

Taneli Härkönen

**SSD-massamuistin sulauttaminen ajoneuvotietokoneeseen**

Insinööri  
Kajaanin ammattikorkeakoulu  
Tekniikka ja liikenne  
Tietotekniikka  
Kevätlukukausi 2010



**Kajaanin  
ammattikorkeakoulu**

## OPINNÄYTETYÖ TIIVISTELMÄ

Koulutusala Tekniikka ja liikenne	Koulutusohjelma Tietotekniikka
Tekijä(t) Taneli Härkönen	
Työn nimi SSD-massamuistin sulauttaminen ajoneuvotietokoneeseen	
Vaihtoehtoiset ammattiopinnot Sulautetut järjestelmät	Ohjaaja(t) Jukka Heino, Olli Virmajoki
	Toimeksiantaja Sunit Oy / Pasi Junttila
Aika 1.4.2010	Sivumäärä ja liitteet 33
<p>Insinööriyön tavoitteena oli selvittää erilaisten massamuistien ominaisuuksien eroavaisuuksia ja toteuttaa sulautettu SSD-massamuisti ajoneuvotietokoneeseen. Työn toimeksiantajana oli Sunit Oy, joka on kajaanilainen ajoneuvotietokoneita suunnitteleva ja valmistava yritys.</p> <p>Insinööriyössä esitellään tietokoneen muistihierarkia sekä käydään läpi erilaiset muistiteknologiat ja rajataan niistä sulautettaviksi massamuisteiksi soveltuvat vaihtoehdot vertailtaviksi. Valituista vaihtoehdoista esitellään niiden yleisimmät rakenteet, liitynnät ja levyratkaisut. Kiintolevyjen ja SSD-levyjen ominaisuuksia vertaillaan teollisuuskäyttöön tarkoitetun SSD-levyn ja ajoneuvokäyttöön tarkoitetun kiintolevyn välillä. SSD-massamuistin sulauttamisesta esitellään sulauttamismahdollisuudet ja suunnitellun SSD-levyn toteutus ja rakenne lohkokaaviotasolla. Työssä pohditaan myös sitä, kuinka pitkälle SSD-massamuistin sulauttaminen voidaan viedä ja mitä hyötyä siitä on.</p> <p>Työn tuloksena saatiin selvitettyä sulautetun puolijohdemuistin edut verrattuna perinteisiin kiintolevyihin, kuten ympäristöolosuhteiden parempi sieto. Vertailutuloksista nähdään minkä takia SSD-massamuistit ovat syrjäyttämässä kiintolevyt. Työn yhteydessä suunniteltua SSD-levyä, jolla voidaan korvata Sunit Oy:n ajoneuvotietokoneen kiintolevy adaptereineen, on helppo lähteä kehittämään pidemmälle ja suunnittelemaan mahdollista seuraavaa versiota. SSD-levystä on nyt myös olemassa suunnittelusolu, jota voidaan käyttää muihin tarpeisiin tulevaisuudessa.</p>	
Kieli	suomi
Asiasanat	SSD, flash, sulauttaminen, muistiteknologiat
Säilytyspaikka	<input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun Kaktus-tietokanta <input checked="" type="checkbox"/> Kajaanin ammattikorkeakoulun kirjasto

School School of Engineering	Degree Programme Information Technology
Author(s) Taneli Härkönen	
Title Embedded SSD for an In-Vehicle Computer	
Optional Professional Studies Embedded Systems	Instructor(s) Mr Jukka Heino, Lecturer Mr Olli Virmajoki, Lecturer
	Commissioned by Sunit Oy/ Mr Pasi Junttila, R&D Manager
Date 1 April 2010	Total Number of Pages and Appendices 33
<p>The purpose of this Bachelor's thesis was to study differences between different mass storage technologies and design an embedded SSD device for the Sunit In-Vehicle Computer. This thesis was commissioned by Sunit Oy.</p> <p>The thesis introduces the hierarchy of the computer memory and examines different memory technologies. The best alternatives for the mass memory comparison of the memory technologies were selected from the thesis point of view. The mass memory comparison the between hard disk drives and SSDs was made with the selected devices. The merge of the SSD device in this thesis contains the opportunities provided by merging and the block diagram of the designed SSD. The thesis also presents the benefits that merging provides and how far merging can be taken.</p> <p>As a result of the thesis, there were found out the benefits of the semiconductor memories compared to the original hard disk drives and why the SSDs are better than the hard disk drives in most of the cases. The design of the SSD device can be reused for other embedded system purposes in the future.</p>	
Language of Thesis    Finnish	
Keywords	SSD, flash, embedded, memory technologies
Deposited at	<input checked="" type="checkbox"/> Kaktus Database at Kajaani University of Applied Sciences <input checked="" type="checkbox"/> Library of Kajaani University of Applied Sciences

## ALKUSANAT

Insinööriyön aihe oli haastava, mutta erittäin mielenkiintoinen ja opettavainen monessakin suhteessa. Asiantuntevasta avusta SSD-levyn suunnittelun parissa tahdon kiittää Sunit Oy:n Jussi Rytilahtea, sekä kirjallisen osan neuvonnassa ja suunnanantajana toiminutta lehtori Jukka Heinoa. Kiitokset myös kaikille muille, jotka ovat olleet osaltaan edistämässä työn valmistumista, sekä perheelleni tuesta ja ymmärryksestä.

Taneli Härkönen

Kajaani 1.4.2010

## SISÄLLYS

1 JOHDANTO	1
2 MUISTITEKNOLOGIOITA	2
2.1 Tietokoneen muisti	2
2.2 Haihtuvat muistit	4
2.3 Haihtumattomat muistit	6
2.3.1 Optiset	6
2.3.2 Magneettiset	7
2.3.3 Puolijohdemuistit	9
2.4 Haihtumattomien muistien yhteenveto	13
3 MASSAMUISTIT	14
3.1 Kiintolevyt	14
3.1.1 Kiintolevyn rakenne ja liitynnät	14
3.1.2 Kiintolevyratkaisut	17
3.2 SSD-levyt	18
3.2.1 SSD-levyn rakenne ja liitynnät	18
3.2.2 SSD-levyratkaisut	22
3.3 Kiintolevyn ja SSD-levyn ominaisuuksien vertailu	23
4 MASSAMUISTIN SULAUTTAMINEN AJONEUVOTIETOKONEESEEN	25
4.1 Massamuistien sulauttamismahdollisuudet	25
4.2 SSD-puolijohdemuistin sulauttaminen ajoneuvotietokoneeseen	27
5 SSD-LEVYN SULAUTTAMISELLA SAATAVAT HYÖDYT	29
6 YHTEENVETO	30
LÄHTEET	31

## LYHENNELUETTELO

BGA	(Ball Grid Array) Juotospaloilla toteutettu pintaliitostekniikka
CE	(Chip Enable) Piirin aktivointipinni tai -linja
CMOS	(Complimentary Metal-Oxide-Semiconductor) Eräs mikropiirien valmistustekniikka
DDR2	(Double Data Rate 2) Datalinja, jossa data liikkuu kaksinkertaisella taajudella kellosignaaliin nähden
DRAM	(Dynamic Random Access Memory) Datan virkistämistä vaativa RAM-muisti
ECC	(Error Correction Code) Datan virheen korjauksessa käytetty menetelmä
EEPROM	(Electrically Erasable Programmable ROM) Sähköisesti tyhjennettävä ja ohjelmoitava muisti
EPRML	(Extended Partial Response, Maximum Likelihood) Eräs kiintolevyn datan koodaustapa
EPROM	(Erasable Programmable ROM) Sähköisesti ohjelmoitava ja UV-valolla tyhjennettävä, uudelleenohjelmoitava muisti
FM/MFM	(Frequency Modulation / Modified Frequency Modulation) Eräs kiintolevyn datan koodaustapa
FPGA	(Field-Programmable Gate Array) Ohjelmoitava logiikkatekniikka
FRAM	(Ferroelectric Random Access Memory) Ferrosähköiseen muistisoluun perustuva muistiteknologia
MLC	(Multi-Level Cell) Flash-muistitekniikka, jossa yhteen hilaan voidaan tallettaa useampi bitti
MOSFET	(Metal-Oxide-Semiconductor Field-Effect Transistor) Eräs transistorityyppi
MRAM	(Magnetoresistive Random Access Memory) Magnetoresistiiviseen muistisoluun perustuva muistiteknologia
NAND	(Not-And) Invertoitu AND-portti tai samankaltaiseen tekniikkaan perustuva flash-muisti
NOR	(Not-Or) Invertoitu OR-portti tai samankaltaiseen tekniikkaan perustuva flash-muisti
NVRAM	(Non-Volatile Random Access Memory) Haihtumaton muistityyppi, jonka perustana on jokin haihtuva muisti

ONFI	(Open Nand-Flash Interface) NAND-flash-muistien valmistajien yhteensopivuuden parantamiseksi tehty määrittely
OTP-EPROM	(One Time Programmable EPROM) EPROM-piiri ilman tyhjennysikkunaa
PATA	(Parallel ATA) Rinnakkaismuotoinen väylä tietokoneen massamuistien liittämiseksi emolevylle
PRAM	(Phase-change Random Access Memory) Muistisolun faasimuutokseen perustuva muistiteknologia
PRML	(Partial Response, Maximum Likelihood) Eräs kiintolevyn datan koodaustapa
PROM	(Programmable ROM) Ohjelmoitava lukumuisti
RLL	(Run Length Limited) Eräs kiintolevyn datan koodaustapa
ROM	(Read-Only Memory) Lukumuisti
SATA	(Serial ATA) Sarjamuotoinen väylä tietokoneen massamuistien liittämiseksi emolevylle
SCSI	(Small Computer System Interface) Eräs tietokoneen väylä oheislaitteiden liittämiseksi
SLC	(Single-Level Cell) Flash-muistiteknikka, jossa yhteen hilaan voidaan tallettaa yksi bitti
SRAM	(Static Random Access Memory) Kiikkupiireillä toteutettu haihtuva muistityyppi
SSD	(Solid State Disk/Drive) Massamuisti, joka on toteutettu täysin puolijohdemuisteilla
SoC	(System on Chip) Yhdelle piirille suunniteltu järjestelmä
USB	(Universal Serial Bus) Tietokoneiden ohjeislaitteille kehitetty sarjaväylä
ZBR	(Zone Bit Recording) Eräs kiintolevyn sektoreiden järjestelytapa

## 1 JOHDANTO

Tämän insinööriyön tavoitteena on saada selvitettyä SSD-levyn sulauttamisen edut ja mahdollisuudet. Työn yhteydessä suunniteltiin Sunit Oy:n ajoneuvotietokoneeseen sopiva sulautettu SSD-massamuisti.

Sunit Oy on vuonna 1996 perustettu kajaanilainen ajoneuvotietokone-, telematiikka- ja AVL-laitteita suunnitteleva, valmistava ja markkinoiva yritys. Sunit Oy:ssä on useiden vuosien kokemus vaativien olosuhteiden laitesuunnittelusta.

Insinööriyön kirjallisessa osassa keskitytään muistitekologioihin ja niiden vertailuun. Massamuistitekologioista pyritään vertailemaan teknologioiden ominaisuuksia ja pohtimaan niiden sulauttamismahdollisuuksia.

Sunit Oy:n puolesta tavoitteena on saada sulautettuihin laitteisiin tarkoitettu suunnittelutason rakennussolu, joka korvaa kiintolevyn. Varsinaisen SSD-levyn toteuttamisesta käsitellään tässä työssä kuitenkin ainoastaan sulauttamisen mahdollisuudet ja suunnitellun levyn rakenne lohkokaaviotasolla.



## 2 MUISTITEKNOLOGIOITA

Muistiteknologioiden tutkiminen tässä työssä on toteutettu massamuistisovelluksia silmällä pitäen ja niiden sulauttamismahdollisuuksia ajatellen. Muistiteknologioita esiteltäessä on myös mietitty niiden soveltuvuutta työn aiheen mukaiseen tarkoitukseen eli massamuisteiksi ja aivan erityisesti sulautetuiksi massamuisteiksi.

### 2.1 Tietokoneen muisti

Muisti on tietokoneen osa, johon voidaan tallentaa dataa ja lukea se sieltä. Niin kauan kuin tietokoneet ovat käsitelleet dataa, ne ovat tarvinneet muistia. Aluksi muistit olivat fyysisesti kookkaita ja datatiheys oli heikkoa verrattuna nykyisiin muisteihin. Nykyisin muistit on toteutettu lähes poikkeuksetta puolijohteiden, optisten tai magneettisten tallennustekniikoiden avulla.

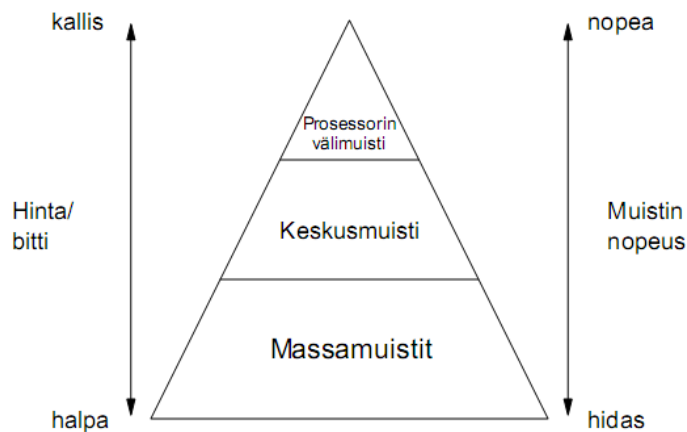
Muistien muuttuessa täysin elektronisiksi ratkaisuiksi ovat perusvaatimukset pysyneet aina tähän päivään saakka samoina. Niin sanotun täydellisen muistin ominaisuuksia ovat:

- halpa bitti/hinta-suhde - ihannetapauksessa lähes ilmainen
- korkea muistikapasiteetti - ihannetapauksessa ääretön
- vähäinen tehonkulutus - ihannetapauksessa olematon
- nopea saantiaika - ihannetapauksessa olematon
- pitkä datan säilyvyysaika ilman tehonsyöttöä - ihannetapauksessa ääretön [1, s. 1.]

Mikään muistitekniikka ei ole tähän mennessä kuitenkaan vastannut täysin näihin kaikkiin täydellisen muistin vaatimuksiin, vaan kaikki ovat joltain osin jääneet puutteellisiksi [1, s. 2]. Käytännössä muistien tulisi kestää myös fyysistä rasitusta ja vaativia ympäristöolosuhteita.

## Mikrotietokoneen muistihierarkia

Pääosin muistit voidaan jakaa haihtuviin (volatile) ja haihtumattomiin muisteihin (non-volatile). Mikrotietokoneen muistihierarkiassa nämä muistit jakautuvat siten, että alimpana ovat haihtumattomat muistit ja päällimmäisenä haihtuvat muistit. Mikrotietokoneen muistihierarkia on esitelty kuvassa 1.



Kuva 1. Muistihierarkia. [2.]

Muistihierarkiassa nopeus ja hinta kasvavat mentäessä ylöspäin, kun taas kapasiteetti kasvaa mentäessä alaspäin. Haihtumattomia muisteja tässä hierarkiassa ovat massamuistit.

Välimuisti, joka nykyisissä tietokoneissa on yleensä integroituna prosessoriin, nopeuttaa prosessorin ja keskusmuistin tai prosessorin ja massamuistin välistä datan hakuaikaa. Välimuisti on tavallisesti SRAM-muistia. Prosessorin sisällä on myös eräänlaisia muistipaikkoja, joita kutsutaan rekisteriksi ja jotka ovat vielä sisäistä välimuistiakin korkeammalla tasolla hierarkiassa [3, s. 22]. Nykyisissä prosessoreissa nämä rekisterit ovat kuitenkin harvemmin enää ohjelmoijien saatavilla.

Keskusmuisti on tavallisesti nykyaikaisissa tietokoneissa DRAM-muistia, kuten DDR2-muistia. Tämä johtuu siitä, että DRAM-muisti on huomattavasti SRAM-muistia halvempaa, vaikkakin hitaampaa.

Massamuistit ovat suurien datamäärien tallentamiseen tarkoitettuja muistivälineitä. Tällaisia muisteja ovat esimerkiksi kiintolevyt ja USB-muistitikut.

## 2.2 Haihtuvat muistit

Haihtuvia muisteja ei tässä työssä esitellä peruseriaatteita ja tärkeimpiä sovelluksia tarkemmin, koska ne eivät sovellu massamuisteiksi. Haihtumattomista muisteista esitellään ja vertaillaan tärkeimmät sekä työn kannalta mielenkiintoisimmat.

Haihtuvat muistit menettävät tietonsa sähköjen katketessa, joten niitä ei voida tästä syystä käyttää varsinaisina datan pitkäaikaisina tallennuspaikkoina. Haihtuvia muisteja käytetäänkin tietotekniikassa väli- ja keskusmuisteina, joihin prosessori lukee tiedon varsinaisesta datamuistista käsittelyä ennen tai käsittelyn ajaksi. Niiden hyvänä ominaisuutena voidaan pitääkin nopeutta, jota prosessorin käyttämältä muistilta vaaditaan.

Haihtuvia perusmuistityyppejä ovat SRAM- ja DRAM-puolijohdemuistit. SRAM-muisti on toteutettu kiikkupiireillä, jolloin siihen tallennettua dataa ei tarvitse virkistää, kuten DRAM-muistia, jonka muistitekniikka perustuu kondensaattoreihin. SRAM-muisti on suhteellisen nopeaa, mutta yhden bitin tallentamiseen menee piiriltä fyysisesti enemmän tilaa kuin DRAM-tekniikalla. SRAM-bitin kiikkuun tarvitaan noin kuusi transistoria, kun DRAM-bitille riittää yksi transistori ja kondensaattori. SRAM-muisti on hyvä muistityyppi silloin, kun käyttömuistin tarve on satoja kilotavuja tai vähemmän. DRAM-muisti on sopivampi silloin, kun käyttömuistin tai keskusmuistin tarve on useita satoja kilotavuja tai enemmän. [1, s. 2.][3, s. 39.]

Haihtuvista muisteista on olemassa myös haihtumattomia muistisovelluksia. Tällaisia muisteja kutsutaan NVRAM-muisteiksi. NVRAM-muistit ovat joko paristovarmennettuja tai EEPROMilla varmistettuja SRAM-muisteja. Paristovarmennetuissa NVRAM-muisteissa on SRAM-muistin kotelon sisään integroitu paristo, jonka avulla tieto voi säilyä yli kymmenen vuotta ilman ulkoista syöttöjännitettä. EEPROMilla varmistetuissa NVRAM-muisteissa tiedot tallennetaan EEPROM-muistiin sähköjen katkeamisen jälkeen, jolloin piiri käyttää tehonsyötön kondensaattoreiden varausta muistin SRAM-muistista EEPROM-muistiin kopioimisen aikaiseen tehontarpeeseen. [3, s. 39.]

Huolimatta nopeudesta ja rajoittamattomista kirjoituskerroista, haihtumattomista NVRAM-muisteista ei ole kannattavaa rakentaa massamuistia, koska NVRAM-muistit ovat kalliita ja niiden muistikapasiteetti on huono verrattuna niiden fyysiseen kokoon. Fyysistä kokoa kasvattaa SRAM-tekniikan toteutuksesta johtuva usean transistorin käyttö yhtä bittiä kohden sekä pariston tai varmistusmuistin lisääminen samaan koteloon. DRAM-muistien käyttö paristovarmistettuna NVRAM-muistina ei ole mahdollista, johtuen DRAM-muistin virkistykseen tarpeesta [3, s. 40].

Sulautetuissa sovelluksissa NVRAM-tyyppiset massamuistit veisivät paljon tilaa, mikä ei ole sulautetussa järjestelmässä yleensä toivottavaa. Pitkän aikajänteen datasäilyvyys ei olisi myöskään hyvä, jos data katoaa paristojen tyhjentäessä.

## 2.3 Haihtumattomat muistit

Haihtumattomat muistit pitävät datan muistissa myös tehonsyötön katkeamisen jälkeen. Haihtumattomien muisteja ei ole yleensä tarkoitettu tietokoneen työskentelymuistiksi eli käyttö- ja keskusmuistiksi, vaan datan pitkäaikaiseen ja toissijaiseen säilyttämiseen. Tietokoneen prosessori ei osaa suoraan käyttää tässä muistissa olevaa dataa, vaan se joutuu ottamaan sen käsiteltäväksi keskusmuistiin ja kirjoittamaan sen uudestaan samaa kautta haihtumattomaan muistiin.

Haihtumattomat muistit voidaan ryhmitellä niiden tekniikan perusteella optisiin, magneettisiin ja puolijohdemuisteihin.

### 2.3.1 Optiset

Optiset muistit ovat levyjä, jotka on valmistettu muovista ja joiden sisällä on kerros heijastavaa materiaalia, johon data on kirjoitettuna. Datan kirjoittaminen tapahtuu laserin avulla polttamalla tai prässäämällä levy muotin avulla. Levyjen dataa luetaan levyn pyöriessä erityisen lukupään avulla, jossa on laser ja linssi. Lukupää muuttaa levytä heijastuneen valon sähköiseksi signaaliksi, valon voimakkuuden mukaan.

Tällaisia muistitekniikoita ovat esimerkiksi CD, DVD ja Blu-ray. CD-levyjen perustiedonsiirtonopeus on 150 kt/s (1x) ja maksimikapasiteetti 680 Mt. DVD-levyillä vastaavat arvot ovat 1,35 Mt/s (1x) ja 17 Gt. Blu-ray on tekniikoista uusin, ja sen perustiedonsiirtonopeus on 4,5 Mt/s (1x) ja maksimikapasiteetti 50 Gt (Dual layer). [4, s. 108-112.][5.]

Vaikka optiset muistitekniikat ovat nykyisin jo hyviä massamuisteja kapasiteetiltaan, ei niistä ole vielä kunnollisiksi tietokoneen ensisijaisiksi massamuisteiksi hitautensa ja vähäisen uudelleen kirjoitettavuutensa vuoksi. Lisäksi optiset tallennusmediat ovat melko herkkiä pölylle, lialle ja mekaanisille vioille, kuten naarmut ja kolhut.

### 2.3.2 Magneettiset

Magneettisissa muisteissa data tallennetaan jollekin magneettiselle materiaalille, usein magneettisuuden polariteettia vaihtamalla. Magneettisia muistivälineitä ovat muun muassa magneettinauhat, levykkeet ja kiintolevyt. Hitautensa vuoksi magneettinauhat eivät ole nykyisin juuri muussa käytössä, kuin datan varmuuskopioinnissa.

#### Magneettiset levymuistit

Magneettisia levymuisteja ovat levykkeet ja kiintolevyt. Levykkeiden ja kiintolevyjen ero on siinä, että levyke voidaan irrottaa asemastaan, kun taas kiintolevyssä levy on kiinteästi kiinni. Levykkeitä, kuten esimerkiksi niin sanottuja diskettejä, ei nykyisin enää ole paljoa käytössä pienen muistikapasiteetin takia, joka disketeille on tyypillisesti vain 1,44 Mt. On olemassa myös suurempi muistikapasiteettisia levykkeitä, kuten Zip-levyt.

Levykkeet eivät ole enää kovinkaan yleisiä, eivät edes niistä uusimmat keksinnöt. Monissa paikoissa, joissa ennen käytettiin levykkeitä, on nykyisin siirrytty flash-puolijohdetekniikalla toteutettuihin muistikortteihin tai pieniin kiintolevyihin.

#### Kiintolevyt

Kiintolevy ja erityisesti Winchester-tyyppinen kiintolevy on yleisin nykyaikaisen tietokoneen ensisijainen massamuisti. Kiintolevyjä kutsutaan yleisesti myös kovalevyiksi.

Kiintolevyssä data on tallennettuna yhdelle tai useammalle lasi- tai alumiinikiekolle, jotka on pinnoitettu magneettisella materiaalilla. Datan lukeminen ja kirjoittaminen tapahtuu akselinsa ympäri pyörivän levyn pinnan päällä kiitävien luku- ja kirjoituspäiden avulla. Usein levyjen molempia puolia voidaan käyttää datan tallentamiseen. [4, s. 99–100.]

Kiintolevyistä on olemassa monenlaisia variaatioita niin fyysisen kokonsa kuin datakapasiteetinkin suhteen. Pienempiä levyjä on voitu käyttää tehokkaasti myös sulautetuissa sovelluksissa. Tällaisista hyvänä esimerkkinä ovat tallentavat digiboksit ja mediasoitimet.

## MRAM

MRAM-muistit ovat uusia, hyvin vartenotettavia vaihtoehtoja haihtumattomiksi muisteiksi. Niissä data on tallennettuna magneetoresistiiviseen muistisoluun. Pääpiirteissään solu koostuu kahdesta ferromagneettisesta kerroksesta, joista toisen magneettisuuden napaisuutta voidaan muuttaa ulkoisen magneettikentän eli käytännössä johtimessa kulkevan virran avulla. Näiden kerroksien välissä on eristerkerros, jonka magneetoresistiivisyys muuttuu riippuen siitä, ovatko kerroksien magneettikentät samansuuntaisia vai vastakkaissuuntaisia. Bitit luetaan pienen tunnusteluvirran avulla. Magneetoresistiivisyys määrää, onko bitti ykkönen vai nolla. [6.]

MRAM-muistien eduksi voidaan katsoa niiden rajoittamattomat luku- ja kirjoituskerrat, nopeus, matalat käyttöjännitteet ja hyvä muistitiheys. [6.]

Varhainen samantyylinen teknologia olivat kuplamuistit (bubble memory), joissa muistisolussa olevaa magneettista substraattia liikuteltiin magneettikenttien avulla. Kuplamuistien menestys loppui kuitenkin kiintolevyjen yleistymiseen ja kuplamuistien toimintaolosuhteiden vaatimuksiin.

MRAM-muisteista ei ole markkinoilla vielä suurilla muistikapasiteeteilla olevia piirejä. Esimerkiksi Everspin Technologiesin MRAM-muistipiirin MR4A08B muistikapasiteetti on vain 16 Mb. Muistista tuli mallikappaleita saataville vuonna 2009 [7].

### 2.3.3 Puolijohdemuistit

Haihtumattomat puolijohdemuistit ovat ajan saatossa kehittyneet kertaohjelmoitavista ROM-muisteista nykyisiin flash-muisteihin. Varteenotettavia massamuistisovelluksia ei varhaisimmista muistityypeistä löydy, mutta ne on syytä esitellä, jotta voidaan hahmottaa, mistä tämänhetkiset puolijohdemuistit ovat kehittyneet.

#### ROM

Maskattava ROM-muisti on varsinaisesti pelkkää lukumuistia. ROM-muisti ohjelmoidaan valmistusvaiheessa niin sanotun valmistusmaskin avulla. Ohjelmoitua dataa ei voida enää jälkeinpäin muuttaa millään tavalla. ROM-muisteja käytetään vain silloin, kun sitä tarvitsevaa laitetta valmistetaan suuria määriä massatuotannossa. Tavallisesti muistikennona toimii diodi, joka maskauksessa poltetaan poikki tai jätetään polttamatta. [3, s. 37.]

#### PROM

Kertaohjelmoitava ROM-muisti eli PROM-muisti voidaan ohjelmoida vain yhden kerran. Erona maskattavaan ROM-muistiin on se, että piiri toimitetaan tyhjänä ja käyttäjä voi itse ohjelmoida sen. Kertaalleen jo ohjelmoitua piiriä ei voida sen jälkeen enää ohjelmoida uudelleen. Muistikennoina toimivat transistorit, joita kutsutaan sulakkeiksi (fuse). Kaikki sulakkeet ovat alussa ehjiä, mikä vastaa jotain loogista tilaa, esimerkiksi nollaa. Ohjelmoitaessa jotkin sulakkeet poltetaan rikki ja näin niiden kennojen looginen tila muuttuu ykköseksi. [3, s. 37.]

#### EPROM

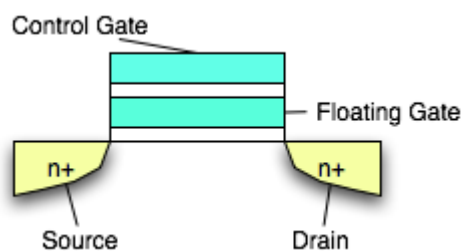
Tyhjennettävä ohjelmoitava ROM-muisti, EPROM-muisti, on muistipiiri, joka on mahdollista tyhjentää ja kirjoittaa uudelleen. EPROM-muisti voidaan tyhjentää ultraviolettivalon avulla piirissä olevan ikkunan kautta. Tyhjennyksen jälkeen piiri on täysin tyhjä ja uudelleen kirjoitettavissa. Piirien muistikapasiteetti ei ole yleensä kovin suuri, maksimissaan megabittien luokkaa. [3, s. 38.]



Ohjelmointi tapahtuu erillisellä ohjelmointilaitteella. Käytössä olevan piirin ikkuna suljetaan paperitarralla, jotta se ei tyhjene tahattomasti. Ikkunattomiakin EPROM-piirejä on olemassa. Niitä kutsutaan OTP-EPROM-muisteiksi, ja ne voidaan ohjelmoida ainoastaan kerran. Ikkunattomuus tekee piireistä edullisia, ja niitä käytetäänkin yleensä sen jälkeen, kun ohjelmaa ei tarvitse enää kehittää tai muuttaa ja piiri asennetaan valmiiseen laitteeseen lopullisesti. [3, s. 38.]

EPROM-muistien muistikennona toimii MOSFET-eristehilakanavatransistori (floating gate MOSFET), jonka eristetyssä hilassa (floating gate) joko on varaus tai ei ole. Ohjelmoitaessa eristettyyn hilaan syötetään tai ollaan syöttämättä varausta eristeen läpi. Varaus siirtyy kanavasta (source - drain) eristetylle hilalle ohjelmointijännitteen ja erilaisten tunnelointi-ilmiöiden seurauksena. Kun muistikennon eristettyhila on varattu, kennoon on tallennettuna ”0”-tila. Tyhjän eristehilan sisältävä kenno on puolestaan ”1”-tilassa. [8, s. 230.][3, s. 46.]

Samaa tekniikkaa hyödynnetään EEPROM- ja flash-muisteissa. Eristehilakanavatransistorin rakenne on esitettyinä kuvassa 2.



Kuva 2. Eristehilakanavatransistorin rakenne. [9.]

## EEPROM

Sähköisesti tyhjennettävä ohjelmoitava ROM-muisti, EEPROM- tai E<sup>2</sup>PROM-muisti, on muistipiiri, joka on mahdollista tyhjentää ja uudelleen kirjoittaa ilman, että sitä irrotetaan piirilevyiltä. EEPROM-muisti voidaan ohjelmoida ja tyhjentää muistipaikka kerrallaan, jolloin muu datasisältö ei muutu. [8, s. 230–231.]

EEPROM-muisti soveltuu hyvin sellaisen datan tallennukseen, jossa muutokset ovat pieniä, esimerkiksi yhteen tavuun kohdistuvia. EEPROM-muistia käytetäänkin yleensä parametrien, laitteistokonfiguraatioiden tai muun sellaisen tallentamiseen. [3, s. 38.]

## Flash

Flash-muisti on tämän päivän tärkein ja yleisin puolijohdemuistityyppi. Sen käyttöä sovelletaan hyvin monessa paikassa. Siihen perustuvat muun muassa mediasoittimien ja kameroiden muistikortit, USB-muistitikut, matkapuhelimien sisäiset muistit, mikro-ohjainten ohjelmamuistit ja kiintolevyn korvaavat SSD-levyt.

Flash-muistityypit jaetaan kahteen kategoriaan, NOR- ja NAND-flash. NAND-flash on muistitiheydeltään paljon tiheämpää kuin NOR-flash. Suorituskyvyltään molemmat ovat lähes samanlaisia, mutta NOR-flashin tyhjentäminen kestää huomattavasti pidempään (satoja millisekunteja) kuin NAND-flashin (millisekunteja). NOR-flashin etuna voidaan pitää sen tavukohtaista muistiosoitusta, kun taas NAND-flashin muistiosoitus voidaan tehdä vain yhdelle sivulle (page). NOR-flasheja käytetäänkin yleensä vain alkukäynnistysmuisteina, ohjelmamuistina tai järjestelmissä, joissa dataa kirjoitetaan vain vähäisiä määriä. [10.]

NAND-flashin muistilohko koostuu sivuista, jotka ovat osa suurempaa lohkoa (block). NAND-flashin tyhjentäminen tapahtuu yleensä lohko kerrallaan, lukeminen ja kirjoittaminen tapahtuvat yleensä sivu kerrallaan.

Lohkojen avulla suurempien tietomäärien kirjoittaminen ja lukeminen on nopeampaa. Muistilohkojen uudelleen tyhjennys- ja kirjoituskerrat ovat sadasta tuhannesta miljoonaan, riippuen käytetystä tekniikasta. Koska NAND-flash tarjoaa suuremman muistitiheyden ja nopeamman kirjoitusnopeuden kuin NOR-flash, on se yleistynyt massamuistisovelluksissa huomattavasti enemmän. [10.]

## Flash-muistin kilpailijat

Flash-muistin heikkouksiksi voidaan katsoa sen rajoitetut tyhjennys- ja kirjoituskerrat. Flash-muistit ovat vielä halpoja valmistaa moneen muuhun tekniikkaan nähden, ja niiden muistitiheys on hyvä. Flash-muistille on kehitteillä varteenotettavia kilpailijoita, kuten PRAM-, FRAM ja MRAM, joista jo aiemmin esiteltiin MRAM.

## PRAM

PRAM-muisti perustuu muistisolun faasimuutokseen. Muistisolu muodostuu happiryhmän molekyyliä sisältävästä lasista (chalcogenide glass). Faasimuutos tarkoittaa aineen olomuodon muuttumista toiseksi. PRAM-muistissa nämä olomuodot ovat amorfinen (amorphous) ja kiteinen (crystalline). Amorfinen tila vastaa loogista ”0”-tilaa ja kiteinen puolestaan loogista ”1”-tilaa. Tiloja muutetaan kuumentamalla solua nopeasti hyvin kuumaksi, jolloin sen jäähtyessä nopeasti jää soluun amorfinen tila. Kiteiseksi rakenne saadaan lämmittämällä sitä tasaisesti ja hieman pidempään. [11.]

PRAM-muistin etuna on, että sitä ei tarvitse tyhjentää uudelleen kirjoitusta varten, mutta sen muistitiheys häviää vielä flash-muistille. Lisäksi faasimuutos on herkkä suurille lämpötiloille, kuten juottamisesta aiheutuvalle lämmölle. [11.]

## FRAM

FRAM-muisti perustuu ferrosähköisiin kondensaattoreihin. Niissä muistisoluna on kondensaattori, jonka eristemateriaalissa on ferrosähköistä ainetta. Rakenteeltaan FRAM-muisti muistuttaa siten DRAM-muistia. Ferrosähköinen aine eristemateriaalissa muuttaa polariteettiaan sähkökentästä riippuen ja pitää tilansa myös sähköjen katkeamisen jälkeen. [12.]

FRAM-muistin edut ovat pitkälti samat kuin PRAM-muistilla, mutta sekin jää muistitiheydessään jälkeen flash-muistille.

## 2.4 Haihtumattomien muistien yhteenveto

Haihtumattomista muistiteknoologioista tätä työtä silmällä pitäen ovat olleet hyviä vaihtoehtoja kiintolevyjen lisäksi NAND-flash-muistit sekä MRAM-, PRAM- ja FRAM-muistit.

NAND-flash-muistit sekä MRAM-, PRAM- ja FRAM-muistit ovat kaikki integroituina CMOS-valmistusprosesseihin. Tämä tarkoittaa siis sitä, että muistisolun on integroitu tavalla tai toisella puolijohteen sisään ja sitä käsitellään muistina jollain erityisellä menetelmällä.

MRAM-muisteissa menetelmä on muuttaa solun magnetoresistiivisyyttä, joka voidaan lukea tunnusteluvirran jännitehäviöstä [6]. PRAM-muisteissa hyödynnetään muistisolun resistanssia, mutta resistiivisyyteen vaikuttaa muistisolun materiaalin olomuoto [11].

FRAM-muisteissa hyödynnetään kondensaattorin eristemateriaaliin lisätyn ferrosähköisen aineen polariteettia, joka jää asetettuun tilaansa sähköjen katkeamisen jälkeenkin. Samoin kuin MRAM- ja PRAM-muisteissa tilat luetaan pienen tunnusteluvirran avulla, mutta tila voi muuttua lukemisen seurauksena, jolloin luettu tila täytyy kirjoittaa uudestaan. [13.]

Koska MRAM-, PRAM- ja FRAM-muisteista ei ole olemassa vielä varteenotettavia massamuistisovelluksia, jotka voisivat korvata kiintolevyn tai NAND-flash-pohjaisen massamuistin, ei näitä muistityyppejä voida ottaa tarkasteltavaksi tähän työhön.

Se mikä tekee NAND-flash-muistista tällä hetkellä parhaan ja suosituimman muistisovelluksen, on sen valmistamisen yksinkertaisuus ja edullisuus. NAND-flash on paras mahdollinen muisti niin kauan, kunnes jokin sen kilpailevista muistiteknoologioista saadaan valmistettua yhtä tiheään ja edullisesti.

Tämän hetken massamuisteissa on olemassa ensisijaisiksi tietokoneen massamuisteiksi soveltuvia sovelluksia ainoastaan NAND-flash-muisteissa ja kiintolevyissä, joten ne otetaan tässä työssä lähempään tarkasteluun.

### 3 MASSAMUISTIT

Vaikka tällä hetkellä kiintolevyt ovat yleisimpiä tietokoneiden päämassamuisteja, ovat niiden korvaajaksi nousemassa, yleensä NAND-flash-pohjaisiin muistiratkaisuihin pohjautuvat SSD-levyt. Tässä luvussa esitellään kiintolevyjen perusrakenne, liitynnät ja levyratkaisut. SSD-levyjen osalta esitellään NAND-flash-muisti edellistä lukua tarkemmin sekä SSD-levyjen rakenne ja toteutusratkaisut. Lisäksi vertaillaan vertailtavaksi valittujen kiintolevyn ja SSD-levyn ominaisuuksia toisiinsa.

#### 3.1 Kiintolevyt

Kiintolevy on tietokoneen ensisijainen massamuisti, johon käyttöjärjestelmä, kaikki ohjelmat ja käyttäjän data on tallennettuna. Kiintolevyn etuna on suuri muistikapasiteetti, ja sen hinta per tallennettu tavu on huomattavasti edullisempi SSD-levyyn verrattuna.

##### 3.1.1 Kiintolevyn rakenne ja liitynnät

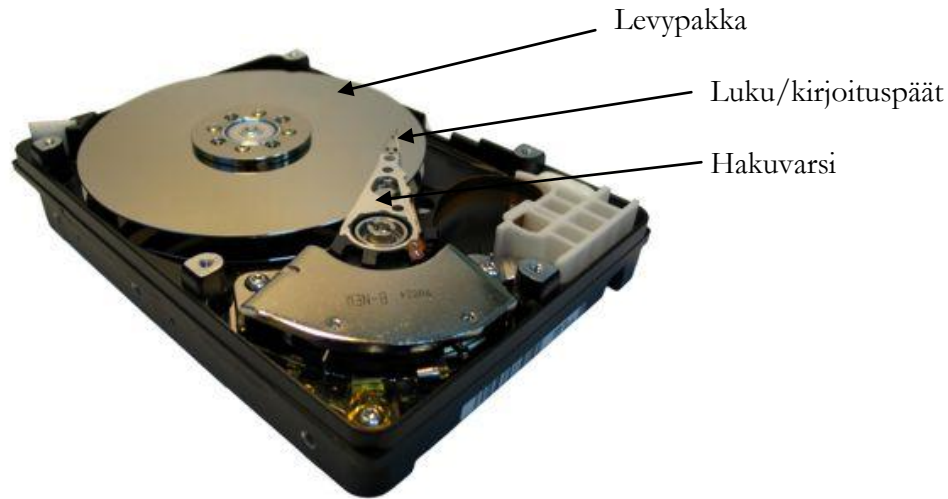
Nykyaikainen kiintolevy on umpilevymuisti, jonka levypakka ja lukupäät sijaitsevat pölytiivissä kotelossa. Umpilevyjä kutsutaan myös Winchester-levyiksi.

Winchester-nimi sai alkunsa ensimmäisestä IBM:n umpilevyasemasta, kun kehitysinsinöörit kutsuivat IBM 3340 -asemaa 30-30:ksi, koska siinä oli kaksi kolmenkymmenen megatavun levyä. 30-30 on myös Winchesterin eräs kalipeeri, josta nimitys sai alkunsa. [14.]

##### Rakenne

Kiintolevyn levyt ovat joko lasisubstraattia tai alumiinia. Lasisubstraattista valmistetut levyt ovat parempia, koska niistä voidaan valmistaa ohuempia ja siten myös kevyempiä levyjä. Ohuemman levyn etuja ovat nopeammat käynnistysajat ja pienempien sähkömoottoreiden tarve. Lisäksi lasin lämpölaajeneminen on vähäisempää kuin alumiinin. [3, s. 100.]

Levyt ovat kiinnitettyinä moottoriin, jonka pyörimisnopeus on 3200–15000 kierrosta minuutissa. Tiedot tallennetaan ja luetaan levyn päällä liikkuvien lukupäiden avulla. [3, s. 100.] Kiintolevyn liikkuvat osat on esitelty kuvassa 3.

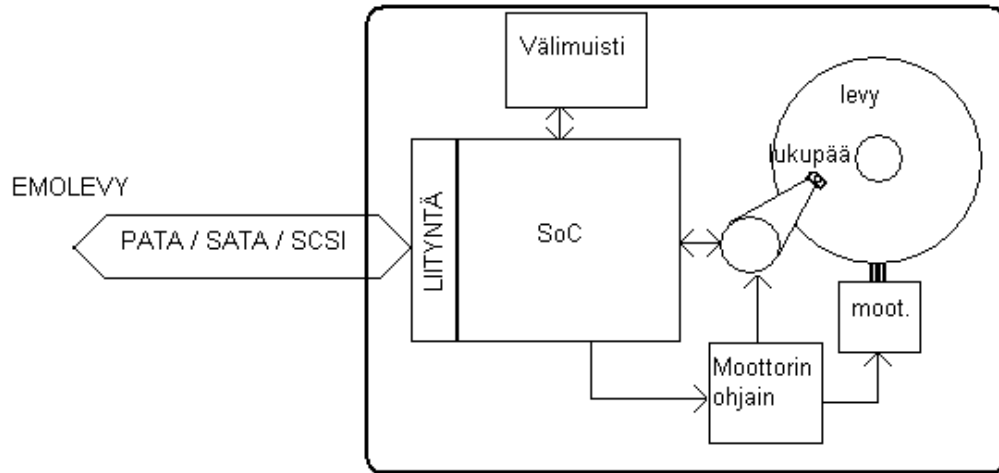


Kuva 3. Kiintolevyn levyt, hakuvarsi ja lukupäät. [15.]

Levy muisti muodostuu urista (track), ja päällekkäiset urat muodostavat sylinterin (cylinder). Kukin ura sisältää sektoreita (sector), jotka muodostuvat biteistä. ZBR-tekniikalla toteutetuissa levyissä sektorit ovat yhtä pitkiä tallennusosioita, sijaitsevatpa ne sitten levyn sisä- tai ulkokehällä. Sektoreiden tallennuskapasiteetti on yleensä 512 tavua, mutta muitakin kokoja on olemassa. Sektori on pienin mahdollinen käsiteltävä muistiosio levyllä, joten se luetaan tai kirjoitetaan aina kerralla kokonaan, vaikka käsiteltävä datasisältö olisikin sektorin kokoa pienempi. [3, s. 101.]

Data on tallennettu levyille jollakin koodausmenetelmällä. Tällaisia koodausmenetelmiä ovat muun muassa FM/MFM, RLL, PRML ja EPRML. FM/MFM ja RLL pyrkivät tulkitsemaan tietoa diskreetteinä pulsseina, mutta PRML-menetelmässä käsitellään kovalevyn pinnan magnetisoinnin synnyttämän analogisen signaalin informaatiota. PRML parantaa pakkaustiheyttä RLL-tekniikkaan verrattuna 40 %. EPRML-koodaus on parannettu versio PRML-koodauksesta, ja se tuo vielä 70 % paremman pakkaustiheyden perinteiseen PRML-koodaukseen verrattuna. [3, s. 100.] PRML ja EPRML, tai niiden seuraajat, ovat yleisimpiä koodaustapoja nykyaikaisissa kiintolevyissä.

Kiintolevyt sisältävät integroidun ohjauslogiikan, joka huolehtii datan koodaamisesta ja dekodeerimisesta levyille sekä levyn moottorin ja hakuvarren ohjauksesta. Usein kontrollerit ovat SoC-piirejä, jotka sisältävät logiikan kaikkeen ohjaukseen. Kuvassa 4 on esitelty pelkistetty kiintolevyn lohkokaavio.



Kuva 4. Kiintolevyn tyypillinen lohkokaavio.

#### Liitännät

Nykyaikaisissa kiintolevyissä yleisimmät liitännät ovat PATA (rinnakkais-ATA), SATA (sarja-ATA), ja SCSI. Näistä PATA-levyt ovat hiljalleen väistymässä, kun SATA-levyt yleistyvät.

Viimeisimpien PATA-liityntöjen nopeudet ovat 100 Mt/s tai 133 Mt/s. SATA-liitynnästä on olemassa tällä hetkellä kolme nopeusluokkaa: SATA I, II ja III. Näistä SATA I:n nopeus on 150 Mt/s, SATA II:n 300 Mt/s, ja uusimman eli SATA III:n nopeus on 600 Mt/s. PATA-liityntää voidaan laittaa kaksi laitetta samaan väylään, kun SATA-väylää ainoastaan yksi. SCSI-liityntä on yleinen servereissä, mutta tavallisissa PC-laitteissa se on harvinainen näky. Ultra-320 SCSI -liitynnän nopeus on 320 Mt/s, ja siihen voidaan liittää, jopa 16 levyä.

### 3.1.2 Kiintolevyratkaisut

Kiintolevyjä valmistetaan useassa eri kokoformaattissa. Kokoluokat on ilmoitettu yleensä kiintolevyjen ulkomitan halkaisijana, joka ilmaistään tuumina (esimerkiksi 3,5”). Tämän hetken yleisimmät kokoformaatit ovat 3,5” ja 2,5” levyt. Pienempiäkin levyjä on olemassa, ja niitä käytetään yleensä sulautetuissa laitteissa, kuten mediasoittimet tai videokamerat. Tällaiset levyt ovat kooltaan 1,8” tai sitä pienempiä. Erilaiset, myös hieman historiallisemmat levyratkaisut ovat esiteltyinä kuvassa 5. Kuvassa ovat ylhäältä alas ja vasemmalta oikealle lueteltuna 16”, 8”, 5,25”, 3,5”, 2,5” ja 1,8” kiintolevyt, suojakotelot aukaistuna.



Kuva 5. Kiintolevyjen eri kokoformaatit. [16.]

Kiintolevyjen liikkuvien osien vuoksi niitä ei suositella käytettäväksi kylmissä olosuhteissa, ja usein kiintolevyjen valmistajien antama käyttölämpötila-alue on luokkaa +5 - +70 °C.

Kiintolevyjä on kehitetty myös kohteisiin, joissa niiden täytyy toimia laajalla lämpötila-alueella. Tällaisia levyjä voidaan siis käyttää myös pakkasessa. Hyvä esimerkki tällaisesta tilanteesta on kiintolevyn tarve ajoneuvotietokoneessa.



## 3.2 SSD-levyt

SSD-levyt ovat kiintolevyjen varteenotettavimpia kilpailijoita tietokoneen ensisijaisiksi massamuisteiksi. Tämänhetkiset SSD-levyt ovat lähes poikkeuksetta NAND-flash-tekniikkaan pohjautuvia.

### 3.2.1 SSD-levyn rakenne ja liitynnät

Nykyisten SSD-levyjen pääasiallisena muistina toimivat NAND-flash-muistipiirit. Muistipiirien lisäksi SSD-levy sisältää muun muassa ohjainpiirin, joka muuttaa emolevyltä tulevan datan flash-muisteille sopivaksi.

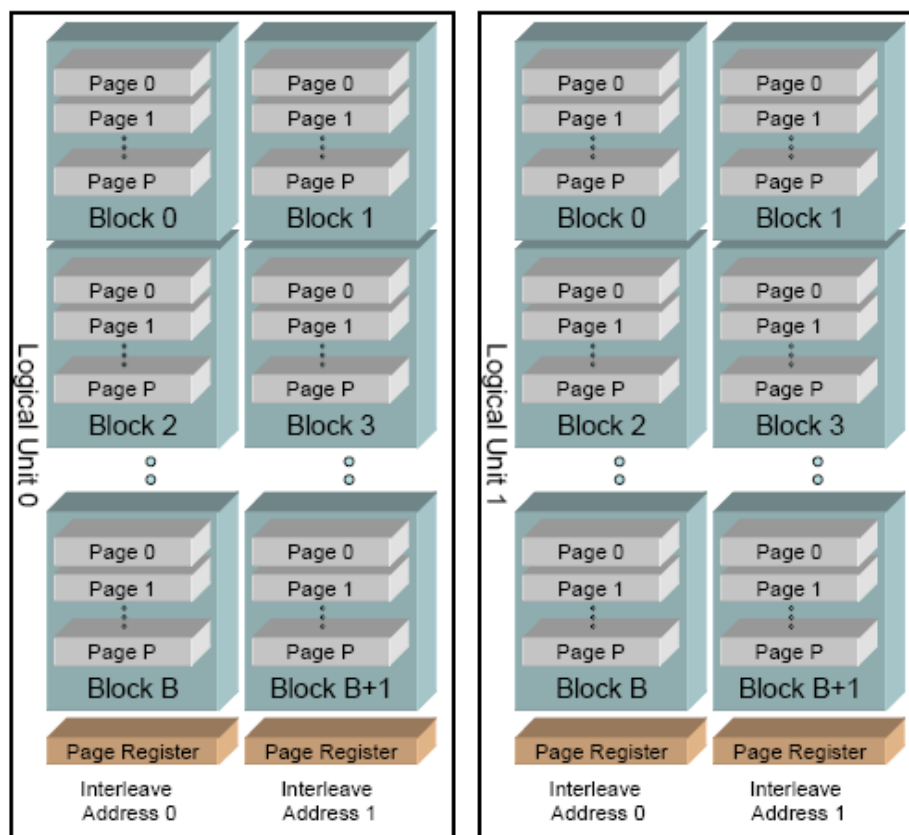
#### NAND-flash-piirin rakenne

Useat NAND-flash-piirien valmistajat ovat muodostaneet työryhmän, joka ylläpitää määrittystä avoimesta NAND-flash-liitynnästä. Näistä uusin määrittely on ONFI-versio 2.2 [17]. ONFI-määrittelyn avulla eri valmistajien piirit pysyvät yhteensopivampina, mikä helpottaa laitteiden suunnittelua, kun ei tarvitse valita piirejä heti laitteen suunnittelun alussa. ONFI-määrittelyssä määritellään muun muassa piirien fyysiset kotelot ja jalkajärjestykset sekä piirien ohjaukset.

Piiri koostuu ONFI-määrittelyn mukaan kohteista (target), joita jokaista ohjaa erikseen yksi CE-linja. Kohde koostuu yhdestä tai useammasta loogisesta yksiköstä (logical unit, LUN). Looginen yksikkö eli LUN on pienin yksikkö, joka voi suorittaa komentoja ja ilmoittaa tilastaan. LUN sisältää vähintään yhden sivurekisterin (page register) ja flash-tilan (flash array). Sivurekisterien määrä riippuu LUNin lomitetun toimintojen (interleaved operations) tuesta. Sivurekisterit toimivat välimuisteina sivujen kirjoittamista ja lukemista varten. [17, s. 34–35.]

Flash-tila koostuu lohkoista (block), jotka ovat pienimpiä erikseen tyhjennettäviä alueita LUNin sisällä. Lohkojen määrää ei ole ONFI-määrittelyssä rajattu. Lohkot koostuvat sivuista (page), jotka ovat pienimpiä erikseen luettavia ja kirjoitettavia alueita LUNin sisällä. Sivut koostuvat tavuista (byte) tai sanoista (word). Sanat tarkoittavat 8-, 16- tai 32 bittiä. Käyttäjätiedon bittimäärä per sivu, lukuun ottamatta varabittejä, on oltava toisen potenssi. Lohkojen sivujen määrä per lohko on oltava jaollinen luvulla 32. [17, s. 34–35.]

ONFI-määrittelyn mukaisen muistimatriisin esimerkki on kuvassa 6.

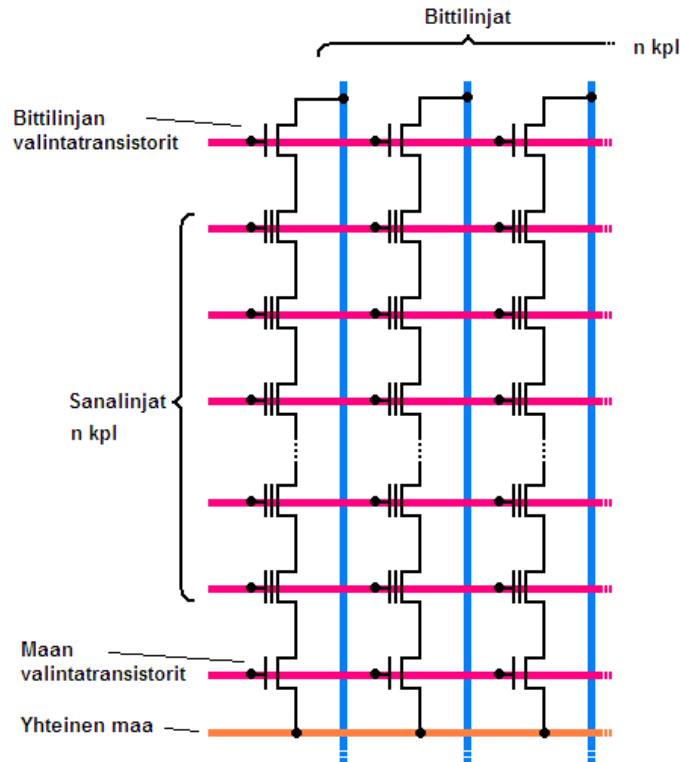


Kuva 6. Esimerkki NAND-flash-piirin yhden kohteen muistirakenteesta [17, s. 34].

Sivu muodostuu siis siinä olevista biteistä, jotka ovat fyysisesti esimerkiksi kelluvahilaisia NMOS-muistisoluja. Sivun sisältöä varsinaisen käyttäjätiedon lisäksi sisältävät myös varabiteit, joita käytetään muun muassa ECC-virheenkorjaukseen, kulumisen tasaukseen (wear-leveling) ja muihin ohjelmiston tarvitsemiin toimintoihin. [18, s. 14.][19, s. 6.]

NAND-muistisolumatriisissa nämä muistisolut on kytketty sarjaan bittilinjan ja maan väliin. Muistisoluketjun ja bittilinjan väliin on sijoitettu bittilinjan valintatransistori. Puolestaan maan ja muistisoluketjun väliin on sijoitettu maan valintatransistori. [18, s. 14.]

NAND-muistimatriisin rakenne on esiteltyä kuvassa 7.



Kuva 7. NAND-muistisolumatriisi. [18, s. 16.][19.]

Perinteiseen flash-muistisoluun voidaan siis kirjoittaa ainoastaan yksi varaus, jolloin puhutaan SLC-muistisoluista. On olemassa tekniikoita, joilla kulluvalle hilalle voidaan kirjoittaa myös useampi bitti. Tällöin puhutaan MLC-muistisoluista. [18, s. 12–13.]

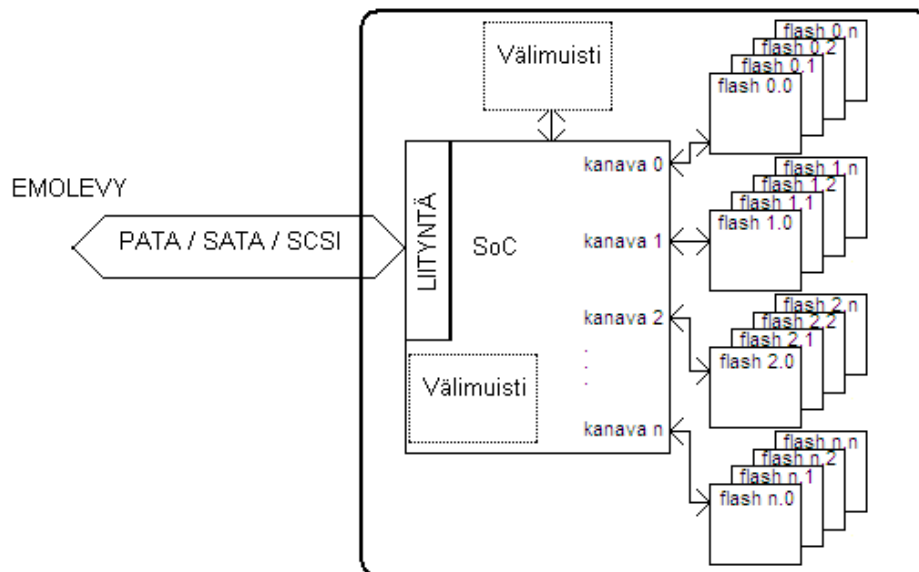
SLC on NAND-flash-tekniikka, jossa yhteen muistisoluun voidaan tallentaa kahden varaustason avulla yksi bitti. SLC-solu on nopea kirjoittaa ja lukea, se kuluttaa vähemmän energiaa sekä on luotettavampi ja pitkäikäisempi verrattuna MLC-soluun. [18, s. 11.][20.]

MLC on NAND-flash-tekniikka, jossa yhteen muistisoluun voidaan esimerkiksi neljän varaustason avulla tallettaa kaksi bittiä. Tällaisen muistisolun kirjoittaminen ja lukeminen on hitaampaa, hankalampaa ja enemmän energiaa kuluttavaa kuin SLC-solun. Lisäksi se kuluu nopeammin, eli se on SLC-solua lyhytikäisempi. MLC mahdollistaa kuitenkin tiheämmän ja edullisemmän muistin. [18, s. 13.][20.]

## SSD-levyn rakenne

SSD-levyn pinta-alasta suurimman osan vievät flash-muistipiirit. Tärkein komponentti levyllä on kontrolleri, joka huolehtii datan muuttamisesta flash-piireille sopivaksi sekä muistien tasaisesta käytöstä. Koska flash-piirit kuluvat käytössä, on kontrollerin huolehdittava kulumisen tasauksesta ja virheiden korjauksesta. Flash-piirit on kytketty kanaviin (channel), joita jokaista ohjaa oma kanavakontrollerinsa.

Kontrolleri voi olla erityisesti SSD-levyjä varten tarkoitettu SoC-piiri tai SSD-levyn ohjaukseen ohjelmoitu FPGA-piiri. Välimuisti voi olla sijoitettuna kontrollerin sisään, tai se on erillisenä ulkoisena komponenttina. SSD-levyjen SoC-kontrollereiden valmistajia ovat esimerkiksi Sandforce, Indilinx ja JMicron. Kuvassa 8 on esiteltyä SSD-levyn tyypillinen lohkokaavio.



Kuva 8. SSD-levyn tyypillinen lohkokaavio.

### Liitynnät

Kontrollereiden liityntöinä emolevylle toimivat kiintolevyjen yhteydestä tutut PATA-, SATA- tai SCSI-liitynnät. Jotkin SATA-liitynnät saattavat olla toteutettu siten, että levyn ulkoinen liityntä on SATA, mutta sisäinen onkin PATA. Ne on toteutettu yleensä erillisen SATA-PATA-muunninpiirin avulla. Yleensä kontrollerit kuitenkin sisältävät itsessään liitynnän suoraan emolevylle, eli ulkoisia piirejä ei tarvita.

### 3.2.2 SSD-levyratkaisut

SSD-massamuisteja on valmistettu muun muassa perinteisten kiintolevyjen kokoformaattissa eli 3,5” ja 2,5” kiintolevyjen koteloiden mukaisiin koteloihin. Tällaiset levyt ovat hyviä korvaamaan perinteiset kiintolevyt, koska ne sopivat saman kotelon vuoksi suoraan niiden paikalle.

Peruskiintolevyjen kokoformaattien lisäksi on olemassa levyjä, joita ei ole tehty johonkin tiettyyn kiintolevyn kokoformaattiin, vaan ne ovat eräänlaisia moduuleita. Moduuleiden etuna on, että ne ovat pienempiä ja usein suoraan liitettävissä emolevyn liittimeen ilman kaapelia.

Kuvassa 9 on SATA II -liitynnällä varustettu Apacerin 7P/180 D LP -moduuli, joita on saatavilla 8 Gt:n muistikapasiteettiin saakka. Lukunopeus moduulilla on 27 Mt/s ja kirjoitusnopeus 28 Mt/s. Käyttöjännitenastat ovat SATA-liittimen kyljessä, tai käyttöjännite on mahdollista tuoda erillisellä johtimella. [21.]



Kuva 9. Sata-liitynnällä oleva SSD-moduuli. [21.]

Emolevyn liittimiin liitettävien moduuleiden lisäksi on olemassa SSD-levyjä, jotka on integroitu juotettavan kotelon sisälle. Tällaisten levyjen etuna on se, että ne voidaan juottaa suoraan emolevylle tai muuhun sovellukseen, missä tarvitaan massamuistia.

Koska SSD-levyt eivät sisällä liikkuvia osia, riippuu niiden käyttölämpötila-alue sisäisten komponenttien käyttölämpötila-alueista. Iskujen ja värinän kesto on myös parempi, koska ne vaikuttavat lähinnä juotosten kestävyys, eivätkä levyn sähköisiin toimintoihin.

### 3.3 Kiintolevyn ja SSD-levyn ominaisuuksien vertailu

Kiintolevyn ja SSD-levyn ominaisuuksien vertailuun valittiin kaksi teollisuuden käyttöön tarkoitettua levyä. Kiintolevy on Toshiba MK8057GSC, ja SSD-levy on Apacer SAFD254, josta tarkasteltiin laajalla käyttölämpötilalla olevaa versiota.

Levyt valittiin siten, että ne olivat keskenään vertailukelpoisia. Lähtökohtina oli, että levyt olisivat fyysisesti samaa kokoformaattia, laajalla käyttölämpötilalla ja ne olisi tarkoitettu ajoneuvo- tai teollisuuskäyttöön. Taulukossa 1 on lueteltuna vertailtavien levyjen valmistajien antamat spesifikaatiot.

Taulukko 1. Kiintolevyn ja SSD-levyn ominaisuuksien vertailu [22][23].

<b>Tyyppi</b>	<b>Kiintolevy</b>	<b>SSD</b>
Valmistaja	Toshiba	Apacer
Malli	MK8057GSC	AP-SAFD254
<b>Perustiedot</b>		
Liityntä	SATA I	SATA II
Perusnopeus	1,5 Gb/s	3,0 Gb/s
Kirjoitus (jatkuva)	-	135 Mt/s
Lukeminen (jatkuva)	-	160 Mt/s
Kapasiteetti	80 Gt	8 – 128 Gt
<b>Tehon kulutus</b>		
Suurin teho	7 W	1,8 W
Tyhjäkäyntiteho	0,8 W	0,8 W
<b>Lämpötilankesto</b>		
Käytössä	-30 ... +85 °C	-40 ... +85 °C
Varastointi	-40 ... +85 °C	-40 ... +100 °C
<b>Iskunkesto</b>		
Käytössä	300 G	1500 G
Varastointi	800 G	-
<b>Tärinänkesto</b>		
Käytössä	2 G (50–500 Hz)	16,3 G (10–200Hz)
Varastointi	5 G (10–500 Hz)	-
<b>Suhteellinen kosteus</b>		
Käytössä	5 – 90 %	5 – 95 %
Varastointi	5 – 95 %	-

Taulukon 1 vertailuarvoista voidaan nähdä, kuinka SSD-levyn arvot eroavat kiintolevystä. Suorituskyvyn ratkaisevat lähinnä elektroniikan ja ohjauksen ohjelmistojen ominaisuudet, mutta käyttöympäristön kestävyys on paljolti kiinni levyjen fyysisistä ominaisuuksista.

Tärinän- ja iskunkestossa käytettävä yksikkö G tarkoittaa kiihtyvyyttä. 1 G on samansuuruinen kuin maan vetovoiman aiheuttama putoamiskiihtyvyys, eli noin  $9,81 \text{ m/s}^2$ .

SSD-levy vie aktiivisena paljon vähemmän tehoa kuin kiintolevy. Tämä johtuu siitä, että kiintolevyn on syötettävä tehoa sähkömoottoreille. Vertailun kiintolevyn käyttölämpötila-alue on kiintolevylle todella hyvä, mutta vertailun SSD-levy sietää vielä vertailtavaa laajalämpötila-alueen kiintolevyäkin enemmän pakkasta. Iskunkesto on SSD-levyllä viisinkertainen verrattuna kiintolevyyn. Myös tärinänkesto on huomattavasti suurempi SSD-levyllä kuin kiintolevyllä. Käyttöympäristön suhteellisen kosteuden alue on levyillä lähes sama, tosin tämänkin hieman laajempi SSD-levyllä. Lisäksi SSD-levyn spesifikaatioiden korkein toimintakorkeus on yli 24 kilometriä, kun se kiintolevylle on vain 5,5 kilometriä. [22.][23.]

Kylmässä käytettäessä ovat mekaanisesti liikkuvat osat aina suuremmalla rasituksella kuin staattiset paikallaan pysyvät osat. Tämä lyhentää kiintolevyn käyttöikä. Koska SSD-levyssä ei ole sähkömoottoreita, sen tehonkulutus perustuu pelkästään datan tallentamiseen ja lukemiseen. Kiintolevyllä datan tallentamiseen ja lukemiseen tarvitaan lisäksi moottoreiden pyörittämistä, mikä vie enemmän tehoa varsinkin levyn käynnistyksessä. Iskut ja tärinä voivat vaurioittaa kiintolevyn levyä lukupään osuessa levyyn iskun voimasta. Tätä ongelmaa ei SSD-levyissä ole.

Vertailusta voidaan siis päätellä, että SSD-levyt ovat monessa asiassa kiintolevyyjä parempia. Kiintolevyn datan tallentaminen ei kuitenkaan kuluta muistin tallennuspaikkaa eli levyä, kuten SSD-levyn tallentaessa dataa NAND-flashiin. Kiintolevyn liikkuvien mekaanisten osien kuluminen ja herkkyys tekevät siitä kuitenkin huonomman massamuistin verrattuna SSD-levyn fyysiseen staattisuuteen.

## 4 MASSAMUISTIN SULAUTTAMINEN AJONEUVOTIETOKONEESEEN

### 4.1 Massamuistien sulauttamismahdollisuudet

Massamuisteista kiintolevyt ja SSD-levyt ovat eniten suosittuja sulautettujen sovelluksien massamuisteiksi. Sen vuoksi sulauttamismahdollisuuksia tarkastellaan tässä työssä niiden kannalta. Kiintolevyn ja SSD-levyn sulauttamisella on hieman erilaiset sulauttamismahdollisuudet.

Fyysisen koon vaikutus sulautettavan muistin valintaan

Kiintolevyn sulauttamisessa on valittava kohteeseen fyysisiltä ja teknisiltä ominaisuuksiltaan sopiva kiintolevy sekä jätettävä sille sovellukseen tilaa sen fyysisen koon verran. Kiintolevyn sulauttamisessa jää suunnittelijalle mahdolliseksi tehtäväksi sulauttamisen suhteen ainoastaan sopivan kiintolevyn valitseminen.

SSD-levyn sulauttamisessa voidaan käyttää samoja periaatteita kuin kiintolevynkin suhteen, eli valitaan valmiista SSD-levyistä itselle sopiva vaihtoehto ja lähdetään sulauttamaan se omaan sovellukseen. Olemassa olevat SSD-moduulit kuitenkin avartavat SSD-levyn sulauttamismahdollisuuksia. Mikäli massamuistin on mahdollista 2,5” tai 1,8” kiintolevyä pienempään tilaan ja oltava kuitenkin muistikapasiteetiltaan suurehko, on SSD-moduuli hyvä vaihtoehto.

Käyttöolosuhteiden vaikutus massamuistin valintaan

Ajoneuvokäytössä on ohjaamossakin tietokoneelle ankarat käyttöolosuhteet. Tärinä on jatkuvaa ja iskut yleisiä. Talvella voi olla hyvin kylmää ja kesällä hyvin kuumaa. Kosteus on myös yksi tekijä, mikä aiheuttaa ongelmia pidemmän päälle.

Kiintolevyissä on kyllä olemassa autokäyttöön ja teollisuuteen tarkoitettuja levyjä, mutta nekin sisältävät kaikesta huolimatta kiintolevyn tyypilliset liikkuvat osat. Kiintolevy on hyvin huono vaihtoehto esimerkiksi työkoneseen, joka kulkee koko ajan epätasaisessa maastossa.



Laajaan käyttölämpötilan omaava SSD-levy on immuunimpi tärinälle, iskuille ja lämpötilavaihteluille kuin kiintolevy. SSD-levyn sulauttaminen tässä mielessä osaksi ajoneuvotietokonetta on parempi ratkaisu.

Muokattavuuden ja kustannusten vaikutus massamuistin valintaan

Kiintolevy on se mitä hankitaan, eikä sille voida tehdä mitään haluttuja muutoksia. Valmiiden SSD-levyjen kanssa on samantapainen tilanne. Toki SSD-levyn elektroniikan voi esimerkiksi lakata, jotta kosteuden sieto paranee, mutta silloin SSD-levyn tehdastakuu luultavasti raukeaa. Lisäksi kaupallisen SSD-levyn suorituskykyyn ei voi itse vaikuttaa. Ostetun levyn suorituskyky on se, mitä siihen on suunniteltu.

Eräs mahdollisuus vaikuttaa massamuistien fyysiseen muotoon, suorituskykyyn ja ympäristönsieto-ominaisuuksiin on suunnitella levy itse. SSD-levyn suunnittelu itse on yhtä mahdollista kuin minkä tahansa muunkin elektronisen laitteen. Valmiita kontrollereita on olemassa usealla valmistajalla, ja flash-piirit sovellukseen voi valita vapaasti.

Mikäli levy tehdään itse, ei tarvitse levystä maksaa muuta kuin komponenttikulut ja valmistus. Silloin itse suunniteltu SSD-levy tulee myös halvemmaksi kaupalliseen verrattuna, mikäli levyjen tarve on suuri.

## 4.2 SSD-puolijohdemuistin sulauttaminen ajoneuvotietokoneeseen

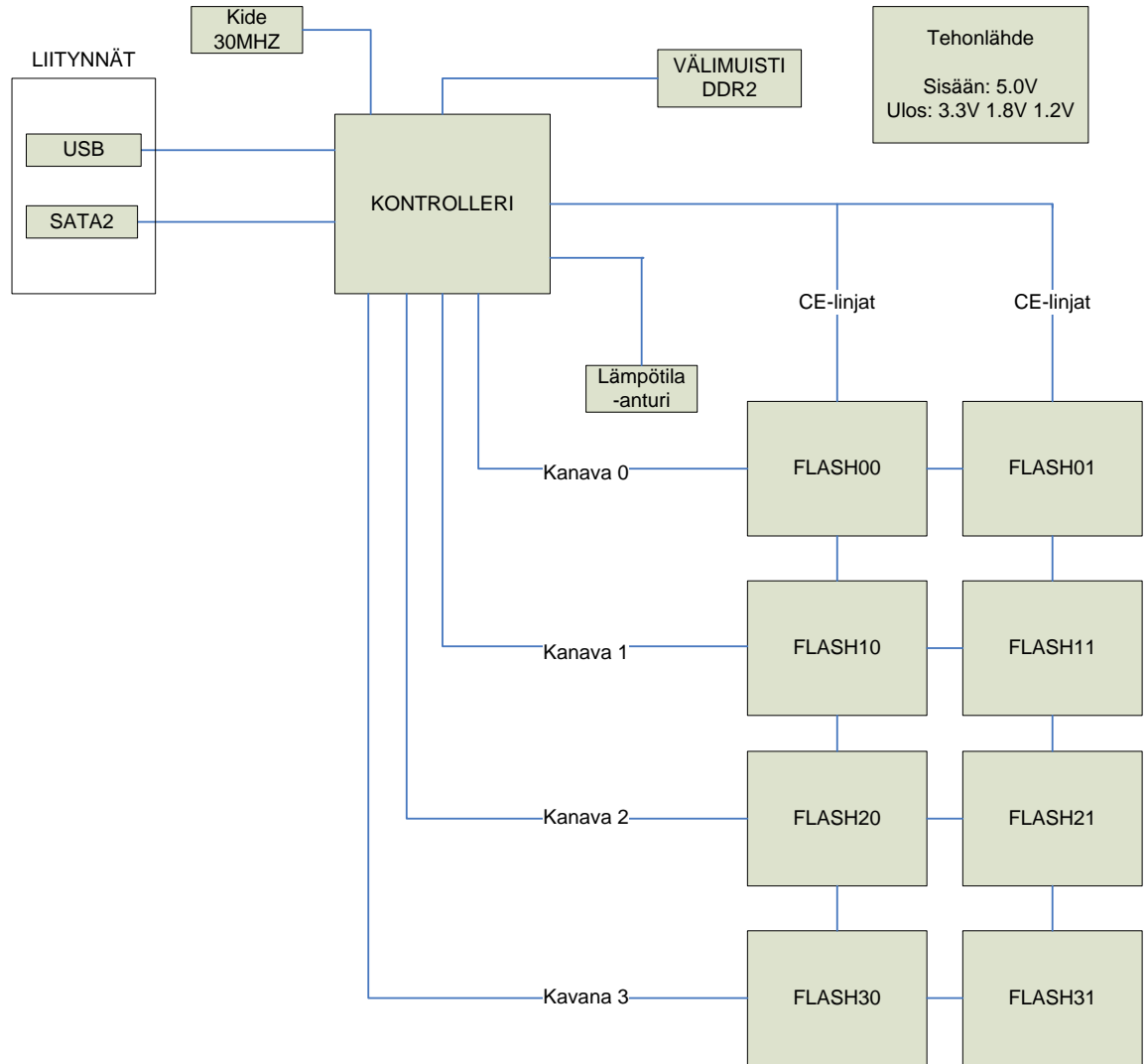
Insinööriyön varsinainen toimeksianto oli suunnitella Sunit Oy:lle SSD-levy ajoneuvotietokoneeseen. Työ alkoi vuoden 2009 lokakuussa, ja ensimmäiset protokortit tilattiin vuoden 2010 helmikuussa. Levy esitellään lohkokaaaviotasolla, mutta sen testituloksia ei tässä työssä kuvata. Levyllä voidaan korvata ajoneuvotietokoneessa oleva kiintolevy adaptereineen. Tässä selostuksessa komponenteista ja niiden valmistajista ei mainita nimiä.

Työn alussa tuli valita sopiva kontrolleri, jossa emolevyn liityntä olisi SATA II. Alkuun löytyi kolme kontrolleria, joista päädyttiin erään valmistajan kontrolleriin, josta löytyi myös USB-liityntä.

Kontrollerin valmistajalta saatiin mallilevyn piirikaavio, jonka pohjalta oman levyn piirikaaviota voitiin alkaa suunnittelemaan. Piirikaavion suunnittelu kesti joulukuun puolivälistä tammikuun puoleenväliin. Piirikaavion tekemisen yhteydessä tehtiin myös työtä sopivien välimuistin ja flash-muistien etsimiseksi. Piirikaavioon lisättiin myös yksi ainoa tehoyksikkö, josta saatiin kolme eri käyttöjännitettä, sekä alkuperäisestä hieman poikkeava levyn alustus, eli ”resetointi”-kytkentä. Flash-kanavista otettiin käyttöön puolet kaikista mahdollisista, ja tämä helpotti vetojen tekemistä oleellisesti.

Piirikaavion suunnittelun jälkeen oli komponentit sijoitettava levyille ja reititettävä levyn vedot. Komponenttisijoittelussa tuli ottaa huomioon muun muassa suurnopeusväylien sijainnit ja EMC-suojaukset. Komponentit sijoitettiin levyille siten, että samaan flash-kanavaan kuuluvat piirit olivat vierekkäin ja sijoitettuina vetojen kulun mukaan järkevimpiin paikkoihin, jotta eri kanavien vetoja ei tullut ristiin. Välimuisti sijoitettiin mahdollisimman lähelle kontrolleria, koska näiden kahden komponentin välillä ovat levyn suurimmat taajuudet, lukuun ottamatta sata-vetoja. Tehonlähteenä toiminut hakkuri sijoitettiin omaan nurkkaan, ja sen läheisyydestä vältettiin vetämästä suurnopeuslinjoja. Komponenttisijoittelu kesti noin pari viikkoa, ja loput levyn suunnittelusta kesti helmikuun loppupuolelle.

Protolevyjen saapumisen jälkeen niihin juotettiin kontrolleri ja välimuisti Kajaanin ammattikorkeakoulun tuotantolaboratorion höyryfaasin avulla, koska molemmat olivat BGA-piirejä. Suunnitellun SSD-levyn lohkokaavio on esiteltyä kuvassa 10.



Kuva 10. Suunnitellun SSD-levyn lohkokkaavio.

Kuvan 10 lohkokkaaviossa on esiteltyä flash-piirien sijoittelu kanaviin ja toteutetun levyn tärkeimmät osakokonaisuudet ja liitynnät. Flash-piirejä levyllä on mahdollista sijoittaa maksimissaan kahdeksan. Levystä voidaan tehdä esimerkiksi 64 Gt:n kokoinen, kun siihen asennetaan kahdeksan kappaletta 8 Gb:n flash-piiriä. Lämpötila-anturi on tarpeellinen muun muassa levyn kunnon seurannassa. Levyn alustaminen eli firmware-ohjelmiston syöttö ja konfigurointi voidaan suorittaa USB- tai SATA II -liityntöjen kautta. Molempia liityntöjä voidaan käyttää myös dataliikenteeseen, firmware-ohjelmistosta riippuen. Kontrollerille eräs tärkeä ulkoinen komponentti on kide, joka tässä tapauksessa oli taajuudeltaan 30 MHz. Tehonlähde ottaa käyttöjännitteensä ajoneuvotietokoneen 5 V:n linjasta ja muodostaa siitä levyn tarvitsemat 1,2 V:n, 1,8 V:n ja 3,3 V:n jännitteet. Välimuisti toimii datan puskurina kontrollerin datan käsittelyiden aikana.

## 5 SSD-LEVYN SULAUTTAMISELLA SAATAVAT HYÖDYT

SSD-levyn sulauttamisella on siis paljon hyötyjä, jos sitä verrataan kiintolevyyn vastaavassa tilanteessa. SSD-levyn ympäristönsieto on omaa luokkaansa ja sen tarvitsema teho vähäisempää. Lisäksi SSD-levyn sulauttamisen voi viedä hyvin pitkälle ja sitä voidaan soveltaa lähes mihin järjestelmään tahansa.

SSD:n sulauttamisella siten, että koko levy suunnitellaan itse, saavutetaan paljon merkittäviä etuja. Levyyn voidaan valita itse haluamansa komponentit, kuten kontrolleri, flash-piirit ja välimuistit. Tällä tavalla levyn suorituskykyyn ja hintaan voidaan itse vaikuttaa. Itse toteutettuun levyyn voidaan suunnitella tarvittavan hyvät EMC-ominaisuudet, liitynnät ja muut ominaisuudet, joita ei markkinoilla olevista levyistä välttämättä löydy. Itse suunniteltu levy voidaan myös huoletta lakata ja saada sille siten parempi suoja kosteutta vastaan.

Levyn fyysinen koko ja muoto voidaan itse päättää ja sillä tavalla käyttää tehokkaasti hyödyksi käytettävissä oleva tila. Laitteistoa suunniteltaessa voidaan lisäksi massamuisti integroida osaksi koko järjestelmää, siten että se ei ole erillisenä komponenttina viemässä tilaa, vaan se on sulautettuna jouhevasti laitteen kokonaisuuteen.

SSD-levyjen ansiosta voidaan massamuistit sulauttaa osaksi järjestelmää yhä vain tiheämmin ja kustannusystävällisemmin. Samalla levyllä prosessorin kanssa sijaitseva massamuisti voi toimia nopeammin ja fyysisten liitoksien määrä on periaatteessa juotoksia lukuun ottamatta olematon.

## 6 YHTEENVETO

Kirjallisessa osassa perehdyttiin muistiteknologioihin, erityisesti kiintolevyihin ja NAND-flash-muisteihin perustuviin SSD-levyihin. Kiintolevyt ovat auttamatta siirtymässä syrjään SSD-levyjen tieltä niiden hyvien ominaisuuksien ja jatkuvan teknisen kehittymisen vuoksi. Tällä hetkellä SSD-levyjen haittana on kuitenkin hinta ja puutteet flash-teknikassa.

Nykyiset tietokoneiden päämassamuisteiksi tarkoitetut SSD-levyt perustuvat yleensä flash-muisteihin, joilla on huonona ominaisuutena niin sanottu kuluminen. Tästä syystä työssä tutustuttiin myös hieman NAND-flash-muistin kilpailijoihin. Tulevaisuutta ajatellen SSD-levyt ovat ottamassa vallan, mutta se, että ne perustuvat flash-teknikkaan, ei ole niinkään varmaa. Työssä esitellyt kilpailevat muistitekniikat kehittyvät koko ajan ja ne eivät kulu käytössä ainakaan yhtä radikaalisti kuin flash.

Insinööriyön varsinaisena tavoitteena oli suunnitella ja toteuttaa SSD-levy ajoneuvotietokoneeseen. Toimeksianto oli haastava, mutta levyn suunnitteluun sai hyvin tukea ja työ toteutui kokonaisuudessaan melko hyvin. SSD-levy saatiin suunniteltua määräaikaan mennessä ja levyjen prototyypit tilattua. Eräs haaste oli levyssä olevien hyvin tiheiden BGA-piirien reitityksien tekeminen ja juottaminen. Levyn testaamista ei insinööriyön kirjalliseen osaan ehditty saamaan.

SSD-levyn suunnitteleminen oli hyvä pilottihanke uuden suunnitteluajattelun pohjaksi. Oma massamuisti voidaan siis nykyisin tehdä ja jopa melko helposti. Kontrollereiden valmistajat olivat ainakin tämän työn tapauksessa hyvin yhteistyökykyisiä ja -haluisia. SSD-levyn suunnittelusta jäi Sunit Oy:n käyttöön SSD-levyn lisäksi valitulle kontrollerille suunnittelusolu, jota voidaan käyttää myöhemmissä projekteissa hyödyksi.

Työn suorituksen tiimoilta opittiin myös, että SSD-massamuisti voitaisiin integroida suoraan samalle kortille prosessorin kanssa tai muuhun elektroniikkaan.

## LÄHTEET

1. AgigA Tech, White Paper - Finding perfect memory. 2009, viimeksi muutettu 3.9.2009.  
[PDF-dokumentti]  
<[http://www.agigatech.com/images/pdf\\_WhitePaper\\_FindingPerfectMemory.pdf](http://www.agigatech.com/images/pdf_WhitePaper_FindingPerfectMemory.pdf)>
2. Smed J. Tietokoneen käytön alkeet. 1997. [PDF-dokumentti]  
<<http://www.cs.utu.fi/staff/jouni.smed/papers/alkeet.pdf>> (Luettu 25.2.2010)
3. Paananen J. Tietotekniikan peruskirja. Jyväskylä: Docendo Finland Oy. 2005.  
6. Laitos. 1. Painos. ISBN 978-951-846-250-0
4. Blu-Ray.com. What is Blu-ray? [WWW-dokumentti]  
<<http://www.blu-ray.com/info/>> (Luettu 25.2.2010)
5. Koskinen J. Mikrotietokonetekniikka, Sulautetut järjestelmät. Keuruu: Otava. 2004.  
1., uudistettu painos. ISBN 951-1-19063-6
6. Durlam M., Naji P., DeHerrera M., Tehrani S., Kerszykowski G., Kyler K.. Nonvolatile RAM based on Magnetic Tunnel Junction Elements. 2000. [PDF-dokumentti]  
Saatavilla IEEE-tietokannasta: <<http://www.kajak.fi/suomeksi/Kirjasto/E-aineistot>>  
(Luettu 26.2.2010)
7. Everspin Technologies, MRAM-muistipiiri MR4A08B. [WWW-dokumentti]  
< <http://everspin.com/products8-16Mb.html> > (Luettu 26.2.2010)
8. Volotinen V. Digitaalitekniikka, Perusteet ja sovellukset. Porvoo: WSOY. 1997.  
1.-2. Painos. ISBN 951-0-21150-8
9. Wikipedia, Floating gate MOSFET. [WWW-dokumentti]  
<[http://en.wikipedia.org/wiki/File:Floating\\_gate\\_transistor.png](http://en.wikipedia.org/wiki/File:Floating_gate_transistor.png) > (Luettu 2.3.2010)
10. Chul Lee, Sung Hoon Baek, Kyu Ho Park. A Hybrid File System Based on NOR and NAND Flash Memories for Embedded Devices. 2008. [PDF-dokumentti]  
Saatavilla IEEE-tietokannasta: <<http://www.kajak.fi/suomeksi/Kirjasto/E-aineistot>>  
(Luettu 2.3.2010)

11. Wangyuan Zhang, Tao Li. Exploring Phase Change Memory and 3D Die-Stacking for Power/Thermal Friendly, Fast and Durable Memory Architectures. 2009.  
[PDF-dokumentti]  
Saatavilla IEEE-tietokannasta: <<http://www.kajak.fi/suomeksi/Kirjasto/E-aineistot>>  
(Luettu 2.3.2010)
12. Fujitsu, What is FRAM?. [WWW-dokumentti]  
<<http://www.fujitsu.com/global/services/microelectronics/technical/fram/index.html>>  
> (Luettu 9.3.2010)
13. Ali Sheikholeslami, P. Glenn Gulak, A Survey of Circuit Innovations in Ferroelectric Random-Access Memories. Viimeksi muutettu 5.5.2000. [PDF-dokumentti]  
<[http://www.eecg.toronto.edu/~ali/papers/survey\\_proc.pdf](http://www.eecg.toronto.edu/~ali/papers/survey_proc.pdf)>
14. IBM Archives, IBM 3340 direct access storage facility. [WWW-dokumentti]  
<[http://www-03.ibm.com/ibm/history/exhibits/storage/storage\\_3340.html](http://www-03.ibm.com/ibm/history/exhibits/storage/storage_3340.html)>  
(Luettu 10.3.2010)
15. Wikipedia, Kiintolevyn kuva. [WWW-dokumentti]  
<[http://fi.wikipedia.org/wiki/Tiedosto:Hdd\\_od\\_srodka.jpg](http://fi.wikipedia.org/wiki/Tiedosto:Hdd_od_srodka.jpg)> (Luettu 10.3.2010)
16. Wikimedia Commons, Six hard drive form factors. [WWW-dokumentti]  
<<http://commons.wikimedia.org/wiki/File:SixHardDriveFormFactors.jpg>>  
(Luettu 11.3.2010)
17. ONFI Workgroup, Open Nand Flash Interface Revision 2.2. Viimeksi muutettu 7.9.2009. [PDF-dokumentti]  
<[http://onfi.org/wp-content/uploads/2009/02/ONFI%20\\_2%20Gold.pdf](http://onfi.org/wp-content/uploads/2009/02/ONFI%20_2%20Gold.pdf)>
18. Mäntymaa J. Haihtumattomat tallennusmenetelmät sulautetussa anturijärjestelmässä. Pro gradu -tutkielma 25.10.2006. Jyväskylän yliopisto, Tietotekniikan laitos.  
[PDF-dokumentti]  
<[https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/12484/URN\\_NBN\\_fi\\_jyu-200746.pdf?sequence=1](https://jyx.jyu.fi/dspace/bitstream/handle/123456789/12484/URN_NBN_fi_jyu-200746.pdf?sequence=1)>

19. Micron, Technical Note NAND Flash 101: An Introduction to NAND Flash and How to Design It In to Your Next Product. 2006, viimeksi muutettu 11/2006.  
  
[PDF-dokumentti]  
<<http://download.micron.com/pdf/technotes/nand/tn2919.pdf>>
20. CEF, Control Express Finland Oy. Whitepaper, Kiintolevyteknologia.  
  
[WWW-dokumentti]  
<<http://www.cef.fi/fi/?ID=320>> (Luettu 11.3.2010)
21. Apacer, Sata disk module -esite. [PDF-dokumentti]  
  
<[http://www.apacer.com.tw/tw/products/SDM\\_7P\\_180DLP\\_DM.pdf](http://www.apacer.com.tw/tw/products/SDM_7P_180DLP_DM.pdf)>  
  
(Luettu 18.3.2010)
22. Toshiba, MK8057GSC Automotive-Grade Hard Disk Drive. [WWW-dokumentti]  
  
<<http://sdd.toshiba.com/main.aspx?Path=StorageSolutions/SpecialtyProducts/MK8057GSC/MK8057GSCSpecs>> (Luettu 19.3.2010)
23. Apacer, Serial ATA Flash Drive Specification fo SAFD 254, Versio 1.4. Viimeksi muutettu 17.12.2009. [PDF-dokumentti]  
  
<[http://www.apacer.com/en/support/downloads/AP-SAFD254QAxxxxS-XXE\\_SPEC\\_rev1.4.pdf](http://www.apacer.com/en/support/downloads/AP-SAFD254QAxxxxS-XXE_SPEC_rev1.4.pdf)>