

Eetu Auvinen

# MAGNEETTIMUISTIEN HYÖDYNTÄMI- NEN MIKROKONTROLLERI- JÄRJESTELMISSÄ

Kandidaatintyö  
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma  
Tarkastaja: Yliopistonlehtori Erja Sipilä  
Huhtikuu 2020

# TIIVISTELMÄ

Eetu Auvinen: Magneettimuistien hyödyntäminen mikrokontrollerijärjestelmissä  
Kandidaatintyö  
Tampereen yliopisto  
Tieto- ja sähkötekniikan kandidaatin tutkinto-ohjelma  
Huhtikuu 2020

---

Mikrokontrollereiden sovellusalueen laajeneminen asettaa entistä enemmän vaatimuksia niissä käytettäville muistiteknologioille. Yhä monimutkaisemmat ohjelmat vaativat suurempia ja nopeampia muisteja, kun taas pienet akkukäyttöiset laitteet tarvitsevat pienempää virrankulutusta. Nykyisin käytössä olevien puolijohdemuistien kyky vastata näihin vaatimuksiin on epävarmaa, ja siksi niille etsitään seuraajaa vaihtoehtoisista muistiteknologioista. Yksi lupaavimmista muistiteknologioista on magnetoresistanssiin perustuva STT-MRAM.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena on tarkastella magneettimuistien potentiaalia mikrokontrollereissa käytettävänä muistina. Aluksi selvitetään tarkastelun tueksi magneettimuistien toimintaperiaatteet sekä tutkitaan niiden kehityshistoriaa. Lisäksi esitellään nykyinen mikrokontrollereissa käytetty muistirakenne ja eritellään sen kohtaamat ongelmat. Lopuksi näitä ongelmia hyödynnetään erilaisina näkökulmina muistiteknologioita vertaillaessa. Työssä vertaillaan kolmea muistiteknologiaa, jotka ovat magneettimuisteista lupaavin STT-MRAM sekä mikrokontrollereissa tyypillisesti käytetyt SRAM ja NOR-flash-muisti. Näitä teknologioita vertaillaan ominaisuus kerrallaan käyttäen parhaita arvoja, jotka kukin teknologia kykenee saavuttamaan.

Työssä havaitaan, että magneettimuistit kykenevät nykYTEKNIKOILLA vähintään yhtä hyvään suorituskykyyn ja kapasiteettiin kuin puolijohdemuistit. Lisäksi magneettimuistien luontainen haihtumattomuus mahdollistaa lepotilojen tehokkaamman hyödyntämisen virrankulutuksen hallinnassa. Vertailulla osoitetaan, että STT-MRAM vaikuttaa lupaavalta erityisesti erilaisille sensoreille ja muille laitteille, jotka ovat enimmäkseen lepotilassa. Näiden laitteiden suurin osa virrasta kuluu lepotilassa, jolloin magneettimuistin avulla akunkesto voidaan parantaa huomattavasti, ja siten mahdollistaa pidemmät huoltovälit.

Tulosten perusteella suurimmat esteet magneettimuistien laajalle käyttöönotolle ovat hinta ja datan säilyvyys. Lisäksi erityisesti flash-muistia korvaaville magneettimuisteille säilyvyys juotos-tapahtuman korkeissa lämpötiloissa on ongelmallista. Ratkaisua vaikeuttaa, että korkean säilyvyyden saavuttaminen kasvattaa STT-MRAM:in aktiivista virrankulutusta. Mikäli nämä ongelmat saadaan ratkaistua, STT-MRAM voi korvata flash-muistin ja mahdollisesti myös SRAM:in mikrokontrollereiden muistirakenteessa.

Avainsanat: Muisti, mikrokontrollerit, magnetismi, MRAM, STT-MRAM

Tämän julkaisun alkuperäisyys on tarkastettu Turnitin OriginalityCheck –ohjelmalla.

# ALKUSANAT

Haluan kiittää Erja Sipilää työn ohjaamisesta ja erityisesti aiheen löytämisessä ja rajaamisessa avustamisessa. Ennen tätä kandidaatintyötä en tiennyt magneettimuisteista juuri mitään, mutta aihe osoittautui äärimmäisen mielenkiintoiseksi ja vei mukanaan aina työn loppuun asti. Haluaisin myös kiittää perhettäni ja ystäviäni tuesta ja avusta.

Tampereella, 4.5.2020

Eetu Auvinen

# SISÄLLYSLUETTELO

1. JOHDANTO .....	1
2. SÄHKÖMAGNETISMI .....	2
2.1 Kappaleen magneettisuus .....	3
2.2 Sähkömagneettinen induktio .....	5
2.3 Magneto-resistanssi .....	5
3. MAGNEETTIMUISTIT .....	8
3.1 Magneettimuistien historia .....	8
3.2 Magneto-resistiivinen suorasaantimuisti .....	10
3.3 Spinipolarisoidun virran magneto-resistiivinen suorasaantimuisti .....	11
4. MIKROKONTROLLERIJÄRJESTELMÄN MUISTI .....	13
4.1 Muistirakenne .....	13
4.2 Muistiongelmät mikrokontrollerijärjestelmissä .....	14
5. MUISTITEKNOLOGIOIDEN VERTAILU .....	17
5.1 Suorituskyky .....	17
5.2 Kapasiteetti .....	18
5.3 Virrankulutus .....	20
5.4 Muut ominaisuudet .....	22
6. YHTEENVETO .....	24
LÄHTEET .....	26

## LYHENTEET JA MERKINNÄT

BL	Bittilinja (engl. bit line), magneetoresistiivisissä suorasaantimuisteissa oleva linja, jota hyödynnetään sekä luku- että kirjoitusoperaatioissa.
CT	Varauksen vangitseminen (engl. charge trapping), Uusi flash-muistitekniikka, jonka avulla muistin skaalautumista voidaan parantaa.
DRAM	Dynaaminen suorasaantimuisti (engl. dynamic random-access memory), tietokoneiden päämuistina käytetty muistitekniikka.
GMR	Suuri magneetoresistanssi (engl. giant magnetoresistance), magneettinen-neutraali-magneettinen levyjen aiheuttama resistanssia muuttava ilmiö.
EEPROM	Elektronisesti tyhjennettävä lukumuisti (engl. electrically erasable read-only memory), Käytetään pienissä määrin mikrokontrollereissa.
MRAM	Magneetoresistiivinen suorasaantimuisti (engl. Magnetoresistive random-access memory), Tunnelimagneetoresistanssiin perustuva muistitekniikka
MTJ	Magneettitunneliliitos (engl. Magnetic tunnel junction), Ferro-magneetti-eriste-ferromagneetti levyistä koostuva elementti.
NAND	engl. Not-AND, Looginen operaatio, joka on AND-operaation vastapari. Flash-muistin eräs rakenne hyödyntää NAND-portteja.
NOR	engl. Not-OR, Looginen operaatio, joka on OR-operaation vastapari. Flash-muistin eräs rakenne hyödyntää NOR-portteja.
RWL	Lukulinja (engl. read word line) Magneetoresistiivisissä suorasaantimuisteissa lukulinja avaa transistorin muistin lukemista varten.
SRAM	Staattinen suorasaantimuisti (engl. static random-access memory), Välimuistina käytetty nopea muistitekniikka.
STT	Spinivääntö (engl. Spin-transfer torque), elektronien spinien vaikutusta toistensa magnetoitumaan kuvaava ilmiö.
WWL	Kirjoituslinja (engl. write word line) Magneetoresistiivisissä suorasaantimuisteissa muistin kirjoittamisessa hyödynnettävä linja.
<b>B</b>	Magneettivuon tiheys
<b>D</b>	Sähkövuon tiheys
<b>E</b>	Sähkökentän voimakkuus
<b>H</b>	Magneettikentän voimakkuus
<b>j</b>	Sähkövirran tiheys
<b>M</b>	Magnetoituma
$\epsilon$	Permittiivisyys
$\rho$	Varaustiheys
$\mu$	Permeabiliteetti.

# 1. JOHDANTO

Esineiden internetin myötä mikrokontrollerijärjestelmien määrä kasvaa jatkuvasti. Ne mahdollistavat monia uusia sovelluksia, kuten älykodit ja älykellot. Sovellusten kasvava monimutkaisuus vaatii entistä suurempia ja nopeampia muisteja. Lisäksi suuri osa näistä sovelluksista saa energiansa hyvin pienistä akuista, mutta laitteiden halutaan kuitenkin pystyvän toimimaan mahdollisimman pitkään ilman jatkuvaa huoltamista ja lataamista.

Tärkein keino virrankulutuksen hallintaan mikrokontrollerijärjestelmissä on erilaisten lepotilojen hyödyntäminen, kun laite ei ole toiminnassa. Lepotilassa muisti kuitenkin kuluttaa huomattavan määrän virtaa, sillä käytössä olevat puolijohdemuistit kuluttavat jatkuvasti virtaa tilansa säilyttämiseksi. Laite voi kuitenkin mennä syvään uneen, jolloin tila tallennetaan flash-muistiin, jota ei tarvitse virkistää. Flash-muistiin kirjoittaminen puolestaan kuluttaa paljon energiaa ja käyttää flash-muistin rajoitettuja kirjoitusyhteitä. Täten myös virrankulutus liittyy olennaisesti mikrokontrollerin muistiin. [1]

Yhtenä ratkaisuna mikrokontrollerijärjestelmien muistien kohtaamiin ongelmiin ovat magneettimuistit. Magneettimuistit ovat luonnostaan haihtumattomia ja voivat mahdollistaa entistä tehokkaamman lepotilojen hyödyntämisen. Tämän työn tavoitteena on karsoittaa magneettimuistien kehitystä sekä tutkia niiden potentiaalia mikrokontrollerijärjestelmien muistina. Lisäksi pohditaan sovelluksia, joissa puolijohdemuistien korvaaminen magneettimuisteilla toisi suurimman hyödyn.

Luvussa 2 esitellään magneettimuistiteknologioiden kannalta tärkeät magnetismi-ilmiöt. Luvussa 3 käsitellään magneettimuistiteknologioita ja niiden toimintaa. Luvussa 4 tarkastellaan mikrokontrollerijärjestelmien nykyistä muistirakennetta sekä eritellään sen kohtaamat ongelmat. Luvussa 5 vertaillaan magneettimuistien ja puolijohdemuistien tärkeimpiä ominaisuuksia, joiden kautta tarkastellaan magneettimuistien potentiaalia mikrokontrollerisovelluksissa. Lopuksi luvussa 6 kootaan työn tärkeimmät havainnot.

## 2. SÄHKÖMAGNETISMI

Tässä luvussa käsitellään muistiteknologioiden kannalta oleelliset sähkömagneettiset ilmiöt. Ferromagnetismi on ilmiöistä tärkein magneettimuisteille, sillä kaikki magneettimuistiteknologiat perustuvat ferromagneettisten aineiden ominaisuuksiin. Sähkömagneettinen induktio puolestaan on ollut tärkeänä osana historiallisia magneettimuisteja, ja magnetoresistanssi toimii perustana modernien magneettimuistiteknologioiden lukuoperaatiolle. [2]

Sähkömagnetismin tärkeitä peruskäsitteitä ovat sähkökenttä ja magneettikenttä. Sähkökenttää kuvataan sen voimakkuuden  $\mathbf{E}$  ja sähkövuon tiheyden  $\mathbf{D}$  avulla. Vastaavasti magneettikenttää kuvataan magneettikentän voimakkuuden  $\mathbf{H}$  ja magneettivuon tiheyden  $\mathbf{B}$  avulla. Tyhjiössä tiheydellä ja voimakkuudella ei ole eroa, mutta väliaineessa kenttien tiheys riippuu väliaineen permittiivisyydestä  $\epsilon$ ,  $\mathbf{D} = \epsilon\mathbf{E}$  ja aineen permeabiliteetista  $\mu$ ,  $\mathbf{B} = \mu\mathbf{H}$ . [3]

Sähkömagnetismin tärkeimmät kaavat on koottu Maxwellin yhtälöihin, jotka ovat

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho, \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (2)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\partial\mathbf{B}/\partial t, \quad (3)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{j} + \partial\mathbf{D}/\partial t, \quad (4)$$

missä  $\mathbf{D}$  on sähkövuon tiheys,  $\rho$  on varaustiheys,  $\mathbf{B}$  on magneettivuon tiheys,  $\mathbf{E}$  on sähkökentän voimakkuus,  $\mathbf{H}$  on magneettikentän voimakkuus ja  $\mathbf{j}$  on sähkövirran tiheys. Nämä kaavat muodostavat yhteyden sähkömagneettisten suureiden välille. Yhtälö (1) kuvaa sähkövarauksen aiheuttamaa sähkökenttää, kun taas yhtälön (2) perusteella magneettisia monopoleja, eli yksinapaisia magneetteja, ei ole. Yhtälö (3) ja yhtälö (4) antavat riippuvuuden sähkö- ja magneettikenttien välille. Kaavan (3) perusteella muuttuva magneettikenttä aiheuttaa sähkökentän, ja vastaavasti kaavan (4) perusteella sähkövirta tai muuttuva sähkökenttä aiheuttavat magneettikentän. [3]

## 2.1 Kappaleen magneettisuus

Kappaleen magneettisuus ilmaistaan magnetoituman  $\mathbf{M}$  avulla. Magnetoituma kuvaa kappaleen sisältämien magneettimomenttien keskiarvoa, ja se vaikuttaa kappaleen magneettikenttään kaavan (5) mukaisesti

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}), \quad (5)$$

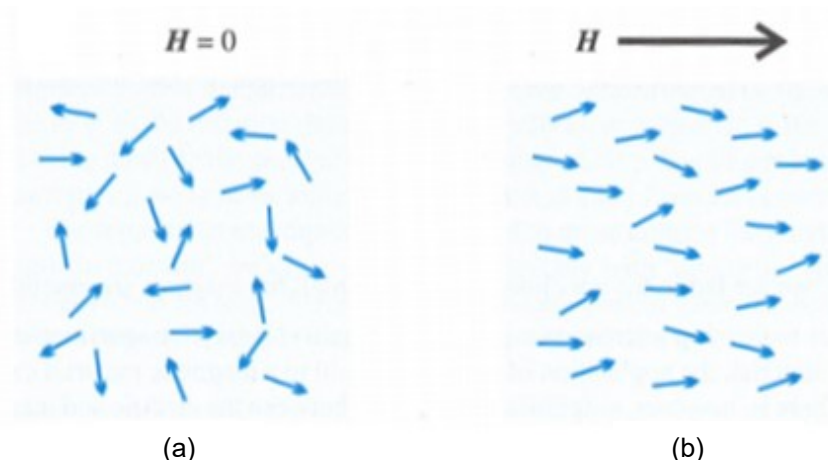
missä  $\mu_0$  on tyhjiön permeabiliteetti. [3] Kaavan (5) perusteella kappale voi joko vahvistaa tai heikentää ulkoista magneettikenttää riippuen magnetoituman suunnasta.

Kappaleen sisältämät magneettiset dipolit syntyvät sen atomien elektronien kierto- liikkeestä sekä niiden spineistä, ja näistä huomattavasti suurempi merkitys on spineillä [4]. Elektronin spin on sen pyörimisliikettä oman akselinsa ympäri ja koska elektroni on sähköisesti varautunut hiukkanen, aiheuttaa sen pyörimisliike muuttuvan sähkökentän. Tämä muuttuva sähkökenttä puolestaan aiheuttaa magneettimomentin  $\mathbf{m}$ , jonka suunta riippuu elektronin spinistä ja kiertoradasta. [3] Mikäli mikään ulkoinen voima ei ole vaikuttanut aineen elektroneihin, ovat niiden magneettimomentit jakautuneet satunnaisesti ja kappaleen magnetoituma on nolla, sillä magneettimomentit kumoavat toisensa [5].

Kappaleet voidaan jakaa niiden magneettisten ominaisuuksien perusteella kolmeen pääluokkaan, jotka ovat diamagneettiset, paramagneettiset ja ferromagneettiset aineet. Pääluokkien lisäksi on harvinaisempia alaluokkia, kuten ferrimagneettiset ja antiferromagneettiset aineet. [4]

Diamagneettisissa aineissa ei luonnostaan ole magneettisia dipoleita, mutta magneettikentässä niihin indusoituu väliaikaisia dipoleita, jotka ovat vastakkaisuuntaisia magneettikenttää kohden ja siten heikentävät ulkoista magneettikenttää. Diamagneettisessa aineessa dipolit kuitenkin haihtuvat ulkoisen magneettikentän vaikutuksen päätyttyä. Paramagneettisissa aineissa puolestaan on satunnaisesti jakautuneita magneettisia dipoleita, jotka asettuvat magneettikentässä kentän suuntaisesti kuvan 1 mukaisesti. [6]

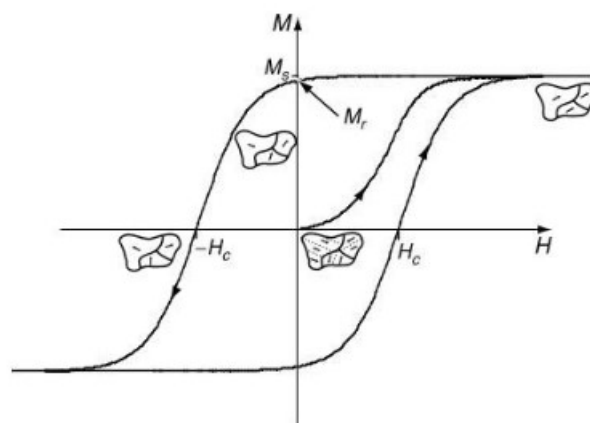




**Kuva 1.** Paramagneettisen aineen käyttäytyminen magneettikentässä [6].

Paramagneettisilla aineilla kuvan 1(b) mukainen magnetoituma suurelta osin palautuu kuvan 1(a) tilaan magneettikentän vaikutuksen päätyttyä [6]. Koska dia- ja paramagneettiset aineet menettävät magnetoitumansa ulkoisen magneettikentän vaikutuksen päätyttyä, eivät ne sovellu muistiteknologioihin.

Kolmas magneettisten aineiden pääluokka on ferromagneettiset aineet. Ferromagneettiset aineet käyttäytyvät paramagneettisten aineiden tavoin, mutta huomattavasti voimakkaammin ulkoisen magneettikentän vaikutuksessa. Tämän lisäksi ferromagneettinen aine säilyttää osan magnetoitumastaan myös, kun ulkoisen magneettikentän vaikutus lakkaa. Tätä ilmiötä kutsutaan ferromagneettiseksi hystereesiksi ja sen vaikutusta voidaan tarkastella aineen hystereesikäyrän avulla. [3] Esimerkki hystereesikäyrästä on kuvassa 2.



**Kuva 2.** Ferromagneettisen aineen hystereesikäyrä [3].

Kuvan 2 hystereesikäyrästä nähdään, kuinka kappale magnetoituu ulkoisen magneettikentän vaikutuksesta. Käyrälle on myös merkitty piste  $M_r$ , joka on ferromagneettisen ai-

neen säilyttämä magnetoituma, kun ulkoisen kentän vaikutus palaa nolnaan. Lisäksi nähdään piste  $H_c$ , joka kuvaa sitä magneettikentän voimakkuutta, jolla säilytetty magnetoituma voidaan palauttaa takaisin nolnaan. [3] Kuvasta voidaan myös havaita, ettei magnetoituma eikä täten magneettivuo  $B$  käyttäydy lineaarisesti, jolloin kaava (5) ei useimmiten päde ferromagneettisille aineille. [6] Hystereesi-ilmiön ansiosta ferromagneettisilla aineilla on luonnostaan eräänlainen muisti, ja siksi magneettimuistiteknologiat perustuvat ferromagneettisista aineista valmistettuihin muistielementteihin, joiden  $M_r$  on korkea [7].

## 2.2 Sähkömagneettinen induktio

Sähkömagneettinen induktio on fysikaalinen ilmiö, joka perustuu Faradayn lakiin, joka on yksi Maxwellin yhtälöistä ja esitetty kaavassa (3). Faradayn lain mukaan muuttuva magneettikenttä aiheuttaa sähkökentän. Sähkömagneettisessa induktiossa hyödynnetään tätä syntyvää sähkökenttää tuomalla johdin muuttuvan magneettikentän läheisyyteen, jolloin sähkökenttä synnyttää johtimeen jännitteen, joka indusoi virran. [6]

Magneettimuisteissa tätä ilmiötä on hyödynnetty muistin lukemisessa, seuraamalla indusoiko muistielementti sähkövirran, kun sen suuntaa yritetään kääntää [7]. Lisäksi Faradayn lain vastapari Amperen laki, joka on myös yksi Maxwellin yhtälöistä ja esitetty kaavassa (4), kuvaa magneettimuistien kannalta tärkeää ilmiötä, jossa johtimessa kulkeva virta synnyttää magneettikentän ympärilleen. Mikäli tämä virta on riittävän suuri, ja siten synnyttää tarpeeksi voimakkaan magneettikentän, voidaan tämän avulla asettaa ferromagneettisen muistielementin magnetoituma haluttuun suuntaan [7].

## 2.3 Magnetoiresistanssi

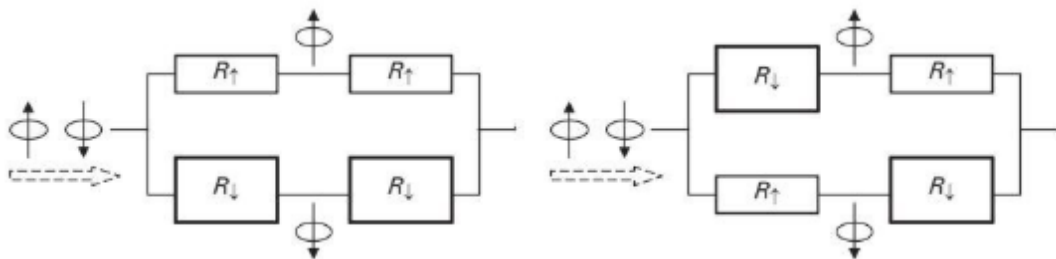
Resistanssi kuvaa kykyä vastustaa sähkövirtaa. Magnetoiresistanssi puolestaan kuvaa magneettikentän vaikutusta kappaleen kokonaisresistanssiin ja se ilmaistaan usein muutoksen suuruutena prosenteissa minimiresistanssista maksimiresistanssiin.

Sähkövirta on varausten liikettä johtimessa ja magneettikenttä aiheuttaa näihin liikkuviin sähkövarauksiin voiman, jonka suuruus voidaan laskea kaavalla

$$\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}, \quad (6)$$

missä  $\mathbf{F}$  on varaukseen kohdistuva voima,  $q$  on varaus ja  $\mathbf{v}$  on varauksen nopeus [6]. Kaavasta (6) nähdään, että magneettikenttä aiheuttaa varaukseen sen kulkusuuntaan nähden kohtisuoran voiman, joka pidentää sen kulkemaa reittiä aiheuttaen resistanssin kasvamisen [3]. Magneto-resistanssi-ilmiö on kuitenkin liian heikko hyödynnettäväksi ei-ferromagneettisilla aineilla, kun taas ferromagneettisilla aineilla magneto-resistanssin vaikutus resistanssiin voi olla jopa yli 500% riippuen käytetystä teknologiasta [2].

Suuri magneto-resistanssi (engl. GMR, giant magnetoresistance) on ilmiö, jossa usean vuorottelevan magneettisen ja ei-magneettisen kerroksen kokonaismagneto-resistanssi on hyvin suuri verrattuna yksittäisten kerrosten vaikutukseen. Tämän ilmiön aiheuttaa mahdollisuus magnetoida kerrokset eri suuntiin, jolloin elektronien molemmat spinit kokevat suurempaa resistanssia, kun taas samaan suuntaan magnetoidut kerrokset vastustavat toisen spinin omaavia elektroneja huomattavasti vähemmän. [2] Kuvassa 3 on tätä ilmiötä havainnollistavat sijaiskytkennät kahden magnetoidun ja yhden neutraalin kerroksen suurelle magneto-resistanssieleментille.



**Kuva 3.** *Samaan (vasen) ja eri (oikea) suuntiin magnetoidut kerrokset* [2].

Kuvan 3 sijaiskytkennässä suurempi laatikko kuvaa suurempaa resistanssia ja sen avulla voidaan nähdä kokonaisresistanssin muuttuvan huomattavasti riippuen kerrosten magnetoitumasta. Usein toinen kerros on kiinteästi magnetoitu yhteen suuntaan ja resistanssia muutetaan vain toisen kerroksen magnetoitumaa muuttamalla. [2]

Tunnelimagneto-resistanssi toimii samalla periaatteella kuin suuri magneto-resistanssi, mutta neutraali kerros korvataan hyvin ohuella, 1-2 nm paksuisella, eristekerroksella. Yhtä tällaista ferromagneetti-eriste-ferromagneetti -elementtiä kutsutaan magneetti-tunneliliitokseksi eli MTJ:ksi (engl. magnetic tunnel junction). [3] MTJ:ssä varauksen-kuljettajat pääsevät toiselta ferromagneettiselta kerrokselta toiselle tunnelointi-ilmiön

avulla. Kyseessä on kvanttifyysinen ilmiö ja sen todennäköisyys on merkittävästi suurempi, kun ferromagneettisten kerrosten magnetoituma on saman suuntainen, mikä kasvattaa tunnelimagneto-resistanssin vaikutuksen huomattavasti suurta magneto-resistanssia voimakkaammaksi. [8]

### 3. MAGNEETTIMUISTIT

Tässä luvussa käsitellään magneettimuistiteknoologioita aloittaen niiden historiallisesta kehityksestä. Nykyaikaisista muistiteknoologioista esitellään magnetoresistiivinen suorasaantimuisti eli MRAM (engl. Magnetoresistive random-access memory) ja siitä jatko-kehitetty, spinipolarisoidun virran magnetoresistiivinen suorasaantimuisti eli STT-MRAM (engl. spin-transfer torque magnetoresistive random-access memory). Käsittely keskittyy erityisesti suorasaantimuisteihin, joista tieto saadaan aina samassa ajassa riippumatta sen sijainnista muistissa [9].

Muistiteknoologioissa kaksi tärkeintä ominaisuutta ovat suorituskyky ja kapasiteetti. Suorituskykyä mitataan usein saantiajalla, joka kertoo kuinka kauan datan lukeminen muistista kestää. Lisäksi voidaan tarkastella myös kirjoitusaikaa, mutta usein saantiajan vaikutus muistin suorituskykyyn on suurempi. Kapasiteetti puolestaan kuvaa kuinka paljon dataa muistiin voidaan tallentaa. Usein näiden kahden ominaisuuden välillä joudutaan tekemään kompromissi, jotta muistin hinta ei nouse liian suureksi. Tämän kompromissin vaikutuksia voidaan kuitenkin lievittää toteuttamalla muisti hierarkkisesti. Muistihierarkian avulla pyritään tarjoamaan hitaan muistin suuri kapasiteetti ja nopean muistin suorituskyky yhdellä muistirakenteella. [10]

Nykyaikaisessa järjestelmässä muistihierarkia koostuu kolmesta osasta, jotka ovat välimuisti, päämuisti ja toissijainen muisti. Välimuistissa sijaitsee nopein muisti, jonka saantiaika on vain muutamia nanosekunteja, mutta hinta bittiä kohden on korkea. Tällainen äärimmäisen lyhyen saantiajan muistiteknoologia on esimerkiksi staattinen suorasaantimuisti eli SRAM (engl. static random-access memory). Päämuistina toimii usein dynaaminen suorasaantimuisti eli DRAM (engl. dynamic random-access memory), jonka saantiaika on noin 50–70 ns. Viimeisenä muistitasona on toissijainen muisti, joka on toteutettu suuren kapasiteetin, mutta hitaan saantiajan haihtumattomalla muistiteknologialla. Siihen voidaan tallentaa data, kun virta katkaistaan. [10]

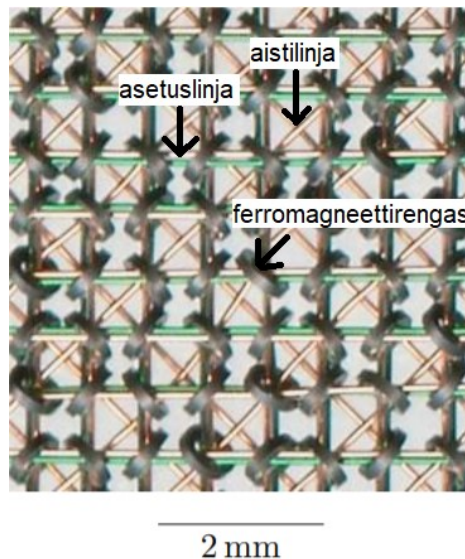
#### 3.1 Magneettimuistien historia

Magneettimuistien historia on lähes yhtä pitkä kuin tietokonemuistiteknoologioiden. Ensimmäiset magnetismia hyödyntävät digitaaliset muistiteknoologiat olivat magneettirumpu ja -nauha. Magneettinauhaa oli käytetty jo aiemmin audiodatan tallentamiseen, mutta 1950-luvulla sitä alettiin hyödyntää myös digitaalisen datan tallennuksessa toissijaisena

muistina. Rumpumuisteja sen sijaan käytettiin tietokoneiden päämuisteina magneettinauhaa lyhyemmän saantiajan ansiosta. Rumpumuistin lyhyempi saantiaika saavutettiin hyödyntämällä useaa luku- ja kirjoituspäätä nopeasti pyörivällä rummulla, jolloin oikean kohdan löytäminen oli huomattavasti samaan luku- ja kirjoitusperiaatteeseen perustuvaa nauhaa nopeampaa. [11] Näistä kahdesta teknologiasta magneettinauhoja kehitetään edelleen suurten datamäärien tallentamista varten [12].

Seuraava merkittävä magneettimuistitekniologia oli magneettirengasmuisti. Se oli ensimmäinen magnetismiin perustuva suorasaantimuistitekniologia ja korvasi sitä edeltäneen tyhjiöputken tietokoneen päämuistina huomattavasti lyhyemmän saantiaikansa ansiosta. Tämän lisäksi magneettirengasmuisti oli hyvin halpaa yksinkertaisen toimintaperiaatteensa ansiosta. [11]

Magneettirengasmuistin toiminta perustuu pienten ferromagneettisten renkaiden magnetoimiseen myötä- tai vastapäivään. Kuvassa 4 on leikkaus magneettirengasmuistista



**Kuva 4.** *Magneettirengasmuisti, muokattu lähteestä [7].*

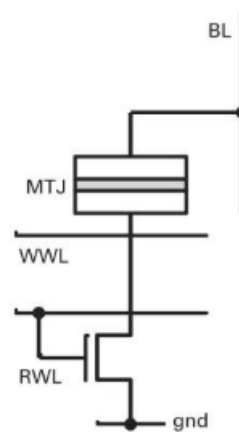
Kuvassa 4 näkyy magneettirengasmuistin tärkeimmät osat: asetulinja, aistilinja sekä itse ferromagneettirenkaat. Asetulinjat kulkevat kuvassa 4 pysty- ja vaakasuorassa. Niiden avulla voidaan asettaa vain haluttu bitti ajamalla pysty- ja vaakasuunnassa tietyn renkaan kohdalta sähkövirta, joka tuottaa puoliksi riittävän vahvan magneettikentän renkaan magnetoituman kääntämiseksi. Tällöin valitun renkaan kohdalla magneettikenttien yhteisvaikutus riittää asettamaan sen haluttuun tilaan, muttei vaikuta ympäröiviin renkaihin. Aistilinja on yhtenäinen linja, joka kulkee jokaisen renkaan lävitse. Muistin lukemiseksi asetetaan haluttu bitti nolllaksi ja tarkastellaan, indusoituuko aistilinjalle sähkövirta. Tämä myös tarkoittaa lukutapahtuman olevan tuhoava, sillä luettu muisti asetetaan aina nolllaksi. Jokaista lukuyritystä seuraakin uusi kirjoitus, jotta dataa ei menetetä. [7]

Magneettirengasmuisti oli viimeinen magneettimuistiteknologia, jota käytettiin tietokoneen päämuistina ennen kuin puolijohdemuistit korvasivat ne lyhyemmän saantiajan ja halvemman hinnan ansiosta [11]. Puolijohdemuistien suorituskyvyn kanssa kilpailevien suorasaantimagneettimuistien kehitys on kuitenkin jatkunut niiden luontaisen haihtumattomuuden motivoimana [2].

### 3.2 Magneto-resistiivinen suorasaantimuisti

Suureen magneto-resistanssiin perustuvia MRAM-teknologioita alettiin kehittämään jo 1980-luvun loppupuolella. Suuren magneto-resistanssin vaikutus resistanssiin oli kuitenkin liian pieni käytännöllisen ja luotettavan muistin perustaksi. 1990-luvun puolivälissä havaittiin kuitenkin tunnelimagneto-resistanssi ja MTJ:stä tuli magneto-resistiivisten muistiteknologioiden peruselementti. [2]

MRAM koostuu yhden transistorin ja yhden MTJ:n muistisolusta, joista kukin tallentaa yhden bitin muuttamalla vapaan kerroksen magnetoitumaa [2]. Kuvassa 5 on esitettyä yhden tällaisen muistisolun rakenne.



**Kuva 5.** Yhden MTJ:n ja yhden transistorin MRAM-muistisolu [2].

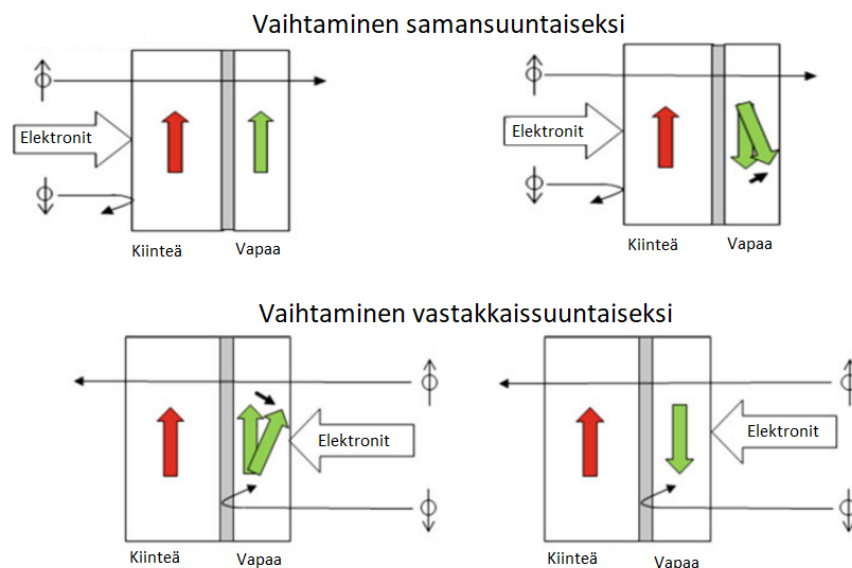
Kuvassa 5 BL tarkoittaa bittilinjaa (engl. bit line), WWL on kirjoituslinja (engl. write word line), RWL on lukulinja (engl. read word line) ja gnd on maapotentiaali. Muistisolun kirjoittaminen noudattaa samaa periaatetta kuin magneettirengasmuisti, jossa halutuilla bitti- ja kirjoituslinjoilla ajetaan sopiva virta niiden risteämiskohdassa olevan MTJ:n tilan vaihtamiseksi. Muistin lukeminen tapahtuu ajamalla bittilinjalla virtaa ja tarkastelemalla sen aiheuttamaa jännitettä, josta voidaan päätellä MTJ:n tila. Lisäksi muistia lukiessa muistisolua vastaava transistori avataan lukulinjan avulla ja siten virta pääsee kulkemaan vain valitussa muistisolussa. [2] Toisin kuin magneettirengasmuisteissa, lukutapahtuma ei enää ole tuhoava ja täten energiaa ei kulu uudelleenkirjoituksiin.

MRAM:in vahvuudet ovat sen haihtumattomuus, kestävyys ja hyvä suorituskyky. Haihtumattomuutensa ansiosta MRAM ei kuluta energiaa muistin ylläpitämiseen, mikä tekee siitä energiatehokkaan muistin [13]. Kestävyydellä tarkoitetaan muistien yhteydessä sitä, kuinka monta kirjoituskertaa yksittäinen muistisolu kestää luotettavasti. MRAM:in on arvioitu kestävän vähintään  $10^{16}$  kirjoitusyhtä, mikä tekee siitä yhden kestävimpiä muistitekniikoita [14]. MRAM:in saantiaika oli vuonna 2000 vain 14 nanosekuntia ja sitä voidaan suorituskykynsä puolesta hyödyntää sekä pää- että välimuistina [15].

Heikkoutena tällä MRAM-toteutuksella on huono skaalautuvuus ja sen aiheuttama virrankulutus. Kun soluja pienennetään ja niiden välit lyhenevät, tulee entistä hankalammaksi kirjoittaa vain haluttu solu niin että viereiset solut eivät vaihda tilaansa. Tähän voidaan vaikuttaa vaihtamalla ferromagneettinen materiaali sellaiseen, jolla on suurempi  $H_c$ . Tämä kuitenkin vaatii kirjoitusvirran kasvattamista, mikä heikentää muistin energiatehokkuutta. [16]

### 3.3 Spinipolarisoidun virran magneto-resistiivinen suorasaantimuisti

Spinipolarisoidun virran magneto-resistiivinen suorasaantimuisti eli STT-MRAM perustuu MTJ:n vapaan kerroksen magnetoituman kääntämiseen spinipolarisoidulla virralla ulkoisen magneettikentän sijasta. STT-ilmiö perustuu virran suodattamiseen siten, että se sisältää vain enemmistön toista spiniä olevia elektroneja ja kun riittävän suuri polarisoitu virta ajetaan MTJ:n läpi, se kääntää vapaan kerroksen elektronien spinit samansuuntaisiksi. Kuvassa 6 on kuvattuna tilan vaihtaminen spinipolarisoidun virran avulla. [16]



**Kuva 6.** MTJ:n tilan vaihtaminen spinipolarisoidulla virralla, muokattu lähteestä [16].



Kuvasta 6 nähdään, että tilan vaihtaminen tapahtuu ajamalla virtaa eri suunnista MTJ:n läpi. Kun kerrokset halutaan magnetoida samansuuntaisiksi, ajetaan virtaa vapaasti magnetoidun kerroksen puolelta, jolloin elektronit kulkevat vastakkaiseen suuntaan. Tällöin suurin osa MTJ:n vapaan kerroksen läpi kulkevasta virrasta sisältää vain kiinteän kerroksen kanssa samansuuntaisesti magnetoituneita elektroneja, jolloin vapaan kerroksen magnetoitumasta tulee myös samansuuntainen. Jos kerrokset halutaan puolestaan magnetoida vastakkaissuuntaisiksi, ajetaan virtaa kiinteän kerroksen puolelta. Nyt kiinteän kerroksen magnetoituman kanssa vastakkaissuuntaisesti magnetoituneet elektronit eivät pääse eristekerroksen yli vaan viipyvät vapaassa kerroksessa pidemmän aikaa kääntäen senkin magnetoituman vastakkaissuuntaiseksi. [16]

STT-MRAM-muistisolu poikkeaa rakenteeltaan tavallisesta MRAM:ista siten, että kirjoituslinjaa ei enää tarvita ja maapotentiali on korvattu lähdelinjalla, jotta virtaa voidaan ajaa molempiin suuntiin. Suorituskyvyltään STT-MRAM on yhtä hyvä kuin tavallinen MRAM. Se kuitenkin skaalautuu huomattavasti paremmin, sillä kirjoitustekniikkansa ansiosta sen virrankulutus pienenee mitä pienempi muistisolu on. [16] STT-MRAM ei ole täysin haihtumaton muisti, toisin kuin MRAM, mikäli se on skaalattu riittävän pieneksi. Tällöinkin data säilyy muistissa useita vuosia ja sitä voidaan käyttötarkoituksesta riippuen pitää haihtumattomana. [17]

MRAM-tekniikan vahvuuksien, hyvän skaalautuvuuden ja pienen virrankulutuksen ansiosta STT-MRAM:ia pidetään erittäin lupaavana muistitekniologiana. Kehitysvaiheessa sen suurimpana ongelmana on ollut luotettavuus, mikä johtuu luku- ja kirjoitusoperaatioiden samankaltaisuudesta. Lukuvirta on kirjoitusvirtaa pienempi, mutta tunnelointi-ilmiön luonteen takia syntyy satunnaisia virheellisiä kirjoituksia lukuoperaation yhteydessä. [18] Kasvaneen kiinnostuksen ja tutkimuksen ansiosta luotettavuusongelmat ovat vähentyneet ja ensimmäiset 1 gigatavun STT-MRAM-muistit tulivat markkinoille vuoden 2019 lopussa [19].

## 4. MIKROKONTROLLERIJÄRJESTELMÄN MUISTI

Tässä luvussa tutustutaan muistiin mikrokontrollerijärjestelmissä. Aluksi esitellään yleisimmin käytetyt teknologiat ja niiden roolit mikrokontrollereiden muistihierarkiassa. Tämän jälkeen selvitetään, millaisia ongelmia mikrokontrollereiden muistiin liittyy ja miten niitä pyritään ratkaisemaan.

### 4.1 Muistirakenne

Mikrokontrollerijärjestelmissä eniten käytetyt muistiteknologiat ovat flash-muisti ja SRAM. Näiden lisäksi niissä on usein pieni elektronisesti tyhjennettävä lukumuisti eli EEPROM (engl. Electrically erasable read-only memory). [20] EEPROM:ia käytetään pääasiassa asetusten ja käyttäjätiedon tallentamiseen [21]. Kuitenkin sellaisissa sovelluksissa, joissa tallennetaan suuria määriä dataa haihtumattomaan muistiin, käytetään flash-muistia EEPROM:in sijaan [22]. Täten EEPROM:in vaikutus mikrokontrollerin normaaliin toimintaan jää pieneksi, eikä sitä tarkastella tässä työssä.

Tietokoneiden päämuistina käytettävää DRAM:ia ei yleensä hyödynnetä mikrokontrollereiden muistihierarkiassa [20]. Mikrokontrollereiden muistihierarkia koostuu usein vain SRAM-välimuistista ja haihtumattomasta toissijaisesta flash-muistista. Sovelluksissa, joissa tarvitaan erityisen paljon työmuistia, mutta sen halutaan olevan nopeaa, käytetään eri tavalla optimoituja SRAM-muisteja. Tällöin välimuistina on mahdollisimman nopea SRAM ja päämuistina käytetään hieman hitaampaa mahdollisimman suuren kapasiteetin SRAM:ia. [22]

Muistin päätehtävä mikrokontrollerijärjestelmissä on ohjelmakoodin suorittaminen ja sen tarvitsemien muuttujien säilyttäminen. Ohjelmakoodi säilytetään flash-muistissa ja sen tarvitsemat muuttujat asetetaan SRAM:iin nopean saatavuuden vuoksi. Ohjelmakoodin suorittamisessa hyödynnetään molempia muistitasoja, sillä suorittaminen suoraan flash-muistilta olisi pitkän saantiajan vuoksi liian hidasta. Ohjelma tuodaankin osissa nopeaan välimuistiin, jolloin käskyjen suorittamisen aikana voidaan samalla siirtää tulevia käskyjä korvaamaan jo suoritettuja. [22] Lisäksi mikrokontrollereissa käytetään NOR-tyypin flash-muistia ohjelman riittävän nopean suorittamisen takaamiseksi, sillä se on huomattavasti muissa käyttötarkoituksissa suosittua NAND-flashia nopeampaa [23]. Nopeuden ja kapasiteetin tasapainottamiseksi on mikrokontrollereissa tyypillisesti noin 8 tavua flash-muistia jokaista SRAM-tavua kohden. [22]

Päätehtävänsä lisäksi muistilla voi olla myös muita tärkeitä tehtäviä modernissa mikrokontrollerijärjestelmässä. Nämä tehtävät voidaan jakaa datan keräämiseen ja sen käsittelyyn. Datan käsittelyyn erikoistuvat järjestelmät vaativat enemmän SRAM:ia kuin yleensä, jotta ne kykenevät toimimaan nopeammin. Esimerkkejä tällaisista dataa käsittelevistä järjestelmistä ovat auton hallintajärjestelmä, joka käsittelee usealta sensorilta tulevaa dataa hyvin nopeasti turvallisen toiminnan takaamiseksi, sekä grafiikkayksiköt. Dataa keräävät järjestelmät puolestaan vaativat enemmän flash-muistia suurten datamäärien säilyttämiseksi. Dataa kerääviä sovelluksia ovat esimerkiksi erilaiset sensorit ja mustat laatikot. [22]

## 4.2 Muistiongelmat mikrokontrollerijärjestelmissä

Mikrokontrollerijärjestelmien muistiongelmat voidaan jakaa kahteen kategoriaan: kapasiteetti ja suorituskyky sekä virrankulutus ja kestävyys. Kapasiteetti ja suorituskyky ovat yleisiä muistiin liittyviä ongelmia myös tietokoneissa [10]. Virrankulutus ja muistin kestävyys puolestaan ovat erityisesti mikrokontrollerimuistien ongelmia [1].

Kapasiteetti- ja suorituskykyongelmat liittyvät toisiinsa, sillä molempien syynä on kasvava tarve muistille mikrokontrollerissa. Kapasiteettiongelmissa kyse on flash-muistin määrästä, kun taas suorituskykyyn vaikuttaa järjestelmän SRAM:in määrä. Molempien tarvetta kasvattaa mikrokontrollerisovelluksien kasvava monimutkaisuus. Suuremmat ja monimutkaisemmat ohjelmat tarvitsevat enemmän flash-muistia ohjelmakoodin säilyttämistä varten. Toisaalta monimutkaistuminen tarkoittaa myös useamman tehtävän suorittamista samanaikaisesti, mikä vaatii parempaa suorituskykyä. Monimutkaistumisen lisäksi mikrokontrollereiden keräämän ja käsittelemän datan määrä on kasvussa, mikä käyttää entistä enemmän muistia. [22]

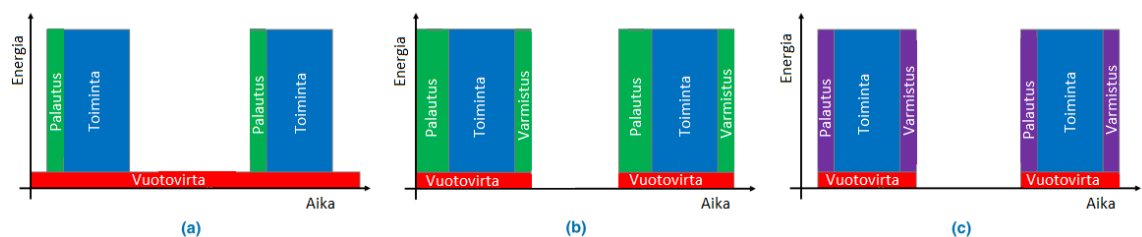
Ratkaisuna kapasiteetti- ja suorituskykyongelmiin on muistin määrän lisääminen, mikä ei kuitenkaan tarkoita suurempaa vaan tiheämpää muistia. Tiheämpi muisti toteutetaan pääasiassa pienentämällä yksittäistä muistisolua. SRAM voidaan skaalata pienempiinkin muistisoluihin, mutta tavallisen flash-muistin skaalautuminen nykyistä 28 nm solua pienemmäksi vaikuttaa epätodennäköiseltä. [22]

Virrankulutus on yksi merkittävä ongelma esineiden internetin kehittämisessä. Erityisesti se koskee langattomia laitteita, jotka saavat energiansa akuista tai paristoista. Nämä laitteet ovat usein pieniä ja siten myös niiden energiavarastojen tulee olla pieniä. Samalla näiden laitteiden toivotaan kuitenkin toimivan mahdollisimman pitkään ilman lataamista

tai paristojen vaihtamista. Pitkät huoltovälit korostuvat erilaisissa sensoreissa, jotka halutaan voida jättää vuosiksi ilman huoltoa. Virrankulutusongelmat koskevat kuitenkin myös useammin ladattavia älylaitteita, sillä liian nopeasti tyhjenevä akku haittaa käyttäjäkokemusta. [1]

Yleinen tapa vähentää mikrokontrollerijärjestelmän virrankulutusta ovat erilaiset lepotilat, joiden avulla pyritään pienentämään virrankulutusta, kun laite ei ole aktiivisessa käytössä. Usein virrankulutuksen minimoimiseksi laite onkin suurimman osan ajasta lepotilassa ja käynnistyy vain, jos sen täytyy suorittaa jokin operaatio. [23] Tavallisimpia lepotiloja ovat kevyt ja syvä uni. Kevyessä unessa SRAM:in tila säilytetään nopean heräämisen varmistamiseksi, mikä kuitenkin kuluttaa huomattavan määrän virtaa SRAM:in vuotovirtana. Syvässä unessa puolestaan SRAM tyhjennetään ja laitteen tila tallennetaan flash-muistiin. Flash-muistiin kirjoittaminen on kuitenkin paljon energiaa vaativa operaatio ja kuluttaa rajoitettuja kirjoituskertoja. [1] Lisäksi flash-muistin lukeminen on hidas operaatio, jolloin myös uudelleenkäynnistäminen kestää kauan ja kuluttaa siten huomattavan määrän energiaa heräämisen ja toiminnan aloittamisen välillä [23]. Syvä uni ei olekaan kannattava lyhyille ajanjaksoille suuren aloitusenergiansa vuoksi, mutta soveltuu kevyttä unta paremmin pitkille lepojaksolle, sillä laite ei syvässä unessa kuluta lähes yhtään virtaa [1].

Lepotilojen hyödyntämisen äärimmäisenä versiona on myös alettu hyödyntää ”yleensä pois päältä” -toimintamallia laitteissa, joissa matala virrankulutus on tärkein ominaisuus. Toimintamallin ajatuksena on rakentaa laite siten, että se voi olla oletusarvoisesti pois päältä, mutta herää nopeasti suorittamaan siltä vaaditut operaatiot. Operaation suorittamisen jälkeen laite sammuttaa jälleen itsensä ja jää odottamaan seuraavaa suoritettavaa operaatiota. [23] Tätä toimintamallia varten laitteella on usein flash-muistin lisäksi erillinen nopea haihtumaton muisti, johon SRAM:in tila voidaan tallentaa ennen sammuttamista. Tämän erillisen muistin tarjoama nopeus erottaa ’yleensä pois päältä’-toiminnan syvästä unesta. [24] Kuvassa 7 on kuvattuna eri toimintamallien käyttämä energia.



**Kuva 7.** Eri toimintamallien energiankulutus a) kevyt uni, b) syvä uni ja c) ”yleensä pois päältä”, muokattu lähteestä [24].

Kuvassa 7 on esitetty kolme erilaista toimintamallia, joilla muistin virrankulutusta voidaan rajoittaa, kun mikrokontrolleria ei käytetä. Kohdan a) kevyt uni mahdollistaa nopean lepotilaan siirtymisen ja nopean heräämisen, mutta energiaa kuluu jatkuvasti. Kohdan b) syvä uni joutuu varmistamaan laitteen tilan säilymisen tallentamalla sen flash-muistiin ennen lepotilaan siirtymistä. Tämän jälkeen energiaa ei kuitenkaan kulu ollenkaan. Lisäksi kohdassa b) nähdään heräämisessä kuluva energia, kun laitteen tila palautetaan flash-muistista. Viimeisenä kohdassa c) on ”yleensä pois päältä” -toimintamalli, joka toimii syvän unen tavoin. Erona on kuitenkin jatkuvaan syvään uneen soveltuva muistihierarkia, jossa nopean haihtumattoman muistin avulla saadaan SRAM:in tila tallennettua ja palautettua nopeasti, minkä ansiosta aktiivinen aika minimoidaan. [24]

Muistin kestävyys on lähes yksinomaan flash-muisteja koskeva ongelma, sillä suurin osa muista yleisesti käytetyistä muistitekniikoista kestää yli  $10^{16}$  uudelleenkirjoitusta [2]. Flash-muisti puolestaan kestää tyypillisesti noin  $10^5$ – $10^6$  kirjoitusyksiä [25]. Rajalliset kirjoitusyksiä eivät aiheuta ongelmia jos flash-muistia käytetään ohjelmamuistina, jolloin kirjoitustapahtumat ovat harvinaisia. Mikrokontrollerijärjestelmien keräämän datan määrän kasvaessa on kuitenkin yhä tavallisempaa, että flash-muisteja hyödynnetään myös datan tallentamiseen. Kestävyysongelmat korostuvat pitkäikäisissä laitteissa, kuten esimerkiksi autoissa. Älyautojen arvioidaan tekevän yli 500 000 kirjoitusoperaatiota toisijaiseen muistiin niiden käyttöaikana, mikä vaatii hyvin suuren ja erityisen kestäväksi muokatun flash-muistin. [22]

## 5. MUISTITEKNOLOGIOIDEN VERTAILU

Tässä luvussa tutkitaan tarkemmin käsiteltyjen muistitekniologioiden ominaisuuksia ja vertaillaan magneettimuisteja käytettyihin puolijohdemuisteihin. Vertailun avulla pyritään tarkastelemaan magneettimuistien potentiaalia toimia niin SRAM:in kuin flash-muistinkin korvaajana erilaisissa sovelluksissa.

### 5.1 Suorituskyky

Jotta magneettimuistit voisivat korvata puolijohdemuistit, tulee niiden kyetä kilpailemaan näiden suorituskyvyn kanssa. Erityisen tärkeää suorituskyky on työmuisteissa, mutta sillä on vaikutus mikrokontrollerin toimintaan myös toissijaisessa muistissa. Suorituskykyä voidaan mitata kahdella tavalla, jotka ovat kirjoitus- ja saantiaika. Toisinaan näiden kahden ajan välillä on suurikin ero, mutta esimerkiksi SRAM:ille ne ovat samat. Taulukoon 1 on koottu eri muistitekniologioiden suorituskykyyn liittyvät tiedot. Taulukon arvot on koottu useasta eri lähteestä, sillä kukin muistitekniologia voidaan toteuttaa usealla eri tavalla, mikä aiheuttaa hieman vaihtelua nopeuksissa.

**Taulukko 1.** Muistitekniologioiden suorituskyvyt [2] [23] [24].

TEKNOLOGIA	NOR-FLASH	SRAM	STT-MRAM
SAANTIAIKA	<80 ns	1-50 ns	2-20 ns
KIRJOITUSAIKA	10 $\mu$ s/tavu	1-50 ns	2-100 ns
TYHJENNYSAIKA	1 s/128 kB	-	-

Taulukon 1 kirjoitusajoista nähdään flash-muistin hyvin pitkä kirjoitusaika, mikä tekee flash-muistista yksinomaan toissijaisen muistitekniologian. SRAM:in ja STT-MRAM:in suurehko vaihteluvälit selittyvät pääasiassa eri käyttötarkoituksiin optimoiduilla valmistustavoilla. Välimuisteiksi optimoidut muistit tarvitsevat suurimman nopeuden ja pää- tai toissijaiseksi suunnitellut muistit tarvitsevat enemmän kapasiteettia suorituskyvyn kustannuksella. SRAM:illa ja STT-MRAM:illa ei ole erillistä tyhjennysaikaa, sillä ne ovat luku- ja kirjoitusmuisteja eli vanhan tiedon päälle on mahdollista kirjoittaa uutta dataa. Flash-muisti puolestaan on lukumuisti, josta edellinen data on tyhjennettävä ennen uuden kirjoittamista. Tyhjennys flash-muistissa tapahtuu lohkoissa, kuten esimerkiksi taulukon 128 kB:n lohko. [16] Tyhjennysaika voidaan ajatella yhdistettynä jokaiseen kirjoitukseen, jolloin se kasvattaa kirjoitusaikaa.

Muistiteknologioiden suorituskyvyn vertailun kannalta on tärkeää huomioida mikrokontrollereiden kellotaajuus, sillä tämä määrittää, kauanko jokaisella käskyllä on aikaa suorittaa, ennen kuin se vaikuttaa koko systeemin toimintaan. Matalan virrankulutuksen mikrokontrollerit eivät ylitä 100 MHz kellotaajuutta, joka vastaisi 10 ns aikaa suorittaa jokainen käsky. [23] Tyypillinen kellotaajuus matalan virrankulutuksen sovelluksissa on noin 32–50 MHz ja äärimmäisen matalan kulutuksen sovelluksissa vastaavasti noin 8–24 MHz [24]. Näillä kellotaajuuksilla jokaisella käskyllä on suoritusaikaa 20–31 ns tai 42–125 ns. Korkeaan suorituskykyyn tähtäävillä mikrokontrollereilla kellotaajuus voi puolestaan olla jopa 480 MHz, mikä vastaa noin 2 ns suoritusaikaa jokaiselle käskylle [26].

STT-MRAM:in kirjoitusoperaation luotettavuus laskee kirjoituspulssin lyhentyessä. Täten taulukon 1 nopeinta mahdollista kirjoitusaikaa ei välttämättä ole mahdollista saavuttaa erityistä luotettavuutta vaativissa sovelluksissa. Suurimman STT-MRAM valmistajan mukaan riittävä luotettavuus nykyisillä tekniikoilla saavutetaan 6-8 ns kirjoituspulseilla. [27] Tutkimusympäristössä on kuitenkin kyetty osoittamaan riittävä kirjoitusluotettavuus jo 2 ns kirjoituspulseilla [28]. Mikäli tutkimustulokset on mahdollista siirtää tuotantoon, pystyy STT-MRAM vastaamaan SRAM:in suorituskykyyn nopeimmissakin mikrokontrollerijärjestelmissä.

Suorituskykynsä puolesta STT-MRAM kykenee kilpailemaan nykyisten puolijohde-muistien kanssa. Työmuistina se on riittävän nopea suurelle osalle mikrokontrollerijärjestelmiä, vaikka SRAM on hieman nopeampi. Flash-muistin korvaaminen huomattavasti nopeammalla STT-MRAM:illa voi tuoda merkittävän parannuksen järjestelmän kokonaissuorituskykyyn.

## 5.2 Kapasiteetti

Muistiteknologioiden kapasiteettia voidaan vertailla niiden skaalautumisen sekä yksittäisen muistisolun suhteellisen koon avulla. Skaalautumisella tarkoitetaan teknologian yhteensopivuutta pienempien yksittäisen elementtien kanssa. Moderneissa järjestelmissä käytettyjen puolijohdeprosessien yksittäisten elementtien suuruusluokat ovat nanometreissä. Pienin nykyisissä mikrokontrollereissa käytettävä prosessi on 28 nm [24].

SRAM skaalautuu teknologiansa puolesta hyvin myös pienempiin soluihin, mutta yksi SRAM-muistisolun koostuu kuudesta tai useammasta transistorista. Täten yksi SRAM-muistisolun on huomattavasti suurempi kuin samalla prosessilla valmistettu yhden transistorin STT-MRAM- tai flash-muistisolun. Suuremman kokonsa lisäksi SRAM:in skaalautumista rajoittaa vuotovirta. Sen jatkuvasti kuluttama vuotovirta kasvaa suuremmaksi kun

transistorit pienentyvät. Koska vuotovirta muodostaa suurimman osan SRAM:in kokonaisvirrankulutuksesta, sen minimointi on tärkeää matalatehoisissa sovelluksissa. Nykyinen keino pienentää vuotovirtaa on lisätä transistoreiden määrää, mikä puolestaan kasvattaa yksittäisen muistisolun kokoa. [29] Mikrokontrollerijärjestelmissä kasvava vuotovirta onkin merkittävin SRAM:in skaalautumista estävä tekijä [22].

Flash-muistin skaalautuminen on SRAM:ia perusteellisempi ongelma, sillä se aiheutuu teknologian toimintaperiaatteesta. Nykyisin käytössä olevan flash-muistin skaalautuminen pienemmäksi heikentää sen luotettavuutta ja lopulta muisti ei toimi ollenkaan, sillä varauksen säilyttävien hiukkasten määrä pienenee. Luotettavuuden heikkeneminen myös hidastaa muistia entisestään, kun muistin oikeellisuuden tarkistaminen vie enemmän aikaa. Lisäksi oikeellisuuden tehokas tarkistaminen on erityisen ongelmallista mikrokontrollereissa suosituille NOR-flashille, jossa hallintapiiri on huomattavasti hankalampi toteuttaa. NAND-flash voidaankin skaalata 16 nm soluihin, kun taas NOR-flash ei nykytekniikalla skaalaudu alle 28 nm soluun. [15]

Sulautetun NOR-flash-muistin skaalautumista parantavia tekniikoita kehitetään jatkuvasti. Yksi lupaava tekniikka on varauksen vangitseva CT-flash (engl. charge trapping), jonka avulla myös NOR-flash voi skaalautua 16 nm:iin ja pienempiin soluihin ilman, että luotettavuus kärsii liikaa [30]. CT-teknologialla on pystytty osoittamaan mikrokontrollerikäyttöön soveltuvan NOR-flash-muistin skaalautuminen 22 nm soluun [31].

Tavallisen MRAM:in skaalautuminen pysähtyi 90 nm soluun kasvavan virrankulutuksen seurauksena, mutta STT-MRAM skaalautuu myös pienempiin soluihin [16]. Toistaiseksi STT-MRAM skaalautuu 22 nm soluihin ennen kuin kirjoitusoperaatiota täytyy hidastaa huomattavasti [32]. Täten magneettimuistit pystyvät kilpailemaan puolijohdemuistien kanssa kokonaiskapasiteetissa. STT-MRAM:in skaalautuminen vaikuttaa kuitenkin merkittävästi sen suorituskykyyn, sillä sekä kirjoitus- että lukuoperaatioita tulee hidastaa virheiden välttämiseksi pienissä soluissa. Ajoneuvokäyttöön riittävän luotettavan 22 nm soluun valmistetun STT-MRAM:in kirjoitusaika on 200 ns ja lukuaika 20 ns. Kirjoitusaika on huomattavasti pidempi kuin taulukossa 1 esitetyt arvot. Näin hidas kirjoitusaika ei kuitenkaan ole välttämätön vaan 20 ns kirjoitusaika 22 nm solussa on saavutettavissa nykyteknologialla. Tämä voi jopa parantaa luotettavuutta, sillä liian pitkä kirjoituspulssi aiheuttaa haitallista lämpöä [33].

Samalla prosessilla valmistettu STT-MRAM-solu on hieman suurempi kuin flash-solu, mutta noin kolme kertaa pienempi kuin SRAM. STT-MRAM:in pienempi koko on suuri etu SRAM:iin verrattuna järjestelmän välimuistina. Suuremman välimuistin etu on siinä,



että hakuja toissijaisesta muistista täytyy tehdä harvemmin, jolloin järjestelmän suorituskyky kokonaisuutena on usein parempi. STT-MRAM:in suurempi koko ohittaa SRAM:in paremman nopeuden yli 8 megatavun välimuisteissa eli noin 15–22 nm soluissa. SRAM:in ohittaminen vaatii kuitenkin vielä MTJ-teknologian kehittymistä, jotta lukuoperaation nopeuttamista varten saavutettaisiin yli 200% TMR-arvo myös pienillä soluilla. [32]

STT-MRAM skaalautuu SRAM:ia paremmin, mutta mahdollisesti flash-muistia huonommin, mikäli CT-flash skaalautuu alle 20 nm soluihin. STT-MRAM pystyy kuitenkin teknologiansa puolesta skaalautumaan vielä pienempiinkin soluihin. Osoituksena teknologian skaalautuvuudesta MTJ:n tila on onnistuttu vaihtamaan STT-ilmiön avulla 11 nm soluissa, joten skaalautuminen pienempiinkin soluihin on mahdollista, mikäli muistin toimintaan liittyvät ongelmat saadaan ratkaistua [34].

### 5.3 Virrankulutus

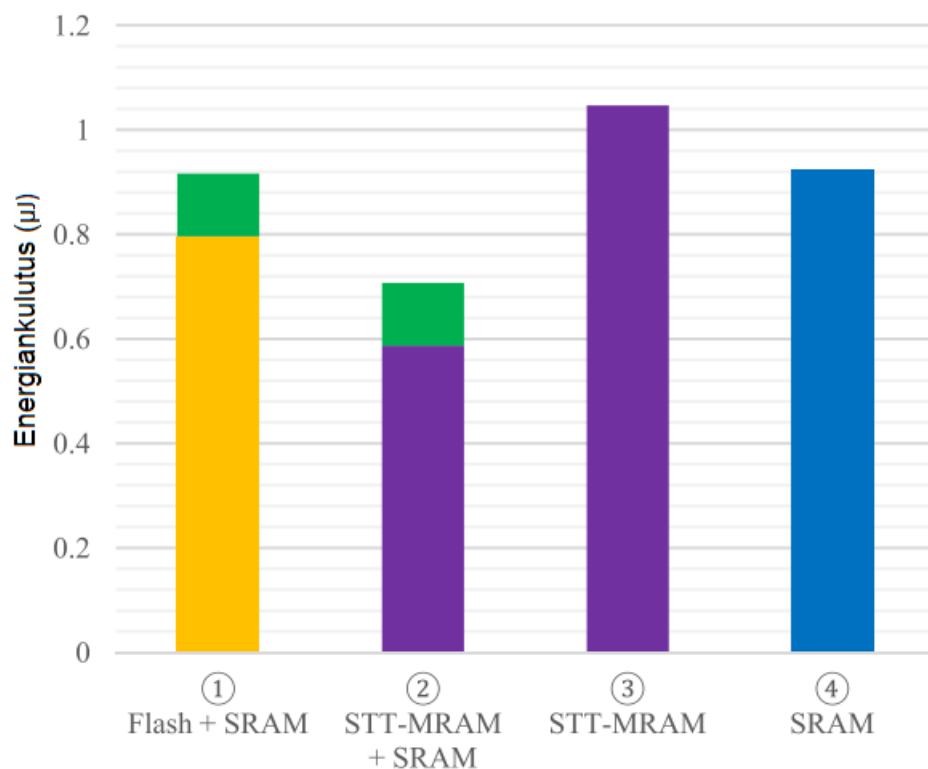
Esineiden internetin ja akkukäyttöisten laitteiden yleistyessä virrankulutus on entistä tärkeämpi, ja tietyissä sovelluksissa jopa tärkein, muistiteknologian ominaisuus [23]. Erityisesti sellaiset laitteet, jotka ovat suurimman osan ajasta erilaisissa lepotiloissa, tarvitsevat energiatehokkaan muistin. Näissä laitteissa suurin osa virrankulutuksesta tapahtuu lepotilassa ja sen aikana eniten energiaa kuluu muistissa. [1] Muistiteknologioiden virrankulutusta on kuitenkin vaikea vertailla yhden ominaisuuden avulla, sillä usein teknologioiden heikkoudet ja vahvuudet sijaitsevat muistin eri alueilla.

SRAM:in suurin virrankulutusongelma on sen jatkuva vuotovirta. Mikäli muistin tila halutaan säilyttää, virtaa kuluu jatkuvasti muistin käytöstä riippumatta. [29] Tämä on erityisen hankala ominaisuus laitteille, jotka ovat paljon lepotilassa, sillä SRAM:in jatkuvasti kuluttama vuotovirta pienentää lepotilan avulla säästetyn energian määrää. Mikäli laitteen tulee kyetä heräämään nopeasti lepotilasta, ei SRAM:in tilaa voida kuitenkaan menettää, ja energiaa kuluu lepotilan aikana paljon. Tätä lepotilan aikaista vuotovirtaa voidaan kuitenkin merkittävästi vähentää laskemalla SRAM:in käyttöjännite niin lähelle miniarvoa kuin mahdollista. [1] Lepotilan virrankulutuksessa STT-MRAM ja flash-muistit ovat haihtumattomuutensa ansiosta ylivoimaisia, sillä ne eivät kuluta lainkaan virtaa tilansa säilyttämiseen.

Aktiivisessa virrankulutuksessa SRAM on STT-MRAM:ia tehokkaampi. STT-MRAM:in kirjoittaminen kuluttaa tyypillisesti nelinkertaisen määrään energiaa SRAM:iin verrattuna, mutta sen lukuenergia on noin 10 % pienempi. Työmuistia luetaan enemmän kuin kirjoitetaan, mutta ei tarpeeksi antamaan STT-MRAM:ille merkittävää etua matalammalla

lukuenergialla. Flash-muistin tärkein tehtävä toissijaisena muistina on ohjelmakoodin säilyttäminen, jolloin siihen tehdään pääasiassa lukuoperaatioita. Flash-muistin lukuenergia on noin 26 % suurempi kuin STT-MRAM:in. Siten sen lukuenergia on näistä kolmesta teknologiasta suurin. [24] Flash-muistia hyödynnetään kuitenkin myös datan tallentamiseen paljon dataa keräävissä sovelluksissa tai laitteen tilan säilyttämistä varten ennen syvää unta. Tällöin siihen kohdistuu myös paljon kirjoitusoperaatioita. [1] Kirjoittaminen flash-muistiin on paljon energiaa kuluttava operaatio sen vaatiman korkean jännitteen ja hitauden vuoksi [16]. Flash-muisti voikin käyttää jopa tuhansia kertoja enemmän energiaa kirjoittamiseen kuin STT-MRAM tai SRAM [14].

Muistiteknologioiden virrankulutusta voidaan vertailla tarkastelemalla erilaisia muistihierarkioita. Kuvassa 8 on esitetty erilaisten muistihierarkioiden virrankulutus tavallisen ohjelman aktiivisen suorituksen aikana. Kuvan 8 ohjelmassa ei tehdä kirjoitusoperaatioita toissijaisiin muisteihin ja ohjelmaa suoritettiin yhden sekunnin ajan. [24]



**Kuva 8.** Muistihierarkioiden energiankulutus, muokattu lähteestä [24].

Kuvan 8 energiankulutuksessa on huomioitu vain luku- ja kirjoitusoperaatioihin kuluva energia, joten SRAM:in vuotovirtaa ei ole huomioitu. Kuvasta 8 nähdään rakenteen 2 toissijaisen STT-MRAM:in pienemmän lukuenergian antama hyöty virrankulutuksessa verrattuna rakenteen 1 flash-muistiin. Lisäksi voidaan huomata STT-MRAM:in suurehkon kirjoitusenergian vaikutus energiankulutukseen, kun verrataan rakenteita 3 ja 4,

joissa muistihierarkia koostuu vain suuresta työmuistista. On kuitenkin huomioitavaa, että STT-MRAM voi kuluttaa laitteen elinaikana vähemmän energiaa, sillä sen lepotilan virrankulutus on paljon pienempi kuin SRAM:in. Rakenne 3 soveltuukin parhaiten laitteille, jotka ovat pitkään lepotilassa ja käynnistyvät vain tekemään lyhyitä operaatioita silloin tällöin. Lepotilan vaikutus virrankulutukseen voidaan huomioida tarkastelemalla heti kuvan 8 aktiivisen jakson jälkeen alkavaa lepotilaa. Jos tämä lepotila kestää vähintään 150 ms, kuluttaa rakenne 3 kokonaisuutena vähemmän energiaa kuin rakenne 1. Mikäli lepotila puolestaan kestää yli 400 ms, rakenne 3 kuluttaa myös vähemmän energiaa kuin rakenne 2. [24]

STT-MRAM on mielenkiintoinen teknologia ”yleensä pois päältä” -toimintamallin jatkokehittämiseksi. Kuvan 8 rakenne 3 mahdollistaa tämän toimintamallin viemisen entistä pidemmälle lyhentämällä huomattavasti sammuttamiseen ja tilan palauttamiseen kuluva aikaa. Rakenteen 3 tapauksessa ei tarvitsisi kuin kopioida prosessorin sisäisten rekistereiden tilat välimuistiin ennen sammuttamista ja taas käynnistämisen yhteydessä palauttaa rekistereiden tilat. [35] Tällaisella haihtumattomasta työmuistista koostuvalla rakenteella energiaa ei kulu juuri lainkaan virransäästöön, toisin kuin nykyisillä lepotiloilla.

Virrankulutuksen kannalta STT-MRAM:illa on potentiaalia korvata paljon energiaa kuluttavat puolijohdemuistit mikrokontrollereissa. Etenkin lepotiloja usein hyödyntävien laitteiden, kuten esimerkiksi erilaisten sensoreiden, virrankulutusta voidaan parantaa merkittävästi hyödyntämällä haihtumatonta työmuistia. Flash-muistin korvaajana STT-MRAM voi parantaa laitteen virrankulutusta huomattavasti myös pitkään aktiivisessa tilassa olevissa laitteissa. STT-MRAM:in aktiivisen tilan tehokkuutta tulee kuitenkin vielä parantaa, jotta se pystyisi korvaamaan SRAM:in näissä sovelluksissa. [24]

## 5.4 Muut ominaisuudet

Tässä alaluvussa tarkastellaan muistiteknologioiden muita ominaisuuksia, jotka vaikuttavat tietyissä mikrokontrollerisovelluksissa, mutta jotka ovat vähemmän universaaleja kuin edellä käsitellyt. Nämä ominaisuudet ovat kestävyys, datan säilyvyys ja muistin hinta.

STT-MRAM:in kestävyys on osoitettu olevan vähintään  $10^{15}$  kirjoitusyksiä [34]. Hyvän kestävyytensä ansiosta se voi toimia ratkaisuna kestävyysongelmiin sovelluksissa, joissa flash-muistin noin  $10^5$ – $10^6$  kirjoitusyksiä kestävyys ei riitä. SRAM:in kestävyys on puolestaan lähes ääretön, ja on siten parempi kuin STT-MRAM:in. STT-MRAM:in kestävyys kuitenkin paranee sen skaalautuessa pienemmäksi, koska sitä kuormittava virta

pienenee. Tällöin sen kestävyys on mahdollista saada riittävän suureksi myös väli-muistikäyttöön. [33]

Datan säilyvyyttä mitataan ajassa, jonka muisti voi olla ilman käyttöjännitettä menettä-mättä dataansa. Tämä ominaisuus ei koske SRAM:ia, sillä se ei ole haihtumaton muisti vaan menettää datansa lähes välittömästi. Flash-muistille datan säilyvyys on noin kym-menen vuotta, mikä on riittävä suurimmalle osalle mikrokontrollerisovelluksista [16]. Flash-muistin säilyvyys onkin tyypillisesti tavoitteena sulautetulle STT-MRAM:ille [33]. STT-MRAM:in datan säilyvyys heikkenee sen skaalautuessa pienemmäksi, mutta sitä voidaan parantaa virrankulutuksen kustannuksella [16]. Toistaiseksi 10 vuoden säilyvyys uhraamalla liialti virrankulutusta on mahdollista saavuttaa vain yli 40 nm muistisoluisissa [34]. Kaikki sovellukset eivät kuitenkaan välttämättä tarvitse 10 vuoden säilyvyyttä, sillä jo muutaman tunnin säilyvyys riittää, mikäli käyttöjännite voidaan taata useammin.

Datan säilyvyydellä on myös toinen ulottuvuus, joka on datan säilyminen korkeissa lämpötiloissa. Korkea lämpötila heikentää datan säilyvyyttä, mutta muistin tulee säilyttää datansa juottamisen ajan. Tämä johtuu siitä, että valmistaja on usein tallentanut niihin muistin toimintaan vaikuttavaa koodia. Pastajuotoksen tapauksessa tämä vaatimus on säilyttää data 3 minuutin ajan noin 260 °C lämpötilassa. Kun huomioidaan lisäksi virran-kulutuksen ja säilyvyyden suhde, on datan säilyttäminen juottamisen aikana yksi suurim-pia ongelma STT-MRAM:in käytölle. [30] Toistaiseksi pastajuotoksessa datansa säilyt-tävä ja 22 nm soluun valmistettu STT-MRAM kuluttaa muistiin kirjoitettaessa hieman enemmän energiaa kuin flash-muisti. Kokonaisvirrankulutuskulutus kirjoitusoperaation aikana on kuitenkin lähes sama, kun huomioidaan myös flash-muistin tarve poistaa vanha data ennen kirjoitusoperaatiota. Tämän lisäksi data säilyy pastajuotoksen kestä-vässä STT-MRAM:issa myös yli 200 asteen toimintalämpötiloissa. [36]

Hintansa puolesta STT-MRAM on flash-muistin ja SRAM:in välissä. SRAM on erittäin kallista ja maksaa tuhansia dollareita gigatavulta [10]. NOR-flash puolestaan on muisti-teknologioista halvin ja maksaa noin 10 dollaria gigatavulta. STT-MRAM on hieman flash-muistia kalliimpi ja maksaa 10–100 dollaria gigatavulta. [37] STT-MRAM:illa on kui-tenkin mahdollisuus olla lopulta jopa NOR-flash-muistia halvempi, sillä se tarvitsee vain 4 ylimääräistä maskikerrosta valmistuksessa, kun taas flash-muisti tarvitsee jopa 12. [36] Lisäksi STT-MRAM:in parempi kestävyys ja pienempi virrankulutus mahdollistavat pi-demät huoltovälit, mikä puolestaan pienentäisi järjestelmän kokonaiskustannuksia.

## 6. YHTEENVETO

Mikrokontrollereiden sovellusalueen laajentuessa vaatimukset niissä käytettäville muistiteknologioille kasvavat. Esineiden internetin kehityksen myötä mikrokontrollerit vaativat entistä suurempaa, nopeampaa ja vähemmän virtaa kuluttavaa muistia. Muistiteknologioihin kohdistuvien vaatimusten tiukentuessa nykyisin käytössä olevien puolijohdemuistien kyky vastata näihin vaatimuksiin on epävarmaa. Erityisesti flash-muistilla on ongelmia skaalautuvuuden, kestävyuden ja virrankulutuksen kanssa. Tästä syystä magneettimuisteja on alettu tutkia flash-muistin, ja ehkä myös SRAM:in, korvaajana mikrokontrollerijärjestelmissä.

Magneettimuistit olivat laajassa käytössä tietokoneiden alkuaikoina, kunnes puolijohdemuistien halvempi hinta ja parempi suorituskyky syrjäyttivät ne. Tämän jälkeen magneettimuistit eivät ole palanneet laajaan käyttöön työmuisteina, mutta uusien teknologioiden kehitys on jatkunut. Tärkeimpänä kannustimena magneettimuistien jatkokehittämiselle on niiden luontainen haihtumattomuus. Sen ansiosta ne voivat mahdollistaa uusia tapoja säästää energiaa, kuten ”yleensä pois päältä” -toimintamallin tehokkaamman hyödyntämisen. Jotta niitä voitaisiin hyödyntää moderneissa järjestelmissä, tulee niiden myös kyetä vähintään yhtä hyvään suorituskykyyn kuin nykyiset puolijohdemuistit.

Tämän kandidaatintyön tavoitteena oli luoda katsaus magneettimuistien kehitykseen sekä tutkia niiden potentiaalia mikrokontrollerijärjestelmän muistina. Työssä käytiin läpi magneettimuistiteknologioiden kehityskulku sekä magneettimuistien toiminnan taustalla olevat magnetismin ilmiöt. STT-MRAM otettiin lupaavimpana magneettimuistiteknologiana tarkempaan tarkasteluun. Sen mahdollisuuksia korvata nykyisin käytössä olevat puolijohdemuistit tutkittiin vertailemalla niiden ominaisuuksia. Käytettyjen puolijohdemuistien ja STT-MRAM:in vertailun tueksi tarkasteltiin nykyisin käytössä olevaa mikrokontrollereiden muistirakennetta ja eriteltiin sen kohtaamia nykyisiä ja tulevia ongelmia.

Tässä työssä tehdyssä muistiteknologioiden vertailussa on huomioitava se, että vertailut arvot eivät ole yksittäisistä laitteista, vaan ne on koottu useista tutkimuksista ja muisteista. Onkin siten kyseenalaista, mitkä esitetyistä ominaisuuksista on mahdollista toteuttaa samaan aikaan yhdellä muistilla. Erityisesti kävi ilmi säilyvyyden ja virrankulutuksen

välinen suhde. Riittävän säilyvyyden saavuttaminen vaatii virrankulutuksen kasvattamista. Ominaisuuksien optimointi tiettyihin sovelluksiin voisikin olla aihe jatkotutkimukselle.

Vertailussa STT-MRAM osoittautui ominaisuuksiensa puolesta soveltuvan hyvin mikrokontrollerin muistiteknologiaksi. Se soveltuu flash-muistin seuraajaksi, sillä se on lähes kaikilta ominaisuuksiltaan parempi. Toisaalta STT-MRAM on hieman kalliimpi, mikä on yhtenä esteenä käyttöönotolle. Hinnan lisäksi STT-MRAM:illa on vaikeuksia vastata flash-muistin säilyvyyteen.

SRAM:in ja STT-MRAM:in välinen vertailu on hieman haastavampaa. SRAM on nopeampi, mutta pienempi kuin STT-MRAM. Lisäksi SRAM kuluttaa vähemmän virtaa aktiivisessa tilassa, mutta toisaalta lepotilassa se joko menettää datansa tai kuluttaa jatkuvaa vuotovirtaa. SRAM sopiikin paremmin välimuistiksi paljon dataa käsitteleville ja pääosin aktiivisessa tilassa oleville laitteille. STT-MRAM puolestaan soveltuu suuren aktiivisen virrankulutuksensa ja haihtumattomuutensa vuoksi paremmin sellaisiin laitteisiin, jotka ovat usein lepotilassa.

Puolijohdemuistien korvaaminen magneettimuisteilla voi tulevaisuudessa olla ratkaisu mikrokontrollereiden kohtaamiin ongelmiin. Erityisesti flash-muistin korvaajana STT-MRAM:illa on paljon potentiaalia. Se voi myös mahdollistaa pelkästä haihtumattomasta työmuistista koostuvan muistirakenteen, jolloin lepotiloja voitaisiin hyödyntää entistä paremmin virrankulutuksen pienentämiseksi.

# LÄHTEET

- [1] H. Jayakumar, A. Raha, Y. Kim, S. Sutar, W.S. Lee, V. Raghunathan, Energy-efficient system design for IoT devices, ASP-DAC, Macau, 2016, pp. 298–301 [viitattu 18.2.2020], Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.lib-proxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7428027>
- [2] D.D. Tang, Y. Lee, Magnetic memory: fundamentals and technology, Cambridge, New York, 2010, 196 p. [viitattu 1.2.2020] Saatavilla: <https://www.dawsonera.com/readonline/9780511683527>
- [3] J.M.D. Coey, Magnetism and magnetic materials, Cambridge, Dublin, 2010, 614 p.
- [4] S. Chikazumi, Physics of magnetism, John Wiley & Sons, University of Tokyo, 1964, 630 p.
- [5] R.M. Christy, Foundations of electromagnetic theory, 4th edition, Addison-Wesley, USA, June 1993, 630 p.
- [6] M. Mansfield, C. O'Sullivan, Understanding Physics, 2<sup>nd</sup> edition, Wiley, Ireland, 2011, 672 p.
- [7] B. North, O. Nash, Magnetic core memory reborn, May 2001, [viitattu 1.2.2020], Saatavilla: <http://www.corememoryshield.com/report.pdf>
- [8] E.Y. Tsymbal, O.N. Mryasow, P.R. LeCair, Spin-dependent tunneling in magnetic tunnel junctions, IOP Publishing, Journal of Physics: Condensed Matter, Vol. 15, Issue 4, Nebraska, 2003, pp. R109–R142, [viitattu 4.2.2020] Saatavilla: <https://digitalcommons.unl.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=&httpsredir=1&article=1018&context=physicstsymbal>
- [9] A. Butterfield, G.E Ngondi, A. Kerr, A Dictionary of Computer Science: random-access memory, 7<sup>th</sup> edition, Oxford University Press, 2016, 628 p. [viitattu 15.2.2020], Saatavilla: <https://www-oxfordreference-com.lib-proxy.tuni.fi/view/10.1093/acref/9780199688975.001.0001/acref-9780199688975-e-4302?rskey=OuNvUQ&result=1>
- [10] D.A. Patterson, J.L. Hennessy, Computer Organization and Design, Fourth Edition : The Hardware/Software Interface, 4<sup>th</sup> edition, Elsevier Science & Technology, Canada, 2009, 703 p., [viitattu 13.2.2020], Saatavilla: <https://ebookcentral.proquest.com/lib/tampere/reader.action?docID=610523>
- [11] D. Klein, The history of semiconductor memory: From magnetic tape to NAND flash memory, IEEE Solid-State Circuits Magazine, 2016, Vol.8(2), pp.16-22, [viitattu 11.2.2020], Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.lib-proxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=7495058>
- [12] M. Lantz, Why the Future of Data Storage is (Still) Magnetic Tape, IEEE Spectrum, Zurich, August 2018, 7 p., [viitattu 12.2.2020], Saatavilla:

[https://chem.beloit.edu/classes/nanotech/cheapmemory/Why%20the%20Future%20of%20Data%20Storage%20is%20\(Still\)%20Magnetic%20Tape%20-%20IEEE%20Spectrum.pdf](https://chem.beloit.edu/classes/nanotech/cheapmemory/Why%20the%20Future%20of%20Data%20Storage%20is%20(Still)%20Magnetic%20Tape%20-%20IEEE%20Spectrum.pdf)

- [13] J.S. Meena, S.M. Sze, U. Chand, T. Tseng, Overview of emerging nonvolatile memory technologies, Springer, Nanoscale Research Letters, Vol. 9, Article no. 526, 2014, 33 p., [viitattu 23.2.2020], Saatavilla: <https://nanoscalereslett.springeropen.com/track/pdf/10.1186/1556-276X-9-526>
- [14] A. De, M.N.I. Khan, J. Park, S. Ghosh, Replacing eFlash with STTRAM in IoTs: Security Challenges and Solutions, Journal of Hardware and Systems Security, Vol. 1, Springer, November 2017, pp. 328–339, [viitattu 23.2.2020], Saatavilla: <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s41635-017-0026-x.pdf>
- [15] S. Tehrani, B. Engel, J. M. Slaughter, E. Chen, M. DeHerrera, M. Durlam, P. Naji, R. Whig, J. Janesky, and J. Calder, Recent Developments in Magnetic Tunnel Junction MRAM, Transactions on magnetism, vol. 36, issue 5, IEEE, September 2000, pp. 2752–2757 [viitattu 23.2.2020], Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=908581>
- [16] R. Gastaldi, G. Campardo, In Search of the Next Memory: Inside the Circuitry from the Oldest to the Emerging Non-Volatile Memories, Springer, Milan, 2017, 261 p., [viitattu 22.2.2020], Saatavilla: <https://link-springer-com.lib-proxy.tuni.fi/content/pdf/10.1007%2F978-3-319-47724-4.pdf>
- [17] B.K. Kaushik, S. Verma, Spin Transfer Torque Based Devices, Circuits, and Memory, Artech House, Boston, 2016, 202 p., [viitattu 26.2.2020], Saatavilla: <http://web.b.ebscohost.com.libproxy.tuni.fi/ehost/detail/detail?vid=0&sid=4484bac8-9ee2-4b3b-b420-6214b06c9cc0%40pdc-v-sessmgr03&bdata=JkF1dGhUeXBIP-WNvb2tpZSxpcCx1aWQmc2l0ZT1laG9zdC1saXZlJnNjb3BIPXNpdGU%3d#db=nlebk&AN=1511851>
- [18] W.S. Zhao, Y. Zhang, T. Devolder, J.O. Klein, D. Ravelosona, C. Chappert, P. Mazoyer, Failure and reliability analysis of STT-MRAM, Microelectronics reliability, vol. 52, issue 9-10, Elsevier, July 2012, pp. 1848–1852, [viitattu 26.2.2020], Saatavilla: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0026271412002326>
- [19] Everspin, EMD4E001G-datasheet, October 2019, [viitattu 26.2.2020], Saatavilla: <https://www.everspin.com/family/emd4e001g?npath=3557>
- [20] F.E. Valdes-Perez, R. Pallas-Areny, Microcontrollers, CRC Press, Boca Raton, 2009, 300 p., [viitattu 1.3.2020], Saatavilla: <https://www-taylorfrancis-com.lib-proxy.tuni.fi/books/9781315218663>
- [21] C.C-H Hsu, Y-T Lin, eMemory Technology, Inc, E.C-S Yang, R.S-J Shen, Logic Non-volatile Memory: The Nvm Solutions For Ememory, World Scientific, Singapore, 2014, 274 p. [viitattu 7.3.2020], Saatavilla: <http://web.b.ebscohost.com.lib-proxy.tuni.fi/ehost/ebookviewer/ebook/bmx-IYmtfXzk0MjE0NF9fQU41?sid=a7ce835f-6afe-4949-b325-250c5e758aa4@pdc-v-sessmgr01&vid=0&format=EB&rid=1>



- [22] T. Jew, Embedded Microcontroller Memories: Application Memory Usage, International memory workshop, IEEE, 2015, pp. 13-17, [viitattu 5.3.2020], Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&ar-number=7150284&tag=1>
- [23] S. Senni, L. Torres, G. Sassatelli, A. Gamatie, Non-Volatile Processor Based on MRAM for Ultra-Low Power IoT Devices, Journal on Emerging Technologies in Computing Systems, vol. 13, issue 2, Article no. 17, AMC, 2017, p. 23, [viitattu 12.3.2020], Saatavilla: <https://dl-acm-org.lib-proxy.tuni.fi/doi/abs/10.1145/3001936>
- [24] G. Patrigeon, P. Benoit, L. Torres, S. Senni, G. Prenat and G.D. Pendina, Design and Evaluation of a 28-nm FD-SOI STT-MRAM for Ultra-Low Power Microcontrollers, IEEE Access, vol 7, 2019, pp. 58085–58093, [viitattu 20.3.2020], Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&ar-number=8712545>
- [25] L.D. Jasio, Using the PIC16F1XXX High-Endurance Flash (HEF) Block, Microchip technology Inc., 2014, 18 p., [viitattu 13.2.2020], Saatavilla: <http://ww1.microchip.com/downloads/en/AppNotes/00001673A.pdf>
- [26] STMicroelectronics, STM32H742xl/G STM32H743xl/G -datasheet, rev. 7, August 2019, [viitattu 20.3.2020], Saatavilla: <https://www.mouser.fi/datasheet/2/389/dm00387108-1799185.pdf>
- [27] S. Aggarwal, STT– MRAM: High Density Persistent Memory Solution, Everspin Technologies, Flash Memory Summit 2019, [viitattu 21.3.2020], Saatavilla: [https://www.flashmemorysummit.com/Proceedings2019/08-07-Wednesday/20190807\\_NEWM-202B-1\\_Aggarwal.pdf](https://www.flashmemorysummit.com/Proceedings2019/08-07-Wednesday/20190807_NEWM-202B-1_Aggarwal.pdf)
- [28] G. Hu, et al., Spin-transfer torque MRAM with reliable 2 ns writing for last level cache applications, IEE International Electron devices meeting, February 2019, pp. 2.6.1–2.6.4 [viitattu 21.3.2020], Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.lib-proxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&ar-number=8993604>
- [29] D. Hentrich, E. Oruklu, J. Saniie, Performance Evaluation of SRAM Cells in 22nm Predictive CMOS Technology, IEEE International Conference on Electro/Information Technology, 2009, pp. 470–475, [viitattu 22.3.2020], Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.lib-proxy.tuni.fi/ielx5/5173449/5189546/05189662.pdf?tp=&ar-number=5189662&isnumber=5189546&ref=>
- [30] T. Kono, Embedded Non-volatile Memory System as an Enabler of Smarter World, Renesas Electronics Corporation, 2017 International Symposium on VLSI Technology, Systems and Application (VLSI-TSA), Japan, p. 4, [viitattu 23.3.2020], Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.lib-proxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&ar-number=7942447>
- [31] J. Pak, et al., 40nm & 22nm Embedded Charge Trap Flash for Automotive Applications, Cypress Semiconductor Corporation, IEE International Memory Workshop (IMW), 2018, pp. 126–126, [viitattu 23.3.2020], Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&ar-number=5189662>
- [32] K.C. Chun, H. Zhao, J.D. Harms, T-H. Kim, J-P. Wang, C.H. Kim, A Scaling Roadmap and Performance Evaluation of In-Plane and Perpendicular MTJ

- Based STT-MRAMs for High-Density Cache Memory, IEEE Journal of Solid-State Circuits, Vol. 48, Issue 2, 2013, pp. 598–610, [viitattu 24.3.2020], Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&ar-number=6374706>
- [33] V.B. Naik, et al., Superior Endurance Performance of 22-nm Embedded MRAM Technology, Globalfoundries, IEEE International Reliability Physics Symposium (IRPS), March 2019, p. 4, [viitattu 24.3.2020], Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&ar-number=8720435&tag=1>
- [34] S. Ikegawa, F.B. Mancoff, J. Janesky, S. Aggarwal, Magnetoresistive Random Access Memory: Present and Future, IEEE Transactions on Electron Devices, vol. 67, issue 4, January 2020, pp. 1407–1419, [viitattu 25.3.2020], Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.libproxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&ar-number=8976130>
- [35] K. Ando, S. Fujita, J. Ito, S. Yuasa, Y. Suzuki, Y. Nakatani, T. Miyazaki, H. Yoda, Spin-transfer torque magnetoresistive random-access memory technologies for normally off computing (invited), AIP Publishing, Journal of applied physics 115, issue 17, May 2014, p. 7 [viitattu 29.3.2020], Saatavilla: <https://aip.scittion.org/doi/pdf/10.1063/1.4869828>
- [36] W. J. Gallagher et al., Recent Progress and Next Directions for Embedded MRAM Technology, 2019 Symposium on VLSI Technology, Kyoto, Japan, 2019, pp. T190-T191, [viitattu 1.4.2020], Saatavilla: <https://ieeexplore-ieee-org.lib-proxy.tuni.fi/stamp/stamp.jsp?tp=&ar-number=8776547>
- [37] S. Bertolazzi, MRAM Technology and Market Trends, Yole Développement, Flash Memory summit 2019, [viitattu 3.4.2020], Saatavilla [https://www.flash-memorysummit.com/Proceedings2019/08-05-Monday/20190805\\_MRAMDD\\_Plenary\\_Bertolazzi.pdf](https://www.flash-memorysummit.com/Proceedings2019/08-05-Monday/20190805_MRAMDD_Plenary_Bertolazzi.pdf)