

Santeri Jokela

I/O-PORTTIEN VAIKUTUS ELEKTRO- NIIKKALAITTEEN TUOTESUUNNITTE- LUUN

Informaatioteknologian ja viestinnän tiedekunta
Kandidaatintyö
Toukokuu 2019

TIIVISTELMÄ

Santeri Jokela: I/O-porttien vaikutus elektroniikkalaitteen tuotesuunnitteluun
Influence of I/O ports on product design of the electronic device

Tampereen yliopisto

Kandidaatintyö, 30 sivua, 0 liitesivua

Toukokuu 2019

Tieto- ja sähkötekniikan TkK-tutkinto-ohjelma

Tarkastaja: Yliopistolehtori Erja Sipilä

Elektroniikka on jatkuvasti kehittyvää kuten ovat kuluttajaelektroniikan markkinat. Laittevalmistajien täytyy valmistaa laitteita, jotka herättävät kiinnostusta kuluttajissa. Tämän vuoksi valmistajien tarvitsee suunnitella laitteita, jotka ovat alati pienempiä, kevyempiä ja laskentateholtaan tehokkaampia. Laitteiden laskentatehon kasvaessa kasvaa myös laitteessa ja laitteiden välillä siirtyvän tiedon määrä, koska laitteiden halutaan kommunikoida muiden laitteiden ja maailman kanssa.

Yksi tapa laitteiden väliselle kommunikoinnille on toteuttaa se I/O-porttien avulla. Tämän vuoksi I/O-portit ovat tärkeitä elektroniikkalaitteissa ja ne pitää huomioida laitteen suunnittelun aikana, varsinkin, koska viimeaikainen trendi elektroniikkalaitteissa on vähentää I/O-porttien määrää. Tärkeää on valita laitteeseen I/O-portit, jotka täyttävät laitteen suunnittelulle annetut sähköiset ja fyysiset vaatimukset unohtamatta laitteen käytettävyyttä ja luotettavuutta. Nämä kaikki vaikuttavat lopullisen laitteen hintaan ja laitteen kehittämisen kannattavuuteen, koska kallista laitetta on vaikea markkinoida.

Tämän kandidaatintyön ensisijaisena tavoitteena on kirjallisuusselvitys I/O-porttien vaikutuksesta elektroniikkalaitteen tuotesuunnitteluun sen eri vaiheissa. Työ suoritettiin kirjallisuusselvityksenä. Työssä on kuitenkin myös käytetty eri yritysten julkaisuja kirjallisten lähteiden lisäksi, koska tutkimuksen aiheena olivat kuluttajakeskeiset elektroniikkalaitteet.

Työn alussa tuodaan esille asioita, jotka ovat pakottaneet I/O-porttien kehityksen muun elektroniikan kehittyessä. Tämän jälkeen verrataan analogisen ja digitaalisen signaalien eroja ja vaikutuksia tiedonsiirtoon. Työn loppuosassa käydään läpi elektroniikkalaitteen suunnittelu tuotteen määrittelystä lopullisen laitteen kotelointiin ja tuodaan esille asioita, jotka pitää I/O-porttien kanssa huomioida.

Elektroniikkalaitteen tuotesuunnittelu on aikaa, vaivaa ja rahaa vievä prosessi. Tärkeintä elektroniikkalaitteen suunnittelussa on tehdä hyvä pohjatyö ennen laitteen suunnitteluprosessin aloittamista. Pienilläkin muutoksilla suunnitteluprosessin aikana on suuret vaikutukset laitteen kokonaisuuden suunnitteluun, varsinkin suunnittelun myöhäisemmissä vaiheissa. Tulevaisuudessa saatetaan nähdä elektroniikkalaitteita, joissa ei ole minkäänlaisia I/O-portteja alati kehittyvien langattomien tehon- ja tiedonsiirron vuoksi.

Avainsanat: I/O-portti, Liitin, Kotelointi, Tuotesuunnittelu

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck —ohjelmalla.

ALKUSANAT

Valitsemani kandidaatintyön aihe ei ollut esillä kandidaatintöiden aihepakissa, vaan esitin itse työni aiheen kandidaatintyöni ohjaajalle syksyllä 2018. Ohjaaja totesi aiheen olevan mielenkiintoinen ja ajankohtainen, minkä vuoksi sain tehdä kyseisestä aiheesta kandidaatintyöni. Työni valmistumisen tavoitteeksi asetettiin toukokuu 2019, jossa pysyin hyvin. Kevään 2019 aikana sain tasaiseen tahtiin tehtyä kandidaatintyöni valmiiksi.

Suuri kiitos kandidaatintyöni ohjaajalle Erja Sipilälle, opeista, neuvoista ja kärsivällisyydestä kandidaatinopintojen aikana. Haluan myös kiittää läheisiä ystäviäni, jotka ovat jaksaneet enemmän ja vähemmän tyhmiä kysymyksiäni ja juttujani opintojeni aikana. Suurin kiitos kuuluu perheelleni niin motivaatiosta kuin tuesta.

Isoisäni tulee aina inspiroimaan minua ja tulen aina muistamaan hänen tarinansa. Tähän hetkeen osuvimpaan tarinaan kuulu pöytä ja vasara. Pikkupoikana isäni oli istunut pöydän alla vasara kädessä rikkinäisen lelun kanssa ja todennut isoisälleeni: *”Ei Mikko riko, Mikko reeraa”*. Voinen nyt myös todeta, ettei Santeri riko vaan reeraa vaikkei se siltä heti päällimmäiseksi vaikuttaisikaan, kun savu nousee koekytkenälevyltä.

Tampereella 19.5.2019

Santeri Jokela

SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO	1
2. ELEKTRONIIKAN KEHITYKSEN VAIHEET JA VAIKUTUS I/O-PORTTEIHIN	3
2.1 Transistorin synty	3
2.2 PS/2-portin synty	4
2.3 USB-teknologia	5
2.4 I/O-porttien väheneminen elektroniikkalaitteissa	7
3. ANALOGISEN JA DIGITAALISEN SIGNAALIN VAIKUTUS	8
3.1 Analoginen signaali	8
3.2 Digitaalinen signaali	8
3.3 Häiriön vaikutus signaaliin	9
3.4 Signaalinmuodon vaikutus elektroniikkalaitteisiin	10
4. ELEKTRONIIKKATUOTTEEN MÄÄRITTELY	11
4.1 Ihmisen ja koneen välisen käyttäytymisen vaikutus lohkokaavioon	11
4.2 Komponenttien valinta	13
4.2.1 Pintaliitos- ja läpiladontakomponentit	14
4.2.2 I/O-porttien valinta	14
4.2.3 Komponenttien hinta	17
4.3 Tuotteen kehittämisen kannattavuus	18
5. LAITTEEN SÄHKÖINEN TUOTESUUNNITTELU	19
5.1 Piirikaavio	19
5.2 Piirin simulaatio	19
5.3 Lopullinen komponentti- ja vetolista	20
6. PIIRILEVYN SUUNNITTELU	21
6.1 Piirilevyn geometria ja mekaaninen määrittely	21
6.2 Komponenttisijoittelu	22
6.3 Reititys	22
6.4 Muutosten vaikutus hintaan	23
7. LAITEKOTELOINTI	24
7.1 Laitekoteloinnin määrittely	24
7.2 I/O-porttien koon vaikutus	24
7.3 IP-luokituksen vaikutus	25
8. YHTEENVETO	27
LÄHTEET	28

LYHENTEET JA MERKINNÄT

BOM	engl. Bill-Of-Materials, laitteessa käytettävien komponenttien lista
DC	engl. Direct Current, tasavirta
HD	engl. High Definition, teräväpiirtoinen
HDMI	engl. High Definition Multimedia Interface, kuvan ja ääneen siirtoon suunniteltu liitännästandardi
I/O	engl. Input / Output, rajapinta, jota käytetään tiedon siirrossa
IBM	engl. International Business Machines Corporation
IC	engl. Integrated Circuit, integroitu piiri, mikropiiri, johon on integroitu erilaisia elektroniikan komponentteja
IP	engl. Ingress Protection, standardi, joka kertoo sähkölaitteiden suo- jausasteesta
LCD	engl. Liquid Crystal Display, nestekidenäyttö
PCB	engl. Printed Circuit Board, piirilevy
POC	engl. Proof-of-Concept, soveltuvuus selvitys
PPD	engl. Preliminary Production Design, alustavan tuotesuunnittelun tuote
SMD	engl. Surface Mount Devise, pintaliitoskomponentti
THM	engl. Through-Hole Mounting, läpiladontakomponentti
USB	engl. Universal Serial Bus, yleiskäyttöinen tiedonsiirtoväylä sarja- muotoiselle datalle.
VHS	engl. Video Home System, videonauhurilaitteiden tallennusmuodon standardi

1. JOHDANTO

Viimeisimpien vuosien aikana elektronisissa laitteissa on näkynyt suuria muutoksia kuluttajakeskeisissä elektroniikkalaitteissa. Globaalit kuluttajaelektroniikkamarkkinat ovat jatkuvassa kasvussa ja vuoteen 2024 mennessä on markkinoiden ennustettu kasvavan 1,787 miljardiin Yhdysvaltain dollariin [1]. Tämän vuoksi laitevalmistajien täytyy pyrkiä erottumaan muista valmistajista omilla tuotteillaan, mikä näkyy alati tehokkaammissa, ohuemmissa, suuremmissa ja nopeammassa laitteissa.

Älypuhelimien näyttöjen koot ovat kasvaneet huimasti verrattaessa ensimmäisiin älypuheliiniin, mutta liitinporttien määrät eivät ole kasvaneet samassa suhteessa. Kun LG toi vuonna 2007 markkinoille ensimmäisen puhelimen kapasitiivisella kosketusnäytöllä, oli sen näytön koko vain 3 tuumaa ja ainoana liittimenä USB (engl. Universal Serial Bus) micro-B 2.0. Kun taas Google Pixel 3 XL tuli markkinoille lokakuussa 2018, oli sen näytön koko 6,3 tuumaa ja ainoana liittimenä oli USB-C [2][3]. Kyseinen USB-C-liitin toimi siis puhelimen ainoana I/O-porttina, joka on lyhenne sanoista input ja output eli sisäänmeno ja ulostulo saapuvalla ja lähtevälle datalle [4, s. 168].

Vuonna 2008 Walsh totesi mikrokontrollerien suosion kasvavan jatkuvasti elektroniikkalaitteissa [5]. Mikrokontrolleri on tietokone, joka on mahdutettu yhdelle sirulle. Kyseinen siru sisältää prosessorin, muistin ja I/O-pinnit, mitä käytetään tyypillisesti tiettyyn toimintoon järjestelmissä. [6] Jo tuolloin arvioitiin jokaisessa taloudessa olevan vähintään 50 mikrokontrolleria erilaisissa käyttötarkoituksissa. Tämä voidaan perustella sillä, että lähestulkoon jokainen elektroniikkalaite tarvitsee jonkin sitä ohjaavan komponentin suorittamaan haluttua tehtävää. [7]

Jotta aiemmin mainitulla mikrokontrollerilla pystyisi tekemään mitään, tarvitsee sen kommunikoida ulkomaailman kanssa [8, s. 189]. Tämän vuoksi laitteet tarvitsevat I/O-portteja saapuvalla ja lähtevälle datalle. I/O-porttien avulla voidaan esimerkiksi valvoa painesäiliön painetta ja lämpötilaa eri antureilla, jotka tuottavat dataa mikrokontrollerille. Tämän datan perusteella voidaan ohjata esimerkiksi virtauksensäätöventtiilejä paineen säätämiseksi. [4, s. 168]

Tämän kandidaatintyön tarkoitus on tuoda esille asioita, joihin I/O-porttien valinnat vaikuttavat elektroniikan laitesuunnittelussa. Elektroniikan laitesuunnittelu koostuu useasta

eri vaiheesta, jonka vuoksi I/O-porttien vaikutusta tarkastellaan jokaisessa laitesuunnittelun vaiheessa.

Luvussa 1 on johdanto. Luvussa 2 käydään läpi elektroniikan kehityksen vaiheita, jotka ovat mahdollistaneet I/O-porttien vähenemisen elektroniikkalaitteissa. Analogisen ja digitaalisen signaalin ero ja vaikutus I/O-portteihin käsitellään luvussa 3. Luvussa 4 tuodaan esille, miten elektroniikkatuote määritellään ja mitkä ovat tärkeimmät asiat tuoda esille tässä suunnittelun vaiheessa. Laitteen sähköistä suunnittelu ja tärkeimpiä huomioitavia asioita käydään läpi luvussa 5. Luvussa 6 esitellään piirilevyn suunnittelu. Elektroniikkalaitteen laitekotelointi käydään läpi luvussa 7. Lopuksi tehdään yhteenveto työssä käsitellyistä asioista luvussa 8.

2. ELEKTRONIIKAN KEHITYKSEN VAIHEET JA VAIKUTUS I/O-PORTTEIHIN

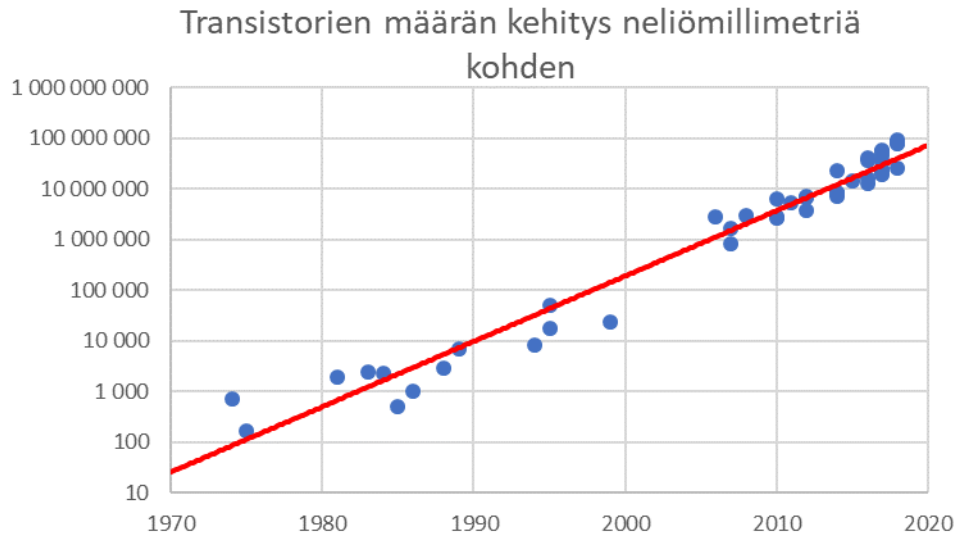
Jotta voidaan tutkia I/O-porttien vaikutusta elektroniikkalaitteen suunnitteluun, täytyy ymmärtää, mitkä asiat ovat mahdollistaneet I/O-porttien kehityksen ja vähenemisen laitteissa. Tässä luvussa tarkastellaan eri asioita, jotka ovat vaikuttaneet I/O-porttien kehitykseen ja niiden käytettävyyteen.

2.1 Transistorin synty

23.12.1947 Bardeen, Brattain ja Shockley kehittivät ensimmäisinä maailmassa puolijohdekomponentin, transistorin, joka päätyi korvaamaan sen aikaiset elektroniputket [9, s. 140]. Harva ymmärsi, kuinka suuri vaikutus kyseisellä komponentilla tulisi olemaan mikroelektroniikkaan ja sen vallankumoukseen. Vuonna 1956 Bardeen, Brattain ja Shockley saivat transistorista Nobel-palkinnon. [10, s. 147]

Kaksi vuosikymmentä myöhemmin, 1965, Moore teki havainnon, että IC (engl. Integrated Circuit) -piirien monimutkaisuus kehittyi eksponentiaalista vauhtia. Tämän havainnon seurauksena 70-luvulla kehitettiin skaalausalgorithmi, joka tunnetaan Mooren lakina. Kyseinen algoritmi toteaa, että joka kolmas vuosi komponenttien koot tulevat pienenemään 0,7 kertoimella. Vaikka kyseistä lakia kritisoidaan yhä, Mooren ennuste on osoittautunut riittävän tarkaksi. Siitä on tullut elektroniikkateollisuuden tavoite, joka valmistajien on täytettävä pysyäkseen kilpailukykyisenä. [11, s. 144-149]

Alla olevassa kuvassa on esitetty transistorien määrän kehitys vuosien aikana. Mitta-
arvojen avulla on luotu kuvan 1 kuvaaja [12].



Kuva 1: Transistorien määrän kehitys vuosien 1970-2020 välillä [12]

Kuten kuvasta 1 nähdään, Mooren laki pitää yhä paikkansa. Transistorien määrän muutos neliömillimetriä kohden vuosien 1974-2020 aikana on pysynyt vakaana, mitä punainen sovitesuora kuvassa 1 kuvaa. Transistorien pienentyessä laitteiden laskentatehot nousivat ja hinnat laskivat suhteessa laskentatehoon [13]. Laskentatehon kehitys on mahdollistanut kerättävän datan määrän kasvun, joka laitteiden välillä siirretään. Tämän myötä myös I/O-porttien on pitänyt kehittyä elektroniikan kehittyessä.

2.2 PS/2-portin synty

Monet laitevalmistajat näkivät markkinaraon henkilökohtaisten tietokoneiden markkinoilla 80-luvulla ja yksi vaikutusvaltaisimmista tietokoneista oli IBM (engl. International Business Machines Corporation) Personal System/2. Kyseinen tietokone julkaistiin huhtikuussa 1987 ja kuva kyseisestä tietokoneesta on esitetty kuvassa 2. [13]



Kuva 2: IBM PS/2 -tietokone IBM-näppäimistön ja IBM PS/2 -näytön kanssa [13]

Kyseisen tietokoneen mukana IBM esitteli uudenlaisen liitäntäportin, joka tunnetaan PS/2-porttina. Sen avulla näppäimistö ja hiiri voidaan yhdistää tietokoneeseen. [14, s. 150] PS/2-portin vaikutuksen voi nähdä yhä tänä päivänä joissakin tietokoneissa PS/2-portin muodossa.



Kuva 3: PS/2 portti tietokonehiirelle ja -näppäimistölle

Kuvassa 3 on esitetty PS/2-portti, jossa ylempi (vaaleanvihreä) portti on tietokoneen hiirelle ja alempi (violetti) on tietokoneen näppäimistölle. PS/2-portti oli vallankumouksellinen, koska sitä ennen ei ollut yhtä standardia näppäimistön ja hiiren liittämiseksi tietokoneeseen. PS/2-porttia ei yleisesti enää valmisteta elektroniikkalaitteisiin, koska sen on syrjäyttänyt universaali sarjaliikenneportti USB.

2.3 USB-teknologia

Vuosikymmen PS/2-portin julkaisun jälkeen vuonna 1996 USB esiteltiin. Alkuperäisen portin takana oleva motivaatio tuli kolmesta eri näkökulmasta: tietokoneen yhdistäminen puhelimeen, helppokäyttöisyys ja porttimäärien laajennusmahdollisuus. [15, s. 8, 11]

Tuolloin tieto- ja viestintäteknologia olivat kehittyneet itsenäisesti, minkä vuoksi USB tarjosi standardimuotoisen linkin, jota voidaan käyttää laajalti puhelinten ja tietokoneiden välisessä yhteydessä. [15, s. 8, 11]

Joustavuuden puute käytettävyydessä oli tunnistettu tietokoneiden heikkoudeksi niiden käyttöönotolle. Käyttäjätasoiset graafiset käyttöliittymät ja kehittyneet väyläarkkitehtuurit olivat helpottaneet tietokoneiden konfigurointia ja sen myötä käyttöönottoa, mutta se ei näkynyt loppukäyttäjän helppokäyttöisyydessä. [15, s. 8, 11]

Oheislaitteiden käyttöä hankaloitti porttien vähäisyys: molempisuuntaisten, matala- ja keskinopeiden ja halpojen porttien puute oli rajoittanut oheislaitteiden tuloa markkinoille, koska toimivuutta eri valmistajien laitteiden välillä ei voitu taata. [15, s. 8, 11]

USB-standardi pyrki korjaamaan kaikki nämä puutteet ja onnistui tavoitteessaan: kyseisen porttistandardi on yhä pohjana uusimmille USB-porteille, joita näkyy arkipäiväisissä elektroniikkalaitteissa. Alla olevassa taulukossa 1 on esitetty USB-tekniikan kehitys.

Taulukko 1: USB:n kehitys vuosien 1996 ja 2017 välillä [16]

Vuosi	USB määritelmä	Nopeus määritelmä	Nopeus	Teholähde
1996	USB 1.0	FS (Full Speed)	12 Mbps	5V/500mA
1998	USB 1.1	LS (Low Speed)	1.5 Mbps	5V/500 mA
1998	USB 1.1	FS (Full Speed)	12 Mbps	5V/500mA
2000	USB 2.0	HS (High Speed)	480 Mbps	5V/500mA
2000	USB 2.0 OTG	HS (High Speed)	12/480 Mbps	
2008	USB 3.0	SS (Super Speed)	5 Gbps	5V/900mA
2013	USB 3.1	SSP (Super Speed Plus)	10 Gbps	5V/900mA
2012	USB PD			5V/2A, 12V/1.5-3A, 20 V/3-5A
2014	USB Type-C	FS (Full Speed)		5V/3A
2017	USB 3.2	FS (Full Speed)	20 Gbps	5V/1.5A

Taulukosta 1 nähdään, kuinka suuri muutos varsinkin tiedonsiirrossa on tapahtunut USB-tekniikan kehityksen myötä. Nykystandardeihin verrattuna vuonna 1996 julkaistu USB 1.0 oli hidas ja vähän virtaa vievä portti: portista saatiin maksimissaan 500 mA ulos ja se tuki maksimissaan vain 12 Mbps:n siirtonopeuksia. [15, s. 23, 171] Kyseiset arvot ovat pieniä verrattuna viimeisimpään USB 3.2. Gen 2x2 standardiin, joka mahdollistaa 20 Gbps:n siirtonopeuden [17]. Taulukosta myös nähdään, että USB PD mahdollistaa jopa 100 W:n tehosiirron, minkä vuoksi on ennustettu, että ajan myötä suurin osa tietokoneiden latureista tulee käyttämään USB-C-portteja latausportteinaan [18].

2.4 I/O-porttien väheneminen elektroniikkalaitteissa

Kasvaneet siirtonopeudet ovat mahdollistaneet porttien vähenemisen elektroniikkalaitteissa: yhden USB-portin kautta voidaan siirtää jopa HD (engl. High Definition) -tason kuvaa reaaliajassa [19]. Tämän vuoksi laitteisiin ei tarvitse valmistaa portteja vain yhtä käyttötarkoitusta varten. Esimerkiksi HDMI (engl. High Definition Multimedia Interface) -portti siirtää pääsääntöisesti vain HD-tason kuvaa, videota sekä ääntä. Koska USB-portin kautta voidaan siirtää HDMI-signaalia, ei elektroniikkalaitteisiin välttämättä tarvitse valmistaa erillistä HDMI-porttia.

Fyysinen tila, jonka portti olisi vienyt elektroniikkalaitteessa, voidaan nyt käyttää muuhun tarkoitukseen. Tämän vuoksi laitevalmistajat eivät suunnittele elektroniikkalaitteisiin, kuten matkapuhelimiin, esimerkiksi kuulokeliitäntöjä, koska ne pääsääntöisesti palvelevat vain yhtä käyttötarkoitusta. Matkapuhelimien valmistajat perustelevat kuulokeliitännän poistamisen pääsääntöisesti kolmen eri syyn avulla: suuremmat akut, ohuempia ja kevyempiä puhelimia ja langattoman tiedonsiirron tulevaisuus [20].

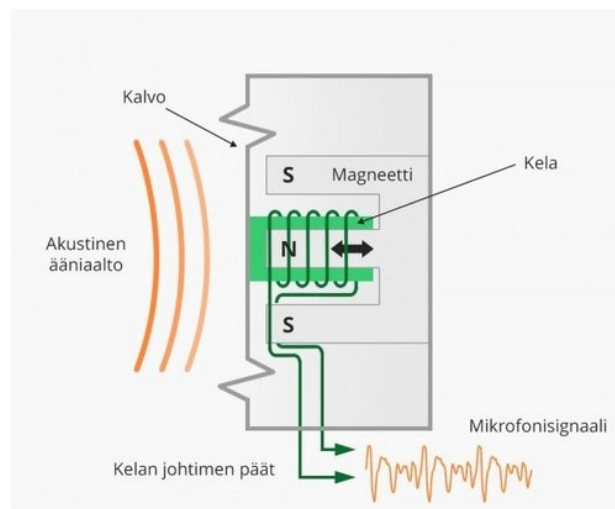
Elektroniikkalaittevalmistaja Xiaomi:n johtava tuotepäällikkö Mani toteaa, että (suomennettuna) ”Kuulokeliitännät ovat varsin suuria. Yleinen suuntaus älypuhelimien suunnittelussa on kasvattaa muiden komponenttien kokoa: paremmat kaksoistakakamerat, suuremmat etukamerat, pienemmät kehykset (näytön ympärillä) ja vesieristys.” ja ”On vaikeaa sanoa täsmälleen, mitkä komponentit hyötyvät kuulokeliitännän poistamisesta, koska mekaaninen suunnittelu alkaa tuotteen määrittelyn jälkeen. Mutta yleisesti kuulokeliitännän poistamisesta saatu tila voidaan hyödyntää muualla”. [21] Ei siis ole olemassa vain yksittäistä syytä, miksi niin kuulokeliitännät älypuhelimissa kuin I/O-portit älylaitteissa vähenevät tai poistuvat kokonaan.

3. ANALOGISEN JA DIGITAALISEN SIGNAALIN VAIKUTUS

Tässä luvussa käsitellään kahta perustapaa sähköiselle tiedonsiirrolle: analoginen ja digitaalinen signaali. Luvussa vertaillaan kyseisten tiedonsiirtotapojen eroja, altistumista häiriöille ja datan muodon vaikutusta I/O-portteihin.

3.1 Analoginen signaali

Analoginen signaali on yksi sähköisen energian muoto, jossa sähkön määrä, usein jännite, on lineaarisesti verrannollinen sen edustamalle signaalille [22, s. 226]. Analogisella signaalilla on ääretön määrä tasoja. [23, s. 2] Hyvä esimerkki tästä on mikrofonin toiminta. Kuvassa 4 on esitetty dynaamisen mikrofonin toimintaperiaate.

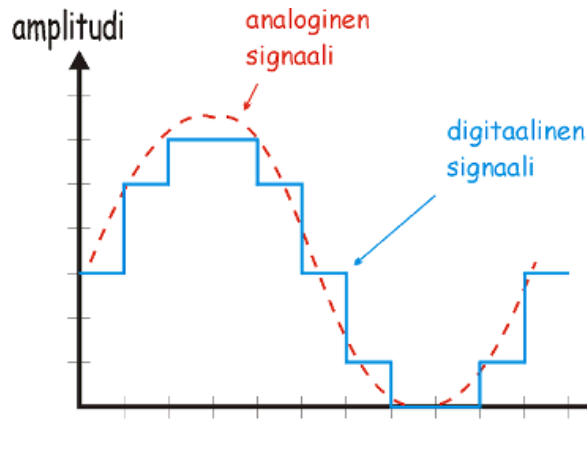


Kuva 4: Dynaamisen mikrofonin toimintaperiaate [24]

Kuvan 4 mikrofonin toiminta perustuu akustisiin ääniaaltoihin. Kyseiset ääniaallot saavat aikaan paineenmuutosta, joka aiheuttaa kalvon liikkumista, johon kela on kiinnitetty. Kelan liikkuessa magneettikentässä indusoituu siihen virtaa ja sen myötä jännitettä. [25] Näin ääniaallot on saatu muutettua analogiseksi signaaliksi.

3.2 Digitaalinen signaali

Digitaalinen signaali eroaa suuresti analogisesta signaalista: digitaalinen signaali ilmaistaan poikkeuksetta erillisinä numeroina, joita kutsutaan näytteiksi. Kyseiset näytteet otetaan signaalista tietyn ajan välein, eli diskreetti-aikaisesti. Kyseinen aikaväli saadaan näytteenottotaajuuden avulla. [22, s. 230] Kuvassa 5 on esitetty analogisen signaalin muutos digitaaliseksi.



Kuva 5: Analoginen signaali muunnettuna digitaalseksi [26]

Kuvasta 5 nähdään, että digitaalinen signaali ei vastaa kuvan tilanteessa täysin analogista signaalia. Tätä voitaisiin parantaa kasvattamalla näytteennottotaajuutta ja lisäämällä näytteidenottomäärää amplitudin suhteen. Kuvassa 5 käytetään 3:a bittiä näytteiden otossa, eli $2^3 = 8$ näyteväliä minimi- ja maksimiarvon välillä, kun taas 4-bitillä se olisi $2^4 = 16$. [22, s. 235-236]

Digitaalisella signaalilla siis pyritään luomaan mahdollisimman tarkka vastine analogisesta signaalista käyttäjän asettamien parametrien sisällä. Digitaalisella signaalilla ei kuitenkaan päästä samaan tarkkuuteen, kuin analogisella signaalilla, koska digitaalisella signaalilla on rajoitettu määrä tasoja [23, s. 3].

3.3 Häiriön vaikutus signaaliin

Yksi sähköisessä tiedonsiirrossa esiintyvä ongelma on kohina. Tällä tarkoitetaan signaalissa epäsäännöllisesti esiintyvää häiriötä. Kohina jaetaan kahteen kategoriaan: laitteesta ja laitteen ympäristöstä aiheutuvaan kohinaan. [23, s. 127] Oikeaoppisella suunnittelulla, kuten tarkoilla komponenttivalinnoilla, piirisuunnittelulla ja jäähdytyksellä laitteesta aiheutuvaa kohinaa voidaan rajoittaa. Signaalin poistuessa laitteesta altistuu se ulkopuolisille häiriöille, joita ei voida rajoittaa. [23, s. 132]

Ideaalitulanteessa analoginen signaali on häiriötöntä, mutta signaalin edetessä summautuu siihen kohinaa. Signaalivahvistimet vahvistavat itse signaalia, kuin myös signaaliin summautuvaa kohinaa. Mitä enemmän laitteessa on vahvistimia, sitä huonommaksi kohinan ja signaalin välinen suhde muuttuu, kunnes alkuperäinen signaali on kokonaan peittynyt kohinan alle. [23, s. 149]

Digitaalisen signaalin ideaalitulanteessa signaali on häiriötöntä, mutta siihenkin summautuu kohinaa. Digitaalisen signaalin tapauksessa signaalinvahvistimet luovat kopion alkuperäisestä signaalista. Sen myötä signaalissa esiintynyt häiriö ei etene signaalin mukana

vahvistimen jälkeen, kunhan kohina ei ole ollut liian suurta. [23, s. 151] Tämän vuoksi kohinan ja signaalin välinen suhde on paljon parempi digitaalisella signaalilla kuin analogisella.

3.4 Signaalinmuodon vaikutus elektroniikkalaitteisiin

Analogisen signaalin ollessa häiriöalttiimpaa on elektroniikkalaitteissa siirrytty digitaaliseen tiedonsiirtoon myös kuvansiirrossa. Silti elektroniikkalaitteisiin, kuten televisioihin, valmistetaan analogiselle signaalille, yleisesti kuva ja ääni, portteja, koska kuluttajilta yhä löytyy laitteita, jotka tukevat vain analogista datansiirtoa. Näitä voivat olla esimerkiksi VHS (engl. Video Home System) -soittimet. Vaikka digitaalinen tiedonsiirto on luotettavampaa, valmistavat valmistajat yhä elektroniikkatuotteita, joissa on kuvalle ja äänelle niin analoginen kuin digitaalinen ulostulo. Esimerkiksi kuvassa 6 oleva kuluttajille ja varsinkin harrastelijoille suunnattu Raspberry Pi 3 Model B+ on hyvä esimerkki tästä.



Kuva 6: *Raspberry Pi 3 Model B+* [27]

Kuvasta 6 nähdään, että kyseisen tietokoneen etualalla on I/O-portteina USB micro-B -, HDMI- ja myös kuulokeporttina tunnettu 3.5 mm -portti. 3.5 mm -portin kautta käyttäjä voi kuljettaa ääni- ja kuvasignaalia analogisessa muodossa. Tämän vuoksi yhdelle I/O-portille saadaan useampi käyttötarkoitus.

4. ELEKTRONIKKATUOTTEEN MÄÄRITTELY

Elektroniikkalaitteen suunnitteluprosessi alkaa itse tuotteen konkretisoinnilla, joka saadaan alustavan tuotesuunnittelun avulla (engl. PPD preliminary production design). Tätä ei kuitenkaan saa sekoittaa POC (engl. Proof-of-Concept) -prototyyppeihin. POC-prototyypit on usein valmistettu kehitysalustojen, kuten Arduino, avulla, joita harvemmin tulee esille lopullisessa tuotteessa. POC-prototyyppien tarkoitus on todistaa, että suunniteltu laite ratkaisee esitetyn ongelman. PPD sen sijaan keskittyy lopullisen laitteen komponentteihin, kustannuksiin, voittomarginaaleihin, suorituskykyyn, ominaisuuksiin, kehityskelpoisuuteen ja valmistettavuuteen. [28]

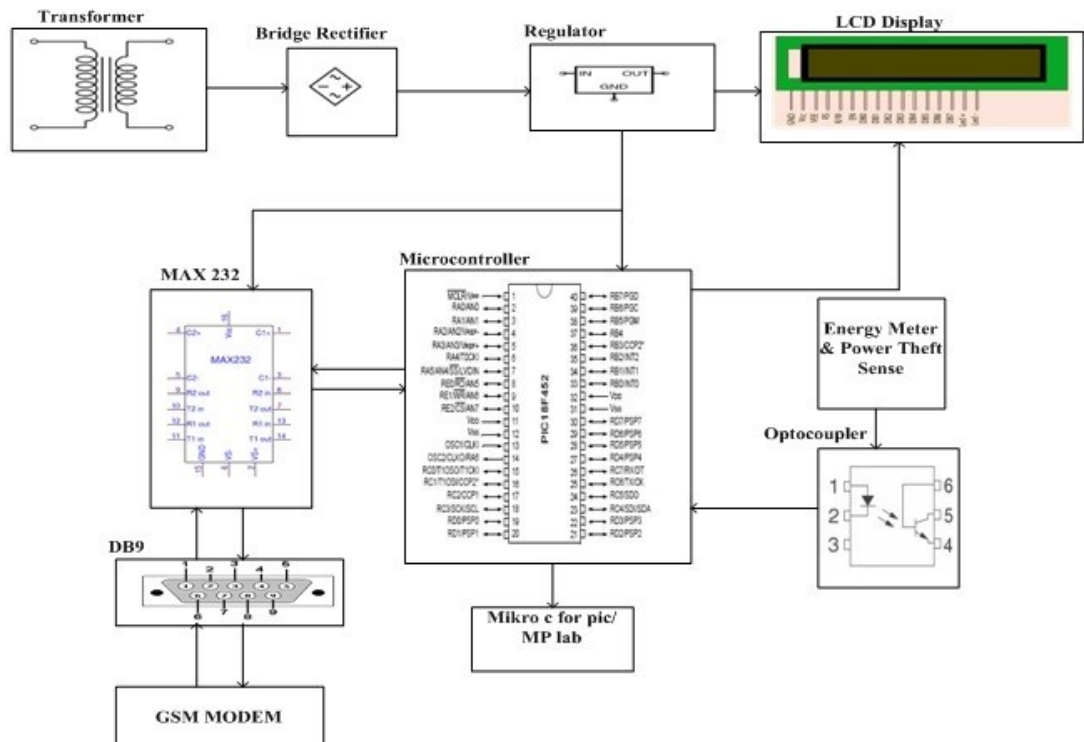
Elektroniikkalaitetta suunniteltaessa on siis tärkeää määritellä mahdollisimman tarkkaan, mitä laitteen halutaan tekevän eri tilanteissa. Hyödyllistä on myös tuoda esille laitteen rajoitteita, kuten laitteen fyysinen koko, paino, virrankulutus ja käyttöolosuhteet. [29, s. 7] Esimerkiksi laitteen fyysinen koko on yksi suurimmista tekijöistä, jotka vaikuttavat I/O-porttien valintoihin. Laitteen fyysisen koon vaikutusta käsitellään enemmän luvussa 7. Elektroniikkalaitteen määrittäminen suunnittelun alkuvaiheessa on tärkeää, koska muutokset, jotka tapahtuvat laitteen kehityksen myöhäisemmissä vaiheissa, tulevat kustantamaan enemmän kuin samat muutokset prosessin aiemmissä vaiheissa. Luvussa 6.5 perehdytään kyseiseen asiaan.

4.1 Ihmisen ja koneen välisen käyttöliittymän vaikutus lohko-kaavioon

Kun laitteelle on määriteltä sen perustoiminnot ja rajoitteet, tarvitsee määrittää, miten käyttäjä vaikuttaa järjestelmään: tapahtuuko se esimerkiksi painonappien, äänikomentojen tai kosketusliittymän kautta [29, s. 7]. Tällä pyritään estämään käyttäjää vaikuttamasta laitteeseen tavalla, jota ei ollut alun perin suunniteltu. Esimerkiksi tilanteissa, joissa käyttäjän ei haluta vaikuttavan laitteen toimintaan I/O-porttien kautta, pelkkä DC-jännitelatausportti (engl. Direct Current) saattaa riittää laitteen lataamiseksi. Kuten luvussa 2.3. todettiin, USB-C-portit yleistyvät laitteiden latausportteina. Kyseisen portin etuna on myös se, että latausportti toimii myös tiedonsiirtoporttina.

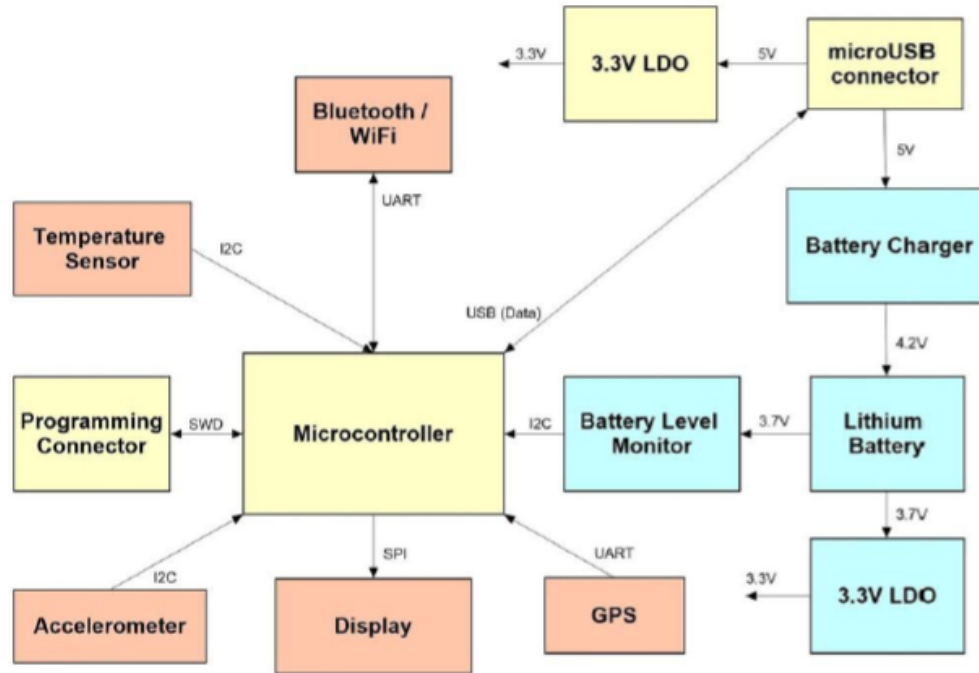
Ennen laitteen komponenttien valitsemista on tärkeää tiedostaa, mitkä tulevat olemaan laitteen pääkomponentit, joilla aiemmin määritellyt laitteen ominaisuudet ja käyttöliittymä voidaan toteuttaa. Näitä ovat esimerkiksi akku, näyttö ja prosessori. Kun laitteen pää-

komponentit on valittu, voidaan komponenttien avulla luoda lohkokaavio, jonka tarkoituksena on kertoa, miten eri komponentit vaikuttavat toisiinsa. Alla olevassa kuvassa on esitetty esimerkki lohkokaaviosta.



Kuva 7: Lohkokaavio [30]

Kuten kuvasta 7 nähdään, lohkokaavion avulla saadaan selville, mitä pääkomponentteja laitteessa tullaan käyttämään ja miten ne tulevat vaikuttamaan toisiinsa [29, s. 7]. Kuvan 7 esimerkistä nähdään, että energiamittarin anturi on yhdistetty optoanturiin (engl. optocoupler), joka on puolestaan yhdistetty mikrokontrolleriin, johon LCD (engl. Liquid Crystal Display) -näyttö on myös yhdistetty. Kyseisessä lohkokaaviossa anturin data saadaan esille LCD-näytössä, vaikka kyseiset komponentit eivät ole suoraan vuorovaikutuksessa toisiinsa. Lohkokaaviosta ei aina selviä, millä sähköisellä tavalla komponentit on yhdistetty toisiinsa, kuten kuvan 7 esimerkissä, mutta yhdistämistapojen mahdollinen esille tuominen helpottaa laitteen suunnittelua myöhemmissä vaiheissa. Kuvassa 8 on esitetty lohkokaavio, jossa komponenttien väliset tiedonsiirtomenetelmät on esitetty.



Kuva 8: Lohkokaavio [28]

Kuvasta 8 nähdään lohkokaaavion eri komponenttien väliset vuorovaikutukset. Vaikka yllä olevassa kuvassa ei ole esitetty mahdollisia komponentteja kuvina, kuten kuvassa 7, tuo se silti esille selkeän kuvan laitteen kokonaistoiminnasta. Nimeämällä komponentit ja niiden väliset yhteydet pystytään helposti hahmottamaan eri komponenttien välisten yhteyksien tarkoitukset.

4.2 Komponenttien valinta

Lohkokaavion avulla suunnittelija saa peruskäsityksen laitteen toiminnasta ja komponenteista, joiden avulla laitteen haluttu toiminta saadaan taattua. Lohkokaavion jälkeen voidaan siirtyä komponenttien valintaan. Kyseinen vaihe on tärkeä siksi, että komponenttien valinnat tulevat vaikuttamaan laitteen käytettävyyteen, jatkokehitykseen ja varsinkin kokonaishintaan.

Kuvan 8 esimerkissä voidaan miettiä, onko USB micro-B -liitin sopiva laitteeseen vai halutaanko esimerkiksi valita USB-C-liitin. Komponenttien valinta on tärkeää tässä vaiheessa laitteen suunnittelua, koska komponenttien vaihtaminen toisiin myöhemmässä tuotteenkehityksen vaiheessa voi vaikuttaa suuresti komponenttien välisiin yhteyksiin ja kehitystyön kustannuksiin.

4.2.1 Pintaliitos- ja läpiladontakomponentit

Pääsääntöisesti elektroniikassa käytetyt komponentit jaetaan kahteen eri ryhmään perustuen tapaan, jolla ne ladotaan piirilevyille eli PCB:lle (engl. Printed Circuit Board): THM (engl. Through-Hole Mounting) -komponentteihin eli läpiladontakomponentteihin ja SMD (engl. Surface Mount Device) -komponentteihin eli pintaliitoskomponentteihin [31][32]. Alla olevassa kuvassa 9 on esitetty THM- ja SMD-komponentteja.



Kuva 9: THM- ja SMD-komponentteja [31]

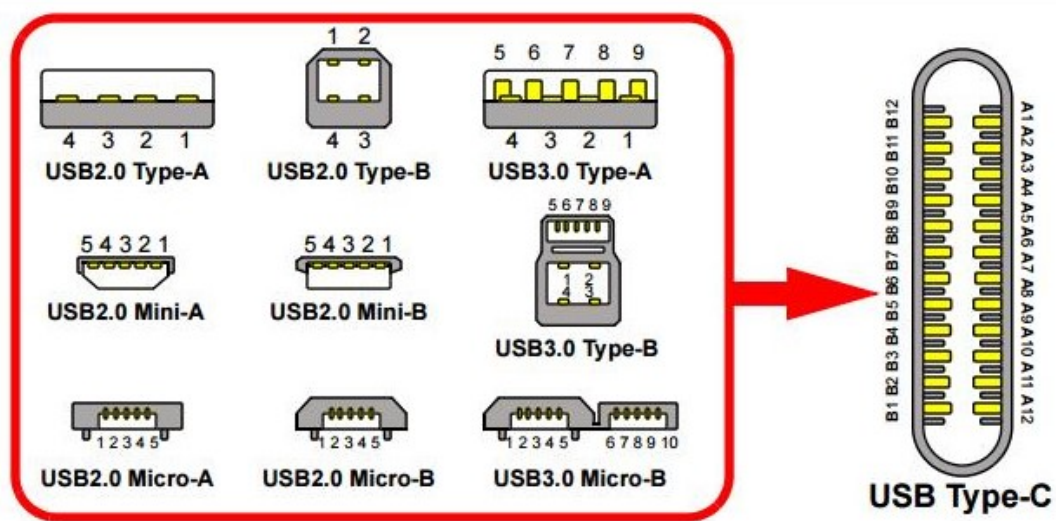
Molemmilla komponenttityypeillä on omat vahvuutensa ja heikkoutensa. Läpiladontakomponenteilla on paljon vahvemmat liitokset piirilevyyn kuin pintaliitoskomponenteilla, minkä vuoksi ne ovat paljon luotettavampia kuin pintaliitoskomponentit. Tämän ansiosta ne ovat parempi valinta tilanteissa, joissa komponentit altistuvat rasitukselle [31][32]. Läpiladontakomponenttien haittapuolena on niiden suurempi fyysinen koko verrattuna pintaliitoskomponentteihin. Tämän vuoksi SMD-komponenteilla saadaan aikaiseksi parempi komponenttitiheys verrattaessa läpiladontakomponentteihin [31]. Tärkeää on myös huomioida, ettei kaikkia komponentteja aina saa pintaliitos- tai läpiladontakomponentteina [10, s. 22][32]. I/O-porteille asetetut vaatimukset saattavat erota suuresti suunniteltaessa elektroniikkalaitteita eri käyttötarkoituksiin, vaikka vaatimukset eivät tule esille loppukäyttäjän käytettävyydessä. Tämän vuoksi I/O-portteja valmistetaan niin SMD-komponentteina kuin THM-komponentteina.

4.2.2 I/O-porttien valinta

Laitteen I/O-portteja valittaessa on tärkeää pitää mielessä, mihin kaikkeen muuhun kyseinen valinta mahdollisesti vaikuttaa laitteen suunnittelussa, koska on olemassa monenlaisia standardisoituja liittimiä elektroniikkalaitteisiin. Tämän vuoksi valittaessa I/O-portteja elektroniikkalaitteeseen on tärkeää ottaa huomioon asioita, kuten portin sähköiset ominaisuudet, joita ovat esimerkiksi maksimikäyttöjännite ja -virta, käyttöolosuhteet, luotettavuus ja fyysinen koko. [33, s. 12-14] Käyttöolosuhteiden ja porttien fyysisten kookojen vaikutuksia käsitellään enemmän luvuissa 7.2 ja 7.3.

On olemassa erilaisia USB-standardveja (ks. taulukko 1, s. 6). Esimerkiksi USB-PD-standardi voi käyttää USB-C-porttia liittimenään. Tärkeää on kuitenkin huomioida, että muutkin standardit, kuten USB 3.2, voivat käyttää samaa fyysistä porttia liittimenään. Taulukosta 1 nähdään, että USB 3.2- ja USB-PD-standardien tehonsiirto-ominaisuudet eroavat suuresti toisistaan. Tämän vuoksi ei voida olettaa, että fyysisesti samat portit toimisivat sähköisesti samalla tavalla eri laitteiden välillä.

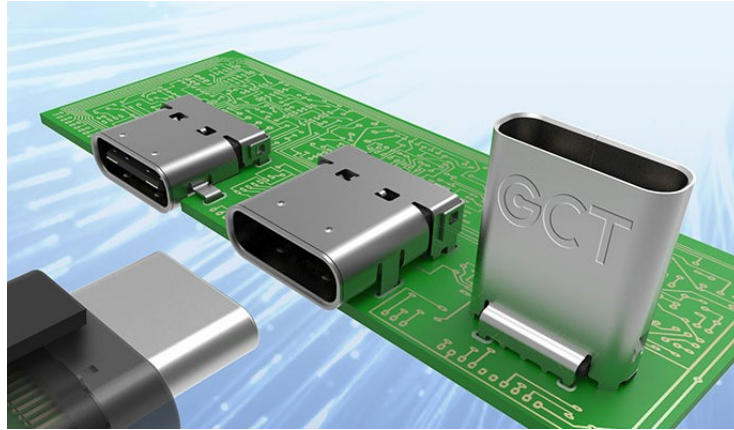
Suurin osa liittimistä on valmistettu niin, että ne voidaan asentaa vain yhdellä tavalla porttiin helpottaen liittimen käytettävyyttä. [33, s. 14] Alla olevassa kuvassa 10 on esitetty erilaisia USB-portteja, joista suurimpaan osaan liitin voidaan asentaa vain yhdellä tavalla.



Kuva 10: USB-portteja [34]

Kuvassa 10 punaisella ympyröityihin portteihin voidaan asentaa liitin vain yhdellä tavalla, kun taas kuvan oikeassa laidassa olevaan porttiin voidaan asettaa liitin miten päin tahansa. Tämä helpottaa laitteen käytettävyyttä, mutta vaikuttaa suuresti laitteen suunnitteluun portin liitinpinnien määrän ja pinoutin takia. Pinoutilla tarkoitetaan komponentin sähköisten liitoksien nimeämistä. I/O-porttien pinoutin vaikutusta käsitellään enemmän luvussa 5.3.

Kun portin sähköiset vaatimukset on saatu määritettyä, voidaan valita käytettävän I/O-portin tyyppi ja sen asennustapa piirilevylle. Alla olevassa kuvassa 11 on esitetty kolme eri tapaa USB-C-portin kiinnittämiseen piirilevylle.



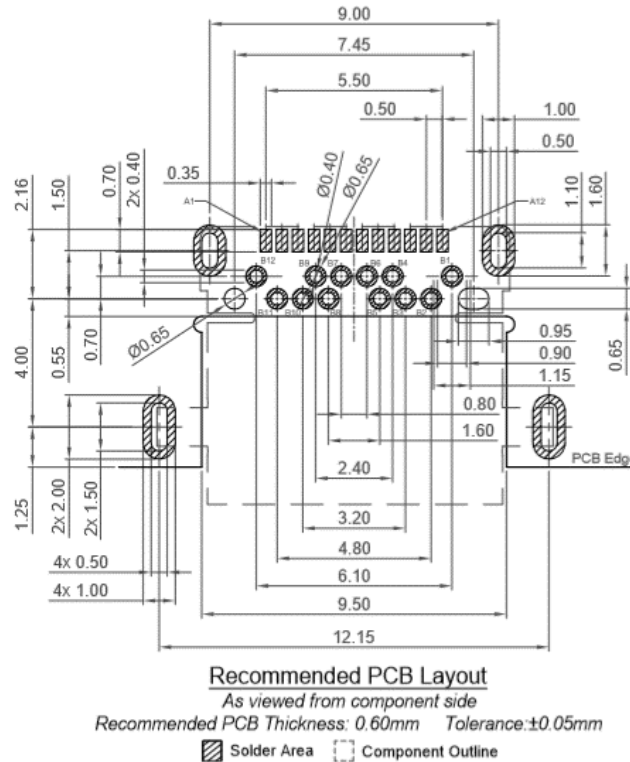
Kuva 11: USB-C-portin kiinnitystapoja [35]

Kuvan 11 esimerkissä vasemmanpuoleisin portti on piirilevyn puolessavälissä (engl. mid mount), keskellä oleva portti on kokonaan PCB:n päällä (engl. top mount) ja oikealla oleva portti on myös PCB:n päällä, mutta pystysuuntaisesti asennettu PCB:n suhteen. Suunnittelijan komponenttivalinnoilla, esimerkiksi kuvan 11 porttien välillä, ei ole varsinaisesti vaikutusta valmiin tuotteen käyttäjille, mutta niillä on kuitenkin suuret vaikutukset laitteen suunnitteluun.

Kuvan 11 vasemmanpuoleisen portin valitseminen mahdollistaa matalamman lopputuotteen valmistuksen, koska portti on asennettu piirilevyn tasolle, mutta tämän vuoksi suosituksena on 0,60 mm paksu piirilevy. Kiinnitystavan vuoksi piirilevyyn tarvitsee valmistaa kyseiselle liittimelle hahlo, joka on esitetty kuvassa 12. [36]

Kuvan 11 keskimmäisen portin piirilevyn paksuudeksi suositellaan 1,2 mm. Kyseinen portti asennetaan kokonaan piirilevyn päälle, joka kasvattaa valmiin tuotteen kokonaiskorkeutta. [37] Kyseinen portti on yleisesti hyvin käytetty tilanteissa, joissa laitteen fyysinen paksuus ei ole suunnittelun tärkein prioriteetti. Kyseisen portin avulla piirilevyyn ei tarvitse valmistaa kuvan 12 kaltaista hahloa.

Kuvan 11 oikeanpuoleisin portti mahdollistaa sen kiinnityksen pystysuuntaisesti suhteessa piirilevyyn, jonka paksuudeksi suositellaan 1,2 mm. Asennustyylin vuoksi kaikki portin suuntaisesti porttiin kulkeutuva voima kohdistuu piirilevylle komponenttien ja piirilevyn välisten liitoksen juotoksien sijaan. Kyseisen komponentin datalinjojen liitokset ovat pintaliitoksia. [38]



Kuva 12: Piirilevyn puoleenväliin asennettavan USB-C-portin kiinnitys piirilevyille[36]

Kuvasta 12 myös nähdään, että kyseinen portti käyttää niin pintaliitos- kuin läpiladonta-periaatetta. Edellä mainittujen syiden vuoksi kyseinen portti on varsin yleinen elektronikkalaitteissa, vaikkakin valmistusvaiheessa pitää huomioida läpiladonta- ja pintajuotokset. I/O-portit siis vaikuttavat varsin moneen asiaan laitesuunnittelussa, vaikka puhuttaisiin komponenteista, joilla on samat sähköiset ominaisuudet. Tärkeintä on kuitenkin valita porttimalli, jonka avulla saadaan valmistettua lopputuote halutunlaisilla ominaisuuksilla.

4.2.3 Komponenttien hinta

Tärkeä näkökulma komponenttien valinnassa on niiden hinta, koska ne vaikuttavat suoraan laitteen kokonaishintaan. On myös huomioitava, miten eri komponenttityypit vaikuttavat valmistusvaiheisiin ja täten tuotteen lopulliseen hintaan: läpiladontakomponenteille tarvitsee porata erilliset reiät liitoksille, mikä taas lisää työvaiheita ja näin valmistuskustannuksia.

Toinen komponenttien hintaan vaikuttava tekijä on niiden toleranssit; paremmilla toleransseilla olevilla komponenteilla on korkeammat hinnat. Yleisesti laitteet, jotka on valmistettu korkeamman toleranssin komponenteilla, ovat luotettavampia. Myös komponenttien suojuokituksella on vaikutus hintaan: ulkotiloihin tarkoitettujen komponenttien ja laitteiden hinnat ovat kalliimpia kuin sisätiloihin tarkoitettujen [33, s. 14].

I/O-porttien suunniteltu elinikä myös vaikuttaa komponentin hintaan. Portin ja liittimen väliset kontaktit voidaan pinnoittaa eri materiaaleilla, kuten platinaseoksilla ja kullalla. Pinnoitteen avulla kontaktipintojen mahdollinen oksidoituminen voidaan minimoida. [39, s. 133] Tämän vuoksi liittimet ja portit, jotka ovat pinnoitettuja ja tämän myötä pitkäikäisempiä, ovat kalliimpia.

4.3 Tuotteen kehittämisen kannattavuus

Kun alustava tuotesuunnittelu on saatu aikaiseksi, on pystyttävä vastaamaan seuraaviin kysymyksiin: onko tuotetta mahdollista kehittää? Kuinka paljon tuotteen kehitys tulee maksamaan? Kuinka kauan tuotteen kehitystyö tulee viemään? Onko tuote valmistettavissa? Ja tärkeimpänä: voidaanko tuotteesta saada voittoa? [28] Näihin kysymyksiin vastaamalla saadaan aikaan hyvä kuva tuotteen kehittämisen kannattavuudesta.

Tärkeää on myös huomioida, miten laitteen I/O-portit vaikuttavat kehittämisen kannattavuuteen: esimerkiksi USB micro-B -portti voi mahdollistaa kaikki halutut toiminnot laitteelle, mutta kyseinen portti ei vetoa loppukäyttäjiin samalla tavoin kuin USB-C-portti. Tämän vuoksi elektroniikkalaitteita, joissa ei ole nykyaikaisia I/O-portteja, on vaikeampi markkinoida verrattuna laitteisiin, joissa on uudemmat I/O-portit kuten USB-C.

5. LAITTEEN SÄHKÖINEN TUOTESUUNNITTELU

Laitteen sähköinen tuotesuunnittelu hyödyntää alustavassa tuotesuunnittelussa luotuja suunnitelmia. Näiden ympärille aletaan rakentamaan tuotteen kokonaisuutta, jonka tarkoituksena on täyttää sille määritellyt parametrit.

5.1 Piirikaavio

Piirikaavio on kaiken elektronisen suunnittelun perusta: lohkokaaavio tuo esille laitteen pääkomponentit, kun taas piirikaaviossa ovat esillä kaikki komponentit, joita laitteessa tullaan käyttämään. Sen avulla suunnittelijalle selviää, miten kaikki komponentit ovat yhdistettynä toisiinsa, kun taas aikaisemmin luotu lohkodeiagrammi kertoo pintapuoleisesti, miten eri komponentit vaikuttavat toisiinsa. Tämän vuoksi piirikaavion teko on kaikista tärkein vaihe suunniteltaessa elektronista laitetta: jopa yksi väärin merkattu komponentin jalka kaaviossa saattaa aiheuttaa koko laitteen toimimattomuuden.

Suunniteltaessa laitteeseen I/O-portteja tarvitsee huomioida järjestelmästä aiheutuva kohina. Kohina ei ole haluttua, minkä vuoksi se pyritään minimoimaan I/O-porttien suodatuskondensaattoreilla. Kyseiset kondensaattorit on yhdistetty piirilevyn maatasoon, joka taas on sidoksissa koteloinnin maadoitukseen. Nämä kondensaattorit siis suodattavat itse laitteesta aiheutuvan häiriön kuin myös I/O-portteihin yhdistettyjen kaapeleiden laitteen ulkopuolelta poimiman kohinan. [40, s. 17] Tämän vuoksi pienet komponentit piirikaaviossa vaikuttavat suuresti I/O-porttien toimintaan.

Yleisesti elektroniikkalaitteet kytketään pitkillä kaapeleilla I/O-portteihin, jotka altistavat laitteen elektrostaattisille purkauksille. Laitteet myös altistuvat kyseisille purkauksille ihmisten kosketuksesta. Näiden purkauksien vuoksi laitteen datalinjat tarvitsevat suojausten. [41]

5.2 Piirin simulaatio

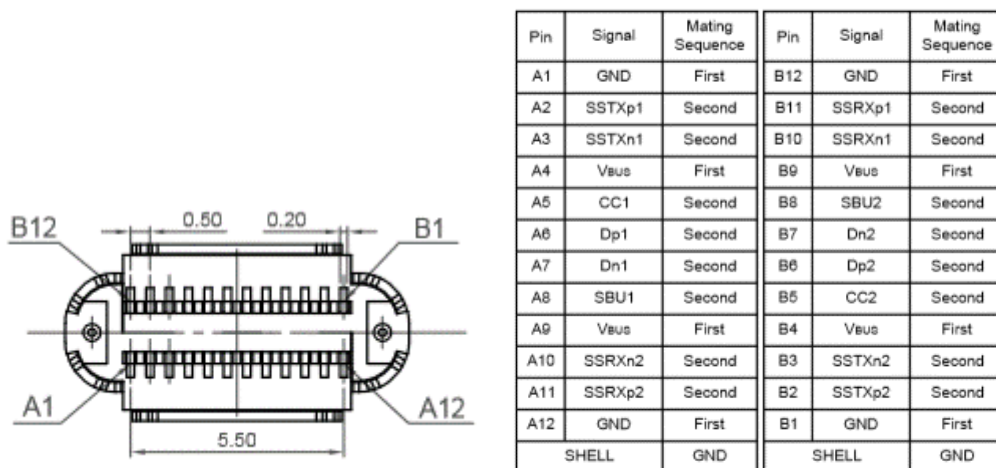
Kun laitteesta on saatu piirikaavio aikaiseksi, on tärkeää todentaa suunnitellun piirin toiminta. Tämä voitaisiin toteuttaa rakentamalla fyysinen piiri ja testaamalla sitä, mutta se on aikaa vievää ja usein epätarkka tapa. Helpompi ja nopeampi vaihtoehto on simuloida piirin toimintaa. Simuloinneissa komponenttien arvoja saadaan helposti muutettua ja simulaatioiden tulokset saadaan tallennettua halutussa muodossa toivottuun paikkaan. [29, s. 601][42, s. 21-23]

Simulointien avulla voidaan myös todentaa esimerkiksi I/O-porttien vaikutus piirin toimintaan. On oltava varma, etteivät I/O-porttien virtavaatimukset ylikuormita laitteen virtalähtepiiriä. [41] Kuten luvussa 2.3 todettiin, yksi USB 2.0 portti voi viedä 500 mA, joka vaikuttaa suuresti virtapiiriin.

5.3 Lopullinen komponentti- ja vetolista

Kun simulaation avulla todennetaan piirin halutun kaltainen toiminta, voidaan tehdä lopullinen komponenttilista. Komponenttilistassa on listattuna kaikki laitteessa käytetyt komponentit. Ennen piirilevyn suunnittelua tarvitsee piirikaaviosta luoda vetolista (engl. net list). Kyseinen lista kertoo suunnitteluohjelmalle kytkennät komponenttien ja osalistan välillä. Vetolista siis toimii rajapintana suunnitteluohjelman eri vaiheiden välillä.

Nykyaikaisissa ohjelmissa voidaan siirtää suunnitteluun liittyvää oleellista tietoa, jota piirilevyn suunnittelussa voidaan käyttää, kuten suunnittelusääntöjä. [43, s. 19] Vetolistat ovat tärkeitä, koska I/O-porteissa voi olla kymmeniä eri liitinpinnejä. Kuvassa 13 on esitetty USB-C-portin pinout.



Kuva 13: USB-C-portin pinout [38]

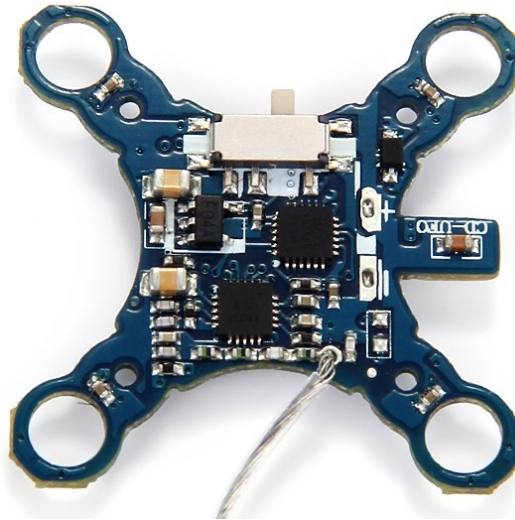
Kuvasta 13 nähdään, että jokainen liittimen pinni on tarkkaan nimetty, minkä vuoksi vetolistan teko on hyvin tärkeää. Väärin kytketyt pinnit voivat altistaa I/O-portin oikosuluille. Tämä taas voi tehdä laitteesta toimintakyvyttömän.

6. PIIRILEVYN SUUNNITTELU

Kun piirikaavio on saatu suunniteltua ja tarkastettua simulaatioiden avulla, voidaan siirtyä itse piirilevyn suunnitteluun. PCB toimii sähköisenä kontaktina komponenttien välillä [28, s. 12]. Tikkanen jakaa piirilevyn suunnittelun vaiheet seuraavaksi käsiteltäviin päävaiheisiin (luvut 6.1-6.4) teoksessa ”PADS Piirilevyn suunnitteluopas 2” [43, s. 20].

6.1 Piirilevyn geometria ja mekaaninen määrittely

Piirilevygeometrian suunnittelu on tärkeä vaihe laitesuunnittelussa. PCB:n koko määrittää, miten komponentit sijoitellaan piirilevylle ottaen samalla huomioon I/O-porttien sijoittelun ja piirilevyn kiinnitysmekanismit [29, s. 601]. Kiinnitysreikiä suunniteltaessa on otettava huomioon esimerkiksi toimittaako se samalla piirikortin maadoitustehtävää. Jos reikä ei toimita edellä mainittua tehtävää, tarvitsee huomioida alue kiinnitysruihin alapuolelle. Tällä pyritään siihen, että ruuvi ei vaikuta muuhun piirin sähköiseen toimintaan. [43, s. 73-74]



Kuva 14: Quadrokopterin piirilevy [44]

Yleisesti piirilevyn koon ja muodon määrittävät lopullisen laitteen koko ja muoto. Kuvassa 14 on esitetty pienen quadrokopterin piirilevy. Kuvasta nähdään, kuinka laitteen muoto on vaikuttanut piirilevyn muodon suunnitteluun ja saattanut rajoittaa I/O-porttien käyttöä tilanpuutteen vuoksi.

6.2 Komponenttisijoittelu

Ennen komponenttien sijoittelua on suositeltavaa jakaa komponentit toiminnallisiin lohkoihin, kuten ne on piirikaaviossa esitetty [43, s. 20-21]. Sijoittelussa on myös huomioitava komponenttien reititys. Signaalilinjoista on pyrittävä tekemään mahdollisimman lyhyitä häiriöiden välttämiseksi [42, s. 23][43, s. 20].

Tärkeää on myös huomioida komponenttien juotettavuus, testattavuus ja huollettavuus [43, s. 21]. Tikkanen toteaa tekstissään komponenttisijoittelun olevan suunnittelun tärkeimpiä vaiheita, mikä on täysin totta, koska sijoittelu vaikuttaa niin moneen myöhemmään vaiheeseen.

Suosittelavaa on myös sijoittaa ensimmäisenä komponentit, jotka tulevat laitteen reunoille, kuten I/O-portit. Yleisesti kyseisten komponenttien sijoittelua rajoittaa laitteen mekaaninen suunnittelu, kuten laitteen kotelointi. [45] Esimerkiksi kuvan 14 tilanteessa quadrokopterin virtakytkin on sijoitettu piirilevyn reunalle, jotta se olisi helposti käyttäjän käytettävissä.

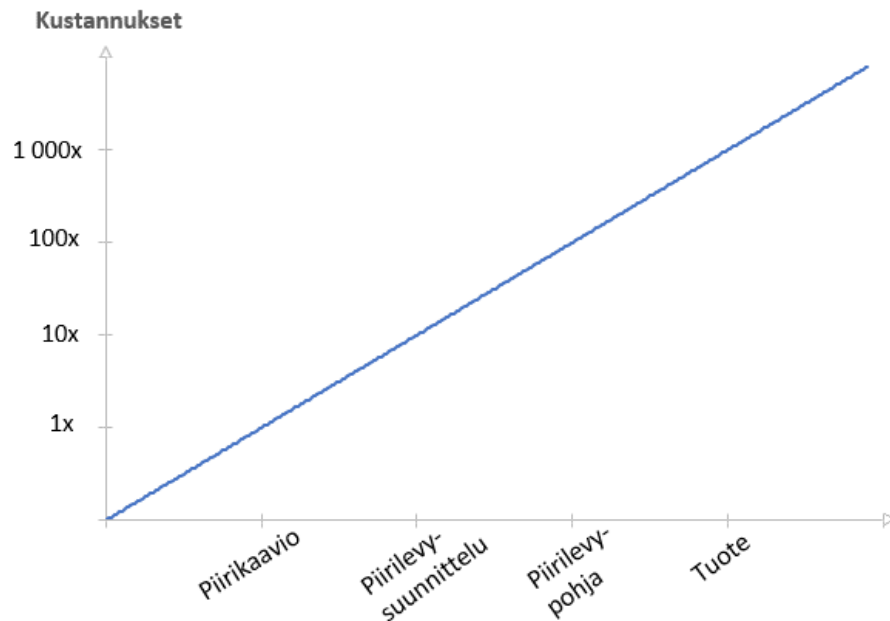
6.3 Reititys

Komponenttien sijoittelun jälkeen voidaan suunnitella reititystä, jolla tarkoitetaan piirikaaviossa esitettyjen komponenttien välisten liitosten mallinnusta fyysisesti [43, s. 21]. Nykyaikaisissa piirilevyjen suunnitteluohjelmissa on auto routing –toimintoja, jotka nimensä mukaisesti tekevät automaattisesti reititykset komponenttien välillä [29, s. 602][43, s. 21]. Nämä ohjelmat eivät kuitenkaan ota huomioon signaalien häiriöalttiutta, minkä vuoksi virtareitit ja maatasot tulee reitittää suunnittelijan toimesta [40, s. 16].

I/O-portit vaikuttavat suuresti reititykseen ja vetojen vahvuuksiin. Taulukossa 1 (ks. s. 6) oli tuotu esille USB PD -standardi, joka pystyy kuljettamaan 100 W tehon, minkä vuoksi kyseisten linjojen tarvitsee olla vahvempia kuin signaalilinjojen. Myös signaalit, joissa kulkee yli 50 kHz:n taajuiset kello-signaalit, tulisi suunnittelijan itse reitittää [40, s. 16].

6.4 Muutosten vaikutus hintaan

Tikkanen toteaa tekstissään jälkikäteen tapahtuvien muutosten vaikuttavan hintaan [43, s. 24]. Kuvassa 15 on esitetty muutosten vaikutus kokonaishintaan tuotekehityksen eri vaiheissa.



Kuva 15: Muutosten vaikutus kokonaishintaan [43, s. 24]

Kuvasta 15 nähdään, että aina myöhäisemmässä vaiheessa tapahtuvat muutokset vaikuttavat kymmenkertaisesti hintaan, joka muutoksista aiheutuu. Tämän vuoksi on tärkeää heti laitesuunnitteluprojektin alussa määrittää lopullinen tuote mahdollisimman tarkasti.

7. LAITEKOTELOINTI

Tässä luvussa tarkastellaan tuotesuunnittelun määritysten vaikutuksia laitteen kotelointiin. Elektroniikkalaitteen tai -järjestelmän kaikki komponentit on suojattava käyttöympäristöltä. Yleisin tapa komponenttien suojaamiselle on asettaa ne jonkinlaiseen suojaavaan koteloon. [46]

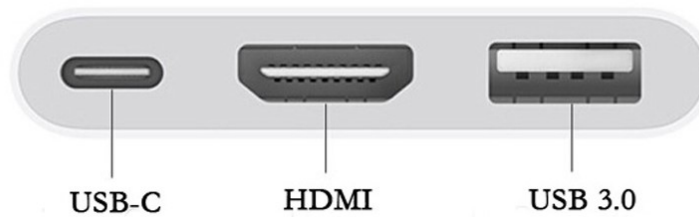
7.1 Laitekoteloinnin määrittely

Elektroniikkalaitteen tuotesuunnittelu alkoi laitteen määrittelyllä, jota käsiteltiin luvussa 3.1. Tuotekehityksen alkuvaiheissa voidaan määrittää esimerkiksi lopullisen laitteen fyysisen koon maksimimitat, kuten myös käyttöolosuhteet. Kyseiset ominaisuudet vaikuttavat suuresti laitekoteloinnin suunnitteluun. I/O-porteilla on suuri vaikutus laitekotelointiin, koska elektroniikkalaitteen porttien tulee olla helposti käytettävissä. Tämän vuoksi täytyy varmistaa, että I/O-portteihin tulevat liittimet pääsevät tarpeeksi syväälle portteihin niin, ettei laitekotelointi vaikuta tähän.

Laitekoteloinnin määrittelyn päällimmäinen tarkoitus on valmistaa laitteelle kotelointi, joka kestää käyttöä sen suunnitellussa ympäristössä. Esimerkiksi IP (engl. Ingress Protection) -luokitus vaikuttaa merkittävästi laitteen mahdollisiin käyttöolosuhteisiin. [47] IP-luokituksen vaikutusta käsitellään enemmän alaluvussa 7.3.

7.2 I/O-porttien koon vaikutus

LaBabera toteaa, että (suomennettuna) ”*Kuluttajina yhdistämme pienemmän parempana tai kehittyneempänä, mutta joskus se on enemmän kuin vain ohuempia iPhoneja.*” ja ”*Elektroniikan pienentämistä vievät eteenpäin ne teollisuudenalat, jotka vaativat suurempaa nopeutta, tehokkuutta, tehoa ja vähentynyttä painoa. Tuloksena on parempia lääketieteellisiä kuvantamislaitteita, sokaisevan nopeaa elektroniikkaa ja pienempiä laitteita. Mutta kaikella tällä on kustannuksensa.*” [48] Yritykset siis joutuvat kehittämään laitteistaan pienempiä, jotta ne vetoaisivat kuluttajiin. Alla olevassa kuvassa 16 on esitetty USB-A-, HDMI- ja USB-C-portti, joita käytetään eri kuluttajakeskeisissä laitteissa.



Kuva 16: USB-C-, HDMI- ja USB-A -portti [49]

Kuvasta 16 nähdään, kuinka paljon eri porttien fyysiset koot eroavat toisistaan. Kuten edellä mainittiin, valmistajien tarvitsee valmistaa alati ohenevia laitteita kuluttajille, minkä vuoksi joihinkin uusimpiin kannettaviin tietokoneisiin ei enää valmisteta USB-A- ja HDMI-portteja.

Vuonna 2015 Apple julkaisi MacBook tietokoneen, jonka paksuus vaihteli 0,35 – 1,31 cm välillä [50]. Kuvassa 17 on esitetty kuva kyseisen tietokoneen sivuprofiilista.



Kuva 17: Vuoden 2015 MacBook [50]

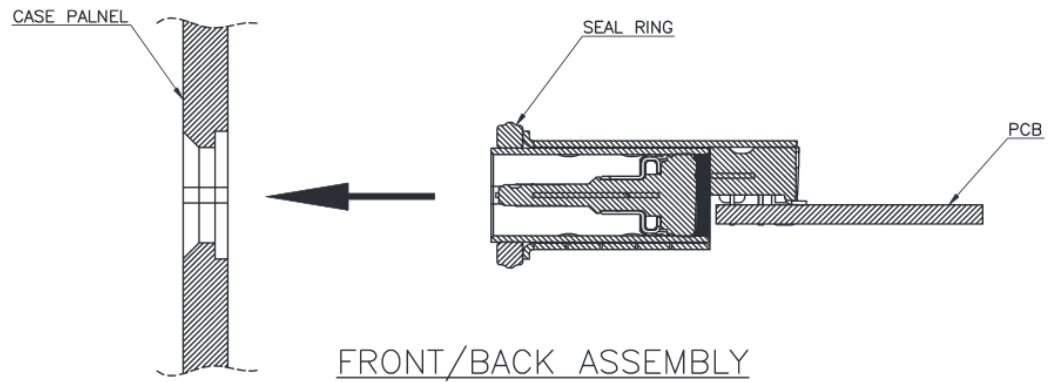
Ohuen tietokoneen tavoittelulla oli vaikutuksensa laitteen käytettävyyteen; Kyseisessä tietokoneessa ei ole kuulokeliitännän lisäksi mitään muuta I/O-porttia kuin yksi USB-C-portti. Voidaan siis todeta, että laitteen fyysinen koko ja varsinkin laitekoteloinnin muotoilu rajoittivat esimerkkitapauksessa I/O-porttien määrää ja kokoa.

7.3 IP-luokituksen vaikutus

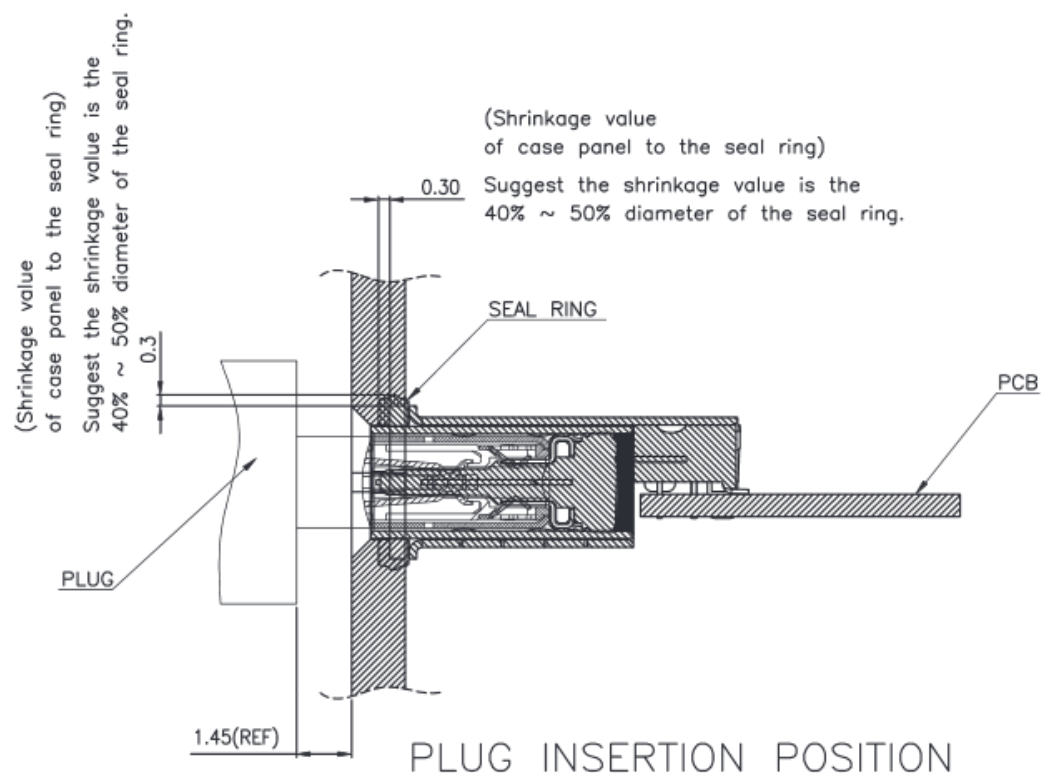
Sähkölaitteita tullaan käyttämään laajalti erilaisissa olosuhteissa. Mitä vaativampia olosuhteet ovat, sitä tärkeämpää on käyttää niihin tilanteisiin ja olosuhteisiin suunniteltuja laitteita. [47] IP-koodilla arvioidaan sähkölaitteen veden- ja pölynkestoisuutta. Kyseinen koodi koostuu kahdesta numerosta: ensimmäinen numero kertoo suojauksesta vieraiden esineiden ja pölyn suojaukselta ja jälkimmäinen numero veden suojauksesta. [51]

IP-luokituksen tarkoitus on kertoa tuotteen loppukäyttäjälle, kuinka turvallista tuotteen käyttö tietyissä olosuhteissa on [52]. Korkean IP-luokituksen haittapuoli on kuitenkin se, että esimerkiksi laitteen kasausvaiheessa oleva ilmankosteus kondensoituu laitteen sisällä ja altistaa sen korroosiolle. [46]

Suunniteltaessa laitteeseen I/O-portteja pitää myös niillä olla sama tai korkeampi IP-luokitus kuin laitteelle halutaan. Kuvissa 18 ja 19 on esitetty USB-C -portti, jolla on IP67-luokitus.



Kuva 18: IP67 USB-C -portti ja kotelointi [53]



Kuva 19: IP67 USB-C -portti kotelointiin liitettynä [53]

Kuvista 18 ja 19 nähdään, että kotelointiin täytyy tehdä sisäpuolelta syvennys tiivisterengasta varten. Renkaan koko riippuu käytetystä tiivisteestä. Tämä taas vaikuttaa koteloinnin valmistettavuuteen ja sen myötä hintaan.

Yleisesti voidaan todeta, että laitekoteloinnilla on suuri merkitys elektroniikkalaitteen suunnittelulle. Laitetekeloinnin avulla varmistetaan laitteen suunniteltu toiminta sen suunniteluussa ympäristössä. Tuotteet, jotka on suunniteltu pidempiaikaiseen käyttöön, täytyy suunnitella niin, että ne ovat yksinkertaisia ja ergonomisia käyttää, koska vaarana on, että kuluttaja siirtyy käyttämään kilpailevan valmistajan tuotteita [54, s. 28].

8. YHTEENVETO

Elektroniikkalaitteen tuotesuunnittelu on aikaa, vaivaa ja rahaa vievä prosessi. Tärkeintä elektroniikkalaitteen suunnittelussa on tehdä hyvä pohjatyö laitteen suunnittelulle: laitteen mahdollisimman tarkka määrittely prosessin alkuvaiheessa helpottaa lopullisen laitteen suunnittelua ja säästää rahaa. Luvussa 6.4 kyseinen asia tuotiin tarkemmin esille. Mitä myöhäisemmässä vaiheessa laitteen määrittelylle ja sen myötä suunnittelulle tehdään muutoksia, sitä suuremmat kustannukset siitä seuraa.

Kasvaneet laskentatehot elektroniikkalaitteissa ovat mahdollistaneet pienempien ja tehokkaampien laitteiden valmistuksen. Esimerkiksi kannettavissa tietokoneissa ja älypuhelimissa on siirrytty alati oheneviin ja sirompiin laitteisiin. Tämä taas on johtanut I/O-porttien vähenemiseen ja pienenemiseen elektroniikkalaitteissa. Vaikka aluksi tämä saattaa vaikuttaa huonolta asialta, on sillä myös hyvät puolensa: elektroniikkalaitteisiin pyritään valmistamaan portteja, jotka eivät palvele vain yhtä tarkoitusta. Tämän vuoksi esimerkiksi HDMI-portteja ei ehkä kannata valmistaa uusiin kannettaviin tietokoneisiin, koska uusimpien USB-standardien myötä kyseinen signaali saadaan kuljetettua USB-porttien kautta.

Määritettäessä elektroniikkalaitteen toimintoja on tärkeää tuoda esille mahdollisimman tarkkaan, mitä laitteen halutaan tekevän missäkin tilanteessa. Tämän vuoksi I/O-porttien valinnat ovat tärkeitä laitteen suunnittelussa: esimerkiksi valittaessa USB-portteja laitteeseen joudutaan tekemään päätöksiä itse porttien kuin myös USB-standardien välillä. Tärkeintä kuitenkin on valita laitteeseen sellaiset I/O-portit, joilla laitteelle määritellyt vaatimukset saadaan täytettyä.

Kuitenkin yksinkertaisilta vaikuttavilta valinnoilla on suuri vaikutus laitteen kokonaissuunnitteluun: fyysisen I/O-portin valinnan jälkeen tarvitsee päättää kyseisen portin asennustapa niin piirilevylle kuin laitekotelointiin. Tärkeää on myös valita riittävä suojaus portille, jotta laitetta voidaan käyttää halutuissa olosuhteissa. Myös eri porttityypeillä on omat vaatimuksensa, kuten suodatuskondensaattorit, jotka tarvitsee suunnittelussa huomioida.

I/O-porteilla siis on varsin suuri vaikutus elektroniikkalaitteen tuotesuunnitteluun, vaikkei sitä heti huomaisikaan. Kuitenkin tulevaisuudessa langaton tehon- ja tiedonsiirto tulevat kehittymään ja yleistymään: markkinoilta jo löytyy älypuhelimia, jotka tukevat langatonta latausta. Tämän vuoksi tulevaisuudessa on siis mahdollista nähdä elektroniikkalaitteita ilman minkäänlaisia I/O-portteja.

LÄHTEET

- [1] Zion Market Research, "IGlobeNewswire," 29.6.2018. [Online]. Saatavilla: <https://globenewswire.com/news-release/2018/06/29/1531798/0/en/Global-Consumer-Electronics-Market-Will-Reach-USD-1-787-Billion-by-2024-Zion-Market-Research.html>. [Viitattu 29.1.2019].
- [2] phoneArena.com, "phonearena.com LG PRADA," [Online]. Saatavilla: https://www.phonearena.com/phones/LG-PRADA_id1985. [Viitattu 28.1.2019].
- [3] phoneArena.com, "phonearena.com Goole Pixel 3XL," [Online]. Saatavilla: https://www.phonearena.com/phones/Google-Pixel-3-XL_id10926. [Viitattu 29.1.2019].
- [4] G. Wilson, *Embedded Systems and Computer Architecture*, Newnes, 2002, p. 320.
- [5] C. Walsh ja N. Saeid, "Everyday microcontrollers," 2008. [Online]. Saatavilla: <https://electronicsnews.com.au/news/everyday-microcontrollers>. [Viitattu 5.2.2019].
- [6] Elektor, "What Is a Microcontroller?," 25.9.2018. [Online]. Saatavilla: <https://www.elektormagazine.com/news/what-is-a-microcontroller>. [Viitattu 5.2.2019].
- [7] Predictable designs, "Microcontroller or Microprocessor: Which is Right for Your New Product?," [Online]. Saatavilla: <https://predictabledesigns.com/microcontroller-or-microprocessor-which-is-right-for-your-new-product/>. [Viitattu 25.2.2019].
- [8] D. A. Bradley, A. Loader, D. Dawson ja N. C. Burd, *Mechatronics: Electronics in Products and Processes*, CRC Press, 1993, p. 510.
- [9] L. Hoddeson ja V. Daitch, *True Genius: The Life and Science of John Bardeen: The Only Winner of Two Nobel Prizes in Physics*, Washington , D.C.: Joseph Henry Press, 2002, p. 467.
- [10] K. Silvonen, *Elektroniikka ja sähkötekniikka*, Helsinki: Otatieto, 2018, s. 504.
- [11] L. B. Kish, "End of Moore's law: thermal (noise) death of integration in micro and nano electronics," *Physics Letters A*, nro 3-4, pp. 144-149, 2002.
- [12] Wikipedia, "Transistor count," [Online]. Saatavilla: https://en.wikipedia.org/wiki/Transistor_count. [Viitattu 22.2.2019].
- [13] "CPU-Galaxy IBMPS/2 Model 50Z 8550," 2010. [Online]. Saatavilla: https://www.cpu-galaxy.at/complete_systems/IBM_PS2_model50Z_8550/IBM_PS2_Model50Z_8550.jpg. [Viitattu 30.1.2019].
- [14] P. Wilson, *Design Recipes for FPGAs; Using Verilog and VHDL*, Elsevier Ltd, 2007, p. 320.
- [15] USB Implementers Forum, *Universal Serial Bus Specification Revision 1.0*, 1996, p. 268.
- [16] TeleTec Electronics Corp., "USB 101: All You Need to Know About USB 3.2," 14.6.2018. [Online]. Saatavilla: <https://www.teletecsi.com/blogs/usb-101-all-you-need-to-know-about-usb-32>. [Viitattu 25.2.2019].
- [17] USB Implementers Forum, "SuperSpeed USB," [Online]. Saatavilla: <https://www.usb.org/superspeed-usb>. [Viitattu 24.2.2019].
- [18] Designtecnica Corporation, "Digital Trends: Charging via USB-C for laptops: Here's what you need to know," 21.2.2019. [Online]. Saatavilla: <https://www.digitaltrends.com/computing/charging-via-usb-c/>. [Viitattu 24.2.2019].
- [19] HDMI Licensing Administrator, "HDMI Alt Mode for USB Type-C™ Connector," [Online]. Saatavilla: <https://www.hdmi.org/manufacturers/hdmialtmodeusbtypec.aspx>. [Viitattu 14.3.2019].
- [20] Android Authority, "Top 3 excuses companies make for ditching the headphone jack," 18.9.2018. [Online]. Saatavilla: <https://www.androidauthority.com/headphone-jack-removal-reasons-905146/>. [Viitattu 2.5.2019].

- [21] The Next Web, "Counterpoint: Why phone makers are trying to kill the headphone jack," 1.9.2017. [Online]. Saatavilla: <https://thenextweb.com/plugged/2017/09/01/counterpoint-why-phone-makers-are-trying-to-kill-the-headphone-jack/>. [Viitattu 2.5.2019].
- [22] K. D. Stephan, Analog and mixed-signal electronics, Wiley, 2015, p. 538.
- [23] G. Smillie, Analogue and digital communication techniques, Newnes, 1999, p. 312.
- [24] Sibelius-Akatemia, "Emute: Mikrofonit, osa 2," [Online]. Saatavilla: <https://emute.edu.fi/mikrofonit/mikrofonit-osa-2>. [Viitattu 6.3.2019].
- [25] Audio-Technica U.S., "What a Microphone Does," [Online]. Saatavilla: <https://www.audio-technica.com/cms/site/b0d226992d31e25d/index.html>. [Viitattu 6.3.2019].
- [26] Aalto yliopisto, "Tietoliikenne- ja tietoverkkotekniikan laitos: 56 kilobittä sekunnissa?," 24.11.1998. [Online]. Saatavilla: <https://www.netlab.tkk.fi/opetus/s38118/s98/htyo/18/>. [Viitattu 6.3.2019].
- [27] Raspberry Pi Foundation, "Raspberry Pi 3 Model B+," [Online]. Saatavilla: <https://www.raspberrypi.org/products/raspberry-pi-3-model-b-plus/>. [Viitattu 7.5.2019].
- [28] J. Teel, *Ultimate Guide - How Develop Your New Electronic Hardware Product in 2018*, Predictable Designs, 2018, p. 25.
- [29] N. Storey, Electronics: a systems approach, Kolmas painos ., Pearson, 2009, p. 804.
- [30] Microcontrollers Lab, "Electric energy theft intimation system using PIC microcontroller," 2017. [Online]. Saatavilla: <http://microcontrollerslab.com/electric-energy-theft-intimation-system/>. [Viitattu 20.2.2019].
- [31] EPR, "Basic principles of PCB assembly: Through-Hole vs Surface Mounted," 14.2.2019. [Online]. Saatavilla: <https://eppartner.com/through-hole-vs-surface-mounted/>. [Viitattu 14.2.2019].
- [32] Optimum Design Associates, "Through-Hole vs. Surface Mount," [Online]. Saatavilla: <http://blog.optimumdesign.com/through-hole-vs-surface-mount>. [Viitattu 14.2.2019].
- [33] S. J. Sangwine, Electronic Components and Technology: Engineering Applications, Van Nostrand Reinhold, 1987, p. 181.
- [34] EasyAcc.com, "USB Type-C Charger: The Death of AC Laptop Chargers," 21.3.2016. [Online]. Saatavilla: <https://www.easyacc.com/media-center/usb-type-c-charger/>. [Viitattu 27.4.2019].
- [35] GCT (Global Connector Technology), "USB Type C Connector," [Online]. Saatavilla: <https://gct.co/usb-connector/usb-type-c>. [Viitattu 23.2.2019].
- [36] GCT (Global Connector Technology), "USB460 - Type C USB 3.1 Connector draving," 21.4.2016. [Online]. Saatavilla: <https://gct.co/connector/usb4060>. [Viitattu 23.2.2019].
- [37] GCT (Global Connector Technology), "USB4055 - Type C USB 3.1 Connector," 21.4.2016. [Online]. Saatavilla: <https://gct.co/connector/usb4055>. [Viitattu 23.2.2019].
- [38] "USB4070 - Type C USB 3.1 Connector," 5.5.2016. [Online]. Saatavilla: <https://gct.co/connector/usb4070>. [Viitattu 23.2.2019].
- [39] Reliability of Electronic Components, London: Iliffe Books Ltd., 1966, p. 165.
- [40] Texas Instruments, PCB Design Guidelines For Reduced EMI, 1999, p. 19.
- [41] Altium LLC, "No More Wrong Ports: Implementing USB Devices In Your Hardware Design," 18.1.2018. [Online]. Saatavilla: <https://resources.altium.com/simulation-analysis/no-more-wrong-ports-implementing-usb-devices-in-your-hardware-design>. [Viitattu 9.3.2019].
- [42] P. Du Feu, A guide to advanced manufacturing in electronics, London: Peter Peregrinus Ltd., 1988, p. 99.
- [43] H. Tikkanen, PADS Piirilevysuunnitteluopas 2, Jyväskylä: DS-Design Systems OY, 2004, s. 291.
- [44] GeekBuying, "D1-007 PCB Receiver for DHD D1 Mini Drone," [Online]. Saatavilla: <https://www.geekbuying.com/item/D1-007-PCB-Receiver-For-D1Mini-Drone-351275.html>. [Viitattu 9.3.2019].

- [45] S. Sattel, "The Top 10 PCB Component Placement Tips for the PCB Beginner," Autodesk, [Online]. Saatavilla: <https://www.autodesk.com/products/eagle/blog/top-10-pcb-component-placement-tips-pcb-beginner/#eagle-navigation>. [Viitattu 9.3.2019].
- [46] I. Verhappen, "Control Global; How to design functional enclosures to protect electronic devices," 10.4.2018. [Online]. Saatavilla: <https://www.controlglobal.com/articles/2018/how-to-design-functional-enclosures-to-protect-electronic-devices/>. [Viitattu 26.2.2019].
- [47] STEK, "IP-luokitus," [Online]. Saatavilla: <https://stek.fi/perustietoa-sahkosta/sahkojarjestelmat/ip-luokitus/>. [Viitattu 28.2.2019].
- [48] A. LaBabera, "Electronic products: Why are electronics getting smaller?," 19.8.2015. [Online]. Saatavilla: https://www.electronicproducts.com/Hardware/Components/Why_are_electronics_getting_smaller.aspx. [Viitattu 28.2.2019].
- [49] Focus Technology Co., "USB3.1 Type-C to HDMI+USB3.0+Type C Female Port Multifunction Cable Adapter," [Online]. Saatavilla: <https://m.made-in-china.com/product/USB31-Type-C-to-HDMI-USB3-0-Type-C-Female-Port-Multifunction-Cable-Adapter-798110135.html>. [Viitattu 28.2.2019].
- [50] Apple Inc., "MacBook (Retina, 12-tuumainen, alkuvuosi 2015) - Tekniset tiedot," [Online]. Saatavilla: https://support.apple.com/kb/SP712?locale=fi_FI. [Viitattu 28.2.2019].
- [51] MPL AG Elektronikunternehmen, "IP Ratings (Ingress Protection)," [Online]. Saatavilla: <https://www.mpl.ch/info/IPratings.html>. [Viitattu 28.2.2019].
- [52] RS Components Ltd, "The Comprehensive Guide To IP Ratings," [Online]. Saatavilla: <https://uk.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=ideas-and-advice/ip-ratings>. [Viitattu 28.2.2019].
- [53] CUI Inc, "UJ31-CH-3-MSMT-TR-67 Datasheet," 8 7 2018. [Online]. Saatavilla: <https://www.cui.com/product/resource/uj31-ch-3-msmt-tr-67.pdf>. [Viitattu 28.2.2019].
- [54] Interaction Design Foundation, The Basics of User Experience Design, Interaction Design Foundation, 2018.