



Petteri Niskanen

# Proessoripiirilevyn suunnittelu

Metropolia Ammattikorkeakoulu

Insinööri (AMK)

Ajoneuvotekniikka

Insinöörityö

26.5.2023

## Tiivistelmä

Tekijä:	Petteri Niskanen
Otsikko:	Proessoripiirilevyn suunnittelu
Sivumäärä:	31 sivua + 1 liite
Aika:	26.5.2023
Tutkinto:	Insinööri (AMK)
Tutkinto-ohjelma:	Ajoneuvotekniikka
Ammatillinen pääaine:	Autosähkötekniikka
Ohjaajat:	Lehtori Sanna Heikkinen Teknologiajohtaja Tuomas Asikainen, DooSolutions Oy

---

Opinnäytetyössä suunniteltiin piirilevyrakenne ja kartoitettiin suunnittelulähtökohdat prosessoripiirilevylle. Työssä perehdyttiin piirilevyteknologiaan ja erilaisten vaihtoehtojen hintavaikutuksiin sekä piirilevysuunnitteluun yleisellä tasolla. Opinnäytetyö tehtiin DooSolutions Oy:lle.

Tässä työssä suunniteltu prosessoripiirilevy on Linux-pohjainen prosessorimoduuli, josta halutaan yhteensopiva Raspberry Pi Compute Module 4:n IO-kortin kanssa. Työn tuloksena syntyi piirilevyrakenne, johtimien impedanssisovitukset sekä käytettävä valmistusteknologia prosessoripiirilevylle.

Avainsanat: piirilevy, piirilevyrakenne, dataväylä

## Abstract

Author: Petteri Niskanen  
Title: Processor Circuit Board Design  
Number of Pages: 31 pages + 1 appendix  
Date: 26 May 2023

Degree: Bachelor of Engineering  
Degree Programme: Automotive Engineering  
Professional Major: Automotive Electrical Engineering  
Supervisors: Sanna Heikkinen, Senior Lecturer  
Tuomas Asikainen, Chief Technology Officer, DooSolutions Ltd.

---

The objective of this Bachelor's thesis was to design a build-up to a processor circuit board and examine the different requirements of a processor board PCB design. The thesis was assigned by DooSolutions Ltd. The thesis examines PCB technology, cost effects of different technology choices, high-speed and EMC design and PCB design in general.

Designing the board structure, suitable PCB technology and design rules at the beginning of the process is always important in PCB design. It becomes vital with more complex boards like processor modules. Thorough pre-design of the board reduces unexpected costs and problems with manufacturability and leads to a more reliable operating of the finished device.

The designed board in this Bachelor's thesis consists of a processor module with a Linux operating system, and it should be compatible with Raspberry Pi Compute Module 4. The final product can be used as platform for software development and as a template for future designs.

As a result of the thesis, processor board build-up, trace widths to impedance matched conductors and suitable PCB technology were designed. This data can be used to design the final layout and routing of the board. Finally, the designed structure's manufacturability was ensured via a PCB producer.

Keywords: printed circuit board, build-up, databus

# Sisällys

## Lyhenteet

1	Johdanto	1
2	Piirilevyteknologia	1
2.1	Kerrosrakenteet	1
2.2	Läpivientireiät	2
2.3	Valmistus	4
2.4	Valmistuskustannukset	5
3	Piirilevysuunnittelu	6
3.1	Suunnittelutyökalut	6
3.2	EMI ja EMC	6
3.3	Häiriöiden syntyminen ja kytkeytyminen	6
3.4	Osasijoittelun ja reitityksen suunnittelu	8
3.5	Kerrostien käyttäminen	10
4	Nopeiden dataväylien suunnittelu	11
4.1	Signaali piirilevyllä	11
4.2	Signaalin jatkuvuus ja impedanssien sovittaminen	14
5	Teholähteet piirilevyllä	17
5.1	Teholähteet piirilevyllä	17
5.2	Hakkureiden toteutus piirilevyllä	17
6	Proessoripiirilevy	19
6.1	Yleiskuvaus	19
6.2	Suunnittelun haasteet ja huomiot	20
7	Piirilevyn kerrosrakenteen ja teknologia	23
7.1	Kerros määrän valinta ja kerrostien käyttö	23
7.2	Käytettävät läpiviennit ja teknologia	24
7.3	Impedanssisovitukset ja piirilevyrakenteen	25
8	Yhteenveto	29

Liitteet

Liite 1: Prosessoripiirilevyn lohkokuva

## Lyhenteet

HDI: *High Density Interconnect*. Piirilevy, jossa on tavanomaista tiheämpi johdotus.

EMI: *Electromagnetic Interference*. Sähkömagneettinen häiriö.

EMC: *Electromagnetic Compatibility*. Sähkömagneettinen yhteensopivuus.

BGA: *Ball Grid Array*. Komponenttikotelo, jossa on pallomaiset juotosjalat.

LPDDR: *Low-power Double Data Rate*. Pienitehoinen tuplanopeuksinen hajasaantimuisti.

PTH: *Plated Through Hole*. Kuparoitu läpivientireikä.

PCB: *Printed Circuit Board*. Piirilevy.

# 1 Johdanto

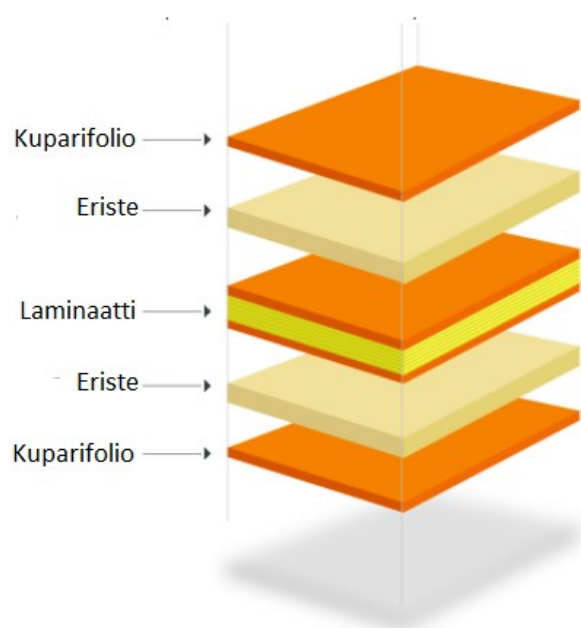
Tämän opinnäytetyön tavoitteena oli suunnitella piirilevyrakenne ja käytettävä teknologia Linux-pohjaiselle prosessoripiirilevyille, joka voidaan liittää Raspberry Pi Compute Module 4:n IO-korttiin. Monimutkaisia piirilevyjä suunniteltaessa suunnitteluehtojen määrittely prosessin alkuvaiheessa on erityisen tärkeää, jotta valmistettavuuden ja valmistuskustannusten kanssa ei tulisi ongelmia, kun lopullinen osasijoittelu ja reititys on tehty. Työ tehtiin DooSolutions Oy:lle.

Työssä perehdyttiin piirilevyteknologiaan -ja suunnitteluun yleisesti käytännön tasolla sekä suunniteltiin piirilevyrakenne, kerrosten käyttö ja impedanssisovitetavien johtimien leveydet. Lisäksi työssä tarkasteltiin eri teknologiavalintojen vaikutusta piirilevyn hintaan ja valmistettavuuteen. Lopuksi suunnitellun rakenteen valmistettavuus varmistettiin piirilevytoimittajan kautta.

## 2 Piirilevyteknologia

### 2.1 Kerrosrakenteet

Monikerrospiirilevyn rakenne koostuu johdinmateriaalina käytettävästä kuparifoliosta, eristeestä ja laminaatista. Laminaattimateriaali on kovetettua epoksihartsia, joka on molemmin puolin päällystetty kuparifoliolla. [1, s. 63.] Yksi laminaatti muodostaa itsessään kaksikerroksisen levyn. Kerrosmääriä lisättäessä laminaatin päälle tulee ohuesta lasikuitulevystä tehty eristearkki, jonka päälle voidaan lisätä uusi kuparikerros. Kuvassa 1 on esitetty tyypillinen nelikerroksisen piirilevyn rakenne.



Kuva 1. Nelikerroksisen piirilevyn rakenne [2].

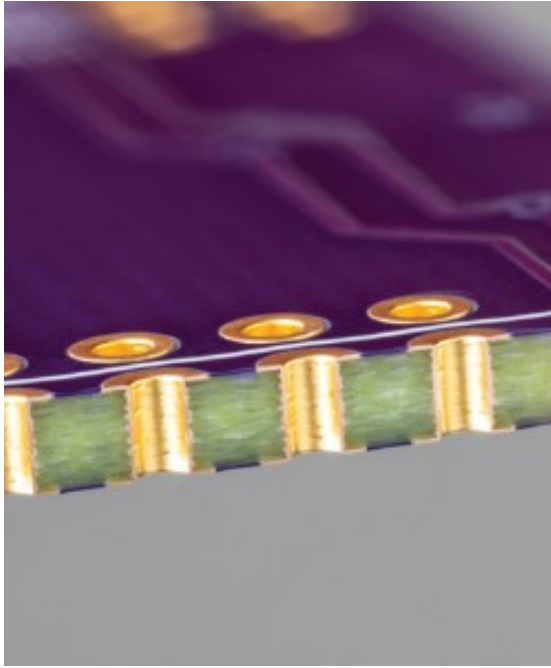
Kuusikerroksisessa piirilevyssä tulee ensimmäisen laminaatin päälle toinen laminaatti ja niiden väliin sijoitetaan eristearkki. Laminaattien päälle sijoitetaan eristearkit ja kuparifoliot. Tyypillinen piirilevyn kerrosmäärä on 4–8, mutta esimerkiksi prosessoripiirilevyissä kerroksia voi olla 10–16.

Uloimpien kuparikerrosten päälle tulee juotoksenestopinnoite, eli juotosmaski, joka toimii eristeenä, suojaa pintakupareita korroosiolta ja estää oikosulkujen syntymistä juotosprosessissa. [3]

## 2.2 Lävivientireiät

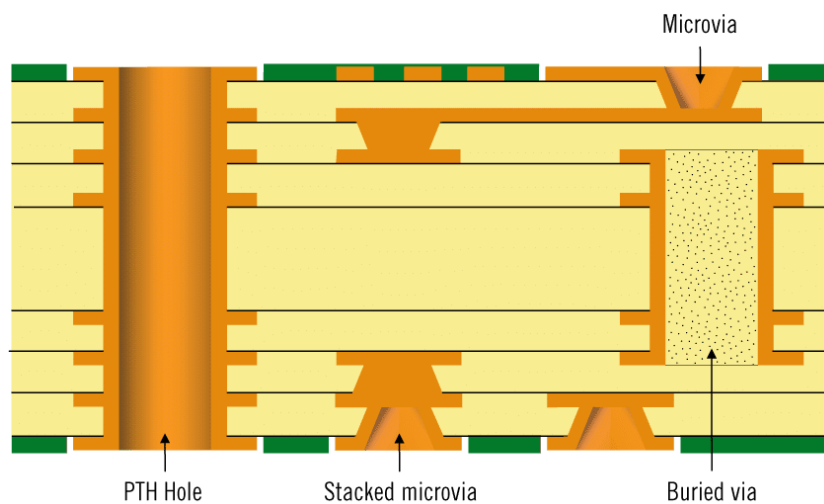
Lävivientireikiä käytetään piirilevyllä, kun halutaan yhdistää kuparitasoja ja johtimia kerrosten välillä. Lävivientireikä tehdään poraamalla joko mekaanisesti tai laserilla. Reikä kuparoidaan, ja reiän ylä- ja alapintaan tulee kuparikaulukset. Kuvassa 2 on esitetty poikkileikkauskuva läpiporatusta läpivientireiästä.





Kuva 2. Poikkileikkauskuvaa läpiporatusta läpivientireiästä [4, s. 230].

Läpivientireiät voivat olla läpireikiä (engl. plated through hole), haudattuja (engl. buried) tai sokeita (engl. blind) reikiä. Läpireikä tehdään poraamalla mekaanisesti reikä koko levyn läpi. Haudattu läpivienti yhdistää piirilevyn välikerroksia mutta ei ulotu pintakerrokseen. Sokea läpivienti alkaa pintakerroksesta ja päättyy välikerrokseen. Erilaiset läpivientireiät on esitetty kuvassa 3.



Kuva 3. Erilaiset läpivientireiät [5].

Sokeat läpiviennit ovat tyypillisesti mikroläpivientejä. Mikroläpivienti on sokea läpivienti, jonka poikkileikkaussuhde on korkeintaan 1:1 ja jonka syvyys on enintään 0,25 mm mitattuna pintakerroksesta kohdekerrokseen. [6] Kuvassa 4 on esitetty poikkileikkauskuva mikroläpiviennistä. Mikroläpiviennit tehdään yleensä laserporaamalla. Niitä käytetään pääasiallisesti yhdessä haudattujen läpivientien kanssa, koska mikroläpiviennit voivat yleensä olla vain yhden kerroksen syvyisiä.



Kuva 4. Poikkileikkauskuva mikroläpiviennistä [6].

### 2.3 Valmistus

Piirilevyn valmistusprosessissa johdinkuvio saadaan aikaan printtaamalla haluttu kuvio kuparifoliolle ja syövyttämällä ylimääräinen kupari pois. Materiaalit liitetään toisiinsa prässillä, jolla painetta ja lämpötilaa voidaan kasvattaa tasaisesti. Pintakerrokseen kasvatetaan kemiallisesti lisää kuparia ennen syövytystä läpivientireikien kuparoimiseksi. [2]

Läpivientireiät tehdään prosessin eri vaiheissa riippuen siitä, millaisia läpivientejä halutaan käyttää. Läpireiät porataan prässäyksen jälkeen koko levyn läpi ennen pintakuparien päällystämistä. Kun valmistetaan esimerkiksi kuusikerroksinen levy, jossa on haudattuja läpivientejä kerrosten 2 ja 5 välissä, valmistaja tekee ensin nelikerroslevyn kahdesta laminaatista, johon porataan läpireiät ja tämän jälkeen lisätään uloimmat kerrokset. Myös mikroläpivientejä voidaan tehdä välikerrokseen, ennen ulompien kerrosten liittämistä piirilevyyn; tällöin puhutaan haudatuista mikroläpivienneistä.

Kun piirilevy rakenne on valmis, piirilevy päällystetään molemmin puolin juotteenestopinnoitteella. Paljaaksi jäävät kuparialueet, kuten komponenttien juotospisteet, pinnoitetaan oksidoitumisen estämiseksi. [3] Valmistaja suorittaa yleensä myös testauksen, jossa käydään läpi kaikki virtasolmut katkosten ja oikosulkujen varalta [7].

## 2.4 Valmistuskustannukset

Piirilevyn valmistuskustannukset määräytyvät käytännössä erilaisten työvaiheiden määrän, sekä teknologian tarkkuuden mukaan. Merkittävimpiä tekijöitä ovat

- pienin eristeväli ja johdinleveys
- erilaiset läpivientireiät ja niiden koot
- kerrosten lukumäärä
- erityisvaatimukset ja luokitukset
- valmistusmäärät

Kun käytetään tarkempaa piirilevyn valmistusteknologiaa, jossa johtimia on tiheämmin yksikköpinta-alalla kuin tavallisissa piirilevyissä, puhutaan HDI-tekniologiasta (high density interconnect). HDI-tekniologialuokkaan siirrytään, kun tarvitaan 100  $\mu\text{m}$ :n suuruisia tai pienempiä eristevälejä ja johdinleveyksiä tai mikroläpivientejä. [5]

Tavallisesti piirilevyt tilataan jonkin välittäjänä toimivan piirilevytoimittajan kautta, jolla on yhteyksiä piirilevytehtaisiin ympäri maailmaa. Piirilevyn suunnitteluvaiheessa tarkkaa hintaa on vaikea arvioida, eivätkä valmistajatkaan pysty antamaan hinnasta kuin arvion ennen valmistustiedostojen näkemistä. Piirilevytoimittajien verkkosivuilla on yleensä ohjeita suunnitteluun ja erilaisten suunnitteluratkaisujen vaikutukseen hinnan määräytymisestä. Monimutkaisia HDI-piirilevyjä suunnitellessa kannattaa kuitenkin suunnitteluvaiheessa konsultoida

piirilevytoimittajia, varsinkin jos suunnitteluohjeista halutaan poiketa. Näin varmistetaan, että haluttu teknologia on mahdollista valmistaa. Piirilevyteknologia kehittyy jatkuvasti, joten ajankohtaisimmat tiedot tehtaiden kyvykkyydestä saadaan parhaiten kysymällä valmistajilta.

### 3 Piirilevysuunnittelu

#### 3.1 Suunnittelutyökalut

Tänä päivänä piirilevysuunnittelu tehdään käytännössä aina jollakin CAD-ohjelmalla. Tyypillisesti suunnitteluohjelmissa on erikseen piirikaavioeditori, josta työ siirretään piirilevyn suunnitteluohjelmaan. Tässä työssä käytettävät suunnitteluohjelmat ovat Siemensin PADS Logic, Layout ja Router.

#### 3.2 EMI ja EMC

Piirilevyillä käytettävät suurilla taajuuksilla toimivat dataväylät ja teholähteet aiheuttavat sähkömagneettisia häiriöitä (EMI). Sähkömagneettinen yhteensopivuus (EMC) tarkoittaa tilaa, jossa elektroniset laitteet kykenevät toimimaan ulkoisista häiriöistä huolimatta, eivätkä häiritse toiminnallaan muita laitteita [1, s. 7]. Hyvä EMC-suunnittelu piirilevysuunnittelun alkuvaiheessa vähentää ongelmia ja kustannuksia, joita syntyy, kun valmista laitetta yritetään saada EMC-testeistä läpi. Hyväksymisrajojen ylittäminen EMC-testissä voi johtaa komponenttien vaihtamiseen tai piirilevyn muutoksiin. Uusien prototyyppikierrosten läpikäyminen viivyyttää prosessia ja lisää työtunteja sekä testauskustannuksia.

#### 3.3 Häiriöiden syntyminen ja kytkeytyminen

Johtimessa kulkeva sähkövirta synnyttää johtimen ympärille magneettikentän. Virran muutokset johtimessa aiheuttavat myös muutoksia syntyvässä magneettikentässä. Kun magneettikenttään tuodaan toinen johdin, kentän muutos indusoi tähän johtimeen jännitteen. Indusoituvan jännitteen suuruus on esitetty kaavassa 1 [8, s. 15].

$$E = -M \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (1)$$

$E$  on indusoituva jännite

$M$  on johtimien keskinäisinduktanssi

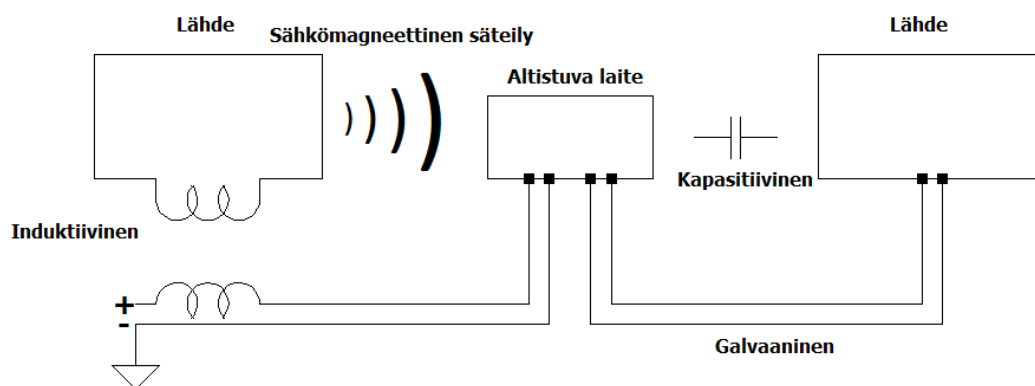
$\Delta i$  on sähkövirran muutos johtimessa

$\Delta t$  on virran muutosnopeus

Tasavirralla ja pienillä taajuuksilla toimivissa järjestelmissä sähkömagneettiset häiriöt eivät tyypillisesti muodosta ongelmaa. Mitä enemmän ja nopeammilla taajuuksilla toimivia digitaaliväyliä ja teholähteitä halutaan piirilevyille, sitä tärkeämmäksi kasvaa häiriöiden huomiointi suunnittelussa.

Signaalin taajuussisältö on lähes aina perustajuutta merkittävämpi häiriöiden lähde. Signaalin nopea nousu- ja laskuaika lisää merkittävästi perustajuutta korkeampia taajuuksia. [9, s.14–15.]

Häiriöt voivat kytkeytyä lähteestä altistuvaan laitteeseen kapasitiivisesti sähkökentän kautta, indusoitumalla magneettikentän kautta, johdinta pitkin sähkövirrana tai sähkömagneettisesti säteilemällä [1, s. 7]. Kuvassa 5 on esitetty häiriöiden kytkeytymismekanismeja.



Kuva 5. Häiriöiden kytkeytyminen [1, s. 7].

Kapasiitiivinen kytkeytyminen voi tapahtua esimerkiksi nopean signaalin alittaessa suuripinta-alaisen jäähdytyslevyn. Signaalin johtimen ja jäähdytyslevyn pinnan välissä on kapasitanssia, joka suurella taajuudella saa aikaan kapasiitiivisen kytkeytymisen sähkökentän kautta johtimen ja jäähdytyslevyn välille. [9, s. 10–11.] Induktiivisesti häiriöitä voi kytkeytyä esimerkiksi hakkuriteholähteen lähökkelasta lähellä oleviin kuparialueisiin tai komponentteihin.

Häiriöiden kytkeytyminen voi olla yhden tai useamman kytkeytymismekanismin sarja esimerkiksi siten, että häiriö kytkeytyy ensin induktiivisesti kohteeseen ja häiriösilmukan paluuvirta kytkeytyy kapasiitiivisesti maatasoon. Tämän vuoksi kytkeytyvien häiriöiden reitin löytäminen ja poistaminen voi olla vaikeaa, vaikka häiriöiden lähde ja altistuva laite olisi tiedossa. [1, s. 8.]

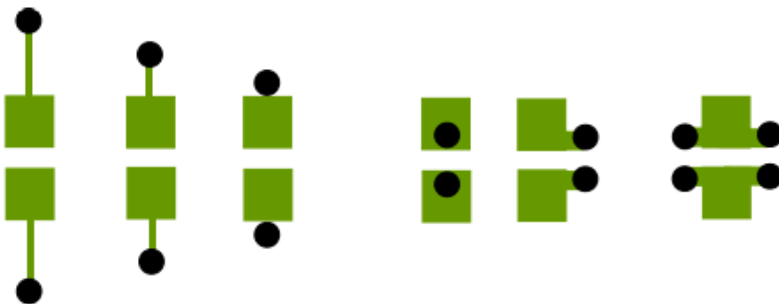
### 3.4 Osasijoittelun ja reitityksen suunnittelu

Tehokkain tapa vähentää sähkömagneettisia häiriöitä on kontrolloida häiriöitä niiden lähteessä [9, s. 4]. Komponenttien sijoittelulla ja reitityksellä on tässä suuri merkitys.

Kaikissa piirilevyn kuparijohtimissa ja läpivienneissä on induktanssia ja resistanssia. Induktanssit aiheuttavat häiriöitä sitä voimakkaammin mitä suurempia

virran muutoksia niissä esiintyy. Tämän vuoksi johtimien pituudet halutaan pääsääntöisesti pitää mahdollisimman lyhyinä. Johdinpituutta minimoidessa on tärkeää huomioida myös virran paluureitin pituus. Kun virtasilmukan kokonaispituus saadaan mahdollisimman pieneksi, myös silmukasta aiheutuva magneettikenttä pienenee. [8, s. 9–10.]

Integroitujen piirien käyttöjännitesyötön ja maan väliin lisätään lähes aina yksi tai useampi erotuskondensaattori suodattamaan häiriöiden aiheuttamaa kohinaa. Käyttöjännitteen säröily voi aiheuttaa epävakautta piirien toiminnassa. Käyttöjännite- ja maatasen välillä värähtelevä jännite saattaa lisäksi aiheuttaa häiriöitä piirilevyn ulkopuolelle. [9, s.122–123.] Kondensaattori tasaa myös piirin lähdön kuormittamisesta aiheutuvia jännitevaihteluja, jotka näkyvät piirin tulossa. Erotuskondensaattorit sijoitetaan mahdollisimman lähelle piirin käyttöjännite pinniä johtimen induktanssin minimoimiseksi. Jos piirilevyllä on omat kerroksensa käyttöjännitteille ja maatasolle, kytketään erotuskondensaattori näihin tasoihin läpiviennillä ja mahdollisimman lyhyellä johtimella. Kuvassa 6 on esimerkkejä läpivientireikien sijoittamisesta.



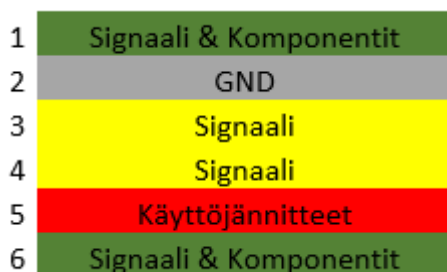
Kuva 6. Läpivientireikien sijoittaminen [10, s. 29].

Mikroläpivientien etuna on, että pienen kokonsa ansiosta ne voidaan usein sijoittaa suoraan komponentin juotospisteelle (engl. pad), jolloin johtimen induktanssi jää pois. Sijoittamalla kaksi läpivientireikää vierekkäin, saadaan aikaan induktanssien rinnankytkentä ja siten läpiviennin kokonaisinduktanssin puolittuminen.

Toiminnallisten kokonaisuuksien erottaminen toisistaan on tärkeä huomio osasijoittelussa. Suurilla taajuuksilla toimivat digitaalipiirit, teholähteet sekä herkäät analogiset kokonaisuudet kannattaa mahdollisuuksien mukaan sijoittaa kauas toisistaan piirilevyllä. Joissain tapauksissa pelkkä etäisyys häiriön lähteen ja alitistuvan laitteen välissä riittää. Kokonaisuudet voidaan erottaa myös galvaanisesti siten, että kuparialueet katkaistaan ja yhteys näiden välillä on esimerkiksi isolaattoriin tai muuntajan kautta. [11, s. 842–845.]

### 3.5 Kerrosten käyttäminen

Piirilevyn kerrosmäärä kasvatetaan, kun halutaan lisää reititystilaa. Reitityskerrosten väliin sijoitetaan yleensä joko maa- tai käyttöjännitetaso. Yhtenäinen maataso on optimaalinen reitti paluuvirralle pienen impedanssinsa ansiosta [1, s. 80]. Se pienentää virtasilmuksia ja niistä aiheutuvia häiriöitä. Kuparitasoilla saadaan myös tarvittaessa eristettyä tehokkaasti reitityskerrokset toisistaan. Kuvassa 7 esitetty tavanomainen kerrosten käyttö kuusikerroksisella piirilevyllä



Kuva 7. Perinteinen kerrosten käyttö 6-kerroksisella piirilevyllä [1, s. 71].

Tällainen kuusikerroslevy mahdollistaa neljä reitityskerrosta, yhtenäisen maa- sekä käyttöjännitetason. Isovirtaiset käyttöjännitetasot reititetään tavallisesti omassa kerroksessaan mahdollisimman suurina kuparialueina.

Tavallisesti piirilevyn reunaan pitkin halutaan sijoittaa läpivientireikiä yhdistämään kerroksien maatasot toisiinsa. Tämän tarkoituksena on muodostaa piirilevystä Faradayn häkki, joka vähentää levyn ulkopuolelle säteileviä häiriöitä. [1, s. 82.]

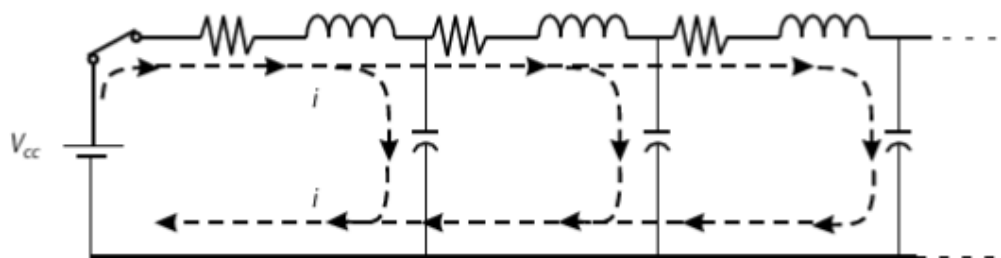


Myös käyttöjännitekerroksille tehdään piirilevyn reunaan pitkin kiertävä maa-ku-parialue käyttöjännitealueen ympärille.

## 4 Nopeiden dataväylien suunnittelu

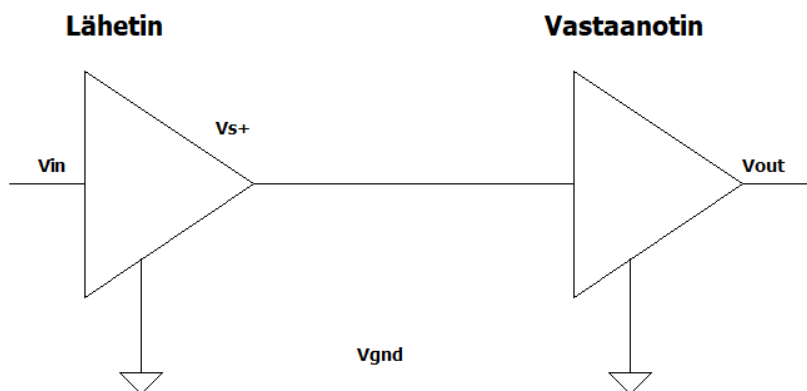
### 4.1 Signaali piirilevyllä

Johtimessa etenevä suurtaajuuksinen signaali voidaan ajatella siten, että jännitteen nouseva reuna etenee johdinta pitkin aaltona. Virtasilmutka, jossa suurtaajuuksinen datasiinaali etenee piirilevyllä, kuvataan sarjana sijaiskytkentöjä, joissa johdin on esitetty resistanssina ja impedanssina ja johtimen ja referenssitason väli on esitetty kapasitanssina (kuva 8). Signaalin reunan edetessä ”kondensaattorit” varautuvat ja signaalin paluuvirta kytkeytyy kapasitiivisesti referenssitasoon. [12, s. 52–54.]



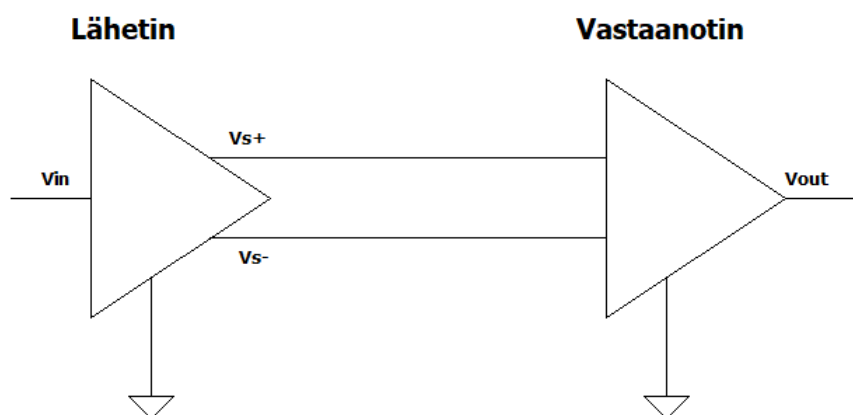
Kuva 8. Signaalin eteneminen johtimessa ja referenssitasossa [12, s. 55].

Digitaaliväylien signaalit voivat olla joko epäsymmetrisiä (engl. single-ended, kuva 9) tai differentiaalisia (kuva 10). Epäsymmetrinen signaali kulkee yksittäistä johdinta pitkin lähettävältä piiriltä vastaanottavalle piirille. Vastaanottava piiri mittaa signaalin jännitettä johtimessa ja referenssitasona on yleensä systeemin maataso. Epäsymmetrisen signaalin haittapuolena on, että kaikki häiriöt ja jännitteenmuutokset maatasossa ja signaalin johtimessa pyrkivät vääristämään signaalin jännitetasoa.



Kuva 9. Epäsymmetrinen signaali.

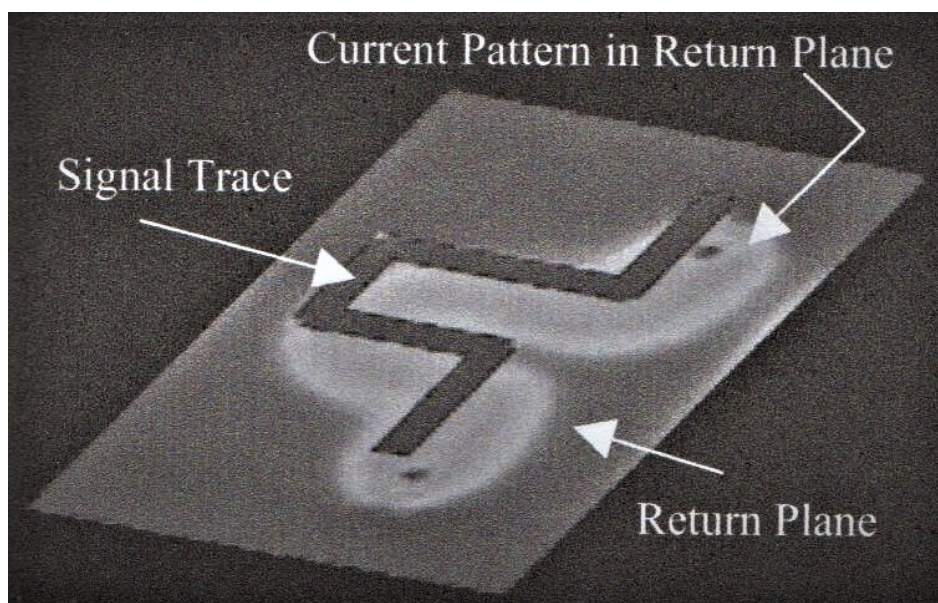
Differentiaalinen signaali kulkee kahden johtimen differentiaaliparissa, joiden välistä jännitettä vastaanottava piiri mittaa. Ideaalisessa tilanteessa kaikki differentiaalipariin kytkeytyvät häiriöt ovat yhtä suuret molemmissa johtimissa, jolloin niiden välinen jännite ei muutu.



Kuva 10. Differentiaalipari.

Piirilevyllä toteutettuna differentiaaliparin johtimien paluuvirta kytkeytyy sähkökentän kautta referenssitason. Tämän vuoksi differentiaalipari piirilevyllä tulee ajatella kahtena epäsymmetrisenä johtimena, joiden paluuvirrat kulkevat maatasossa. [9, s. 181.]

Pienillä taajuuksilla signaalin paluuvirta referenssisitasossa kulkee pienimmän resistanssin reittiä. Käytännössä tämä tarkoittaa suorinta reittiä suurta pinta-alaa hyödyntäen. [13, s. 258.] Taajuuden kasvaessa paluuvirta pyrkii kulkemaan pienemmän induktanssin reittiä seuraten signaalin kulkureittiä suoraan signaalin johtimen alapuolella referenssisitasossa kuvan 11 mukaisesti. Ilmiö esiintyy tyypillisesti taajuuden kasvaessa megahertsiluokkaan [11, s. 649]. Tästä syystä referenssisitaso signaalin johtimen alla tulee olla yhtenäinen kuparialue, eikä se saa leikkautua signaalin johtimen kohdalla.



Kuva 11. Paluuvirran reitti referenssisitasossa [11, s. 647].

Kun signaali vaihtaa kerrosta piirilevyllä, tulee signaalin johtimen läpiviennin viereen sijoittaa läpivientireikä myös referenssisitasoon paluuvirtareitin varmistamiseksi.

Yleisimmät tavat reitittää signaalijohtimet piirilevyllä on joko pintakerroksessa mikroliuskana (micro-strip) tai sisäkerroksissa referenssisitasojen välissä (strip-line). Striplinen etuna on, että johtimen molemmilla puolella kulkevat kuparitasot vaimentavat sähkömagneettisia häiriöitä tehokkaasti. [1, s. 132.]

## 4.2 Signaalin jatkuvuus ja impedanssien sovittaminen

Jotta signaali päätyisi lähettävästä päästä vastaanottimelle vääristymättä ja heijastumatta, on signaalin johtimen impedanssi sovitettava. Signaalinen vääristyminen ja heijastuminen voi aiheuttaa dataväylän toimimattomuuden lisäksi myös laitteen ulkopuolelle säteileviä häiriöitä. Signaalijohtimen karakterinen impedanssi on impedanssi, jonka signaalin reuna näkee, edetessään johtimessa [14, luku 7]. Impedanssi riippuu johtimen geometriasta, etäisyydestä referenssitason ja eristemateriaalin suhteellisesta permittiivisyydestä. Johtimen etäisyys referenssitason on käytännössä sama kuin eristemateriaalin paksuus, joten impedanssisovitukset vaikuttavat merkittävästi piirilevyrakenteeseen.

Signaalijohtimen impedanssin tarkka laskeminen vaatii tyypillisesti simulointia, mutta impedanssi voidaan arvioida useimpiin tilanteisiin riittävän tarkasti kaavoilla 2 ja 3. Kaava 2 pätee microstrip-johtimelle ja kaava 3 striplinelle. [15, s. 74–75.] Yleinen tapa impedanssisovitusten laskemiseen on käyttää jotakin laskentatyökalua.

$$Z_0 = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.41}} \ln \left( \frac{5.98h}{0.8w + t} \right) \quad (2)$$

$$Z_0 = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left( \frac{1.9b}{0.8w + t} \right) \quad (3)$$

$Z_0$  on karakterinen impedanssi

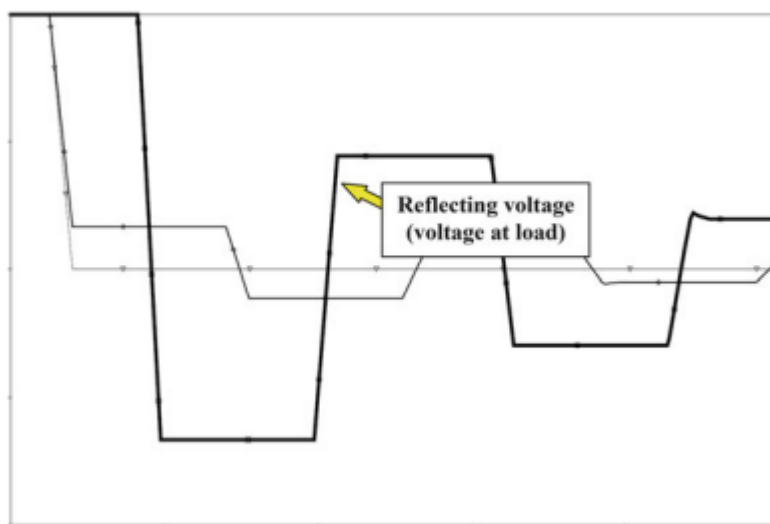
$w$  on johtimen leveys (mils)

$t$  on johtimen paksuus (mils)

$h$  on etäisyys referenssitason (mils)

$b$  on referenssitasojen keskinäinen etäisyys (mils)

Impedanssin yhteensopimattomuus väylässä saattaa aiheuttaa signaalin heijastumisen vastaanottimen päässä, jolloin signaalin jännite alkaa värähtelemään. Heijastunut signaali on esitetty kuvassa 12. Jos jännite värähtelee riittävän suurella amplitudilla, vastaanotin saattaa tulkita logiikka tason väärin. [15, s.76–79.] Lisäksi värähtely voi aiheuttaa ulospäin säteileviä häiriöitä.

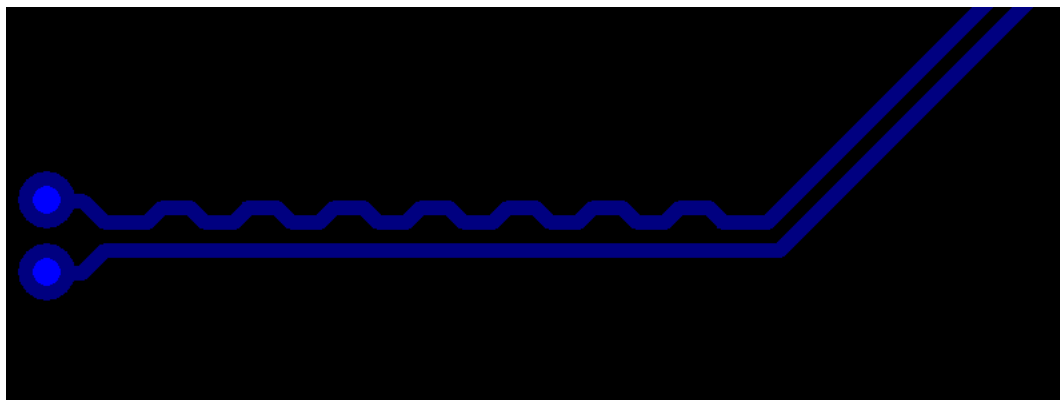


Kuva 12. Heijastunut signaali [15, s. 81].

Ilmiötä, jossa rinnakkain reititetyistä johtimista kytkeytyy häiriöitä viereisiin johtimiin, kutsutaan ylikuulumiseksi. Johtimien välillä on keskinäisinduktanssia, joka aiheuttaa induktiivista kytkeytymistä johtimien välille. Reitittämällä johtimet kauemmaksi toisistaan keskinäisinduktanssi pienenee ja ylikuuluminen vähentyy. [15, s.111–112.] Eristevälin pienentäminen referenssitason ja johtimien välissä vähentää myös ylikuulumista, koska häiriöt kytkeytyvät enemmän referenssitason kuin viereiseen johtimeen. Yleisesti suositeltu etäisyys suurtaajuuksisten signaalien ja häiriöherkkien johtimien välillä on kolme kertaa johtimen etäisyys referenssitason, joka vähentää ylikuulumista 90 % [15, s. 112].

Signaalin etenemisviive voi aiheuttaa synkronointivirhettä nopeissa data-väylissä. Esimerkiksi differentiaaliparissa signaalien on saavuttava lähettimeltä vastaanottimelle tietyn aikamarginaalin sisällä, jotta vääristymää ei syntyisi. Tästä syystä signaalijohtimet piirilevyllä on reititettävä vaaditun marginaalin mukaan saman mittaisiksi.

Käytännössä tämä tapahtuu kasvattamalla lyhyemmän johtimen pituutta lisäämällä siihen ylimääräisiä mutkia, kunnes pituusero pitempään johtimeen täyttyy. [16] Kuvassa 13 on esimerkki pituussovitetusta differentiaaliparista.



Kuva 13. Pituussovitettu differentiaalipari.

Hitaammilla nopeuksilla toimivissa väylissä sallitut pituuserot ovat yleensä niin suuria, että ylimääräisiä mutkia ei tarvita. Nopeammissa väylissä sallitut marginaalit ovat usein hyvin pieniä. Jos esimerkiksi piirivalmistajan datalehdessä on ilmoitettu, että differentiaaliparin johtimet on mitoitettava 1 ps marginaalilla keskenään, voidaan periaatteessa sallittu pituus ero laskea käyttämällä signaalin etenemisnopeutta piirilevyllä. Signaalin etenemisnopeus voidaan laskea kaavalla 4 [13, s. 270].

$$V_0 = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{re}}} \quad (4)$$

$V_0$  on signaalin etenemisnopeus

$c$  on valon nopeus tyhjiössä

$\epsilon_{re}$  on eristemateriaalin suhteellinen permittiivisyys

Tästä voidaan laskea johtimien sallittu pituusero piirilevyllä, jonka eristemateriaalin suhteellinen permittiivisyys on 4,3.

$$X = tV0 \rightarrow t \frac{c}{\sqrt{\epsilon r e}} = 1 \text{ ps} * \frac{2,998 * 10^8 \frac{m}{s}}{\sqrt{4,3}} \approx 0,15 \text{ mm} \quad (5)$$

[14, luku 7.]

Yhtälön 5 perusteella johtimien sallittu pituusero olisi n. 0,15 mm.

## 5 Teholähteet piirilevyllä

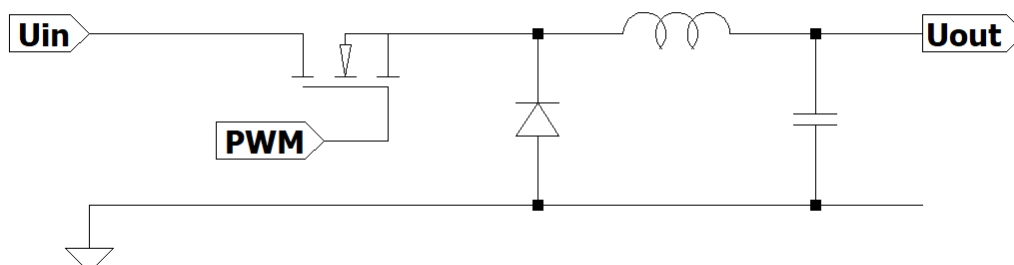
### 5.1 Teholähteet piirilevyllä

Piirilevyllä tarvitaan yleensä useita eri jännitetasoja esimerkiksi integroitujen piirien käyttöjännitteiksi. Usein piirilevyille tuodaan ulkopuolelta yksi käyttöjännite, josta regulaattoreilla saadaan useita eri jännitetasoja. Piirilevyllä käytettävät tehollähteet ovat tyypillisesti joko lineaarisia tai hakkuriregulaattoreita. Lineaariregulaattori on rakenteeltaan yksinkertainen ja vähemmän häiriötä aiheuttava kuin hakkuriregulaattori. Lineaariregulaattoreilla on yleensä hakkureihin verrattuna suurempi hukkateho eikä niillä voi nostaa jännitettä. Hakkurit voivat olla joko jännitettä nostavia tai laskevia ja niiden häviöt ovat lineaarisia regulaattoreita pienemmät. Hakkurit ovat kuitenkin suurten kytkentätaajuuksiensa vuoksi erittäin merkittäviä häiriön lähteitä ja vaativat erityistä huomiota piirilevy suunnittelussa.

### 5.2 Hakkureiden toteutus piirilevyllä

Hakkuriregulaattorissa katkotaan tulovirtaa suurella taajuudella. Hakkurin lähdössä on kela ja kondensaattori, joihin varastoituu energiaa kytkimen ollessa kiinni. Kytkimen ollessa auki, kuorma ottaa virtaa kelasta ja kondensaattorista. Kuvassa 14 on esitetty periaatekuva jännitettä laskevasta eli alasmuuntavasta hakkuriregulaattorista (engl. buck converter). Kytkimenä on kanavatransistori,

jonka hilajännitteen pulssisuhdetta muuttamalla voidaan säätää lähdön jännitettä. [17, s.245].



Kuva 14. Alasmuuntavan hakkuriregulaattorin periaatekuva [8, s.18].

Usein hakkuriregulaattori toteutetaan piirilevyllä käyttämällä integroitua hakkuri-piiriä, jossa on sisäänrakennettu takaisinkytkentävahvistin ja kytkintransistori. Lähtöjännitettä säädetään takaisinkytkennällä, yleensä jännitteenjakovastuksilla.

Piirilevyllä hakkuriregulaattori pakataan mahdollisimman pienelle alueelle ja sijoitetaan etäälle häiriöille herkistä kokonaisuuksista. Suurimmat virrat ja virranmuutokset ovat kytkimessä ja diodissa [8, s. 20]. Kuvan 14 Transistori, kela ja diodi muodostavat niin sanotun kytkentäsolmun (engl. switching-node), jonka potentiaali nousee ja laskee kytkentätajuuden mukaan. Tämä solmu pakataan pinta-alaltaan mahdollisimman pieneksi. Takaisinkytkentä sijoitetaan kauemmas kytkentäsolmusta ja lähdöstä. Maa-kuparialue näiden välistä erotetaan paikallisesti, etteivät mahdolliset jännitteenvaihtelut näy takaisinkytkennän maadoituksessa. Hakkurin alle sijoitetaan yhtenäinen maataso, johon lähdön ja kytkimen paluuvirta kytketään läpivienneillä.

Tavallisesti piirivalmistajien datalehdissä on periaatteellinen esimerkki kyseisen piirin käytöstä piirilevyllä. Näitä esimerkkejä sovelletaan mahdollisimman tarkasti parhaan toiminnan saavuttamiseksi.



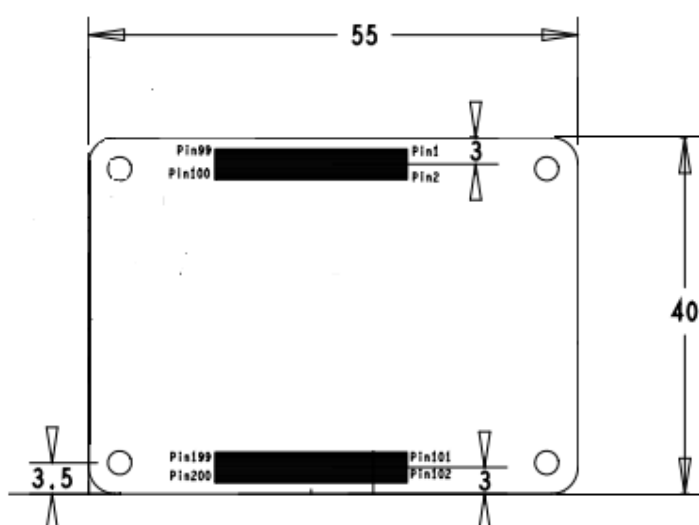
## 6 Prosessoripiirilevy

### 6.1 Yleiskuvaus

Tässä työssä suunnitellusta prosessoripiirilevystä halutaan Raspberry Pi Compute Module 4:n kaltainen prosessorikortti, joka on yhteensopiva Raspberry Pi 4 Compute Modulen IO-kortin kanssa. Valmista korttia voidaan käyttää ohjelmistosuunnittelun kehitysalustana, prosessorikorttina erilaisissa laitteissa ja sen pohjalta voidaan suunnitella samaa prosessoria ja sen ympäristöä käyttäviä piirilevyjä.

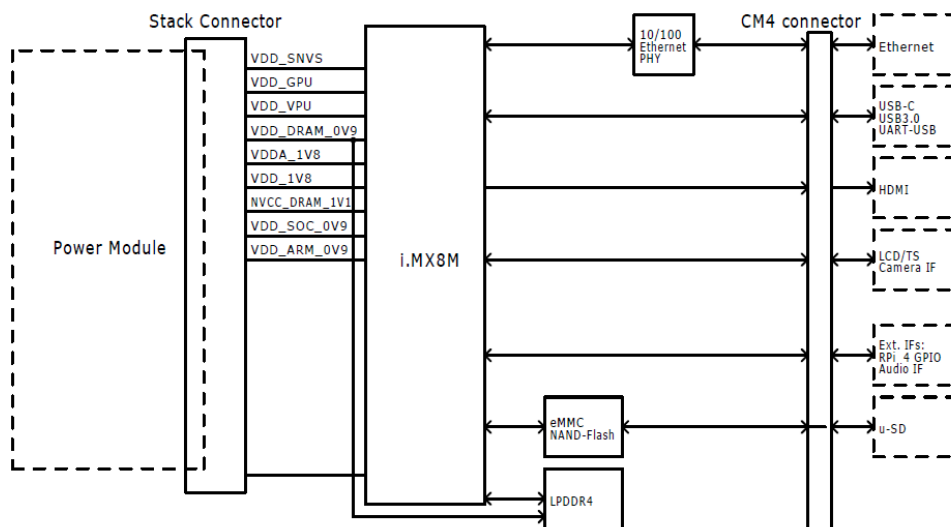
Prossessorina käytetään NXP i.MX8M prosessoria. Kortille tulee prosessorin lisäksi muistiväylien sekä ulospäin kommunikoivien dataväylien mikropiirit, mutta kaikkien toimilaitteiden ja väylien ulkoiset liitännät ovat IO-kortilla, johon prosessorikortti liitetään kahdella kampaliittimellä.

Jotta prosessorikortti olisi yhteensopiva markkinoilla olevien Raspberry Pi:n IO-korttien kanssa, kortti ei voi olla ulkomitoiltaan juurikaan suurempi kuin Raspberry Pi Compute Module 4. Tästä syystä kortti pyritään toteuttamaan lähtökohteisesti samoilla mitoilla kuin Raspberry Pi. Kuvassa 15 on Raspberry Pi Compute Module 4:n mittakuva.



Kuva 15. Raspberry Pi Compute Module 4:n mittakuva [18, s.14].

Koska prosessorikortilla tarvitaan lukuisia eri käyttöjännitteitä ja siten useita teholähteitä, muodostuu tilankäytöstä ongelma. Prosessorikortin pinta-alaa ei voida merkittävästi kasvattaa IO-kortin tilanpuutteen vuoksi, joten teholähteet sijoitetaan erilliselle piirilevyille, joka liitetään prosessorikorttiin piikkirimaliittimillä. Järjestelmän lohkokaavio näkyy kuvassa 16 sekä liitteessä 1.



Kuva 16. Järjestelmän lohkokuva.

## 6.2 Suunnittelun haasteet ja huomiot

Ensisijaisesti prosessorikorttia halutaan käyttää kehitysalustana tulevia laitteita varten. Käytettävän piirilevyteknologian tulisi kuitenkin olla mahdollisimman edullinen ja yksinkertainen, jotta prosessorikortin pohjalta suunniteltavia piirilevyjä voitaisiin käyttää massatuotannossa ilman suuria teknologian muutoksia. Kalliimpaa teknologiaa, esimerkiksi erilaisia läpivientejä, on helpompaa lisätä jälkeen päin kuin yrittää suunnitella piirilevyä uudelleen halvemmilla ratkaisuilla. Toisaalta useampien kerrosten ja läpivientityyppien käyttäminen voi nopeuttaa suunnitteluprosessia sekä mahdollistaa paremman lopputuloksen.

Prossoriipiirilevylle tulevat kokonaisuudet ovat käytännössä kaikki digitaalisia väyliä, eikä analogisia järjestelmiä, tai herkkiä mittauksia kortille tule. Näin ollen galvaanisia erotuksia tai selkeitä aluerajauksia kokonaisuuksien välille ei tarvita, kun teholähteet ovat erillisellä kortilla. Erillisen kortin käyttäminen teholähteitä varten on tehokas keino sijoittaa häiriöitä aiheuttavat hakkuriteholähteet kauas muista kokonaisuuksista, etenkin jos teholähdekortille sijoitetaan yhtenäinen maataso alimmaiseksi. Rakenteen heikkoutena on ylimääräisen kortin tuoma monimutkaisuus ja pidentyneet virtasilmukat kytkennöissä. Lisäksi teholähdekorttia varten tulevat liittimet vievät tilaa prossorikortilla.

Kun oma prossoriipiirilevy halutaan tehdä yhteensopivaksi kaupallisen lisäkortin kanssa, on yksi haaste liittimien pinnijärjestys, jota ei voi muuttaa. Komponenttien sijoittelu pienelle kortille siten, että kaikki johtimet voitaisiin reitittää optimaalisella tavalla ilman risteävyyksiä, on käytännössä mahdotonta. Tämä lisää tarvittavien reitityskerrosten määrää.

Koska teholähdekortti on rakenteeltaan huomattavasti yksinkertaisempi kuin prossorikortti, voidaan teholähdekortin liittimien pinnijärjestystä vapaasti muuttaa prossorikortille optimaaliseksi. Teholähdekortin lopullinen osasijoittelu ja reititys kannattaa suunnitella kuitenkin vasta kun liittimien pinnijärjestys on lopullisesti päätetty.

Prossori on BGA-kotelollinen (ball grid array) jossa juotosjalat ovat pallomaiset ja sijoitettu kotelon alapuolelle 0,65 mm:n päähän toisistaan. Prossorilla yksinään on useita eri käyttöjänniteitä, joiden erotuskondensaattorit on muiden integroitujen piirien tapaan sijoitettava mahdollisimman lähelle juotospinniä. Käytännössä tämä tarkoittaa, että kondensaattorit täytyy sijoittaa prossorin alle, kortin toiselle puolelle. Jotta kondensaattorien sijoittamiselle olisi riittävästi tilaa prossorin alla, ei perinteisiä läpiviennin voi käyttää. Tämän ratkaistaan käyttämällä sokeita mikroläpiviennin, sekä haudattuja läpiviennin yhdessä. Mikroläpiviennin voidaan pienen kokonsa ansiosta sijoittaa suoraan komponenttien juotospisteelle, ja yhdistää sisäkerroksessa haudattuun läpiviennin. Näin välikerroksissa reititettävien johtimien läpiviennin eivät ulotu turhaan koko levyn

läpi ja toiselle puolelle jää komponenttien sijoittelulle sekä reititykselle enemmän tilaa.

Kustannusmielessä on järkevää käyttää mahdollisimman vähän erilaisia läpivientejä. Useiden erilaisten läpivientityyppien käyttäminen aiheuttaa useampia työvaiheita valmistusprosessissa ja nostaa siten levyn hintaa. Kustannustehokain vaihtoehto on käyttää sokeita läpivientejä pintakerroksissa sekä yhdenlaista haudattua läpivientiä, joka läpäisee kaikki sisäkerrokset. Haittapuolena on, että haudattu läpivienti vie tilaa kaikilla välikerroksilla.

Lähes kaikki prosessorikortille sijoitettavat dataväylät vaativat impedanssin ja johdinpituuksien sovituksen. Lisäksi vaadittavia impedansseja on lukuisia eri suuruuksia. Sovitettavat impedanssit on esitetty taulukossa 1.

Taulukko 1. Vaadittavat Sovitusimpedanssit [19, s. 32].

Epäsymmetrinen signaali [ $\Omega$ ]	Differentiaalipari [ $\Omega$ ]
42	85
50	90
-	100

Kerrosrakennetta ja kerrosten käyttöä suunnitellessa vaadittavat impedanssit käytännössä määräävät käytettävät eristemateriaali- ja laminaattipaksuudet. Kerrosrakenne tulee suunnitella sellaiseksi, että vaadittuihin sovitussuhteisiin päästään johdinleveyksillä, jotka ovat riittävän kapeita reititettäväksi ahtaista väleistä. Liian kapeat johdinleveydet toisaalta ovat valmistettavuuden kannalta haaste ja voivat nostaa piirilevyn hintaa. Valmistettavuuden ja hinnan huomioon ottaen, on suositeltavaa käyttää mahdollisimman symmetristä kerrosrakennetta, jossa on standardipaksuisia materiaaleja. Tällä menetelmällä ei välttämättä saavuteta jokaista piirilevyllä tarvittavaa sovitussuhteita jokaisella reitityskerroksella. Tästä syystä eri sovitussuhteita vaativien väylien reitityskerrokset pitäisi kyetä suunnittelemaan kerrosrakennetta suunniteltaessa.

## 7 Piirilevyn kerrosrakenne ja teknologia

### 7.1 Kerrosmäärän valinta ja kerrosten käyttö

Käyttöjännitteiden määrän vuoksi niille varataan kaksi omaa kerrosta. Kaikkien reitityskerrosten väliin sijoitetaan yhtenäinen maataso, jotta nopeat dataväylät voidaan reitittää ilman, että niiden referenssitasoissa on katkoksia. Tästä syystä käyttöjännitetasot sijoitetaan päällekkäisille kerroksille maatasojen väliin. Monimutkaisten reititysvaatimustensa vuoksi yhtenä suunnittelulähtökohtana pidetään LPDDR4-muistiväylän (low-power double data rate) reititystä. Tässä halutaan noudattaa mahdollisimman tarkasti prosessorivalmistajan esimerkkiä, jossa väylän reititykseen on käytetty neljää eri reitityskerrosta [19, s. 15].

Koska piirilevyn molemmille puolille sijoitetaan paljon komponentteja, on reititystila pintakerroksilla rajallinen. Lisäksi pituussovitus ja tarvittavat eristevälit muihin signaaliryhmiin vievät usein paljon tilaa reitityskerroksilla. Reitityskerroksia tarvittaisiin näin ollen 4 tai 5, mikä tarkoittaisi 10 tai 12 kerroksista piirilevyä. Kuvassa 17 on esitetty suunniteltu kerrosten käyttö 12-kerroksisella piirilevyllä. Kahden kerroksen lisääminen nostaa kustannuksia noin 10 % mikäli piirilevyrakenne pysyy muuten samana [20].



Kuva 17. Suunniteltu kerrosten käyttö 12-kerroksisella rakenteella.

Tarvittavan reitityskerrosten määrän näkee todella vasta osasijoittelun ja reitityksen edetessä. Jos käytetyt materiaalipaksuudet pidetään samoina, voidaan tarvittaessa kerrosmäärää lisätä ilman, että impedanssisovitettavien johtimien leveyksiä tarvitsee laskea uudelleen. Tarvittava lopullinen kerrosmäärä kannattaa siksi päättää lopullista osasijoittelua ja reititystä tehdessä.

## 7.2 Käytettävät läpiviennit ja teknologia

Piirilevytoimittaja NCAB suosittelee minimieristeväliksi ja -johdinleveydeksi 100 µm piirilevyille, jolla on BGA-piiri, jonka jalkaväli on 0,65 mm [21]. Kustannusten ja valmistettavuuden vuoksi, halutaan tätä käyttää suunnittelulähtökohtana.

Näillä johdinleveyksillä ja eristeväleillä voidaan johtimia reitittää 0,3 mm halkaisijaltaan olevien BGA-juotospisteiden välistä. Haasteeksi muodostuu piirilevyrakenteen suunnittelu siten, että alle 100 µm:n johdinleveyksiä ei tarvittaisi haluttujen impedanssien saavuttamiseksi.

Koska prosessorin juotospisteet ovat halkaisijaltaan 0,3 mm, käytetään sokeaa mikroläpiviennin, jonka loppureiän halkaisija on 0,1 mm ja kuparikauluksen halkaisija 0,3 mm. Näin mikroläpiviennin voidaan sijoittaa suoraan juotospisteelle. Sokeat läpiviennit ulottuvat kerroksesta 1 kerrokseen 2, sekä kerroksesta 12 kerrokseen 11. Haudatun läpiviennin reiän halkaisija on 0,2 mm ja kuparikauluksen koko on 0,4 mm ja se ulottuu kerroksesta 2 kerrokseen 11. Tyypillinen mekaanisesti poratun läpiviennin halkaisija on 0,2 mm ja kauluksen 0,5 mm mutta tilanpuutteen vuoksi halutaan käyttää pienempää kokoa, joka voidaan mahduttaa prosessorin juotospisteiden väliin. Pienemmän läpiviennin valmistettavuus varmistettiin PCB-Connectin kautta. Sekä haudatuissa että läpiporatuissa läpivienneissä voidaan käyttää 0,2 mm:n reikäkokoa ja 0,4 mm:n kauluksen kokoa. [22]

### 7.3 Impedanssisovitukset ja piirilevyrakenne

Piirilevyrakennetta suunnitellessa on selvitettävä mitä eri materiaalipaksuuksia piirilevyvalmistajilla on saatavilla. Johdinleveyksien laskemiseksi halutuilla impedansseilla käytetään Saturn PCB Toolkit -laskinta ja PADS HyperLynxiä.

Koska eri laskentaohjelmat antavat hieman eri tuloksia, käytetään useampaa kuin yhtä ohjelmaa ja haarukoidaan tuloksista sopivat johdinleveydet erilaisilla eristemateriaalipaksuuksilla. Valittu kerrosrakenne on taulukossa 1. Pintakupari on ilmoitettu mikrometreinä, lähtökupari + kemiallisesti kasvatettu kupari.

Eriste- ja laminaattimateriaalien paksuudet taulukossa 2 ovat piirilevyvalmistaja Brandnerin verkkosivulta, lukuun ottamatta uloimpia eristearkkeja [23]. Kuparinpaksuudet ovat laskureilla haarukoituja. Impedansseja sovittaessa vaikeuksia tuotti haluttuihin impedansseihin pääseminen pintakerroksissa järkevillä johdin-geometrioilla, jolloin materiaalivaihtoehtoja täytyi etsiä laajemmalti. Haluttuihin impedansseihin päästäisiin riittävän tarkasti esimerkiksi 0,075 mm:n paksuisella eristearkillä. Piirilevyvalmistaja Eurocircuitsin verkkosivulta löytyi eristearkki, jonka paksuus on 0,070 mm [24]. Piirilevytehtaiden kyvykkyyksissä ja materiaalivalikoimissa on kuitenkin eroja, joten kerrosrakenne päätettiin lähtökohtaisesti spesifioida 0,075 mm:n paksuisella eristearkillä. Suunnitellun piirilevyrakenteen valmistettavuutta tiedusteltiin piirilevytoimittajilta NCAB ja PCB-Connect. Vastauksena saatiin suuntaa antava hintaluokka ilman valmistustiedostoja, jolloin voidaan olettaa, että rakenne on valmistettavissa. On kuitenkin varsin tavallista, että kun valmistustiedostot lähetetään, joudutaan valmistajan kanssa käymään keskustelua ja mahdollisesti tekemään muutoksia rakenteeseen.

Taulukko 2. Kerrosrakenne ja materiaalipaksuudet 12-kerroksiselle piirilevyllä

1	Pintakupari	9 $\mu$ m +35 $\mu$ m
	Eriste	0,075 mm
2	Kuparifolio	18 $\mu$ m
	Laminaatti	0,1 mm
3	Kuparifolio	18 $\mu$ m
	Eriste	0,18 mm
4	Kuparifolio	18 $\mu$ m
	Laminaatti	0,1 mm
5	Kuparifolio	18 $\mu$ m
	Eriste	0,18 mm
6	Kuparifolio	18 $\mu$ m
	Laminaatti	0,1 mm
7	Kuparifolio	18 $\mu$ m
	Eriste	0,18 mm
8	Kuparifolio	18 $\mu$ m
	Laminaatti	0,1 mm
9	Kuparifolio	18 $\mu$ m
	Eriste	0,18 mm
10	Kuparifolio	18 $\mu$ m
	Laminaatti	0,1 mm
11	Kuparifolio	18 $\mu$ m
	Eriste	0,075 mm
12	Pintakupari	9 $\mu$ m +35 $\mu$ m

Taulukoissa 3–7 on esitetty johdinleveydet epäsymmetrisille johtimille sekä johdinleveydet ja johtimien välinen etäisyys differentiaaliparille.



Taulukko 3. Johdinleveydet ja johtimien väli 85  $\Omega$ :n differentiaalipareille.

Reitityskerros	Johdinleveys (mm)	Johdinväli (mm)	Er
L1 ja L12	0,1	0,1	4,3
L6	0,11	0,1	4,3
L8	0,11	0,1	4,3
L10	0,11	0,1	4,3

Taulukko 4. Johdinleveydet ja johtimien väli 90  $\Omega$ :n differentiaalipareille.

Reitityskerros	Johdinleveys (mm)	Johdinväli (mm)	Er
L1 ja L12	0,1	0,2	4,3
L6	0,1	0,1	4,3
L8	0,1	0,1	4,3
L10	0,1	0,1	4,3

Taulukko 5. Johdinleveydet ja johtimien väli 100  $\Omega$ :n differentiaalipareille

Reitityskerros	Johdinleveys (mm)	Johdinväli (mm)	Er
L1 ja L12	-	-	4,3
L6	0,1	0,2	4,3
L8	0,1	0,2	4,3
L10	0,1	0,2	4,3

Taulukko 6. Johdinleveydet 50  $\Omega$ :n epäsymmetrisille johtimille

Reitityskerros	Johdinleveys (mm)	Er
L1 ja L12	0,11	4,3
L6	0,1	4,3
L8	0,1	4,3
L10	0,1	4,3

Taulukko 7. Johdinleveydet 42  $\Omega$ :n epäsymmetrisille johtimille

Reitityskerros	Johdinleveys (mm)	Er
L1 ja L12	-	4,3
L6	0,14	4,3
L8	0,14	4,3
L10	0,14	4,3

Absoluuttisen tarkasti haluttuihin impedansseihin ei päästy saatavilla olevilla standardi materiaaleilla. Johdinleveyksien laskemista hankaloitti myös laskurien tulokset, jotka poikkesivat toisistaan hieman. Johdinleveydet pyrittiin valitsemaan siten, että halutut sovitusimpedanssit saavutetaan noin 5 %:n tarkkuudella.

Ensisijaisesti reitittäessä pyritään käyttämään kerroksia, joissa johdinleveydet ja differentiaaliparin johdinväli on mahdollisimman pieni. Lisäksi kaikkia sovitusimpedansseja ei saavutettu järkevällä johdingeometrialla kaikissa reitityskerroksissa. Esimerkiksi 100  $\Omega$ :n differentiaaliparit reititetään sisäkerroksissa, koska pintakerroksissa kyseisellä rakenteella johtimien väli olisi täytynyt kasvattaa määrättömän suureksi. Ensisijaisesti on kuitenkin tärkeämpää saavuttaa pintakerroksessa 85  $\Omega$ :n impedanssi differentiaaliparille, jotta prosessorivalmistajan ohjetta DDR-muistin reititykseen voidaan noudattaa [19]. Taulukossa 8 on reitityskerrokset, joissa eri impedansseihin sovitettavat johtimet voidaan reitittää.

Taulukko 8. Impedanssisovitukset reitityskerroksissa

Reitityskerros	Epäsymmetrinen [ $\Omega$ ]	Epäsymmetrinen [ $\Omega$ ]	Differentiaalipari [ $\Omega$ ]	Differentiaalipari [ $\Omega$ ]	Differentiaalipari [ $\Omega$ ]
1 ja 12	-	50	85	90	-
6	42	50	85	90	100
8	42	50	85	90	100
10	42	50	85	90	100

## 8 Yhteenveto

Insinööriyössä suunniteltiin kerrosrakenne, käytettävä piirilevyteknologia Linux-pohjaiselle prosessoripiirilevylle sekä impedanssisovittavien johtimien leveydet. Lisäksi työssä perehdyttiin piirilevysuunnitteluun ja eri teknologiavaihtoehtojen käyttämiseen.

Työn tuloksena saatiin käytettävä piirilevyrakenne, suunnitelma reitityksestä, kerrosten käyttämisestä ja yleisistä säännöistä. Tämän suunnitelman puitteissa varsinaista osasijoittelua ja reititystä voidaan alkaa tehdä. Käytettävään teknologiaan ja rakenteeseen voi kuitenkin tulla muutoksia työn edetessä, koska esimerkiksi lopullisen kerrosmäärän tarpeen näkee yleensä vasta osasijoittelua ja reititystä tehdessä. Lisäksi piirilevyvalmistaja saattaa ehdottaa muutoksia levyyn, kun valmistusdokumentit on toimitettu valmistajan nähtäväksi.

Työssä vaikeuksia tuotti piirilevylle tarvittavat lukuisat sovitusimpedanssit, sekä tavoite saada piirilevystä teknologiaaltaan mahdollisimman yksinkertainen ja edullinen. Piirilevyteknologia kehittyy jatkuvasti ja tehtaiden kyvykkyyksissä on eroja, joten suoria vastauksia erilaisiin materiaalivaihtoehtoihin ja teknologiaratkaisujen hintavaikutuksiin oli vaikea löytää kirjallisuudesta. Näissä kysymyksissä täytyi kääntyä piirilevytoimittajien puoleen.

Työtä voisi kehittää perehtymällä piirilevyn toiminnan simuloimiseen. Prosessoripiirilevyjen suunnittelussa simuloinnista olisi merkittävää hyötyä, kun esimerkiksi nopeiden dataväylien tai hakkuriteholähteiden toimintaa voitaisiin tarkastella jo suunnitteluvaiheessa.

## Lähteet

- 1 Hu, Roger. 2019. PCB Design and Layout Fundamentals for EMC. Great Britain: Independently published.
- 2 Rigid Printed Circuit Board Manufacturing. Verkkoaineisto. <<https://www.pcbunlimited.com/engineering/printed-circuit-board-manufacturing>>. Luettu 10.4.2023.
- 3 What is Solder Mask. Verkkoaineisto. Euro Circuits. <<https://www.eurocircuits.com/sm-solder-mask/>>. Luettu 4.3.2023.
- 4 Schlaepfer, Eric & Oskay, Windell. 2023. Open Circuits: The Inner Beauty of Electronic Components. E-kirja. No Starch Press.
- 5 HDI-Piirilevyt. Verkkoaineisto. NCAB Group. <<https://www.ncab-group.com/fi/hdi-piirilevyt/>>. Luettu 1.3.2023.
- 6 Microvias. Verkkoaineisto. NCAB Group. <<https://www.ncab-group.com/microvias/>>. Luettu 1.3.2023.
- 7 Electrical Test Euro Circuits. <<https://www.eurocircuits.com/electrical-test/>>. Luettu 30.3.2023
- 8 Shirsavar, Ali. 2021. PCB Layout Fundamentals. Luentomoniste. Biricha Digital.
- 9 Archambeault, Bruce. 2002. PCB Design for Real-World EMI Control. Boston: Kluwer Academic Publishers.
- 10 Hubing, Todd H. 2006. Printed Circuit Board Decoupling. Luentomoniste. Clemson University.
- 11 Joffe, Elya B & Lock Kai-Sang. 2010. Grounds for Grounding: A Circuit to System Handbook. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc.
- 12 Thierauf, Stephen. 2010. Understanding Signal Integrity. E-kirja. Norwood Artech.
- 13 Johnson, Howard & Graham, Martin. 2003. High-Speed Signal Propagation: Advanced black magic. New York: Prentice Hall.
- 14 Bogatin, Eric. 2003. Signal Integrity Simplified. E-kirja. Pearson.

- 15 Huss, Samuel R. 2006. Signal Integrity Applied Electromagetics and Professional Practice. E-kirja. Springer.
- 16 Guide to PCB Trace Matching in High-Speed Design. Verkkoaineisto. Peterson, Zachariah. <<https://www.nwengineeringllc.com/article/guide-to-pcb-trace-length-matching-in-high-speed-design.php#skew-and-trace-length-matching>>. Luettu 26.4.2023.
- 17 Silvonen, Kimmo. 2018. Elektroniikka ja sähkötekniikka. Espoo: Otatieto.
- 18 Raspberry Pi Compute Module 4. Verkkoaineisto. Raspberry Pi Ltd. <<https://datasheets.raspberrypi.com/cm4/cm4-datasheet.pdf>>. Luettu 24.4.2023.
- 19 NXP Semiconductors. 2018. i.MX 8MDQLQ Hardware Developer`s Guide. Datalehti.
- 20 Harju, Timo. 2023. Technical Manager, NCAB Group. Sähköpostikeskustelu 5.4.2023.
- 21 HDI-Design Guidelines. Verkkoaineisto. NCAB Group. Luettu 9.3.2023.
- 22 Mäkilä, Jarno. 2023. Sales Engineer, PCB Connect Oy 23.3.2023. Sähköpostikeskustelu 5.4.2023.
- 23 Make your build-up. Verkkoaineisto. Brandner Pcb Ltd. <<https://www.brandner.ee/capabilities/make-your-build-up/>>. Luettu 6.3.2023.
- 24 Standard and Predefined Build-ups. Verkkoaineisto. Euro Circuits. <<https://www.eurocircuits.com/blog/review-standard-and-predefined-build-ups-2/>>. Luettu 8.3.2023.

# Proessoripiirilevyn lohkokuva

