältävät. Tiedoista on hyötyä siinä vaiheessa, kun ollaan tilaamassa levyjä piirilevyvalmistajilta. Valmistajilla voi olla vaatimuksia sen suhteen, mitä asetuksia tiedostoissa käytetään.

## 2 EAGLE-ohje

### 2.1 EAGLE-ohjeen sisältö

Ohje on suunnattu henkilöille, jotka käyttävät EAGLE-ohjelmistoa piirilevyjen suunnittelussa. Tarkoitus ei ole opettaa ohjelmiston käyttöä vaan antaa yksinkertaiset ohjeet, joiden avulla levy saa jyrittyä käyttämällä oppilaitoksen piirilevyjyrsintä LPKF Proto-Mat S62. Ohje on kirjoitettu englanniksi, koska oppilaitoksessa on paljon englanninkielisiä opiskelijoita. Suomenkielistä versiota ohjeesta ei ole tarkoitus tehdä, sillä voidaan olettaa kaikkien osaavan englantia tarpeeksi hyvin ymmärtääkseen ohjeen. Mahdolliset myöhemmin tehtävät muutokset ja päivitykset ovat näin helpommin hallittavissa. Ohjeen pitäisi päteä myös vanhempiin ohjelmiston versioihin, mutta sitä ei testata. Ohjetta tehtäessä on käytetty tekoheikellä uusinta saatavilla olevaa EAGLE:n versiota 6.4.0. Ohjeessa (liite 1) neuvotaan ulkoreunojen, kuparitasojen sekä kuparinhoitoalueiden luonti. Ne voidaan kaikki tehdä tarvittaessa myös CircuitCAM-ohjelmassa, joka on jyrityksen ohjaukseen tarkoitettu tietokoneella.

Jotta piirilevy saadaan irti piirilevyaihiosta sellaisena kuin halutaan, piirilevyssä on oltava määriteltynä ulkoreunat. Ohjeessa neuvotaan yksinkertaisen suorakulmaisen ulkoreunan piirtäminen. Ohjelmalla voidaan toteuttaa tarvittaessa helposti muitakin muotoja kuin suoraa ja teräviä kulmia. Kokemuksen mukaan ainakin ilmaisessa ohjelmistoversiossa on ulkoreunat määriteltä valmiiksi siten, että niistä näkee mikä on suurin levykoko, jonka ilmaisversiolla voi suunnitella. Mainittakoon, että tämä levykoko on 100 x 80 mm.

Ohjeessa ulkoreunat piirretään *Dimension*-kerrokselle, joka on tarkoitettu ulkoreunojen ja läpikuparoimattomien reikien merkintään. Reunaviiva piirretään käyttämällä *Wire*-työkalua. Viivan leveydeksi on kannattavaa valita jokin pieni luku, kuten 0,5 mm. EAGLE:ssä käytetään oletusarvona leveyttä 0 mm. Kapeammasta viivasta on helpompaa hahmottaa levyn oikea koko, sillä se mitataan yleensä viivojen keskikohdista.

Nykyään vähänkin monimutkaisemmissa laitteissa käytetään monikerrospiirilevyjä, joissa on useampia kuparikerroksia kuin kaksi. Varsinkin näissä levyissä on tavallista, että ainakin yhdestä kerroksesta tehdään yhtenäinen taso, johon voi tarvittaessa vetää kontakteja läpivientejä käyttämällä. Myös kaksikerroslevyjä käytettäessä voidaan hyödyntää tällaisia tasoja. Ehkä yleisin menetelmä on tehdä piirilevyn pohjapuolelle



maataso, jolloin normaalisti poistettavasta kuparista muodostetaan yhtenäinen alue, johon kaikki maasignaalit voidaan yhdistää. Tällä menetelmällä voidaan parantaa monia piirilevyn ominaisuuksia, joihin ei kuitenkaan tässä työssä perehdytä. Maatasojen lisäksi voidaan usein tehdä myös tasoja, joissa on tietty jännite, eli kyseessä on tehonsyöttötaso. Ohjeessa kerrotaan perusidea maatasojen luomiseen.

Maatasojen luonti aloitetaan valitsemalla *Polygon*-työkalu, joka on tarkoitettu monikulmioiden piirtämiseen. Seuraavaksi valitaan oikea kerros ja viivanleveys. Leveyden valinta riippuu alueesta, mutta kapeammalla saa tarkempaa jälkeä. Toisaalta pieni leveys kasvattaa CAM-tiedostojen kokoa. *Isolate*-parametrillä valitaan, kuinka suuren eristevälin ohjelma tekee luotavan tason ja muiden signaalien sekä *Dimension*-kerroksen objektien välille. Oletusarvoisesti tämä kannattaa jättää nolaksi. Tällöin eristeväli määräytyy suunnittelusäännöissä (DR, Design Rules) olevien arvojen mukaan. Jos arvoksi laetaan suurempi kuin suunnittelusäännöissä, ohjelma käyttää suurempaa arvoa.

Ohjeessa neuvotaan käyttämään nuolella osoitettuja asetuksia. Näistä ensimmäinen vasemmalta on kuparin täyttötavan valinta. Osoitettu valinta saa aikaan täysin yhtenäisiä kuparialueita. Toinen vaihtoehto on taas ristikkomalli, jota ei suositeta käytettäväksi. Kolmas vaihtoehto piirtää näkyviin vain monikulmion ulkoreunat, mutta CAM-tiedostoja tehtäessä alueet lasketaan kuten nuolella merkityssä vaihtoehdossa. Huonona puolena on silloin se, ettei lopullista kuparialuetta nähdä suoraan.

Toinen nuolella valittu asetus liittyy juotospisteiden lämmönsiirtymiseen. Jos keskellä kuparialuetta on siihen kuuluva juotospiste, valittu asetus poistaa sen ympäriltä osan kuparista, jotta lämpö ei johdu juotettaessa niin suurelle alueelle. Ominaisuuden englanninkielinen nimitys on *thermal relief*. Toinen vaihtoehto olisi jättää kaikki kupari pisteen ympärille, joka vaikeuttaisi juottamista. Läpivienteihin asetuksella ei ole merkitystä, koska niihin ei yleensä juoteta mitään. Yksittäisten komponenttien juotospisteistä *thermal relief* -toiminto voidaan poistaa, vaikka se tasoa tehdessä olisi määritetty käytettäväksi.

Kolmas nuolella valittu toiminto on orpojen pudotus. Jos levyllä on kuparialueita, joita ei voida yhdistää luotuun tasoon, kyseiset kuparialueet jätetään pois. Toinen vaihtoehto säilyttää orvot, eli kaikki tason sisällä olevat alueet, jotka eivät kuitenkaan kuulu tasoon, jätetään jäljelle.

Seuraavaksi tasoalue piirretään halutulle piirilevyn alueelle. Tasoalueen muotoa voidaan muuttaa käyttämällä siihen soveltuvia toimintoja. Alueen piirtämisen jälkeen alueelle annetaan nimi, jonka pitää olla sama kuin sillä signaalilla, joka siihen halutaan liittää. Nimi annetaan *Name*-komentoa käyttämällä. Nimen antamisen jälkeen taso pitää vielä laskea, ennen kuin se tulee näkyviin. Laskemiseen käytetään *Ratsnest*-toimintoa.

Varsinkin silloin, kun piirilevy valmistetaan itse, joko oppilaitoksessa tai kotona, piirilevyn pintaan ei yleensä saada juotteenestopinnoitetta, joka suojaisi juotosvaiheessa tinasilloilta. Tällöin juotosten onnistumisen kannalta on parempi, ettei levyltä löydy ylimääräisiä kuparialueita. Piirilevyjyrsin jättää signaaleihin kuulumattomat kuparialueet paikoilleen, jos sitä ei erikseen määritetä niitä poistamaan. Jos halutaan poistaa kaikki ylimääräinen kupari, se on helpointa toteuttaa CircuitCAMissa. EAGLE-ohjeessa on kuitenkin kerrottu menetelmä, jolla kuparinpoisto voidaan määrittää mihin kohtaan tahansa. Tämä ohjeistus on sellainen, jota ei kannata yleisesti käyttää, vaan se on tarkoitettu lähinnä oppilaitoksen jyrshintä varten.

Ohjeessa neuvotaan käyttämään kerroksia *tRestrict* ja *bRestrict* poistettavien kuparialueiden määrittelemiseen. Kyseiset kerrokset on tarkoitettu estämään automaattista johdinreititintä sijoittamasta johtimia näille alueille. On huomioitava, että suunnittelu-sääntöjen tarkastus (DRC, Design Rule Check) raportoi virheellisiksi kaikki vedot, jotka näiden alueiden sisään on sijoitettu. Tästä syystä näitä alueita ei kannata määrittää, ennen kuin levy on muilta osin suunniteltu valmiiksi ja virheet tarkastettu. Jos käytetään maa- tai muita kuparitasoja alueilla, joihin kuparinpoisto määritetään, pitää ennen kuparinpoistoalueiden määrittämistä tehdä kaikki kyseisiin kuparitasoihin liittyvät CAM-tiedostot. Muutoin kuparialueet voivat jäädä pois tiedostoista.

Alueiden määrittämiseen voidaan käyttää suorakulmioita (*Rectangle*) tai monikulmioita (*Polygon*). Suorakulmioita käytettäessä valitaan vain oikea kerros ja piirretään kuvio haluttuun kohtaan. Jos halutaan tehdä erimallisia alueita, on käytettävä monikulmioita, joita voidaan muokata erilaisilla työkaluilla.

## 2.2 CAM-tiedostojen luonti

Kun piirilevy on suunniteltu siihen pisteeseen, että se on valmis jysyttäväksi, siinä vaiheessa on vuorossa CAM-tiedostojen tekeminen jysyntää varten. CAM-tiedostot ovat ASCII-muotoisia tekstitiedostoja, joiden avulla piirilevynvalmistaja saa tarvittavat tiedot, jotta levy voidaan valmistaa. CAM tulee sanoista *Computer Aided Manufacturing*, joka tarkoittaa tietokoneavusteista valmistusta.

EAGLEssä CAM-tiedostojen teko aloitetaan avaamalla *CAM Processor* suunnitteluohjelman valikosta. Ensimmäiseksi ohjeessa (liite 1, s. 4) neuvotaan poratiedostojen tekeminen. Tätä varten EAGLEssä on valmis työtiedosto nimeltään *excellon.cam*. Käytännössä valmis työtiedosto tarkoittaa sitä, että siinä on valmiiksi valittuna sellaiset asetukset, joita oletetaan yleensä käytettävän. Avautuvassa ikkunassa laitteena (*Device*) on *EXCELLON*. Excellonista on kerrottu tarkemmin luvussa 3.3. *File*-kohdassa oleva merkintä *%N.drd* tarkoittaa, että ohjelmalla luotu CAM-tiedosto on nimeltään muotoa *Levytiedostosi nimi.drd*.

Normaalisti valintaruudut kohdissa *Mirror*, *Rotate* ja *Upside down* tulisi jättää tyhjiksi, sillä silloin kaikki kerrokset tulevat tiedostoihin samalla tavalla kuin ne näkyvät suunnitteluohjelmassa. Poratiedostoja tehdessä avattu *excellon.cam*-työ sisältää valmiiksi valittuna kerrokset *Drills* ja *Holes*. *Drills* tarkoittaa juotospisteisiin liittyviä reikiä, jotka yleensä läpikuparoidaan, kun taas *Holes* tarkoittaa sellaisia reikiä, joissa ei yleensä käytetä läpikuparointia eikä niissä ole sähköisiä kontakteja. Kiinnitysreiät ovat hyvä esimerkki kontaktittomista rei'istä. Koska oppilaitoksessa valmistetuissa levyissä ei käytetä läpikuparointia, valinnat on syytä pitää ennallaan.

Jos tehdään poratiedostoja piirilevynvalmistajalle, voi olla tarpeen tehdä kaksi eri tiedostoa, joista toiseen valitaan vain kerros *Drills* ja toiseen vain *Holes*. Tällöin ensimmäinen näistä voidaan nimetä esimerkiksi *PTH.drd*:ksi kirjoittamalla *%N*-merkkien paikalle *PTH*. *PTH*:lla (*Plated Through Hole*) viitataan läpikuparoituihin reikiin. Toiselle tiedostolle voidaan antaa *%N*-kohtaan nimeksi *NPTH* (*Non-Plated Through Hole*). Jos halutaan, ettei juotospisteeseen tule läpikuparointia, tämä voidaan osoittaa erillisellä tiedostolla, johon merkataan mitkä reiät jätetään kuparoimatta. Poratiedostot luodaan painamalla *Process Job*- tai *Process Section* -painiketta. Molemmat tuottavat tässä tapauksessa saman lopputuloksen.

Seuraavaksi ohjeessa neuvotaan, miten loput tarvittavista tiedostoista tehdään. Ensimmäiseksi avataan uusi työtiedosto *gerb274x.cam*. Nyt ikkunassa näkyy useampia välilehtiä, joista ensimmäinen on nimeltään *Component side*. Sillä tarkoitetaan komponenttipuolen sähköistä kerrosta. Tässä välilehdessä on esivalittuna kerrokset *Top*, *Pads* ja *Vias*. *Top* tarkoittaa mitä tahansa sille kerrokselle piirrettyä, mutta pääasiassa siinä on komponenttipuolen vedot. Loput kaksi tarkoittavat komponenttipuolen juotospisteitä ja läpivientejä. Jos ollaan tekemässä vain yksipuolista levyä, jossa kaikki komponentit ovat *Top*-puolella, kannattaa irtijyrsintää varten valita myös *Dimension*-kerros. Monet piirilevynvalmistajat suosittavat laittamaan jokaiseen tiedostoon piirilevyn ulko-reunat mukaan, jotta kerrokset voidaan helposti kohdistaa päällekkäin, jos ne eivät automaattisesti mene niin.

Jos halutaan tuottaa komponenttipuolen tiedosto heti, kun kaikki valinnat on tehty, voidaan painaa *Process Section*. Toinen vaihtoehto on käydä kaikki välilehdet läpi ja painaa sen jälkeen *Process Job*. Tällöin ohjelma tekee kaikkien välilehtien mukaiset tiedostot yhdellä painikkeen painalluksella. Ohjeesta on pyritty tekemään sellainen, ettei ylimääräisiä tiedostoja synny, ja tästä syystä siinä käytetään yhden osion kerrallaan tekevää menetelmää. Ylimääräiset välilehdet voidaan halutessa poistaa valitsemalla ensin kyseinen välilehti ja painamalla sen jälkeen *Del*. Tarvittaessa omia välilehtiä voidaan lisätä *Add*-painikkeella, minkä jälkeen tarvittavat asetukset voidaan tehdä sellaisiksi kuin halutaan.

*Solder side* -välilehdeltä valitaan asetukset juotospuolen tiedoston tekemiseen. Oppilaitoksen jysintä varten tiedostoa tehdessä on hyvä lisätä *Dimension*-kerros mukaan. Oppilaitoksella olevien PADSiä koskevien ohjeiden mukaan jysinohjelmassa piirilevyn ulkoreunojen jysintään otetaan reunatiedot juuri juotospuolen tiedostosta. Muista kerroksista valittuna tulee olla ainakin *Bottom*, *Pads* ja *Vias*.

*Silk screen CMP* -välilehteä ei ohjeessa ole käytetty mihinkään, mutta normaalisti siihen määritellään sellaiset kerrokset, jotka sisältävät tekstiä ja komponenttien paikka-merkintöjä. Teollisesti valmistetuissa piirilevyissä on usein komponenttipuolella valkoinen painatus, jolla on merkitty esimerkiksi komponenttien ääriviivoja, numeroita, arvoja ja muita levyn kasaajalle ja/tai käyttäjälle hyödyllisiä merkintöjä. Jysintä käytettäessä olisi mahdollista tehdä tekstiä niin, että kupari poistettaisiin kirjainten kohdalta, mutta sitä ei ohjeessa neuvota.

Seuraavaksi ohjeessa on vuorossa kuparinpoistoon liittyvien tiedostojen luonti. Yksinkertaisuuden vuoksi ohjeessa neuvotaan käyttämään välilehtiä *Solder stop mask CMP* ja *Solder stop mask SOL*. Näistä valitaan toinen tai molemmat riippuen siitä, tuleeko molemmille puolille levyä kuparinpoistoa. Jos kuparinpoistoalueita ei ole ollenkaan, tai ne haluaa tehdä CircuitCAMissa, voidaan näiden tiedostojen luonti jättää kokonaan väliin. Nämä välilehdet ovat alun perin tarkoitettu juotteenestopinnoitealueiden määrittelyyn, mutta ohjeessa niitä käytetään niiden sijaan kuparinpoistoon sopivalla tavalla. Välilehdiltä poistetaan valmiiksi valitut kerrokset ja tilalle valitaan tarpeen mukaan joko *tRestrict* tai *bRestrict*. Piirilevynvalmistajille ei yleensä tarvitse erikseen kertoa, mistä alueista ylimääräinen kupari poistetaan, vaan kaikki ylimääräinen kupari poistetaan automaattisesti. Toisin sanoen, vain ne kuparialueet jäävät levyille, jotka on sähköisten kerrosten tiedostoissa määritelty.

### 2.3 CAM-tiedostojen tuonti CircuitCAMiin

CircuitCAM on ohjelma, jolla CAM-tiedostot käsitellään, ennen kuin niiden perusteella tehdään levy. Oppilaitoksessa CircuitCAM tuottaa *.LMD*-päätteisen tiedoston, jota BoardMaster-ohjelma käyttää jrsimen ohjaamiseen. Koska ennestään on olemassa ohjeet, joiden avulla PADSilla tehdyt tiedostot tuodaan CircuitCAMiin, ohjeessa mainitaan tästä prosessista vain sellaiset asiat, jotka eroavat PADSin ohjeista. Niissä on mainittu apertuuritiedoston tuomisesta, mikä ei ole tarpeen edes PADSin tapauksessa, mikäli CAM-tiedostojen luomiseen käytetään niitä ohjeita, jotka oppilaitoksessa on kirjoitushetkellä käytössä. EAGLE-ohjeessa kerrotaan, mikä tiedostopääte vastaa mitäkin kerrosta CircuitCAMissa. Sen lisäksi siinä listataan asetukset, joita poratiedostojen tuonnissa pitäisi käyttää.

## 3 Gerber- ja Excellon-tiedostomuodot

### 3.1 Gerber-tiedostomuodosta yleisesti

Gerber-tiedostomuodon omistaa nykyään Ucamco, mutta alun perin sen kehitti Gerber Systems Corp. Gerber-nimi tulee yhtiön perustajalta Joseph Gerberiltä. Nykyään piirilevyt suunnitellaan usein käyttämällä tietokoneavusteista suunnittelua, joka tunnetaan lyhenteestä CAD (Computer-Aided Design). Suunnitelman muuttamiseksi fyysiseksi

piirilevyksi, valmistajat tarvitsevat riittävät tiedot levystä valmistusta varten. Tässä vaiheessa tulee vastaan lyhenne CAM (Computer-Aided Manufacturing) eli tietokoneavusteinen valmistus. Piirilevynsuunnitteluohjelmalla tehty levy muutetaan tekstimuotoiseksi tiedostoksi, jota valmistajien ohjelmat osaavat lukea. Yksi tällainen tiedostomuoto on Gerber.

Gerberistä on olemassa kaksi versiota, joista ensimmäinen tunnetaan nimellä Standard Gerber. Versio tunnetaan myös kirjain- ja numeroyhdistelmästä Gerber RS-274-D. Tämä versio perustuu EIA:n (Electronic Industries Association) tekemään määritelmään. Usein käytetään virheellisesti merkintää RS-273-D viittaamaan Standard Gerberiin, vaikka siinä pitäisi olla edessä sana *Gerber*, jotta se voidaan erottaa EIA:n versios- ta. RS-273-D kehitettiin ohjaamaan mekaanisia numeerisesti ohjattuja laitteita teollisuudessa. Ensimmäiset laitteet, joita ohjattiin Standard Gerberillä, olivat numeerisesti ohjattuja vektorikuvapiirtureita (*photoplotter*). Nykyisin vektorikuvapiirturit on korvattu rasterikuvapiirtureilla.

Standard Gerber ei ole varsinaisesti kuvan määrittelyyn sopiva tiedostomuoto, vaan se tarvitsee erillisiä tiedostoja, jotta sen avulla voidaan muodostaa tarvittava kuva. Ensimmäinen Gerber-versio ilmestyi vuonna 1980. Viimeinen Gerber Systems Corpin julkaisema opas ilmestyi 1994. Yritys siirtyi belgialaisen Barcon omistukseen vuonna 1998 ja samana vuonna Barco julkaisi version, joka tunnetaan nimellä Extended Gerber sekä tunnuksella RS-274X. Viime vuosien aikana tämän version määritelmään on tullut päivityksiä, joista viimeisin vuoden 2013 huhtikuussa.

RS-274X on nykyään yleisessä käytössä oleva tiedostomuoto. Jokaisesta piirilevyn kerroksesta tehdään yksi Gerber-tiedosto, joka sisältää kaikki tarvittavat tiedot mitä tarvitaan kyseisen kerroksen kuvaamiseen. Jotta olisi selvää, mitä kerrosta mikäkin tiedosto kuvaa, tiedosto tulee nimetä havainnollisella tavalla. Tiedostopääte on vapaasti valittavissa, mutta on suositeltavaa käyttää sellaista päätettä, josta valmistaja näkee, että kyseessä on Gerber-tiedosto. Kolmen kirjaimen päätteet ovat yleisiä, ja Gerberiä voidaan merkitä vaikka päätteellä GBR. Piirilevyn porattavat reiät voidaan myös määritellä Gerberinä, mutta useimmat valmistajat suosivat poratiedostoksi Excellon-muotoa. Tämä muoto on peräisin 1980-luvulta, jolloin Excellon Automation Company valmisti piirilevyn poraus- ja jyrsinlaitteita. Excellon-tiedosto sisältää tiedot käytettävän poranterän koosta sekä koordinaatit, joihin kyseisellä teräkoolla porataan reikä. [1; 2.]

Gerber-tiedostot ovat ihmisen luettavissa, sillä ne sisältävät ASCII-merkkejä. Jokainen merkki koostuu seitsemästä bitistä. ASCII tulee sanoista *American Standard Code for Information Interchange*. Koska yhden merkin esittämiseen käytetään seitsemää bittiä, voidaan seitsemällä bitillä esittää yhteensä 128 erilaista merkkiä. Merkeistä 95 koostuu englannin kielen aakkosista, numeroista ja erilaisista erikoismerkeistä. Loput 33 merkkiä ovat kontrollimerkkejä, joilla muotoillaan tekstin näkymistä. Gerber-tiedostoissa käytetään vain merkkejä 32–126 sekä 10 ja 13. Merkki 10 (LF, Line Feed) aloittaa uuden rivin ja merkki 13 (CR, Carriage Return) palauttaa osoittimen rivin alkuun. Merkkejä '\*' ja '%' voidaan käyttää vain niille rajattuun tarkoitukseen. Merkki 32 (SP, Space) eli välilyönti on sallittu vain kommenteissa. Kommentteja voidaan kirjoittaa laittamalla alkuun koodin G04, jonka perään kommentit kirjoitetaan. Kommenttien lopetus tapahtuu kirjoittamalla lopuksi tähtimerkki '\*'. [3; 4, s. 23.]

### 3.2 Gerber-koodien tulkinta

Tässä luvussa kerrotaan tarkemmin, mitä Gerber-tiedosto sisältää. Kaikkia mahdollisia asioita ei selitetä, mutta esimerkkinä käytetään EAGLEn luomia tiedostoja, joiden sisältöä selvitetään. PADSillä tiedostoja tehdessä on näkyvissä paljon eri asetuksia, kun taas EAGLEssä ei ole suoraan näkyvissä minkäänlaisia asetuksia. Toisin sanoen käyttäjä ei välttämättä tiedä tiedostoista muuta kuin että ne ovat Extended Gerber -, eli RS-274X -muotoa. Tieto on tarpeen varsinkin, jos tiedostoja tehdään piirilevynvalmistajille, mutta myös oppilaitoksen jyräjä ajatellen. Jos CircuitCAM ei tunnista asetuksia automaattisesti, on oikeiden asetusten tietäminen hyödyksi.

Ohjeessa neuvotaan käyttämään valmista työtiedostoa, joka tekee *Extended Gerber* -muotoiset tiedostot kahdesta sähköisestä kerroksesta, komponenttipuolen tekstipainatuksesta sekä juotteenestopinnoitekerroksista (ks. 2.2). Esimerkkinä käytetään samalla työtiedostolla tehtyä *GerberX* (Extended Gerber) -tiedostoa eräästä EAGLEn esimerkkilevystä. EAGLEn *CAM Processor* tekee jokaisen GerberX-tiedoston lisäksi .gpi-päätteisen infotiedoston, josta näkee helposti luettavassa muodossa erilaisia asioita varsinaisen datatiedoston sisällöstä. Jos käyttäjä käyttää toimintoa, joka tekee kaikki kerrokset yhdellä napin painalluksella, jäljelle jää kuitenkin vain yksi infotiedosto. Tiedosto liittyy siihen kerrokseen, jonka ohjelma on viimeiseksi käsitellyt. Jos siis halutaan saada jokaisen kerroksen infotiedosto talteen, jokainen kerros on luotava yksitellen ja välissä käytävä ottamassa infotiedosto talteen.

Liitteessä 2 esitetään infotiedosto komponenttipuolen GerberX-tiedostosta. Tiedostosta selviää muun muassa EAGLE:n versio, tiedoston luontipäivämäärä, erilaisia parametreja sekä kyseisessä kerroksessa käytetyt apertuurit eli valotusaukot. Excellon-poratieostoja tehdessä syntyy GerberX-infotiedostoa vastaava .dri-päätteinen infotiedosto, josta on hyvä tarkastaa levyyn tulevien reikien koot. Silloin saatetaan havaita jos eri mittayksiköitä käytettäessä on syntynyt virheellisiä reikäkokoja. Eräät piirilevynvalmistajat saattavat myös pyytää reikien kokonaislukumäärää ennen kuin tekevät tarjouksen. Infotiedostosta selviää jokaisella teräkoolla tehtävien reikien lukumäärä kokonaislukumäärän lisäksi.

Liitteessä 3 on esimerkki komponenttipuolen GerberX-tiedostosta, joka on tehty EAGLE:n mukana tulevasta *demo3*-nimisestä esimerkkilevystä. Ensimmäisenä liitteessä on kaksi G-koodia, G75 ja G70. Näistä ensimmäinen tarkoittaa, että kaaret voivat kaartua yli 90° aina täyteen ympyrään asti. Jos koodi olisi G74, yksittäisen kaaren kulma ei saa ylittää 90°. Toinen G-koodi, G70 kertoo, että käytössä on tuumayksiköt. Kyseessä on vanhentunut koodi, joka tulisi korvata MO-parametrilla. Silloin G70 tulisi korvata koodirivillä `%MOIN*%`. Vastaavat millimetriyksikköä ilmaisevat koodit ovat G71 ja `%MOMM*%`.

Rivi `%OFA0B0*%` tarkoittaa, ettei käytössä ole *offsetia* eli siirtoa. Halutessaan *offset*-arvot voidaan sijoittaa kirjainten A ja B perään desimaalilukuina pistettä käyttäen. Seuraavan rivin kirjaimet F ja S tulevat sanoista *Format* ja *Specification*. Kirjain L (*Leading*) tarkoittaa, että koordinaattien edessä olevat nollat poistetaan. Perässä olevien nollien poistoa merkattaisiin käyttämällä kirjainta T (*Trailing*). Myöhemmin huomataan, ettei EAGLE kuitenkaan poista ylimääräisiä nolliä koordinaattien edestä, vaikka sen pitäisi niin tehdä. L:n käyttäminen on kuitenkin GerberX:n määritelmän mukaan tässä tapauksessa oikein.

A (*Absolute*) kertoo, että koordinaatit ovat absoluuttisia eli ne ovat aina ilmoitettu suhteessa nollakohtaan. Toinen vaihtoehto olisi nouseva ilmoitustapa, jolloin koordinaatit olisivat aina suhteessa edelliseen. Tätä vaihtoehtoa ei kuitenkaan suositeta, mutta sitä merkattaisiin I-kirjaimella (*Incremental*). Rivin loppuosa X24Y24 tarkoittaa, että sekä X-että Y-suunnassa käytetään koordinaateissa kahta kokonaislukua ja neljää kuvitteellisen pisteen jälkeistä desimaalia. Molemmat luvut pitää määritelmän mukaan olla 0–7, ja lisäksi X- ja Y-koordinaateilla pitää olla keskenään sama määrittäminen. [4, s. 33, 55–58, 97, 102.]



Rivi %IPPOS\*% kertoo kuvan polarisaation olevan positiivinen. Parametri %LPD\*% asettaa tason polarisaatioksi tumman. Seuraava rivi on %AMOC8\*, jonka jälkeen toisella rivillä on sarja pilkuilla erotettuja lukuja. Kyseessä on valotusaukkomakro, jolla määritellään miten kahdeksankulmaisia juotospisteitä piirretään. Alkuosan AM tulee sanoista *Aperture Macro*, ja OC8 tarkoittaa kyseisen makron nimeä. Numero 5 kertoo, että makrossa käytetään monikulmioprimitiiviä. Primitiivi on valmiiksi määritelty toiminto, jolla voidaan luoda tiettyjä muotoja. Esimerkiksi ympyräprimitiivi tarvitsee vain tiedon halkaisijasta ja sijainnista, jonka jälkeen ohjelma tietää minkälaisen kuvion se piirtää. Esimerkkikoodissa luku 1 tarkoittaa valotuksen olevan päällä, luku 8 kärkien määrää, nollat X- ja Y-koordinaatteja ja 1.08239 halkaisijaa. Loppuosan tarkoituksesta ei ole varmuutta. [4. s. 58–59, 86–87, 67–70.]

Seuraavaksi tiedostossa esiintyy useammalla rivillä saman ADD-alun sisältäviä koodeja. Ensimmäiset kirjaimet A ja D tulevat sanoista *Aperture* ja *Definition* ja tarkoittavat valotusaukon määrittystä. Seuraavana oleva D tarkoittaa D-koodia, jonka perässä on juokseva luku alkaen numerosta 10. Suurin luku voi olla 2 147 483 647. Näiden jälkeen olevat kirjaimet kertovat valotusaukon muodon. Kirjain C kertoo kyseessä olevan ympyrän (Circle). Pilkun jälkeen oleva luku ilmaisee ympyrän halkaisijan. Jos ympyrä sisältää myös reiän, sen määritelmä tulee kirjaimen X jälkeen. Esimerkissä ei ole yhtään tällaista tapausta. OC8 viittaa makroon, jota käsiteltiin aikaisemmin. R-kirjain kertoo kyseessä olevan suorakulmion, ja perässä olevat lukuarvot kertovat suorakulmion X- ja Y-suuntaiset mitat. Myös reikä voidaan määritellä lisäksi, kuten ympyrän tapauksessa. Muita valmiiksi määriteltyjä valotusaukkotyyppisiä ovat ovaali (O, Obround) sekä monikulmio (P, Polygon). [4, s. 60–67.]

Valotusaukkomääritelmien jälkeen oleva yksittäinen D10 tarkoittaa, että käytössä on valotusaukko, joka on määritelty aiemmin ensimmäisellä AD-rivillä. Seuraavat rivit koostuvat X- ja Y-koordinaateista siten, että molemmissa on kuusi numeroa ilman desimaalipistettä. Jos johtavat nollat olisi poistettu, kuten rivin %FSLAX24Y24\*% mukaan olisi pitänyt tehdä, näkyisi numeroita vain niin monta kuin niitä jää jäljelle. Tiedostossa näkyvissä riveissä kaikissa olisi silloin vain neljä viimeistä numeroa.

Koodirivin perässä oleva koodi D02 tarkoittaa siirtymistä kyseisiin koordinaatteihin ilman muita toimenpiteitä. D01 tuottaa vedon tai kaaren, kun aluetoiminto on pois päältä. Jos aluetoiminto on päällä, D01 piirtää rajaviivaa ja sillä hetkellä voimassa oleva valotusaukko ei ole käytössä. D03 valottaa käytössä olevan aukon. Sitä ei voida käyttää,

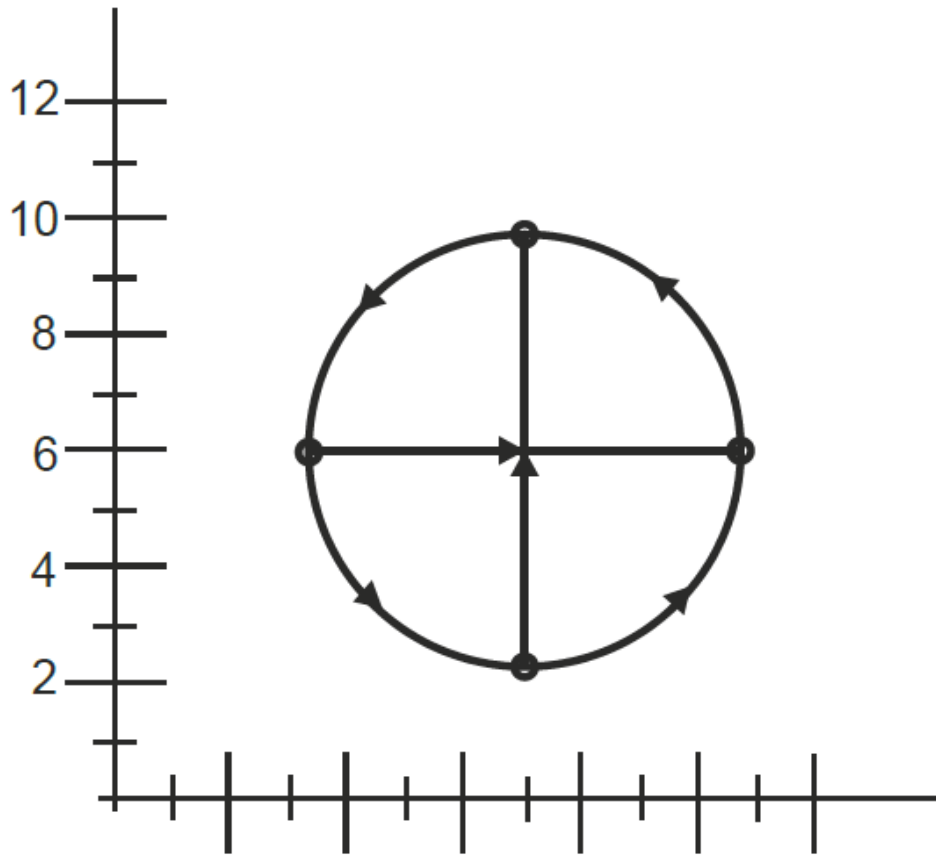
jos aluetoiminto on käytössä. D03:n sisältävillä riveillä valo laitetaan ensin päälle, jonka jälkeen siirrytään annettuihin koordinaatteihin. Koska liitteenä olevasta tiedostosta puuttuu loppuosa, siinä ei näy tärkeää riviä, joka täytyy olla jokaisen Gerber-tiedoston lopussa. Rivi M02\* päättää jokaisen tiedoston, eikä sen jälkeen saa olla mitään muita merkkejä. [4, s. 17, 29.]

Koska kuvien avulla voidaan helpottaa ymmärtämistä huomattavasti, esitetään seuraavaksi kaksi esimerkkiä koodien tulkinnasta käytännössä. Kuvassa 1 esitetään koodit, joiden avulla myöhemmin esitettävät kuvat muodostetaan:

Syntax	Comments
G74*	Single quadrant mode
D10*	Use aperture D10
X1100Y600D02*	Start from (11, 6)
G03X700Y1000I400J0D01*	Quarter arc (radius 4) to (7, 10)
G03X300Y600I0J400D01*	Quarter arc (radius 4) to (3, 6)
G03X700Y200I400J0D01*	Quarter arc (radius 4) to (7, 2)
G03X1100Y600I0J400D01*	Quarter arc (radius 4) to (11, 6)
X300D02*	Start from (3, 6)
G01X1100D01*	Draw to (11, 6)
X700Y200D02*	Start from (7, 2)
G01Y1000D01*	Draw to (7, 10)

Kuva 1. Gerber-esimerkkikoodi 1 [4, s. 36]

Edellä esitetyn kuvan 1 tietojen perusteella voidaan muodostaa kuvio (ks. kuva 2, seur. s.). Kuva 1 sisältää myös lyhyet selitteet, joiden avulla seuraavaksi esitettävää kuvaa on helpompi tulkita. Kuvassa 2 piirretään koodien ohjeiden mukaan ensin ympyrä käyttämällä neljännesympyrän mittaisia kaaria, joiden jälkeen piirretään vielä kaksi ympyrän halkaisevaa viivaa. Ympyrän piirtäminen aloitetaan oikeasta reunasta vastapäivään kiertäen, jonka jälkeen siirrytään ympyrän vasempaan reunaan ja piirretään viiva vasemmalta oikealle. Viimeinen viiva piirretään ympyrän alareunasta yläreunaan.



Kuva 2. Kuvan 1 koodin mukaan piirretty havainnollistava kuvio [4, s. 37]

Kuva 2 havainnollisti koodin tulkintaa lopulliseksi kuvioksi. Koodeja tulkitsevat ohjelmat eivät tietenkään piirrä juuri kuvan mukaista kuviota, jossa näkyvät suuntanuolet ja pienet ympyrät, vaan seuraavaksi esitettävän kuvan 3 mukaisen kuvion:



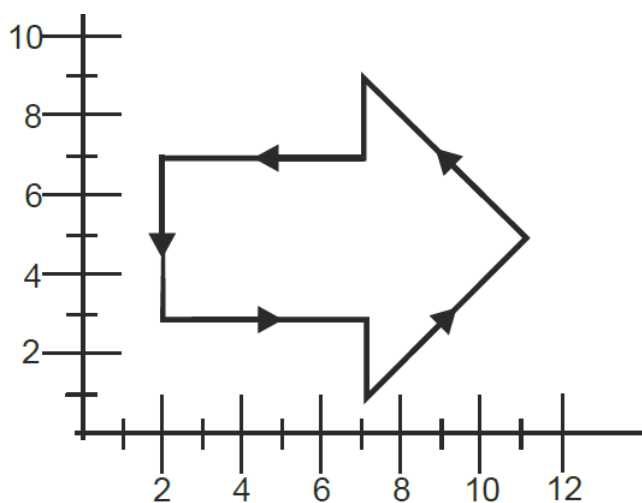
Kuva 3. Kuvan 1 esimerkikoodin mukaan piirretty lopullinen kuvio [4, s. 37]

Gerber-tiedostomuoto sisältää koodit G36 ja G37, joilla kerrotaan, onko aluetoiminto päällä vai pois. G36 asettaa toiminnon päälle ja G37 pois. Isoja yhtenäisiä alueita, kuten isoja maatasoja on kannattavaa piirtää aluetoiminnon avulla, koska sen avulla tiedoista saadaan pienempiä. EAGLE ei käytä kyseistä toimintoa, vaan siinä isotkin yhtenäiset alueet piirretään käyttämällä muita muotoja, kuten viivoja täyttämään koko alue. Seuraavan kuvan 4 esimerkikoodi havainnollistaa aluetoimintoa. [4, s. 40.]

Syntax	Comments
G36*	Start a region
X200Y300D02*	Move the current point to (2, 3)
G01X700D01*	Line segment to (7, 3)
G01Y100D01*	Line segment to (7, 1)
G01X1100Y500D01*	Line segment to (11, 5)
G01X700Y900D01*	Line segment to (7, 9)
G01Y700D01*	Line segment to (7, 7)
G01X200D01*	Line segment to (2, 7)
G01Y300D01*	Line segment to (2, 3)
G37*	Create the region by filling the contour

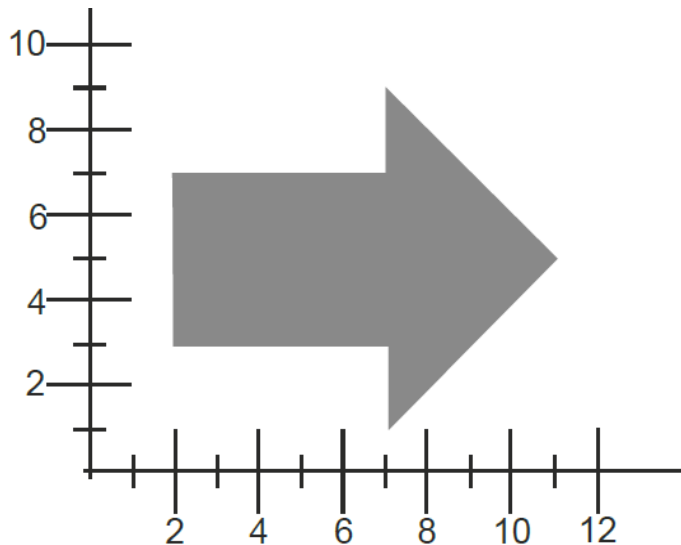
Kuva 4. Gerber-esimerkkikoodi aluetoiminnosta [4, s. 41]

Seuraavassa kuvassa 5 esitetään kuvan 4 koodin mukaan piirretty nuolikuvio. Koodissa G36 kertoo, että käytössä on aluetoiminto. Piirtäminen aloitetaan vasemmasta alakulmasta vastapäivään kiertäen.



Kuva 5. Aluetoimintoesimerkkikoodin mukainen havainnekuviokuva [4, s. 42]

Toisin kuin kuvassa 1 (ks. s. 12) esitetyn esimerkkikoodi 1 mukaan piirretty ympyräkuvio, aluetoiminnon ollessa käytössä kuvion käsittelytapa muuttuu. Ympyräkuviossa lopullinen kuvio muodostui niistä kaarista ja viivoista, jotka koodin mukaan piirrettiin. Aluetoiminnon ollessa käytössä kuvan 5 (ks. ed. s.) mukainen kuvio täytetään siten, kuin seuraavassa kuvassa 6 havainnollistetaan. Kuvan 4 (ks. ed. s.) esimerkkikoodin lopussa oleva koodi G37 suorittaa täyttötoiminnon, jonka jälkeen aluetoiminto on pois käytöstä, kunnes koodi G36 ilmestyy uudestaan.



Kuva 6. Kuvan 5 mukainen kuvio täytettynä [4, s. 42]

### 3.3 Excellon EAGLEssä

Ohjeessa poratiedostot tehdään valmiin *excellon.cam*-työtiedoston avulla. Kuten aiemmin tässä työssä on jo mainittu (ks. 3.1 Gerber-tiedostomuodosta yleisesti), GerberX tukee myös poraustiedostojen tekemistä, mutta yleensä piirilevynvalmistajat haluavat ne Excellon-muodossa. Tiedostomuoto on hyvin samanlainen kuin GerberX:llä. Kuvassa 7 (ks. seur. s.) on samasta *demo3*-nimisestä tiedostosta EAGLEllä tehty Excellon-poratiedosto kuin aiemmin olleessa kuvassa esiintynyt komponenttipuolen GerberX-tiedosto. Kuvassa tiedosto on pilkottu kahteen vierekkäiseen osaan tilan säästämiseksi. Excellon-tiedostomuoto on numeerinen laitteenohjausmuoto, jolla voidaan ohjata monenlaisia laitteita kuten jyrsimiä. Tiedosto voi sisältää paljon erilaisia komentoja, joilla koneen toimintoja ohjataan. Esimerkkinä voidaan mainita terän pyörimisnopeutta ohjaavat komennot. Piirilevynvalmistajille tai oppilaitoksen jyrsimelle riittää kuitenkin tieto reiän koosta ja sijainnista.

Koodi M48 poratiedostossa kertoo, että siitä alkaa ohjelman otsake. M72 ilmaisee, että kaikki mitat on ilmoitettu tuumissa. Millimetrejä vastaava koodi olisi M71. Seuraavat kolme riviä määrittävät kolmelle eri terälle niiden koot. Otsake päättyy merkkiin '%', jonka jälkeen valitaan käyttöön terätkoko 1. Seuraavat rivit kertovat jokaisen kyseisellä terätkoolla porattavan reiän sijainnin koordinaattien avulla, kunnes tulee kohta, jossa työkalu vaihtuu. Viimeisenä oleva koodi kertoo ohjelman päättyvän.

Käytettäessä EAGLEssä *excellon.cam*-työtiedostoa, voidaan sen avulla luodusta info-tiedostosta lukea, että koordinaatisto on absoluuttinen kuten GerberX-tiedostoissakin. Resoluutioksi mainitaan 1/10 000 tuumaa ja *offset* on 0. Resoluutio on sama kuin ohjeen mukaan luoduilla GerberX-tiedostoilla. Kuvasta 7 (ks. seur. s.) havaitaan, että edessä olevat nollat on koordinaateista poistettu. Lopuksi voidaan todeta, että EAGLEn luoma Excellon-tiedosto on hyvin yksinkertainen sisältäen vain tiedon mittayksiköstä, listan poranteristä kokoineen sekä jokaisen reiän koordinaatit. [5.]

```

%
M48
M72
T01C0.0240
T02C0.0320
T03C0.0400
%
T01          T03
X6035Y2598  X1035Y1348
X9785Y2848  X2035Y1348
X6785Y4598  X3035Y1348
X8785Y5598  X4035Y1348
X6785Y6598  X5035Y1348
X11285Y6598 X6035Y1348
X12035Y5098 X7035Y1348
X14285Y3098 X8035Y1348
X16285Y2598 X9035Y1348
T02          X10035Y1348
X13285Y2598 X11035Y1348
X13285Y6598 X12035Y1348
X5035Y7598  X13035Y1348
X3035Y7598  X14035Y1348
X2035Y7598  X15035Y1348
X1035Y7598  X16035Y1348
X1785Y5848  X17035Y1348
X1035Y5348  X17285Y7598
X1785Y4848  X16285Y7598
X1035Y3098  X15285Y7598
X3035Y3098  X14285Y7598
M30

```

Kuva 7. EAGLEllä luotu Excellon-poratiedosto

## 4 USB:n virtaominaisuudet

Piirilevyn kytkentäkaavion suunnitteluvaiheessa päädytään käyttämään USB-UART-piirinä FTDI:n valmistamaa mikropiiriä FT232RL. Tämän komponentin datalehteä tarkastellessa tulee vastaan kysymys siitä, miten virranhallinta pitäisi suunniteltavassa laitteessa toteuttaa. Datalehdessä sanotaan, ettei mikään komponentti saa käyttää USB-porttiin kytkettäessä enempää virtaa kuin 100 mA.

Laitteeseen on tarkoitus laittaa 3,3 V:n jänniteregulaattori, jonka ulostulossa on kondensaattori. Myös langattomat moduulit ovat yleensä valmiiksi kiinnitettyinä laitteeseen ennen sen kytkemistä tietokoneeseen. Näin ollen on hyvin todennäköistä, että laite kuluttaa virtaa yli sallituksi mainitun 100 mA:n verran. Datalehdessä sanotaan myös, että laitteen tulee tarvittaessa siirtyä niin sanottuun *Suspend Mode* -tilaan, jossa virrankulutus on vielä tiukemmin rajattu. Laitteen toiminnan kannalta seuraavaksi selvitetään, minkälaisia toimenpiteitä asian ratkaisemisen vaatii. Asiaa selvitetään USB:n määritelmistä sekä yksinkertaisella testitoimenpiteellä. [6, s. 23.]

USB 2.0:n määritelmistä voidaan heti alkuun päätellä, että siihen liittyy huomattava määrä erilaista tietoa. Nyt kuitenkin keskitytään ainoastaan virrananto-ominaisuuksiin. USB-portti antaa virtaa yksikköinä, ja yksi yksikkö on kooltaan 100 mA. Enimmillään laite saa käyttää 5 yksikköä eli 500 mA. Jokainen laite on oletetusti pienitehoinen (*low-power*), joka tarkoittaa, ettei mikään laite saa kuluttaa kytkentävaiheessa enempää virtaa kuin yhden yksikön.

Jos laite käyttää toimiessaan virtaa enemmän kuin yhden yksikön, se luokitellaan suuritehoiseksi (*high-power*). Liittämisvaiheessa sekään ei kuitenkaan saa käyttää yhtä yksikköä enempää. USB:n isäntäohjelmisto hallitsee päätöstä siitä, voiko suuritehoinen laite käyttää konfiguroinnin jälkeen enempää kuin yhden yksikön. Virranantokyvyltään USB-portteja on olemassa kahdenlaisia. Sellaiset portit, jotka antavat virtaa vain yhden yksikön, kutsutaan *low-power*-porteiksi. Täydet viisi yksikköä virtaa antavia portteja nimitetään *high-power*-porteiksi.

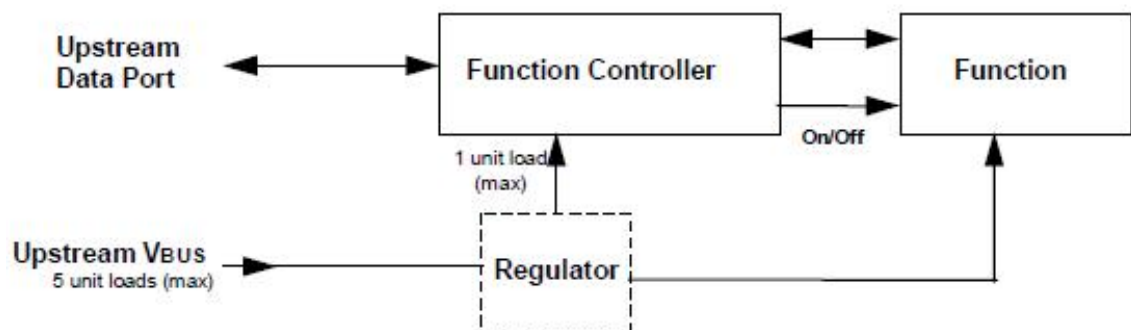
USB:n tulee sisältää ylivirtasuojaus, joka on käyttäjän nollattavissa ilman mekaanisia toimenpiteitä. Ylivirtasuojauksesta huolehtii isäntä tai omalla virtalähteellä toimiva hubi. Suurin esiasetettu virta saa olla 5 A, jonka lisäksi sen tulee olla sen verran suuri, etteivät satunnaiset virtapiikit saa rajoitinta laukeamaan. Yksi mahdollisista tavoista

toteuttaa ylivirtasuojaus on polymeeristen PTC-komponenttien käyttäminen. Näistä komponenteista käytetään lyhennettä PPTC (Polymeric Positive Temperature Coefficient), joka voidaan suomentaa nollattavaksi sulakkeeksi. Komponentti toimii siten, että sallitun virtamäärän kulkiessa komponentin läpi, sen resistanssi on erittäin matala. Virran noustessa yli komponentille tyypillisen arvon alkaa lämpötila komponentissa nousta, mikä aiheuttaa resistanssin suurta kasvua ja sitä kautta virran voimakasta rajoittamista.

Koska langattomat moduulit, joita työssä suunniteltuun laitteeseen on tarkoitus kytkeä, voivat kuluttaa useamman kuin yhden yksikön verran virtaa, voidaan laitteen katsoa kuuluvan suuritehoisten luokkaan. Tällaisen laitteen tulee pystyä toimimaan pienitehoiluokassa vielä väylän jännitteen laskiessa 4,40 V:n tasolle. Suuritehoisina toimiessa niiden tulee toimia vielä tulojännitteen tasolla 4,75 V.

Isäntä, johon laite on kytketty pitää kirjaa saatavilla olevasta virtabudjetista. Laitteen täytyy kytkemisen jälkeen ilmoittaa virrantarpeestaan, jota isäntä vertaa saatavilla olevaan virtaan. Jos saatavilla on riittävästi virtaa, isäntä antaa laitteelle luvan käyttää sitä pyytämänsä määrän. Suuritehoisten laitteiden tulisi sisältää virranhallintajärjestelmä, joka estäisi laitetta kuluttamasta yli yhtä yksikköä ilman lupaa.

Kuvassa 8 on periaatekuva suurivirtaisen laitteen kytkemisestä USB-porttiin. Siinä regulaattori antaa laitteen ohjausyksikölle (*function controller*) maksimissaan yhden yksikön virtaa. Isännän sallissa myös laitteen varsinaiset toiminnot saavat tarvitsemansa virran, kun ohjausyksikkö kytkee loput toiminnoista (*function*) päälle. [7, s. 171, 173–174; 8.]



Kuva 8. Periaatekuva suurivirtaisesta laitteesta USB-portissa [7, s. 174]



Seuraavaksi kerrotaan yksinkertaistetusti mitä tapahtuu, kun laite kytketään kiinni USB-porttiin. Kun hubi havaitsee porttiin kiinnitetyn laitteen, se informoi siitä isännälle. Isäntä odottaa vähintään 100 ms, jotta laite on varmasti kunnolla kiinnitetty ja jännitteet vakiintuneet. Tämän jälkeen suoritetaan nollausprosessi, minkä aikana selviää millä nopeudella isäntä ja laite keskustelevat keskenään. Laitteessa olevat vastukset määräävät onko laite *low-* vai *fullspeed*-nopeudella toimiva. Jos laite on vastusten mukaan *fullspeed*-laite, suoritetaan vielä lisätoimenpide, jolla selvitetään pystyykö laite *highspeed*-nopeuteen.

*Low-speed*-laitteen maksimi tiedonsiirtonopeus on 1,5 Mb/s. Vastaavasti *full-speed*- ja *high-speed*-laitteiden nopeudet ovat 12 Mb/s ja 480 Mb/s. Nollausvaiheen jälkeen laite käyttää oletusosoitetta. Seuraavaksi isäntä määrää laitteelle yksilöllisen osoitteen, jonka laite säilyttää myös virransäästötilassa. Ennen kuin laitteen toimintoja voi käyttää pitää suorittaa konfigurointiprosessi. Tässä vaiheessa laite kertoo isännälle virrantarpeensa. Konfigurointiprosessin jälkeen laite voi käyttää sen verran virtaa kuin se on pyytänyt olettaen, että isäntä on hyväksynyt pyynnön. [7, s. 17, 141–142, 153–154, 243–244.]

Määritelmän mukaan kaikkien laitteiden tulee siirtyä virransäästötilaan, jos datalinjoissa ei liiku tietoa 3 ms:iin. Virransäästötilaan tulee siirtyä tarvittaessa silloinkin, kun laitteella ei ole vielä yksilöllistä osoitetta tai laitetta ei ole konfiguroitu. InterChip USB (ICUSB)-laitteita lukuun ottamatta kaikki laitteet saavat kuluttaa virransäästötilassa 2,5 mA. Poikkeuksena ovat kuitenkin portista virtansa ottavat konfiguroidut hubit. Ne saavat kuluttaa 12,5 mA, josta hubin oma osuus saa olla 2,5 mA. Loput 10 mA jakautuu tasan neljän portin kesken eli jokaiselle portille jää 2,5 mA.

Konfiguroimattomat hubit toimivat pienitehoisina eivätkä saa kuluttaa kuin 2,5 mA. ICUSB-laitteet saavat kuluttaa korkeintaan 150  $\mu$ A. Laitteet saavat virransäästötilassa kuluttaa tietyin rajoituksin hetkellisesti enemmänkin virtaa kuin säästötilassa on normaalisti sallittu. Virtapiikin suurin sallittu arvo on laitteen konfiguroinnin aikana antama arvo. Virtapiikin keskiarvo ei saa ylittää sekunnin aikana suurinta laitteelle sallittua virransäästötilan arvoa. Virtapiikin nousevan reunan suurin sallittu nousunopeus on rajoitettu arvoon 100 mA/ $\mu$ s.

Isäntä lähettää 1 ms:n välein SOF (Start-of-Frame) -paketin täyden nopeuden (*full-speed*) laitteille. Suuren nopeuden (*high-speed*) laitteille paketti lähetetään 125 µs välein. Laitteiden ei tarvitse lähettää vastausta näiden pakettien vastaanottamisesta. *Low-speed*-laitteille lähetetään SOF:n sijasta *keep-alive*-signaali. SOF-paketit ja *keep-alive*-signaalit estävät laitteita menemästä virransäästötilaan. [7, s. 176, 204, 332; 9, s. 1–2.]

Jotta saisi paremman kuvan siitä, noudattavatko laitteet USB:n määritelmiä, selvitetään muutaman erilaisen laitteen isännälle ilmoittamat virrantarpeet. Laitteen ilmoittama virrantarve voidaan selvittää katsomalla Windowsissa ohjauspaneelin kautta laitehallintaa ja etsimällä sieltä oikean USB-laitteen. Toinen tapa, jota tässäkin käytetään, on käyttää Microsoftin tekemää ohjelmaa *usbview*. Helppokäyttöinen ohjelma näyttää laitteen asetukset monipuolisesti.

Langattoman laserhiiren vastaanotin ilmoittaa tarvitsevansa 98 mA eli se toimii pienitehoisena. Kahdeksan gigatavun kokoisen muistitikun virrantarpeeksi selviää 200 mA. Vanhemman sukupolven 512 Mt:n kokoisen muistitikun ilmoittama virrantarve on 100 mA.

Yksi mielenkiintoinen testattu laite on DFRobotin valmistama *XBee USB Adapter*. Kyseessä on oppilaitoksen käyttämä adapteri, jolla langattomat moduulit liitetään tietokoneeseen. Adapterissa on sama piiri kuin kehitettävässä levyssä. Vaikka adapteriin voidaan laittaa moduuleja, jotka kuluttavat useamman yksikön virtaa, ei sen ilmoittama virrantarve ole kuin 90 mA, joka on piirissä oletusarvona tehtaalta lähtiessä. Adapterissa ei myöskään ole virranhallintaa, joka estäisi adapteria kuluttamasta yli yhtä yksikköä ennen isännän lupaa.

Digitaalinen taskukamera on yksi testatuista laitteista. Kyseisessä kamerassa on valittavissa ladataanko akkua kameran ollessa kytkettynä tietokoneeseen vai ei. Asetuksen ollessa automaattisella, ilmoittaa kamera tarvitsevansa täydet 500 mA virtaa. Kytkettäessä lataustoiminto pois päältä, ilmoitettu virrantarve on 0 mA. Testissä ei selviä onko kamerassa muitakin mahdollisia konfigurointivaihtoehtoja kuin 0 tai 500 mA.

Suurimman yllätyksen tuottaa kuitenkin USB-portista virtansa ottava mobiili kiintolevy. Kyseessä on perinteisellä motorisoidulla levyllä oleva kiintolevy, eikä kiinteään muistiin perustuva SSD (Solid-State Drive) -levy. Levyn mukana on erillinen USB-johto, jolla voidaan ottaa laitteeseen virtaa toisesta portista jos yhden portin virta ei riitä.

Tämän lisäkaapelin toinen pää on pelkkä DC-liitin eli sitä käytettäessä laite ottaa virtaa ilman dataliikennettä. Mobiilikiintolevy ilmoittaa tarvitsevänsä virtaa vain 2 mA, jota voidaan pitää ehdottomasti liian matalana. Yhtenä todennäköisenä syynä liian pieneen virrankulutuseroitukseen voidaan pitää pelkoa siitä, että USB-isäntä ei suostuisi yhteistyöhön levyn kanssa jos se katsoisi, ettei sille ole riittävästi virtaa tarjolla. Jo tämän pienen selvityksen tuloksena voidaan todeta, etteivät kaikki kaupalliset laitteet syystä tai toisesta noudata USB:n määrittämiä.

USB-portin virranantokyvyn testaamiseksi tehdään yksinkertainen koe. Oppilaitos käyttää digitaalitekniikan opetuksessa kytkentäalustana levyä, joka ottaa virtansa joko baananiliittimiin kytketystä virtalähteestä tai vaihtoehtoisesti USB-portista. Liittimen datalinjoja ei ole levyssä kytketty mihinkään mikä tarkoittaa, ettei isäntä eli tietokone pysty keskustelemaan levyn kanssa millään tavalla. Levyyn kytketään yksi kerrallaan vastuksia rinnakkain seuraten samalla sulakkeen tilalle kytkettyä virtamittaria. Vastuksia kytketään yhteensä kymmenen kappaletta, jolloin virtamittari näyttää lukemaa 560 mA.

Määrittysten mukaan digilevykään ei saisi ottaa maksimissaan kuin 100 mA. Lukeman mukaan virtaa tulee portista 60 mA enemmän kuin siitä portista saataisiin milloinkaan ottaa. Kokeen tarkoituksena on vain varmistaa, että portista tulee täysi virtamäärä ilman mitään kommunikointia, joten sen enempää virransaantia ei lähdetä testaamaan. Tietokoneen mahdollisen vioittumisen takia ei testata kuinka paljon portista olisi saanut virtaa ennen suojauksen laukeamista.

## 5 Opetuslevyn kehittäminen

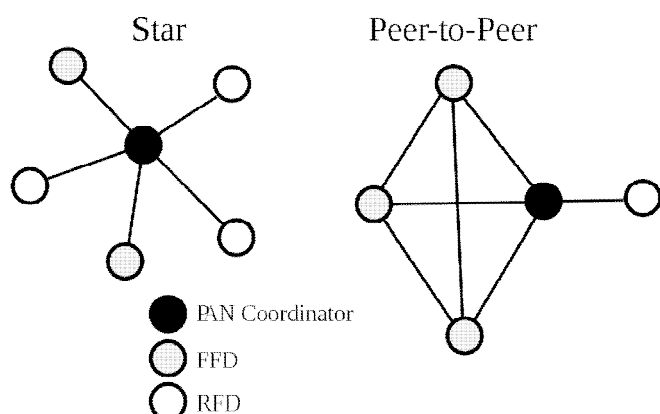
### 5.1 Langattomat moduulit

Työssä kehitettävän levyn on tarkoitus toimia alustana langattomille moduuleille. Käytössä on kaksi erilaista moduulia, joista toinen on XBee 802.15.4 - ja toinen XBee WiFi-moduuli. Molemmat ovat liitännästoiltaan samanlaisia eli molemmissa on 20 nastaa jaettuna kahteen 10 nastan riviin. Molemmissa moduuleissa liitinvien etäisyys toisiinsa on sama eli 22 mm. Nastojen keskinäinen väli on 2 mm. Lisäksi moduulit ovat toiminnoiltaan siinä määrin samanlaisia, että ne voidaan kytkeä samaan levyllä tulevaan liitännään. [10, s. 6.]

XBee on Digi Internationalin käyttämä tuotenimi radiomoduuleista. Niistä on olemassa useita versioita, jotka käyttävät eri taajuuksia ja tiedonsiirtostandardeja. Yleisen 2,4 GHz:n taajuuden lisäksi on olemassa ainakin taajuuksilla 868 ja 900 MHz toimivia moduuleita. Suurimmat lähetystehot vaihtelevat eri moduuleissa, mutta ne lähtevät 1 mW:sta ylöspäin aina 315 mW:iin. Oppilaitoksen käytössä on 2,4 GHz:n taajuudella toimivia moduuleita, joiden suurin sallittu lähetysteho Suomessa on Viestintäviraston taulukon mukaan 10 mW. Rajoitus ei koske WiFi-moduulia, jonka suurin sallittu lähetysteho on 100 mW. [11; 12, s. 7–8.]

Toinen käytettävistä moduuleista perustuu standardiin IEEE 802.15.4. Standardiin kuuluvat laitteet ovat edullisia ja tarjoavat pienellä tiedonsiirtonopeudella toimivat langattomat yhteydet standardin mukaisten laitteiden välille. Tiedonsiirtonopeus on parhaimmillaan 250 kbit/s. Laitteet voivat käyttää jotain kolmesta aiemmin mainitusta taajuuksialueesta. Standardiin kuuluu kahdenlaisia laitetyppejä. Toinen tyypeistä on FFD (Full-Function Device), joka voi toimia koordinaattorina. RFD (Reduced-Function Devices) -laitteet ovat yksinkertaisia, eivätkä voi kommunikoida kuin FFD-laitteiden kanssa.

Verkkotopologioita standardissa on kaksi, joista ensimmäinen on *peer-to-peer* ja toinen *star* eli tähti. *Peer-to-peer*-topologian lyhenne on P2P, ja siitä käytetään nimitystä vertaisverkko. Kummassakin topologiassa ainakin yhden laitteesta on toimittava koordinaattorina. Tähtimallissa kaikki laitteet ovat suorassa yhteydessä vain koordinaattoriin. Verkkotopologioita havainnollistetaan kuvassa 9. Jokaisella laitteella on 64-bittinen yksilöllinen tunnistus. Rajoitetussa ympäristössä voidaan käyttää tarvittaessa lyhyempää 16-bittistä tunnistetta. [13.]



Kuva 9. Tähti- ja P2P-verkkotopologioiden havainnekuva [13]

WiFi-moduulit perustuvat standardiin IEEE 802.11. Standardi määrittelee langattomien lähiverkkojen (WLAN, Wireless Local Area Network) toiminnan. Numerosarjan perässä on yleensä jokin kirjain. XBee WiFi -moduuli tukee versioita b, g ja n. b-version suurin nopeus on 11 Mbit/s ja g-version 54 Mbit/s. Standardin mukaan n-version suurin nopeus on teoriassa 600 Mbit/s, mutta moduuli toimii suurimmillaan vain 64 Mbit/s nopeudella. Moduulit toimivat kaikkien laitteiden kanssa, jotka käyttävät samaa teknologiaa eli 802.11 b, -g tai -n. [14, s. 7–8; 15.]

Seuraavaksi tutustutaan lyhyesti moduuleissa oleviin liitäntöihin ja niissä oleviin toimintoihin. 802.15.4-standardin mukaisessa moduulissa on tietysti pakolliset virtaliitännät. Moduulin liittämiseksi toisiin laitteisiin se on varustettu UART-sarjaliikenneväylällä. Analogisia tuloja moduulissa on kuusi. Samoja nastoja voidaan käyttää myös digitaalisina I/O-portteina.

Digitaalisia I/O-liitäntöjä löytyy yhteensä kahdeksan kappaletta, joiden lisäksi on vielä yksi digitaalinen tulo. Nastassa 4 on digitaalinen lähtö, jota ei kuitenkaan ole tuettu. Pulssinleveysmodulaatiolähtöjä (PWM, Pulse-Width Modulation) on 2 kappaletta. Moduulin tila nähdään nastasta 13. Nasta 14 on analogi-digitaalimuuntimen vertailujännitteen tulo. Näiden toimintojen lisäksi nastoista löytyy ainakin nollaus, signaalin vahvuuden ilmaisu, datanohjaussignaali RTS ja CTS sekä yhteyden muodostumisen ilmaisu. Kaikki toiminnot eivät ole käytössä yhtä aikaa koska osa toiminnoista sijaitsee samassa nastassa. Jotta moduulia voitaisiin käyttää, vähintään neljä nastaa tulee olla kytkettyinä. Nämä ovat virtanastat VCC ja GND sekä UART-liitännät DOUT ja DIN. [10, s. 7.]

WiFi-moduulissa tiedonsiirtoa varten on UART-liitäntöjen lisäksi myös SPI-liitännät. Analogisia tuloja on 5 kappaletta ja digitaalisia I/O-liitäntöjä 15. Kuten toisella moduulityypillä, myös tässä moduulissa osa toiminnoista on sijoitettu samoihin nastoihin, joten kaikkia ei voida käyttää yhtä aikaa. Muilta osin tästä moduulista löytyy samat toiminnot kuin aiemmin esillä olleesta 802.15.4-standardin moduulista. Analogi-digitaalimuuntimen vertailujännitteen tulonastaa 14 ei käytetä WiFi-moduulissa. [14, s. 13.]

WiFi-moduulin syöttöjännite tulee olla välillä 3,1–3,6 V. Suurin virrantarve esiintyy käynnistysvaiheessa, jossa suurin virtapiikki on lähes 750 mA. Käytössä suurin virrantarve muodostuu lähetysvaiheessa, jossa se on suurimmillaan 260 mA. 802.15.4-moduulista on olemassa useampia tehoversioita, joista tehokkaimmassa Suomessa

sallitussa suurin virrantarve on 150 mA. Jännite saa vaihdella välillä 2,8–3,4 V. Jotta voitaisiin taata kaikkien moduulien toiminta kehitettävässä levyssä, on sen kyettävä syöttämään vähintään 260 mA. Koska levyllä tulee olemaan myös muita virtaa kuluttavia komponentteja, täytyy levyn pystyä syöttämään edellä mainittua enemmän, jotta ongelmilta voidaan välttyä. [10, s. 5; 14, s. 10.]

## 5.2 Levynsuunnittelun lähtökohdat

Minimivaatimuksina suunnitellulle levyllä on liitäntä langattomille tiedonsiirto- sekä GPS-moduuleille. Moduuleja ei tarvitse mahtua levyllä kerrallaan kuin yksi kappale. Levyllä tulee olla vähintään kaksi liukukytkintä ja loistediodia eli lediä. Näitä käytetään digitaalisten liitännöiden kanssa. Analogisia tuloja varten levystä pitää löytyä ainakin yksi potentiometri. Yhden ledin täytyy pystyä toimimaan PWM-lähtöjen kanssa, jolloin pulssisuhteen muutos voidaan havaita ledin kirkkaudesta. Käytännön syistä laitteeseen laitetaan USB-UART-mikropiiri, jonka avulla tiedonsiirto hoidetaan laitteen ja tietokoneen välillä. Koska moduulit toimivat 3,3 V:n jännitteellä ja laitteen virta on tarkoitus ottaa USB-portista, tarvitaan myös jänniteregulaattori alentamaan USB:n 5 V:n jännite alaspäin.

Kytкимиä ja ledejä ei ole tarkoitus kytkeä ainakaan kokonaan kiinteästi moduulien liitännästäisiin, vaan tätä varten levyllä tulee liittimiä, joilla tarvittavat liitännät voidaan tehdä hyppylankojen avulla. Myös USB-UART-piirin nastat laitetaan liittimille, jotta sen ominaisuuksia voidaan hyödyntää tarvittaessa myös muihin sovelluksiin. Koska suunnittelu toteutetaan CadSoftin tekemän EAGLE-piirilevynsuunnitteluohjelman ilmaisella versiolla, on levyn koko rajattu maksimissaan 100 x 80 mm:iin.

## 5.3 Opetuslevyn suunnittelu

Suunnitteluohjelmaan luodaan sopivat komponentit sitä mukaa, kun selviää mitä käytetään. Piirikaavioeditoria varten tarvitaan sopiva kuvake, josta nähdään komponentin liitännät, jotta ne osataan kytkeä oikein. Piirilevyeditorissa tulee kaikilla komponenteilla olla sopivat kuvat, joista selviää juotospisteet ja reiät sekä mahdollisesti komponentin ääriviivat tilantarpeen näkemiseksi. Suurimpaan osaan komponenteista löytyy ohjelman kirjastosta valmiit kuvat, joita voidaan tarpeen vaatiessa muokata omiin tarpeisiin

sopiviksi. Komponenttien datalehdistä etsitään oikeanlaiset juotospisteiden koot ja niiden keskinäiset sijainnit, joiden perusteella ohjelman kirjastokomponentit muokataan. XBee-moduulin kiinnittämiseen tarkoitettujen liittimien sijaan suunnitteluohjelmistossa käytetään komponenttina ohjelman kirjaston XBee-moduulia, jolloin sen ääriviivat ovat näkyvissä ja niitä voidaan hyödyntää komponenttien sijoittelua suunniteltaessa.

USB-liittimeksi levyille tulee mini-USB B pintaliitosversiona. Mini-USB B valikoituu siksi, että oppilaitoksessa on ennestään käytössä kyseinen liitintyyppi. Koska USB-UART-piirinä toimiva FT232RL on pintaliitoskomponentti, on kannattavaa käyttää USB-liittimenä pintaliitosversiota, jotta vältytään turhien läpivientien käyttämiseltä.

FT232RL-piiri valikoituu sillä perusteella, että oppilaitoksen ennestään käyttämissä moduuleissa käytetään samaa piiriä. Tällöin piirin toiminnasta on jo olemassa kokemusta, jonka lisäksi tietokoneista löytyy ajurit valmiiksi asennettuina. Komponentti on saatavana myös valmiina moduulina, joka on kuitenkin huomattavasti erillistä mikropiiriä kalliimpi ja lisäksi se veisi levyiltä enemmän tilaa sekä tuottaisi epäsiistimmän ulkoasun. Negatiivisena puolena pintaliitoskomponenteissa on hankala juottaminen, johon ratkaisuna voisi olla uunin käyttäminen juotospastan avulla.

Potentiometri on sama pystymallinen 100 k $\Omega$ :nen kuin oppilaitoksen käyttämässä digitaalitekniikan opetuslevyissä. Sen hyviä puolia ovat sopiva fyysinen koko ja tukeva kiinnitystapa rungosta juottamalla. Näin voidaan varmistua siitä, että komponentti pysyy varmasti paikallaan. Digilevystä poiketen nupiksi tulee pienempi versio, joka sopii paremmin pieneen levyyn. Potentiometri kytketään levyille siten, että yksi nasta tulee kiinteästi 3,3 V:n jännitteeseen ja toinen nasta maihin. Keskimmäinen nasta jätetään liittimelle, josta se voidaan johdottaa tarpeen mukaan. Yksi käyttötarkoituksista on tulojännitteen muodostaminen moduulien A/D-muuntimille.

Myös liukukytkimet ovat samoja kuin digilevyissä käytetyt. Ne ovat käytössä hyviksi havaittuja, eikä siten ole tarvetta mallin vaihtamiseen. Samojen komponenttien käyttäminen luo myös vaikutelmaa, että opetukseen käytettävät levyt ovat samaa sarjaa. Kytkimiä varten laitteessa on kytkinvärähtelyjä poistava mikropiiri Maxim MAX6817, joka on tarkoitettu kahdelle kytkimelle. Piirin ulostulo vaihtaa tilaa vain, kun tulo on pysynyt vakaana 40 ms. Piirissä on sisääntuloissa ylösvetovastukset, joten nollan aikaansaamiseksi riittää sisääntulonastan maadoittaminen.

Kytkimestä jää yksi nasta kytkemättä, mutta se ei haittaa. MAX6817-piirin käyttöä voidaan perustella sillä, että sen avulla saadaan pienellä komponenttimäärällä puhdas kytkentäsignaali, jonka lisäksi siinä on myös jonkinlainen oikosulkusuojaus. Piirin pitäisi kestää ulostulonastojen oikosulku maahan, mutta datalehti ei selkeästi kerro kuinka paljon piirin nastoihin silloin kulkee virtaa. Varmuuden vuoksi kannattaa olla tarkkana, ettei moduulin ulostuloksi määriteltyä nastaa kytke kytkinpiirin lähtöön.

Liittimiä levyssä tarvitaan useita eri kokoja. Moduulien nastat laitetaan kaksiriviselle 40-osaiselle liittimelle, jossa kaksi rinnakkain olevaa nastaa ovat yhdessä. Näin liittimessä on 20 erillistä paikkaa, johon moduulien liitännät voidaan kytkeä. Nastaa 8 ei kytketä liittimelle koska kummassakaan moduulissa ei ole kyseisellä nastalla mitään toimintoja. Sen sijaan nastan 8 paikalle liittimeen laitetaan ylimääräinen 3,3 V:n jännitelähtö. Itse moduuleissa käytetään yksirivisiä 10-osaisia liittimiä, joiden jalkaväli on 2 mm.

Ledejä, kytkimiä ja potentiometriä varten levyyn tulee yksirivisiä kaksinapaisia liittimiä, joissa molemmat jalat ovat kytkettyinä toisiinsa. Yksinapaisia liittimiä ei käytetä, koska ne eivät ole yhtä tukevia ja saattavat irrota levystä helpommin. Kaksi ledeistä käyttää kaksinapaista naarasliitintä, mutta kaksi muuta lediä varustetaan kaksinapaisella piikki-rimalla, jossa navat voidaan yhdistää erityisellä liitinpalalla. Nämä ledit kytketään USB-UART-piiriin kertomaan USB-väylän liikenteestä. Kytkentä voidaan tarvittaessa poistaa irrottamalla liitinpala. Tämä tulee kyseeseen siinä vaiheessa, jos piirin nastoja tarvitaan muuhun käyttöön. Kytkinten liittimet kytketään värähtelynpoistopiirin lähtöihin.

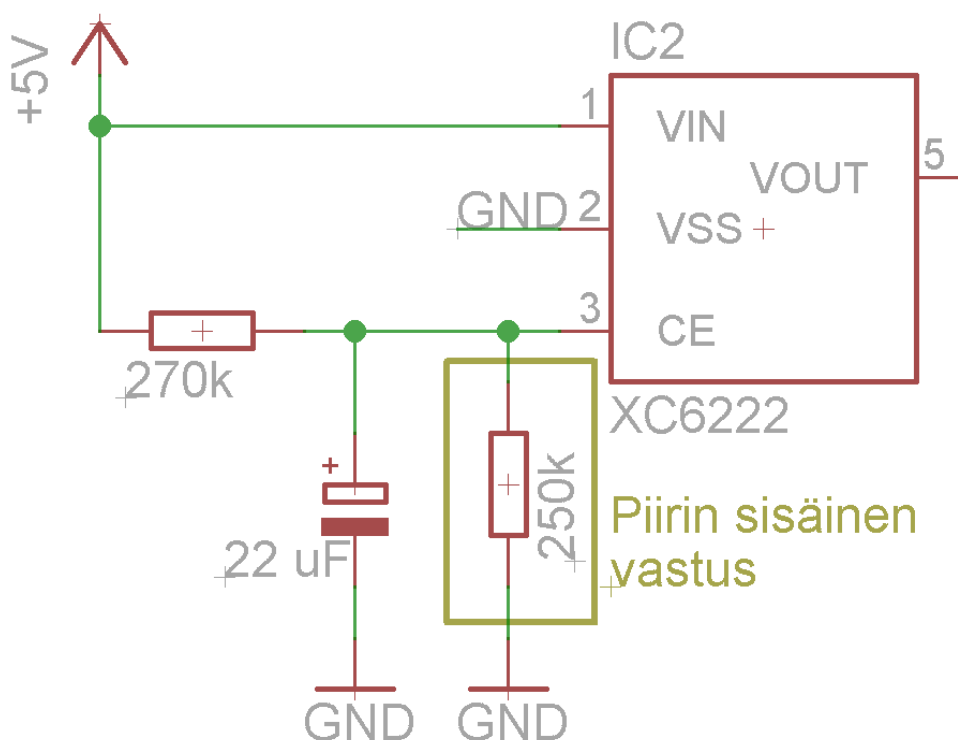
USB-UART-piiriä varten laitteeseen tulee 22-paikkainen kaksirivinen liitin, joissa kaikilla nastoilla on eri käyttötarkoitus eli niitä ei kytketä toisiinsa kuten toisten liittimien kohdalla. Kaikkia piirin nastoja ei kytketä liittimelle, vaan pois jää USB:n datalinjat. Niitä varten on erillinen kaksinapainen liitin, jotta datalinjoista ei tarvitse tehdä niin pitkiä. Myöskään jokaista piirin maanastaa ei ole liittimessä, vaan ainoastaan yksi.

Jänniteregulaattorina toimii Torexin valmistama XC6222-sarjan 3,3 V:n lineaarinen regulaattori. Kyseessä on viisijalkainen pintaliitoskotelolla oleva malli. Normaalien tuloja lähtöliitäntöjen lisäksi yksi nasta (CE) toimii ON/OFF-valintana. Tähän nastaan laiteaan yksinkertainen RC-piiri, jonka avulla voidaan hidastaa regulaattorin käynnistymistä USB-porttiin kytkettäessä. Tällä pyritään vähentämään kytkentävaiheessa mahdollisesti syntyviä virtapiikkejä.



Komponentin datalehden mukaan minimijännite, jolla CE-tulon tila luetaan ykköstilaksi, on 1,2 V. CE-nastaan menevä tyypillinen virta 6 V:n tulojännitteellä on 24  $\mu\text{A}$ . Tämän perusteella voidaan laskea, mikä on piirissä sisällä olevan vastuksen arvo olettaen, että kaikki virta kulkee sen kautta. RC-piiriä mitoitettaessa on otettava huomioon, että kyseinen vastus tulee kondensaattorin rinnalle ja johtaa virtaa kondensaattorin ohi hidastaen jännitteen nousua. Jännite ei myöskään nouse syöttöjännitteen tasolle johtuen vastusten muodostamasta jännitteenjakajasta.

Sopivia komponenttiarvoja vastukselle ja kondensaattorille selvitetään LTspice IV -simulaatio-ohjelmalla, jonka jälkeen toimintaa testataan koekytkentälevyllä. Sopiva käynnistysviive voisi olla noin 2 sekuntia. Vastuksen arvoksi valikoituu 270 k $\Omega$  ja kondensaattorin arvoksi 22  $\mu\text{F}$ . Kuvassa 10 esitetään idea RC-piirin kytkemisestä regulaattoriin. Kuvassa on piirrettynä myös regulaattorin sisällä oleva vastus.



Kuva 10. RC-piirin kytkentä regulaattoriin

Piirin sisäisen vastuksen laskennalliseksi arvoksi tulee 250 k $\Omega$ . Koekytkentälevyllä kondensaattorin rinnalle tulee niin ollen 250 k $\Omega$ :n vastus. Syöttöjännitteenä on 5 V, joka on USB-portista tuleva jännite. Mittauksen (ks. liite 4) mukaan kondensaattorin yli olevan jännitteen arvo nousee 1,2 V:iin 2,2 s:n kuluessa. Jännite nousee suurimmillaan

noin 2,4 V:iin (ks. liite 5). Jännitteen laskuaika on suhteellisen pitkä. Jännite laskee 0,3 V:n tasolle reilussa 12 s:ssa, jonka jälkeen nopeus hidastuu ja jännite saavuttaa nollatason noin 3 s:n kohdalla (ks. liite 6). Laskunopeus laitteessa voi kuitenkin olla nopeampi, koska piiriin on kytkettyneenä muitakin komponentteja.

Simulaatio-ohjelmalla testataan sisäisen vastuksen kahta ääriarvoa, mutta niiden vaikutus jännitteen nousu-aikaan ei ole niin suuri, että sillä olisi merkitystä. Kahden sekunnin viiveen valinnalle ei ole mitään erityisempiä perusteita. Se on riittävä, jotta kytketyminen ehtii kunnolla tapahtua, mutta ei kuitenkaan liian pitkä aika odottaa levyn toimintavalmiutta. Lopulliset ajat selvitetään prototyypin testivaiheessa.

Laitteessa ei ole erillistä virranrajoitusta, joten laitetta käytettäessä on huolehdittava, ettei oikosulkuja synny. Regulaattori sisältää sisäisen virranrajoituksen, joka alkaa toimia virran ylittäessä 950 mA. Tämän jälkeen virtaa kulkee 55 mA, kunnes oikosulkutilanne poistuu. Jos regulaattorin lämpötila nousee 150 °C:seen, kytketty ulostulo pois päältä siihen asti, että regulaattori on jäähtynyt tarpeeksi.

Laite ei huomioi USB:n määritelmiä ainakaan virtojen suhteen. Laitteessa oleva USB-UART-piiri tukee virransäästötilaa, mutta loppu laitteesta ei säätele virtaa. Koska virranrajoitus tulee regulaattorissakin vastaan vasta lähellä yhtä ampeeria, voi laite vetää portista huomattavasti enemmän kuin sallitut 500 mA. Jos USB-UART-piirin konfigurointiparametrejä ei muuteta, laite ilmoittaa tarvitsevansa vain 90 mA, mikä ei todennäköisesti käytännössä riitä. Kaupallisesti on olemassa paljon laitteita, jotka rikkovat USB:n määritelmiä. Määritelmät täyttävän laitteen suunnittelu on kuitenkin hidasta eikä ole toiminnan kannalta välttämätöntä.

Ledejä tulee laitteeseen kolmea eri väriä. Siihen tulee neljä halkaisijaltaan 5 mm:n lediä, joista kaksi on keltaisia ja kaksi punaisia. Punaiset ledit kytketään kiinteästi maihin, jolloin ne ottavat virtansa siitä moduulin nastasta, johon ne kytketään. Koska moduulien nastoista saatavan virran maksimiarvoa ei datalehdistä saada selville, pitää asiaa yrittää selvittää toista reittiä. XBee Regulated -adapterin vihreää RSSI (Received Signal Strength Indicator) -lediä yleismittarilla mittaamalla saadaan vastuksen yli olevaksi jännitteeksi 1,888 V. Kytchentäkaaviosta selviää vastuksen arvoksi 1000  $\Omega$ , joka varmistuu myös mittaamalla. Yksinkertaisella kaavan 1 (ks. seur. s.) mukaisella laskulla vastuksen ja samalla myös ledin läpi meneväksi virraksi tulee 1,888 mA. Tämän tuloksen perusteella levyssä olevat ledit suunnitellaan toimivaksi 2 mA:n virralla.

$$I_R = \frac{U_R}{R} \quad (1)$$

Punaisten ledien tyypillinen kynnyksjännite 2 mA:n virralla on 1,7 V ja keltaisten ledien 1,8 V. Kaavan 2 mukaan laskettuna etuvastuksen arvoksi saadaan 1,8 V:n kynnyksjännitteellä 750 Ω. [6, s. 33; 16, s. 2–5, 8–9; 17, s. 4.]

$$R_E = \frac{V_{cc} - V_F}{I_F} \quad (2)$$

$R_E$  on etuvastus

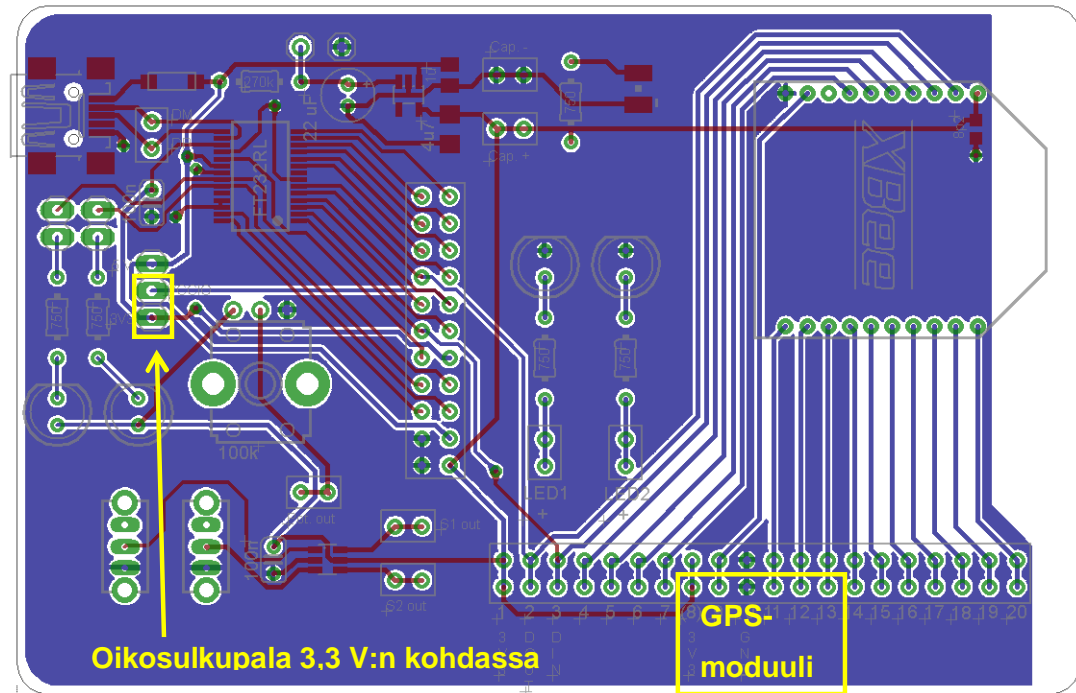
$V_{cc}$  on käyttöjännite

$V_F$  on ledin kynnyksjännite

$I_F$  on ledin virta

Keltaiset ledit kytketään kiinteästi 3,3 V:n jännitteeseen, ja niiden pääasiallinen tarkoitus on ilmaista tiedon siirtymistä USB-isännän ja USB-UART-piirin välillä. Vihreän pintaliitosledin ainoa tarkoitus on ilmaista, että regulaattori on toiminnassa. Ledi kytketään tätä varten kiinteästi regulaattorin lähdön ja maan väliin etuvastuksen kanssa.

GPS-moduuli voidaan kytkeä levyllä useampaan paikkaan. Moduuli voidaan turvallisesti kytkeä 40-napaisen liittimen nastoihin nastasta 9 eteenpäin silloin, kun radiomodulleita ei ole samaan aikaan kiinnitettynä. Kaikki GPS-moduulin nastat joudutaan tällöin johdottamaan erikseen. Toinen vaihtoehto on kytkeä moduuli liittimeen siten, että liittimen nastassa 8 oleva 3,3 V:n jännite kytkeytyy moduulin VDD\_B-nastaan ja maanastat osuvat keskenään oikeille paikoille. Tällä liitännätavalla saadaan moduulille maan- ja varavirtanastat valmiiksi kytkettyinä. Molempien käyttöjännitenastojen, maan ja datalinjojen yhdistämisen jälkeen GPS-moduulin pitäisi olla täysin käyttövalmis. Sekä XBee-että GPS-moduuleja käytettäessä on muistettava asettaa datalinjojen jännitetasoksi 3,3 V kytkemällä oikosulkupala oikeaan paikkaan valintaliittimessä. Kuvassa 11 (ks. seur. s.) esitetään piirroksilla oikosulkupalan oikea paikka sekä GPS-moduulin liittäminen yhteen mahdollisista paikoista. Prototyypin tehdään kuvan suunnitelman mukaisesti. Prototyypin kytkentäkaavio esitetään liitteessä 7.



Kuva 11. Prototyypin suunnitelma, jossa oikosulkupalan ja GPS-moduulin sijoitukset

#### 5.4 Opetuslevyn prototyyppi

Prototyypin valmistus tapahtuu oppilaitoksen omalla LPKF ProtoMat S62 -piirilevyjyrsimellä. Prototyypissä käytetään maatasoa vain juotospuolella ja komponenttipuolen ylimääräinen kupari poistetaan kokonaan. Lopullisissa levyissä tulee olemaan maataso myös komponenttipuolella, mutta prototyypin puuttuvista läpikuparoinneista johtuen osa komponenteista on juotettava myös komponenttipuolelta. Varsinkin liitinten alta juotettaessa juotospistettä ympäröivän kuparin puuttuminen ehkäisee tehokkaasti tinasiltojen muodostumista. Piirilevyn jyrsinnän jälkeen pintaliitoskomponentit juotetaan tarkoitukseen sopivalla uunilla lyijyllistä tinapastaa käyttäen. Tämän jälkeen on vuorossa läpiviennit, joihin juotetaan komponentin, kuten vastuksen jalasta katkaistu pätkä. Lopuksi juotetaan loput komponentit matalimmista aloittaen.

Juottamisen jälkeen testaaminen alkaa silmämääräisellä tarkastuksella, jolla etsitään mahdollisia tinasiltoja tai muuten huonoja juotoksia. Tämän jälkeen on vuorossa yleismittarilla tehtävät johtavuusmittaukset, joilla varmistetaan, ettei virransyöttölinjoissa esiinny oikosulkuja. Kaikkien testimittausten ja mahdollisten korjauksien jälkeen siirrytään varsinaisiin mittauksiin, joilla selvitetään alustan toimintaa. Alustan testaaminen alkaa GPS-moduulin kiinnityksellä, jonka jälkeen alusta liitetään tietokoneeseen.

XBee-moduulien kanssa kommunikointiin tarkoitettu ohjelma X-CTU toimii myös GPS-moduulin kanssa. Ohjelman terminaalista nähdään, että GPS-moduuli lähettää sijaintitietoa kuten moduulin kuuluu. Tästä voidaan päätellä, että tiedonsiirto toimii USB-UART-piirin UART-väylään kytketyn laitteen ja tietokoneen välillä. Seuraavaksi alustaan kiinnitetään XBee 802.15.4 -moduuli ja X-CTU-ohjelmasta valitaan *Read*-toiminto, joka lukee moduulista asetukset. Myös tämä testi onnistuu. Samalla havaitaan keltaisten ledien ilmaisevan USB-väylän liikennettä himmeällä vilkunnalla.

WiFi-moduuli testataan samalla tavalla, mutta alustaan lisätään ylimääräinen elektrolyyttikondensaattori moduulin aiheuttaman suuren virtapiikin vuoksi. Alusta selviytyy hyvin myös WiFi-moduulin testaamisesta. Liitteessä 8 esitetään CE-nastan ja regulaattorin ulostulon jännitteet, kun ylimääräinen kondensaattori ja WiFi-moduuli ovat kytkettyinä liitettäessä alustaa tietokoneeseen.

USB-UART-piirin CBUS4-nasta on tehtaalta lähtiessä määritetty kertomaan piirin lepo-tilasta. Piirin ollessa normaalitilassa, nastassa näkyy sama jännite kuin VCCIO-nastassa. Alustan tapauksessa siinä näkyy joko 3,3 tai 5 V käyttäjän valinnasta riippuen. Valinnan ollessa 3,3 V, kytketään CBUS4-nasta levyllä olevaan punaiseen lediin.

Seuraavaksi mitataan yleismittarilla ledin etuvastuksen yli oleva jännite, joka on noin 1,1 V. Käyttämällä tätä jännitettä, vastuksen 750  $\Omega$ :n arvoa ja kaavaa 1 (ks. s. 29), saadaan vastuksen läpi meneväksi virraksi noin 1,5 mA. Keltaisten ledien heikon kirkkauden voidaan olettaa johtuvan kahdesta syystä. USB-liikenteen nopean tiedonsiirron ja FT232RL-piirin heikon virranantokyvyn voidaan olettaa vaikuttavan asiaan.

Kytkinten toimintaa testataan mittaamalla värähtelynpoistopiirin ulostuloja yleismittarilla, jonka jälkeen suojapiirin toimintaa tutkitaan oskilloskoopilla. Yleismittarilla mitatessa ulostuloissa näkyy odotetusti 0 tai 3,3 V riippuen kytkinten asennoista. Liitteessä 9 esitetään oskilloskoopissa näkyvä kuva, jossa kanavassa 1 on kytkimen lähtö ja kanavassa 2 on suojapiirin ulostulo. Kuvan tietojen perusteella viive kytkimen lähdön ja suojapiirin lähdön muutosten välillä on 46 ms. Mittaus suoritettiin, kun kytkimen tilaa vaihdettiin nolasta ykköseen.

RC-piirin aiheuttamaa regulaattorin käynnistysviivettä tutkitaan kytkemällä oskilloskoopin kanava 1 regulaattorin lähtöön ja kanava 2 regulaattorin CE-nastaan. Liitteestä 10 nähdään, että regulaattorin ulostulo kytkeytyy päälle paljon aiottua aiemmin jo alle

1 s:ssa. RC-piirin komponentteja mitoitettaessa oletettiin ulostulon kytkeytyvän päälle CE-nastan jännitteen ylittäessä 1,2 V. Käytännön kannalta alle sekunnin viive on riittävä, mutta kondensaattorin varauksen hidas purkautuminen aiheuttaa ongelmia. Mittauksissa selviää, että CE-nastan jännite täytyy laskea noin 0,5 V:n tasolle ennen kuin regulaattorin ulostulon kytkeytymiseen ilmestyy minkäänlaista viivettä. Liitteessä 11 esitetään kuva, josta nähdään, että jännitteen laskemiseen 0,5 V:n tasolle menee noin 20–25 s. RC-piiristä ei ole tuloksen mukaan hyötyä, jos laite kytketään lyhyen ajan sisällä uudestaan tietokoneeseen. Prototyypin komponenttipuolelta otettu kuva esitetään liitteessä 12.

## 5.5 Kustannusarvio

Kustannusarviossa kustannukset lasketaan siten, että opetuslevyjä valmistetaan joko 10 tai 15 kappaletta. Komponenttien kustannukset lasketaan ottamalla huomioon kappalemääristä tulevat alennukset. Jos komponenteilla on minimi- ja/tai kerrannaistilauksmäärät, niistä johtuvien ylimääräisten komponenttien tuomat kustannukset otetaan lukuun mukaan. Komponenttien osalta kustannusarviossa ei ole mukana veroa eikä toimituskuluja. Komponenttikustannuksia varten hintatiedot otetaan Farnellista ja Digikeystä.

Piirilevyjen valmistusta varten kustannusarviossa lasketaan levyjen hinta Eurocircuitsista tilattuna. Eurocircuitsin verkossa toimiva laskuri antaa levyjen hintojen lisäksi arvion toimituskuluista ja verosta. Veroprosentiksi laskurissa mainitaan 21 %. Piirilevyjen hintoihin kuuluu levyn molemmille puolille tuleva vihreä juotteenestopinnoite sekä valkoinen tekstipainatus komponenttipuolelle. Juotospintojen pintakäsittelyksi tulee mikä tahansa lyijytön pinnoite.

Liitteessä 13 esitetään kustannusarvio edellä mainittujen menetelmien mukaan tehtynä, minkä lisäksi liitteessä 14 on lista alustassa käytettävistä komponenteista. Listassa on yhteen levyyn tarvittavien kappalemäärien lisäksi lyhyt kuvaus komponentista sekä valmistajan tuotekoodi.

## 6 Yhteenveto

EAGLE-ohjeen tekeminen onnistui odotetusti. Sen avulla opiskelijoiden pitäisi suhteellisen helposti pystyä tekemään piirilevyjä oppilaitoksen jyrsimellä. CAM-tiedostojen tekemisen ja niissä käytettyjen tiedostomuotojen lyhyen avaamisen jälkeen on opiskelijoilla paremmat tiedot siltä varalta, jos he haluavat tilata levyjä piirilevynvalmistajalta. Levyjen tilaaminen on järkevää siinä vaiheessa, kun halutaan laadukas läpikuparoitu levy, jossa on myös kasaamista ja/tai käyttämistä helpottavat pinnoitteet ja tekstipainatukset.

Moduulien alustan kehittämisen jälkeen tietoliikennetekniikan opettajalla on käytössään väline, jolla moduulien käyttöä opetuksessa voidaan helpottaa. Alusta mahdollistaa ainakin kahden erilaisen moduulin liittämisen tietokoneeseen, jolloin moduulien ohjelmointiin voidaan käyttää valmistajan omia ohjelmia. Moduulilla olevat kytkimet, ledit ja potentiometri mahdollistavat moduulien liitäntöjen pienimuotoisen testaamisen ilman erillisiä koekytkelevyjä.

Alustalla olevan USB-UART-piirin ominaisuuksien vuoksi alustaa voi käyttää tarvittaessa yleisemminkin kuin pelkästään XBee-moduulien kanssa. Esimerkkinä mainittakoon GPS-moduuli, josta parilla kytkennällä saadaan moduulin tuottama sijainti-informaatio tietokoneelle tarkasteltavaksi.

Levyä voidaan parantaa suunnittelemalla siihen kunnollinen virranrajoitus ja lisäämällä tarvittaessa ledien lukumäärää. Ledien kirkkaus pienellä virralla saisi myös olla parempi. Samalla voisi olla tarpeen myös harkita ledien ja etuvastusten vaihtamista pintaliitosmalleihin, jolloin säästettäisiin tilaa. Ledien vaihtaminen halkaisijaltaan 3 mm:n malleihin auttaisi myös. Komponenttien sijoittelua parantamalla voitaisiin saada lyhennettyä vetoja varsinkin moduuleihin liittyvien liittimien välillä.

Liittimien sijaintien muuttaminen voi tuoda liittimille hieman väljyyttä, joka voi parantaa niiden käytettävyyttä. USB:n datalinjoihin kytketyt liittimet voidaan jättää pois, jolloin datalinjoista saadaan suuremmat. Regulaattorin käynnistymistä hidastavan RC-piirin kohdalla voidaan harkita komponenttien arvojen muuttamista tai koko toiminnon poistamista. Piiri voidaan myös jättää sellaiseksi kun se on. Piirin aiheuttama viive osoittautui paljon suunniteltua lyhyemmäksi, minkä lisäksi viivettä ei esiinny lainkaan kytkettäessä laite lyhyen ajan sisällä uudestaan tietokoneeseen.

## Lähteet

- 1 Gerber format. 2013. Verkkodokumentti. Wikipedia. <[en.wikipedia.org/wiki/Gerber\\_format](http://en.wikipedia.org/wiki/Gerber_format)>. Päivitetty 15.4.2013. Luettu 19.4.2013.
- 2 Excellon format. 2012. Verkkodokumentti. Wikipedia. <[en.wikipedia.org/wiki/Excellon](http://en.wikipedia.org/wiki/Excellon)>. Päivitetty 24.10.2012. Luettu 19.4.2013.
- 3 ASCII. 2013. Verkkodokumentti. Wikipedia. <[en.wikipedia.org/wiki/Ascii](http://en.wikipedia.org/wiki/Ascii)>. Päivitetty 18.4.2013. Luettu 19.4.2013.
- 4 The Gerber File Format Specification. 2013. Verkkodokumentti. Ucamco. <[www.ucamco.com/Portals/0/Public/The\\_Gerber\\_File\\_Format\\_Specification.pdf](http://www.ucamco.com/Portals/0/Public/The_Gerber_File_Format_Specification.pdf)>. Päivitetty 14.4.2013. Luettu 16.4.2013.
- 5 Part Programming Commands. Verkkodokumentti. Excellon. <[www.excellon.com/manuals/program.htm](http://www.excellon.com/manuals/program.htm)>. Luettu 16.4.2013.
- 6 FT232R USB UART IC. 2012. Verkkodokumentti. FTDI. <[www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS\\_FT232R.pdf](http://www.ftdichip.com/Support/Documents/DataSheets/ICs/DS_FT232R.pdf)>. Luettu 6.3.2013.
- 7 usb\_20. 2011. Verkkodokumentti. USB. <[www.usb.org/developers/docs/usb\\_20\\_040413.zip](http://www.usb.org/developers/docs/usb_20_040413.zip)>. Päivitetty 11.10.2011. Luettu 19.4.2013.
- 8 Resettable fuse. 2013. Verkkodokumentti. Wikipedia. <[en.wikipedia.org/wiki/Resettable\\_fuse](http://en.wikipedia.org/wiki/Resettable_fuse)>. Päivitetty 21.4.2013. Luettu 25.4.2013.
- 9 Suspend Current ECN. 2011. USB. Verkkodokumentti. <[www.usb.org/developers/docs/usb\\_20\\_040413.zip](http://www.usb.org/developers/docs/usb_20_040413.zip)>. Päivitetty 11.10.2011. Luettu 19.4.2013.
- 10 XBee / XBee-PRO RF Modules. 2013. Verkkodokumentti. Digi International Inc. <[http://ftp1.digi.com/support/documentation/90002160\\_A.pdf](http://ftp1.digi.com/support/documentation/90002160_A.pdf)>. Päivitetty 13.2.2013. Luettu 25.4.2013.
- 11 XBee. 2013. Verkkodokumentti. Wikipedia. <[en.wikipedia.org/wiki/Xbee](http://en.wikipedia.org/wiki/Xbee)>. Päivitetty 1.4.2013. Luettu 25.4.2013.
- 12 Määräys. 2013. Verkkodokumentti. Viestintävirasto. <<https://www.viestintavirasto.fi/attachments/Viestintavirasto15AE2013M.pdf>>. Päivitetty 26.3.2013. Luettu 25.4.2013.



- 13 IEEE 802.15.4. 2013. Verkkodokumentti. Wikipedia.  
<[en.wikipedia.org/wiki/802.15.4](http://en.wikipedia.org/wiki/802.15.4)>. Päivitetty 1.4.2013. Luettu 25.4.2013.
- 14 XBee Wi-Fi RF Module. 2011. Verkkodokumentti. Digi International Inc.  
<[http://ftp1.digi.com/support/documentation/90002124\\_F.pdf](http://ftp1.digi.com/support/documentation/90002124_F.pdf)>. Luettu 25.4.2013.
- 15 Wi-Fi. 2013. Verkkodokumentti. Wikipedia. <[en.wikipedia.org/wiki/Wifi](http://en.wikipedia.org/wiki/Wifi)>. Päivitetty 24.4.2013. Luettu 25.4.2013.
- 16 XC6222 Series. 2013. Verkkodokumentti. Torex.  
<[www.torex.co.jp/english/products/voltage\\_regulators/data/XC6222.pdf](http://www.torex.co.jp/english/products/voltage_regulators/data/XC6222.pdf)>. Luettu 6.4.2013.
- 17 Agilent HLMP-4700. 2013. Verkkodokumentti. Agilent.  
<[www.farnell.com/datasheets/95144.pdf](http://www.farnell.com/datasheets/95144.pdf)>. Luettu 20.3.2013.

## **Liitteet**

Liite 1. EAGLE-ohje

Liite 2. GerberX-infotiedostoesimerkki

Liite 3. Esimerkki komponenttipuolen GerberX-tiedostosta

Liite 4. Kondensaattorin jännitteen nousuaika

Liite 5. Kondensaattorin lopullinen jännite

Liite 6. Kondensaattorin jännitteen laskuaika

Liite 7. Prototyypin kytkentäkaavio

Liite 8. CE-nastan ja regulaattorin ulostulon jännitteet

Liite 9. Kytkinvärähtelyjen poistopiirin toiminta nousevalla reunalla

Liite 10. RC-piirin toiminta virtoja kytkettäessä

Liite 11. CE-nastan jännitteen laskuaika

Liite 12. Alustan prototyyppi komponenttipuolelta kuvattuna

Liite 13. Kustannusarvio

Liite 14. Komponenttiluettelo

**EAGLE-ohje**



# **From EAGLE to CircuitCAM Guide**

Version 1.0

---

## **Contents**

<b>1. Before you start</b>	<b>3</b>
<b>2. EAGLE to CircuitCAM</b>	<b>4</b>
<b>3. EAGLE instructions</b>	<b>14</b>
3.1. <i>Board outline</i>	<i>14</i>
3.2. <i>Copper plane</i>	<i>15</i>
3.3. <i>Copper rubout</i>	<i>19</i>

---

## 1. Before you start

With a help of this guide, you should be able to do all necessary files for CircuitCAM. Pictures from EAGLE version 6.4.0. and school's manual for PADS are used. Guide is suitable only for school's PCB-milling machine. It should not be used when producing CAM-files for PCB-manufacturers. Methods described are not necessarily the only possible way to do those things. This guide is made assuming that the person using this is not a total novice with EAGLE.

**NOTE!** If you are doing only a single sided board, just skip unnecessary steps.

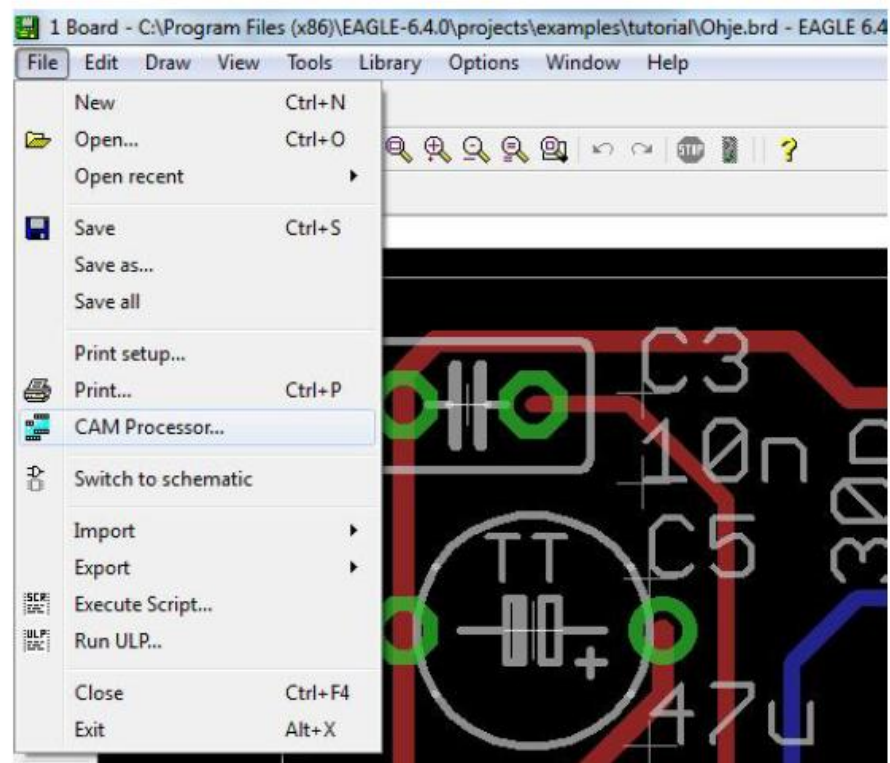
**NOTE!** If you are going to use copper rubout on layers that contain copper planes like ground plane for example, you should make all other CAM-files **before** creating rubout areas.

If you want to do things listed below, check chapter 3.

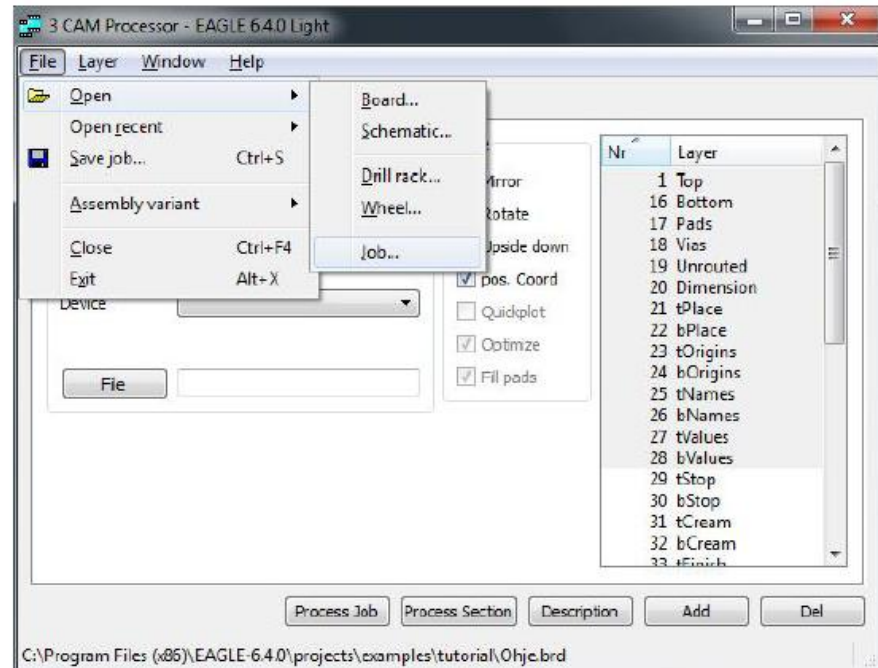
- Define board outlines in EAGLE.
  - Use ground or other signal planes.
  - Remove excess copper from certain areas of board.
-

## 2. EAGLE to CircuitCAM

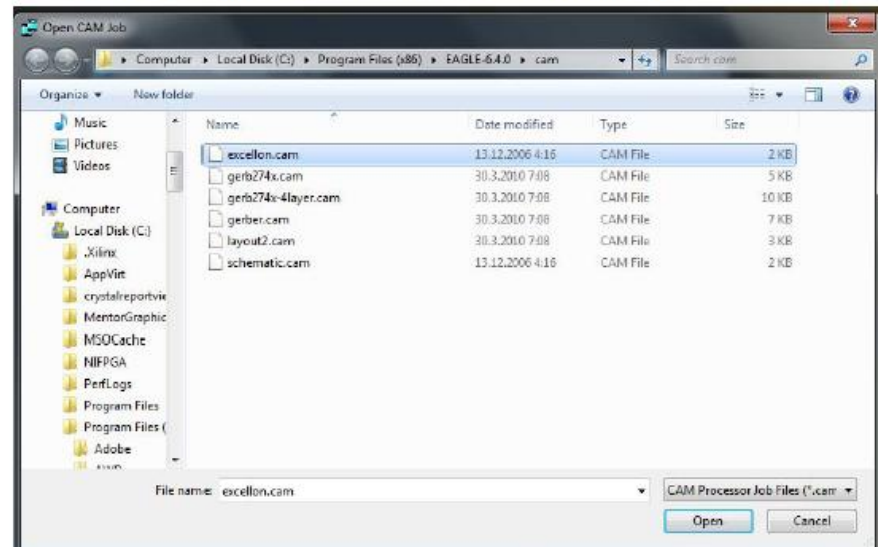
1. All files created during following process go to the same folder where your boardfile (.brd) is.
2. If your board is ready for milling, go to *File* → *CAM Processor...*



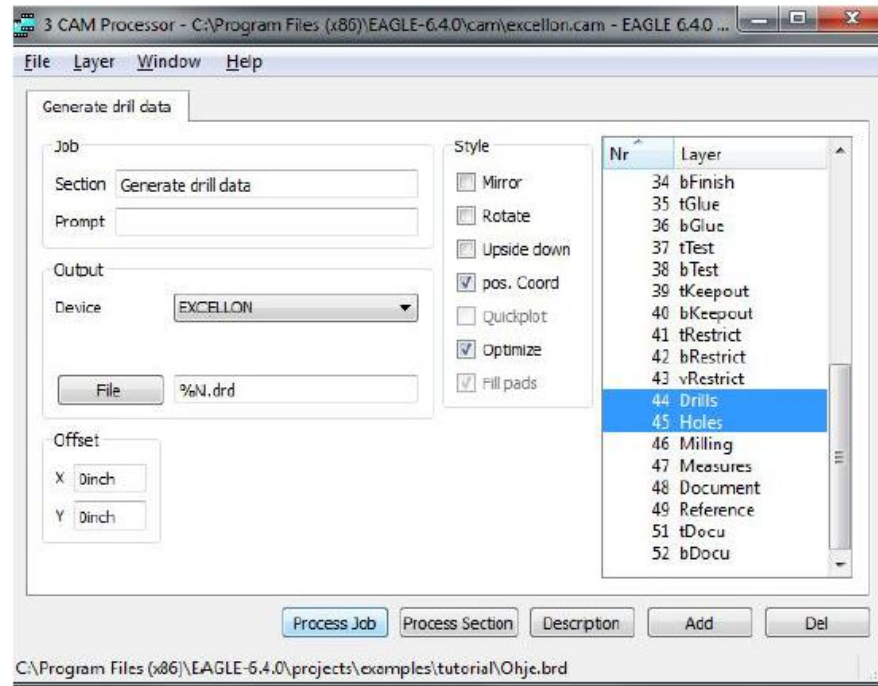
3. CAM Processor window should open. From that window, go to *File* → *Open* → *Job...*



4. From the window opened, select *excellon.cam* and click *Open*.

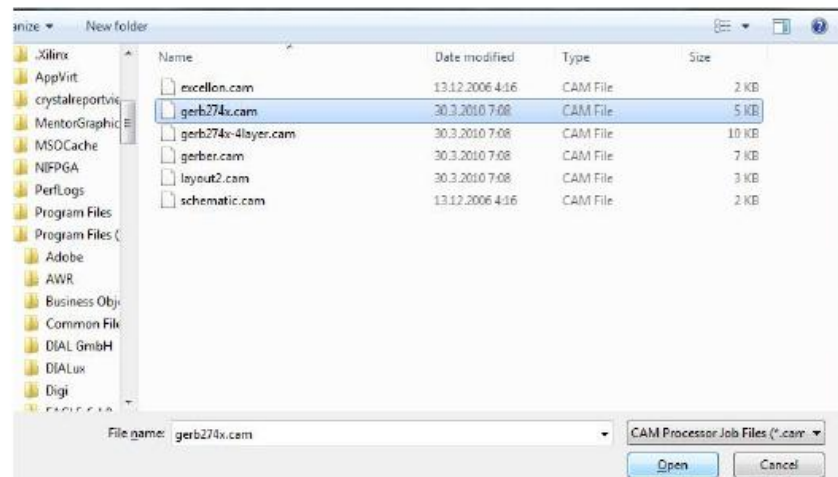


5. Check that everything is like in the following picture, and click *Process Job*.



6. Like before, go to File → Open → Job...

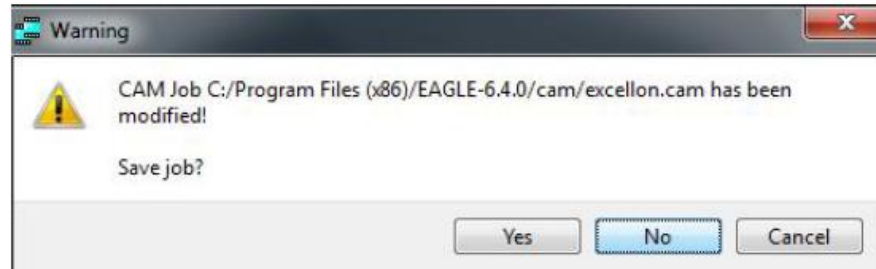
7. Select *gerb274x.cam* and click *Open*.



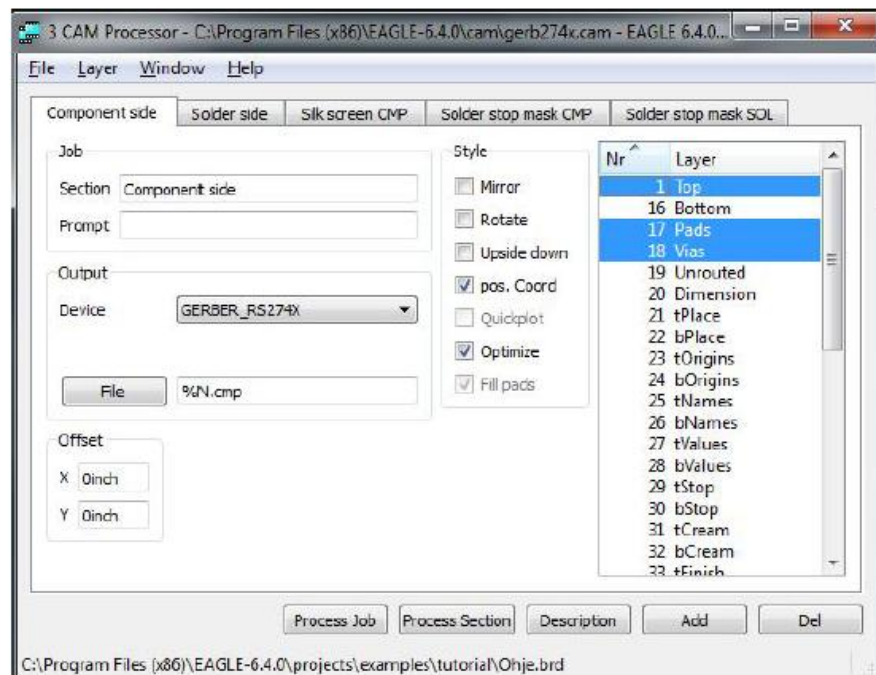


7

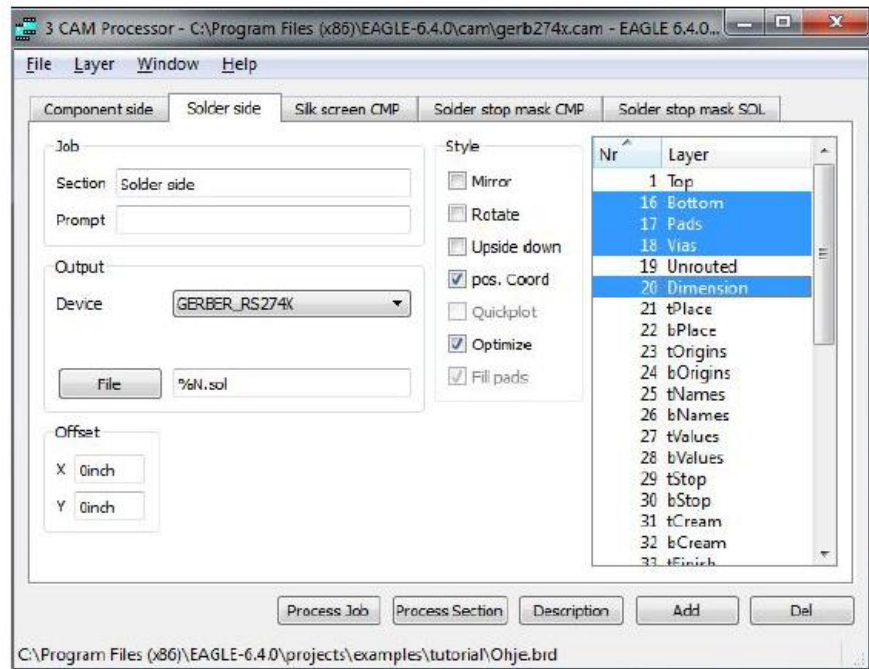
8. Window opens and asks you to save job. If you are using school's computer, click *No*.



9. Now you should have a new job opened. Check that *Component side* -tab is as in next picture. **NOTE!** If you do only Top side, select also the *Dimension*-layer.  
10. Click *Process Section*.



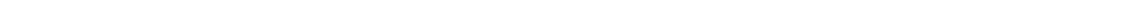
11. Select *Solder Side* -tab. If you defined board outlines in EAGLE, make sure that *Dimension*-layer is selected like shown in next picture.
12. Click *Process Section*.

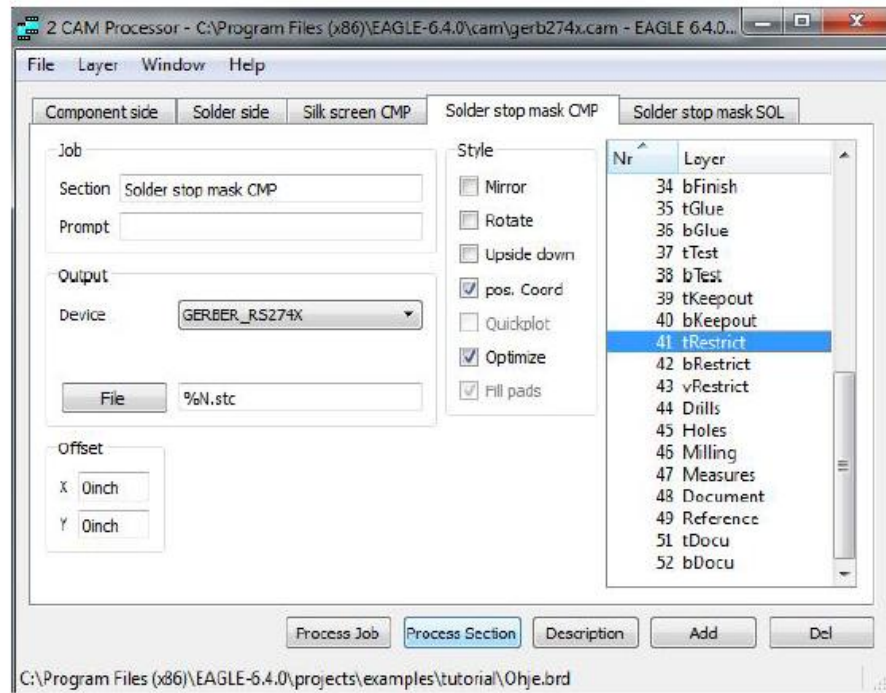


13. If you want to use rubout areas, check chapter 3.3 from page 19 and come back to this step when ready. If not, you can skip to step 22 at page 10.

**Top side:**

14. Select *Solder stop mask CMP* -tab.
15. Unselect all active layers.
16. Select *tRestrict*-layer.





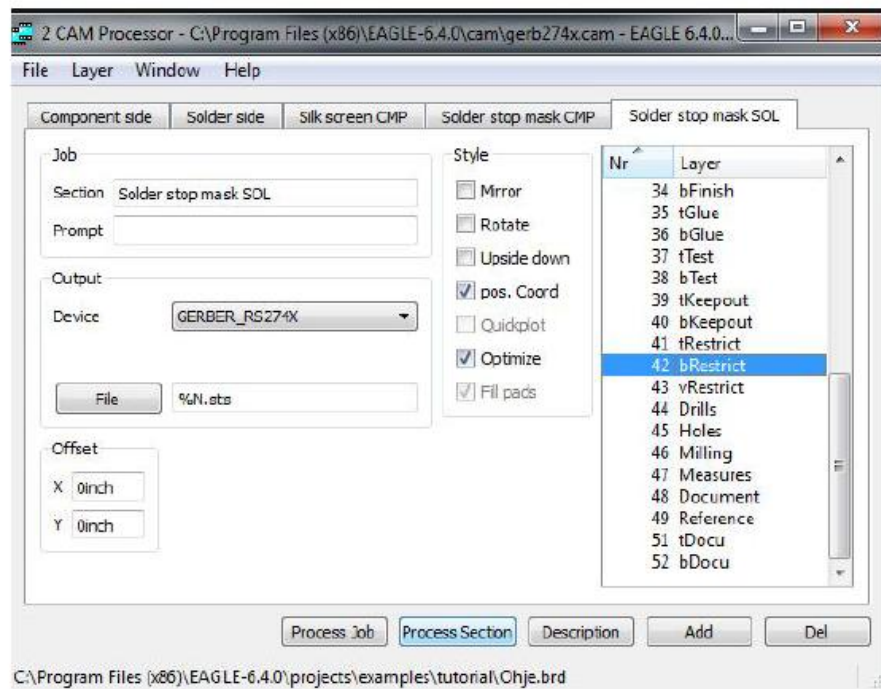
17. Click *Process Section*.

**Bottom side:**

18. Select *Solder stop mask SOL* -tab.

19. Unselect all active layers.

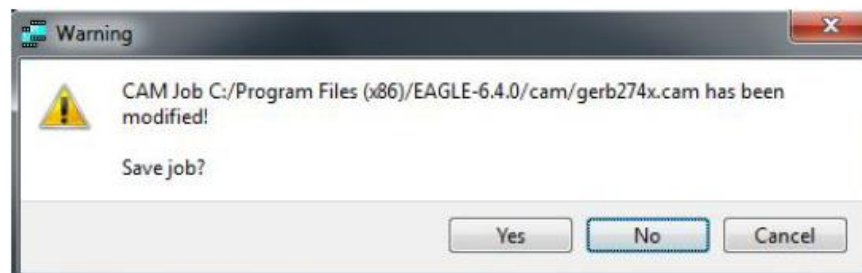
20. Select *bRestrict*-layer.



21. Click *Process Section*.

22. Now all files are processed. You can close the window.

23. Answer *No* to the next window, if you are using school's computer.



24. Now you should have all files ready for the CircuitCAM.

You should have:

- **.cmp** for top layer
- **.sol** for bottom layer
- **.drd** for drills and holes

You may also have:

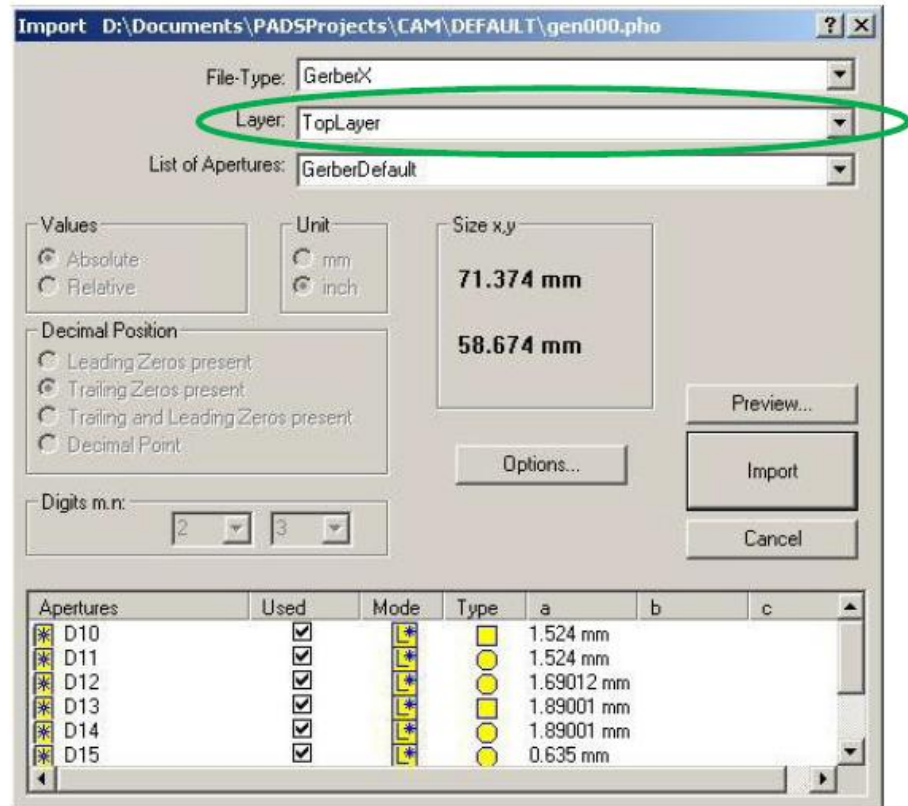
- **.stc** for top rubout
- **.sts** for bottom rubout

### Importing files to CircuitCAM

25. When importing files to CircuitCAM, you can follow instructions made for PADS-files with these following notes.

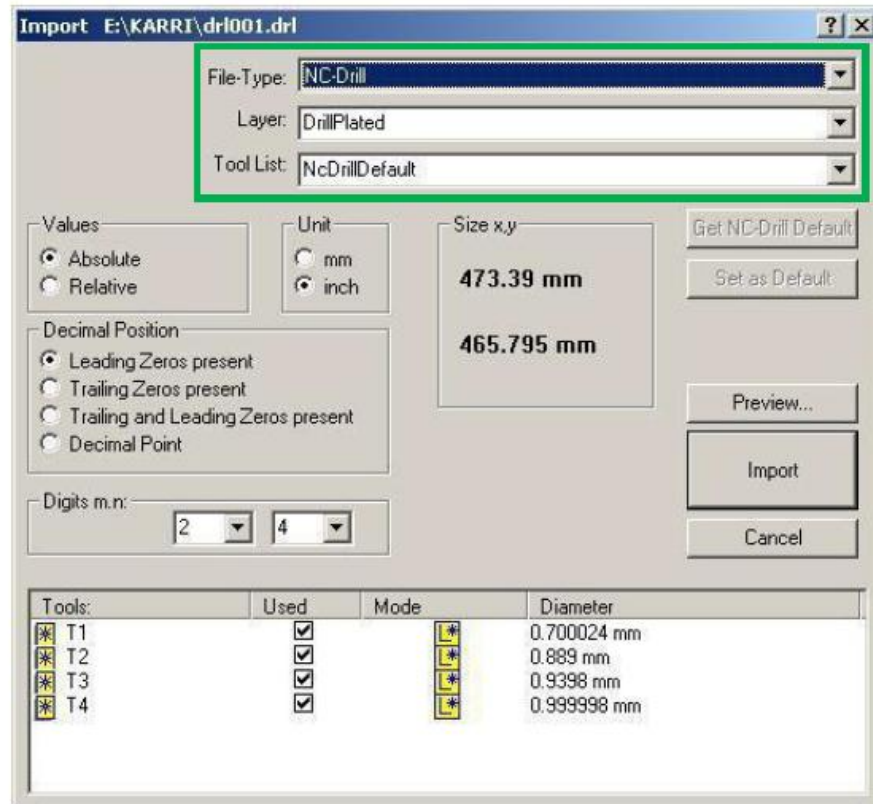
1. Ignore step where file *dr1001.rep* is imported.
2. For other files than **.drd**, change Layer-field (see next picture) according to following instructions:

- **.cmp** → TopLayer
  - **.sol** → BottomLayer
  - **.stc** → RuboutTop
  - **.sts** → RuboutBottom
-



26. For the .drd-file, from the next picture, check that **marked** fields are like shown.  
Check that settings are as listed below.

- Values → Absolute
- Unit → Inch
- Decimal Position → Trailing Zeros present
- Digits m.n → 2 and 4

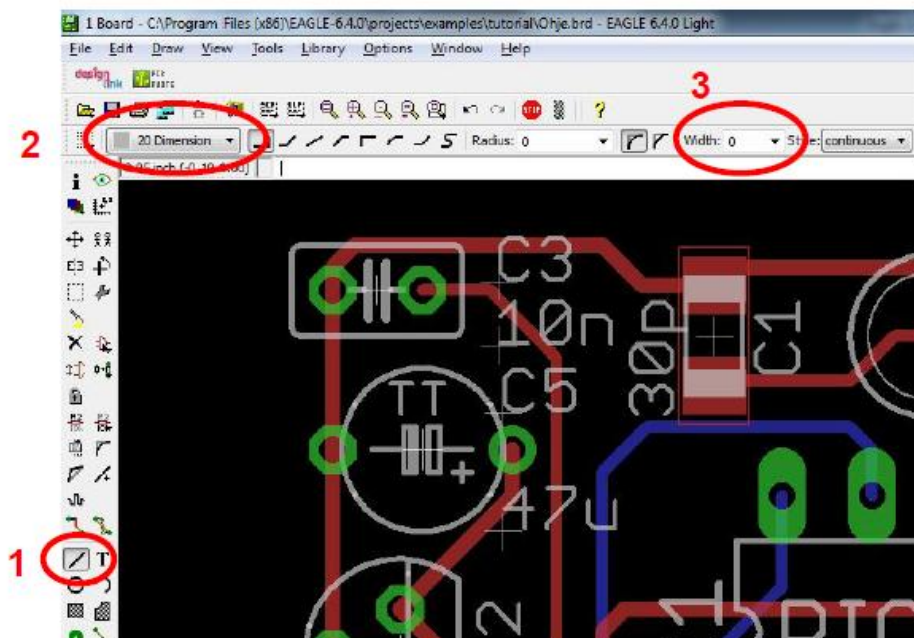


### 3. EAGLE instructions

#### 3.1. Board outlines

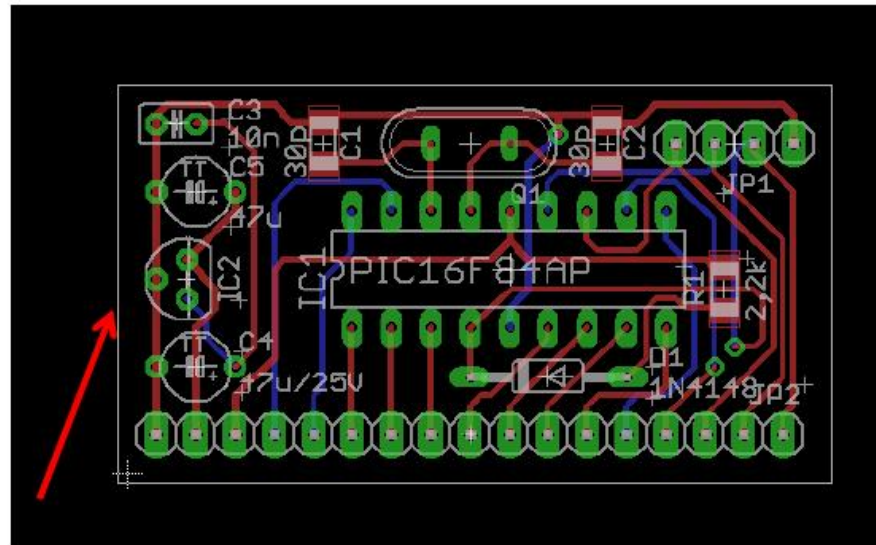
This chapter instructs how to draw board outlines in EAGLE. Outline can be shaped different ways, but only basic rectangle is instructed here. Numbers in parenthesis refer to numbers in next pictures. If outline already exists like in freeware it usually does, you can just move and/or reshape it as you like.

1. Select *Wire* (1). Then choose *Dimension-layer* (2) and set *Width* (3) to zero.



2. Now you can draw board outlines. Use right click or toolbar buttons while drawing to modify style. Next picture shows plotted outline.





3. Make sure you don't have anything placed outside board outlines.

### 3.2. Copper plane

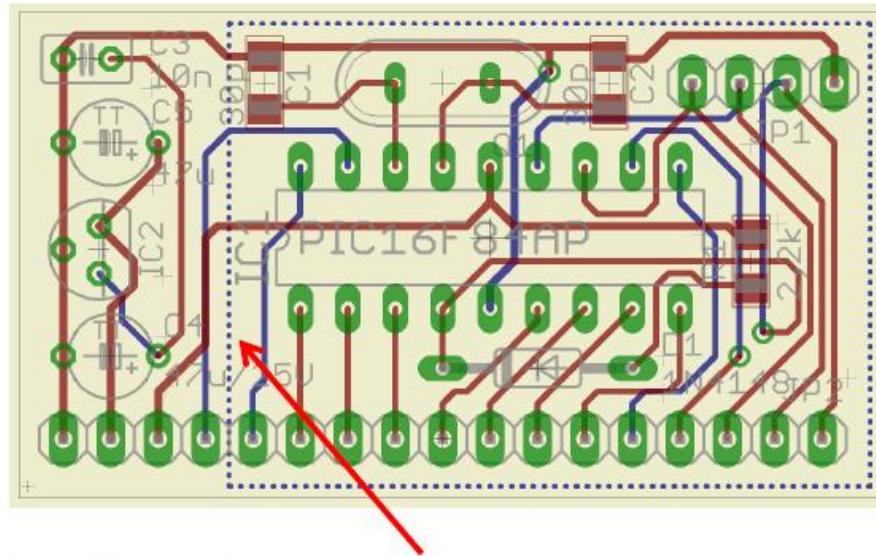
This chapter describes how you can do a ground plane to the bottom side of the board. Like in previous chapter, this just describes the main principle. It is possible to do different kinds of planes with this same method or use other parameters. Here we do the ground plane to the bottom side of the board.

Numbers in parenthesis refer to numbers in pictures.

1. First you need to select *Polygon* (1).
  2. Choose correct layer (2) from toolbar appeared. *Bottom* in this example.
  3. Set *Width* (3) to 0.01 inch / 0.254 mm. Don't use too small or big value.
  4. Set *Isolate* (4) to 0 or greater if needed.
  5. It is also recommended to use settings pointed with arrows.
-



6. Now draw polygon over the area you want to be used for ground plane. See blue dotted rectangle in next picture.



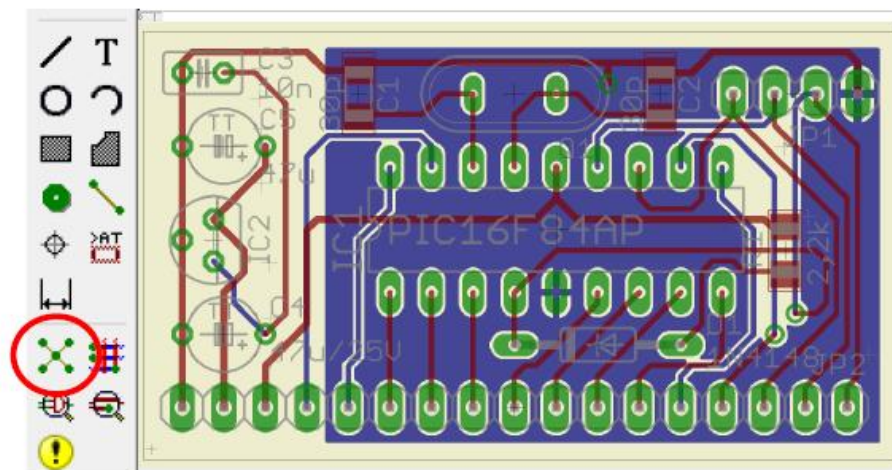
7. Click *Name*-command.



8. Click that polygon you just created. A window should open.
9. Now you need to enter new name to the text field. In this example, ground-signal is named as GND, so we enter GND to the text field. Always check what is the correct name to use.



10. Click OK.
11. There might be another popup to confirm signal connection (Didn't appear while doing this instruction).
12. Click *Ratsnest*-button. Ground plane should now be created.



### 3.3. Copper rubout

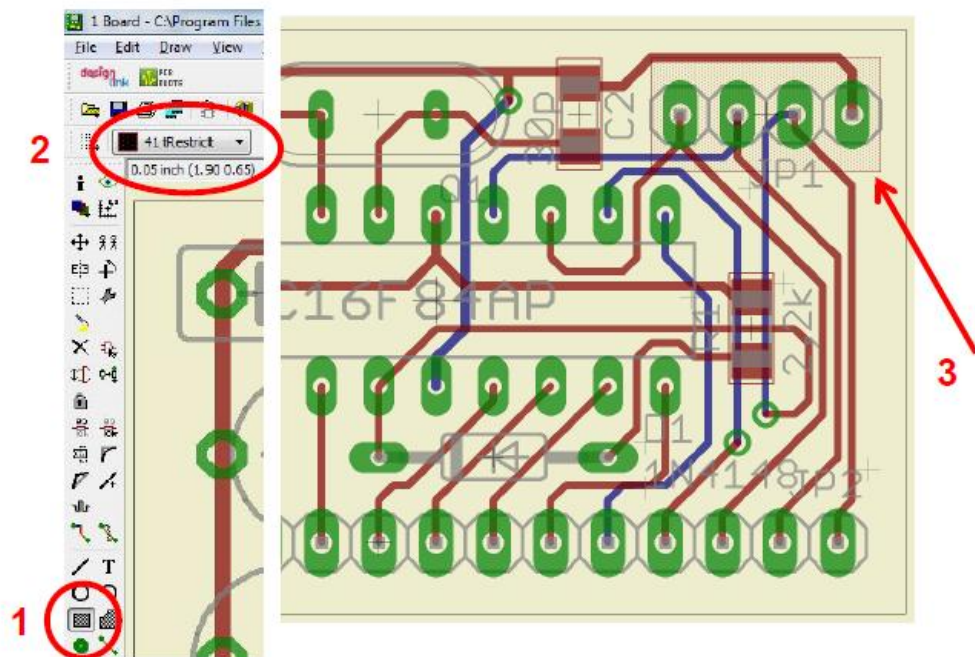
**NOTE!** Make all other than rubout CAM files before creating rubout areas.

If you want to mill out all excess copper, it is easier to do that in CircuitCAM. In this chapter you learn how to do define just certain areas to be milled out. **NOTE!** Design Rule Check (DRC) will report errors on these areas. It is recommended to do these rubout areas last.

In this example we make 2 different areas. One on top-layer using *Rectangle*-command, and one on bottom-layer using *Polygon*-command. Numbers in parenthesis refer to numbers in pictures.

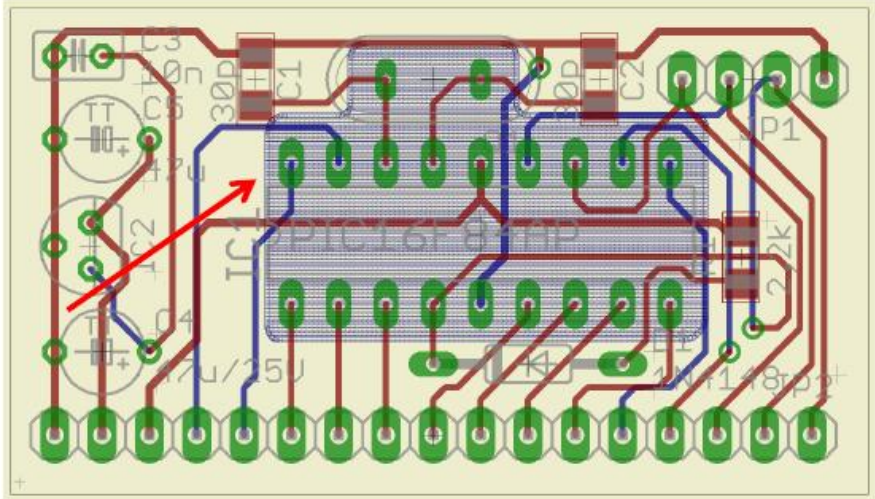
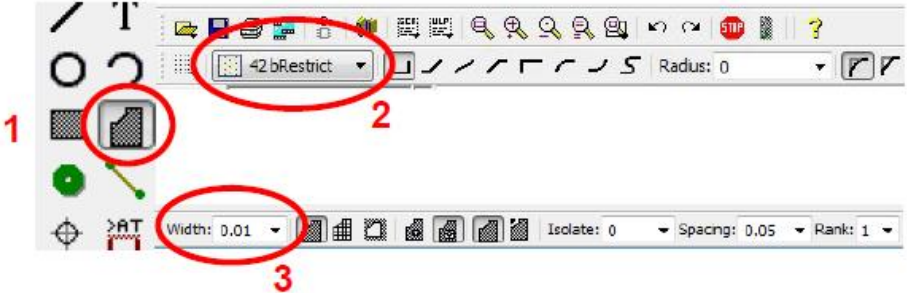
#### Rubout using *Rectangle*

1. Select *Rectangle*-command (1).
2. Select correct layer (2). *tRestrict* in this example.
3. Draw rectangle to wanted area (1).



**Rubout using Polygon.**

- 1. Select *Polygon*-command (1).
- 2. Select correct layer (2). *bRestrict* in this example.
- 3. Set *Width* (3) to 0,01 (Inch).
- 4. Draw polygon to the wanted area.



Corners of the polygon are mitered using *Miter*-command.

## GerberX-infotiedosto esimerkki

Generated by EAGLE CAM Processor 6.4.0

Photoplotter Info File: C:/Program Files/EAGLE-6.4.0/projects/examples/tutorial/demo3.gpi

Date : 18.4.2013 19:26:14  
 Plotfile : C:/Program Files/EAGLE-6.4.0/projects/examples/tutorial/demo3.cmp  
 Apertures : generated:  
 Device : Gerber RS-274-X photoplotter, coordinate format 2.4 inch

### Parameter settings:

Emulate Apertures : no  
 Tolerance Draw + : 0.00 %  
 Tolerance Draw - : 0.00 %  
 Tolerance Flash + : 0.00 %  
 Tolerance Flash - : 0.00 %  
 Rotate : no  
 Mirror : no  
 Optimize : yes  
 Auto fit : yes  
 OffsetX : 0inch  
 OffsetY : 0inch

### Plotfile Info:

Coordinate Format : 2.4  
 Coordinate Units : Inch  
 Data Mode : Absolute  
 Zero Suppression : None  
 End Of Block : \*

### Apertures used:

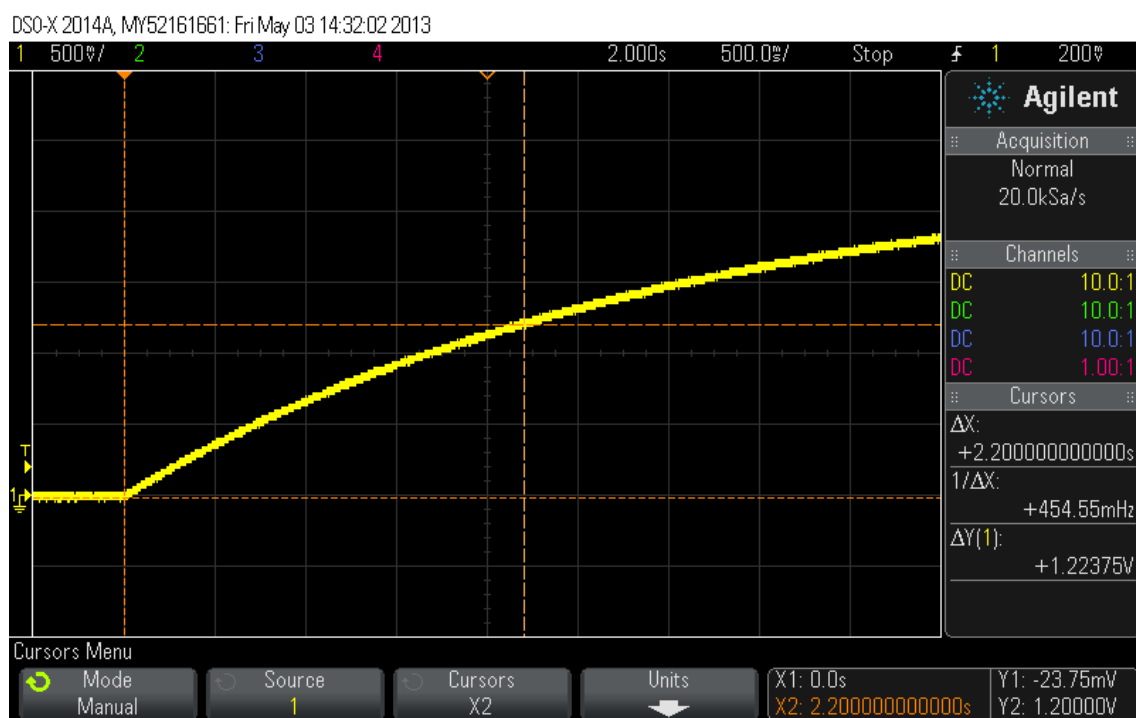
Code	Shape	Size	used
D10	draw	0.0440inch	2
D11	octagon	0.0520inch	7
D12	round	0.0520inch	2
D13	draw	0.0520inch	2
D14	rectangle	0.0300inch x 0.0450inch	18
D15	draw	0.0600inch	21
D16	rectangle	0.0710inch x 0.0630inch	2
D17	rectangle	0.0630inch x 0.0709inch	4
D18	draw	0.0157inch	37
D19	round	0.0400inch	7
D20	draw	0.0118inch	97

## Esimerkki komponenttipuolen GerberX-tiedostosta

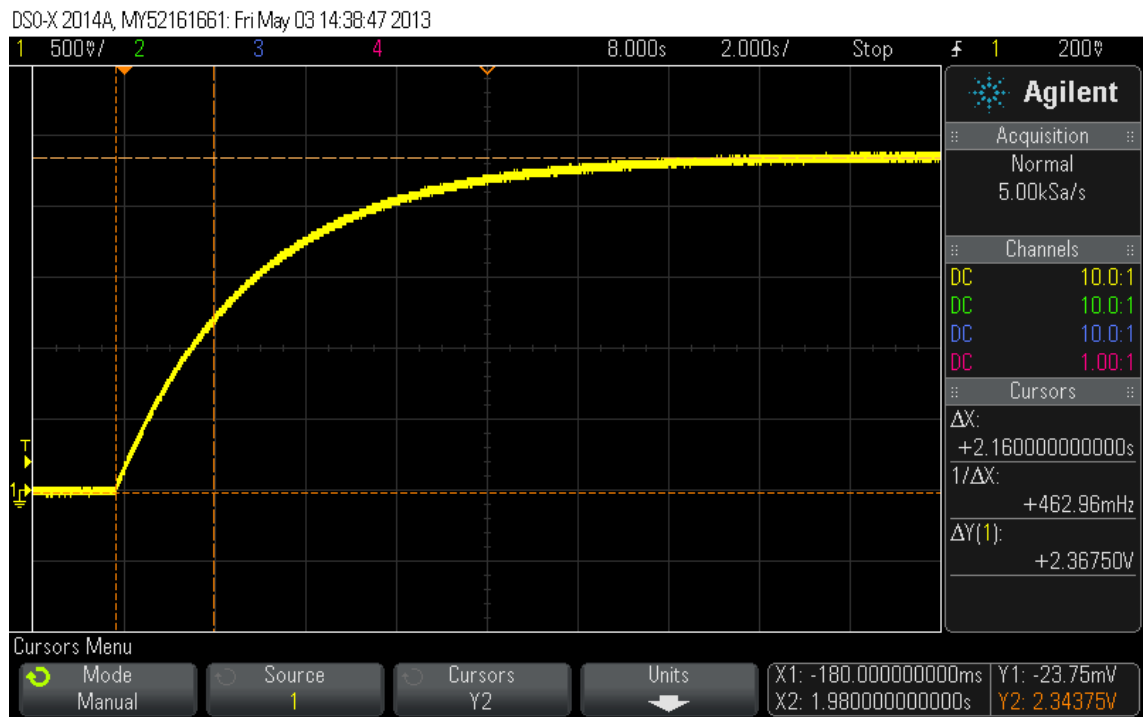
```
G75*
G70*
%OFAOBO*%
%FSLAX24Y24*%
%IPPOS*%
%LPD*%
%AMOC8*
5,1,8,0,0,1.08239X$1,22.5*
%
%ADD10C,0.0440*%
%ADD11OC8,0.0520*%
%ADD12C,0.0520*%
%ADD13C,0.0520*%
%ADD14R,0.0300X0.0450*%
%ADD15C,0.0600*%
%ADD16R,0.0710X0.0630*%
%ADD17R,0.0630X0.0709*%
%ADD18C,0.0157*%
%ADD19C,0.0400*%
%ADD20C,0.0118*%
D10*
X006565Y004598D02*
X007005Y004598D01*
X007005Y006598D02*
X006565Y006598D01*
D11*
X005035Y007598D03*
X002035Y007598D03*
X001035Y007598D03*
X001785Y005848D03*
X001035Y005348D03*
X001785Y004848D03*
X001035Y003098D03*
D12*
X003035Y003098D03*
X003035Y007598D03*
D13*
X013285Y006858D02*
X013285Y006338D01*
X013285Y002858D02*
X013285Y002338D01*
```



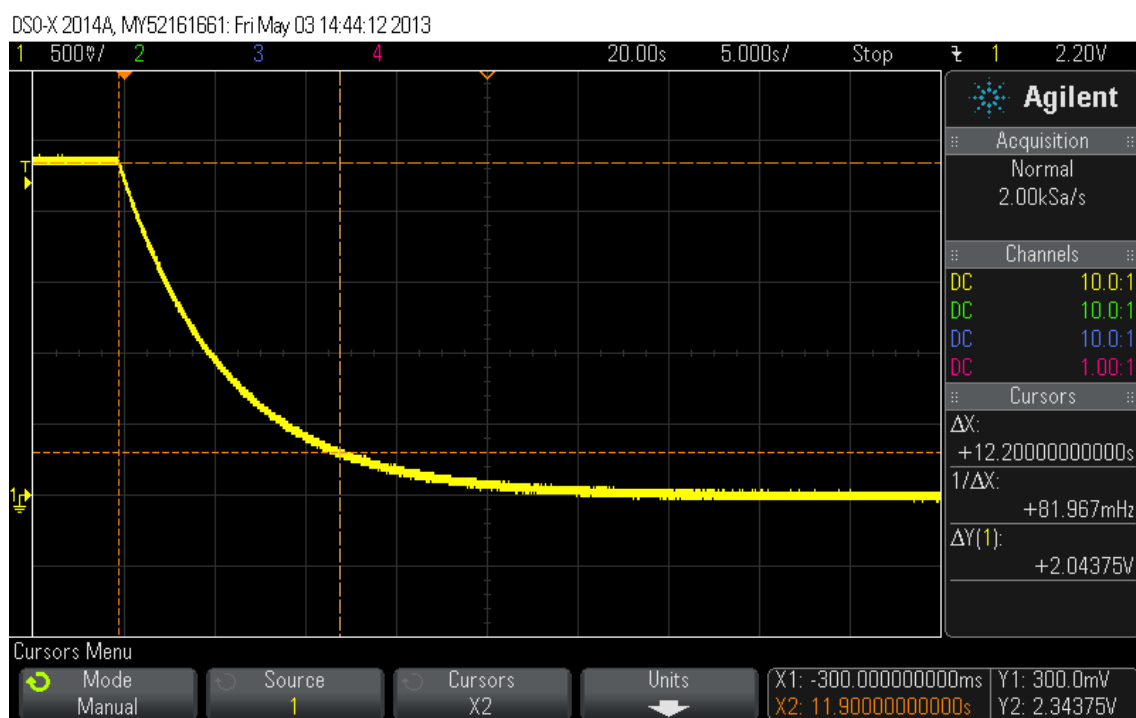
## Kondensaattorin jännitteen nousuaika



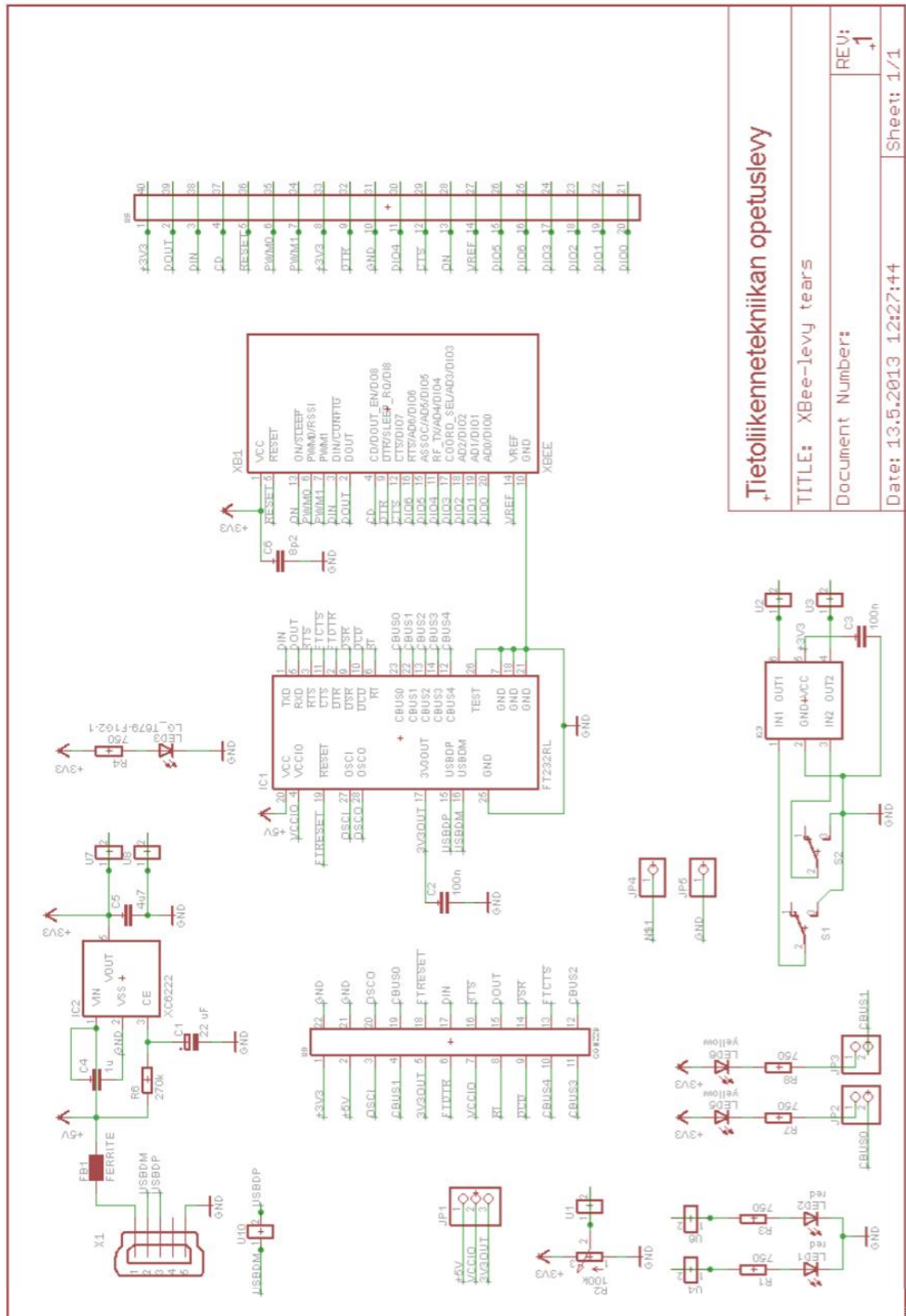
### Kondensaattorin lopullinen jännite



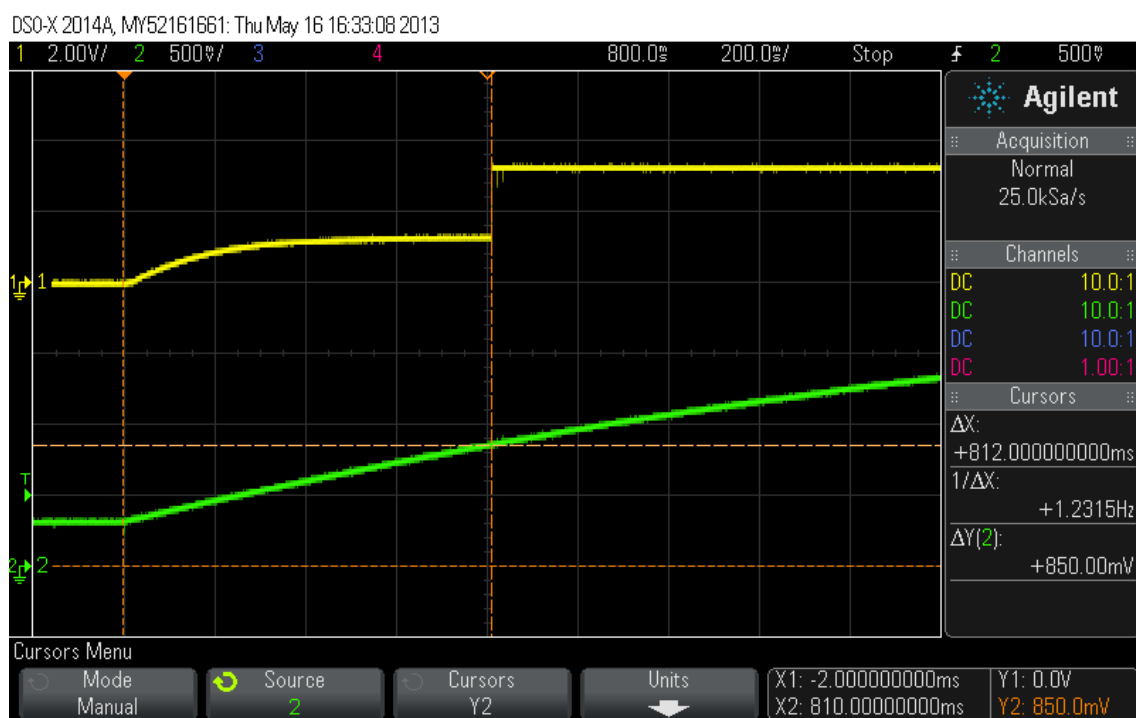
## Kondensaattorin jännitteen laskuaika



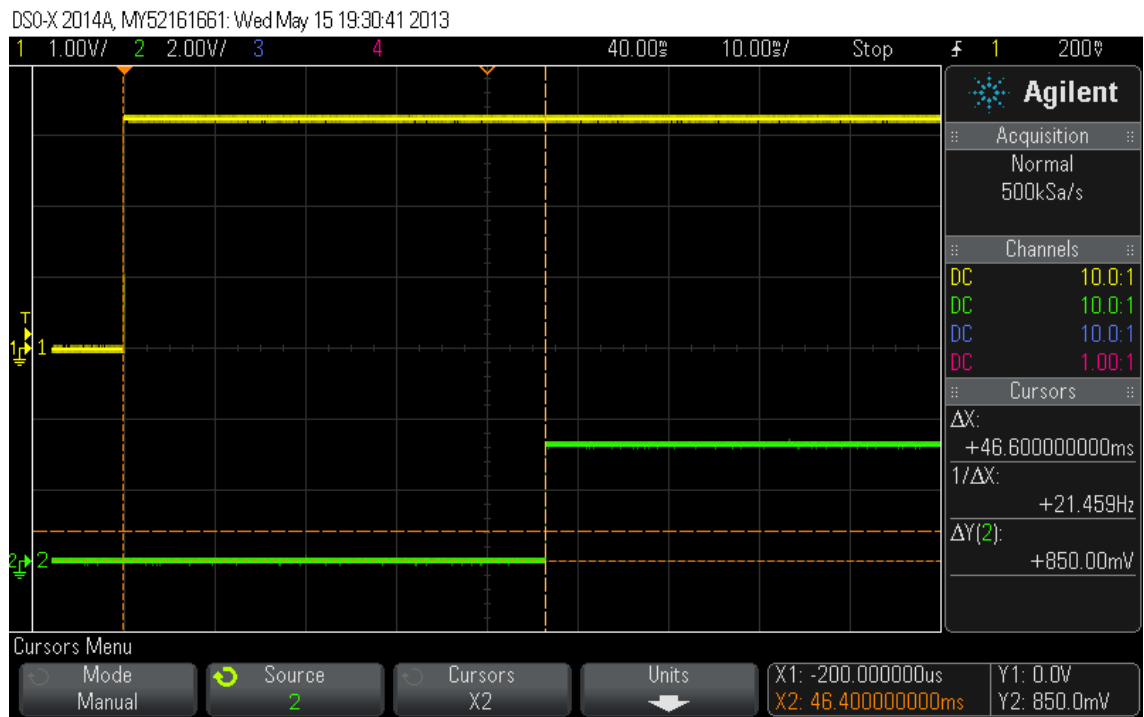
Prototyypin kytkentäkaavio



## CE-nastan ja regulaattorin ulostulon jännitteet



### Kytkinvärähtelyjen poistopiirin toiminta nousevalla reunalla



## RC-piirin toiminta virtoja kytkettäessä

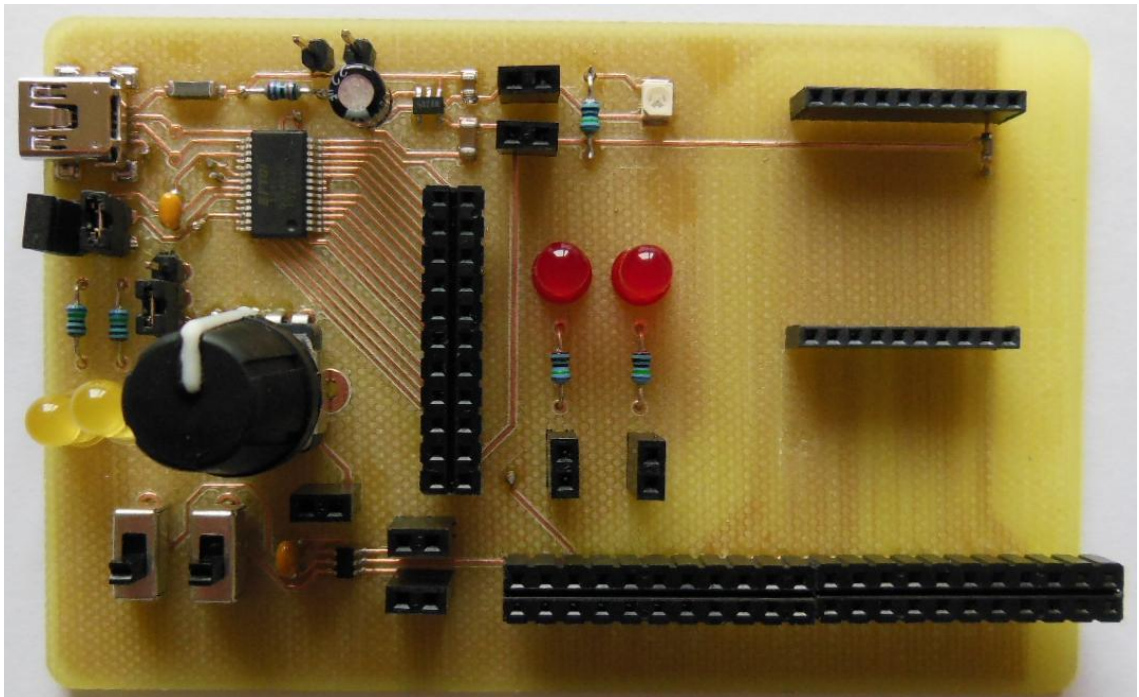


### CE-nastan jännitteen laskuaika





**Alustan prototyyppi komponenttipuolelta kuvattuna**



## Kustannusarvio

	10 levyä	15 levyä
Komponenttikustannukset	252,25 €	367,24 €
Piirilevykustannukset	103,91 €	129,81 €
Välisumma	356,16 €	497,05 €
Piirilevyjen toimituskulut	19,10 €	20,40 €
Piirilevyjen arvonlisävero	25,83 €	31,54 €
Yhteensä	401,09 €	548,99 €

Komponenttikustannukset sisältävät mahdollisten ylimääräisten komponenttien hinnan.  
 Komponenttikustannukset ovat verottomia, eivätkä sisällä toimituskuluja.  
 Piirilevykustannukset perustuvat verkossa toimivan laskurin antamiin lukuihin.

## Komponenttiluettelo

Komponentti	Valmistajan koodi	Kpl/levy
Liitin 1x2	SSW-102-01-T-S	8
Liitin 1x10	MMS-110-01-L-SV	2
Liitin 2x11	SSW-111-01-T-D	1
Liitin 2x20	SSW-120-01-T-D	1
Piikkirima 1x2	TSW-102-07-T-S	2
Piikkirima 1x3	TSW-103-07-T-S	1
USB-liitin mini-B	1734035-2	1
USB-UART-piiri	FT232RL	1
Kytkinvärähtelyjen poistopiiri	MAX6817EUT+T	1
Regulaattori 3,3 V	XC6222D331MR-G	1
Liukukytkin	OS102011MS2QN1	2
Ferriitti	MLS1806-4S4-151	1
Keraaminen kondensaattori 8,2 pF	C0603C829C5GACTU	1
Keraaminen kondensaattori 100 nF 50 V	K104M15X7RF53L2	2
Keraaminen kondensaattori 1 uF	C0805C105Z4VACTU	1
Keraaminen kondensaattori 4,7 uF	MCCA000563	1
Elektrolyyttikondensaattori 22 uF 25 V	MCMR25V226M5X7	1
Led smd vihreä	LGT67K-H2K1-24-Z	1
Led 5 mm kelt.	HLMP-4719	2
Led 5 mm pun.	HLMP-4700	2
Vastus 750R	MF12 750R	5
Vastus 270k	MF12 270K	1
Potentiometri 100k	RK09K1130C94	1
Potentiometrin nuppi	CR-R4-7	1
Yhteensä		41