

Petri Koivulahti

**Intel 8051 -mikrokontrollerit**

Opinnäytetyö

Kevät 2010

Tekniikan yksikkö

Tietotekniikan koulutusohjelma

Ohjelmistotekniikka



## SEINÄJOEN AMMATTIKORKEAKOULU

### Opinnäytetyön tiivistelmä

Koulutusyksikkö: Tekniikan yksikkö

Koulutusohjelma: Tietotekniikan koulutusohjelma

Suuntautumisvaihtoehto: Ohjelmistotekniikan suuntautumisvaihtoehto

Tekijä: Petri Koivulahti

Työn nimi: Intel 8051 -mikrokontrollerit

Ohjaaja: Seppo Stenberg

Vuosi: 2010

Sivumäärä: 52

Liitteiden lukumäärä: 0

---

Mikrokontrolleri on laite, jossa on yhdistetty mikroprosessori, muisti ja lisälaitteet yhdelle ainoalle mikropiirille. Mikrokontrolleri on tarkoitettu sulautettuihin laitteisiin, joissa halutaan luoda toiminnallisuutta ohjelmoimalla. Saatavilla on moniin eri arkkitehtuureihin perustuvia 8-, 16- ja 32-bittisiä mikrokontrollereita yleiskäyttöön tai tiukasti tiettyyn sovellukseen suunniteltuna.

Intel 8051 on yksi ensimmäisiä markkinoille tulleita mikrokontrollereita. Se oli aikanaan varsin suosittu. Avoimen lisensoinnin ansiosta MCS-51-standardi, joka määriteltiin Intel 8051:n yhteydessä, on ollut ulkopuolisten valmistajien lisensoitavissa. Monet valmistajat ovatkin ottaneet sen käyttöön 8-bittisissä mikrokontrollereissaan ja parannelleet sen suorituskykyä ja toimintaa alkuperäisestä. Intel 8051 perustuu harvard-arkkitehtuuriin ja sitä voidaan pitää CISC-tyyppisenä suorittimena. Monet uusista parannelluista MCS-51-pohjaisista mikrokontrollereista pystyvät 1MIPS / 1Mhz -tehosuhteeseen suorituskyvyssä.

Atmel AVR on 90-luvun aikana markkinoille tullut kilpaileva 8-bittisten arkkitehtuuri. Ensimmäisten mallien kotelot olivat suoraan yhteensopivia MCS-51-tuoteperheen kanssa. AVR pyrki yhdistämään tehokkaan 8-bittisen prosessorin, SRAM-muistin, flash-muistin ja EPROM-muistin samaan pakettiin.

Tutkimuksessa tuli ilmi, että Intel 8051 on vahvasti kilpailukykyinen vielä tänäkin päivänä 8-bittisten markkinoilla. Syitä suosion säilymiseen lienee monia, mutta yksi merkittävimmistä on avoin lisensointipolitiikka ja lisensoijien sitoutuminen arkkitehtuuriin ja sen kehittämiseen.

Avainsanat: Intel 8051, mikrokontrolleri, sulautettu tietotekniikka, mikropiirit, mikroprosessorit

## SEINÄJOKI UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

## Thesis abstract

Faculty: School of Technology  
Degree programme: Information Technology  
Specialisation: Software Engineering

Author/s: Petri Koivulahti

Title of thesis: Intel 8051 -microcontrollers

Supervisor(s): Seppo Stenberg

Year: 2010

Number of pages: 52

Number of appendices: 0

---

A microcontroller is a device, which includes a powerful microprocessor, memory and peripherals on one single microchip. The microcontroller market offers a large scale of different architectures and devices for users' designs. There are 8, 16 and 32-bit devices for multipurpose use or strictly defined devices for only one function.

Intel 8051 is an old fashioned microcontroller architecture from the beginning of the 80's. It was quite popular in those days, but competitive architectures and devices took away markets from 8-bit microcontrollers. Thanks for the open licensing policy, many 3<sup>rd</sup> party manufacturers could license the core of Intel 8051, known as the MCS-51 standard, and improve it. Intel 8051 is based on Harvard-architecture and it could be called a CISC-type processor. Nowadays, most current Intel 8051 -based devices can reach 1MIPS / 1Mhz efficiency on command processing.

Atmel AVR is a competitive architecture, which was introduced first for the time in the middle of 90's. The objective was to offer a powerful 8-bit microprocessor core, SRAM memory, flash memory and EPROM memory in a single package. The first models were actually pin-compatible with Intel 8051.

Summarizing, it's valid to say that Intel 8051 is still able to compete in the 8-bit microcontroller market. One reason for this is the manufacturers' loyalty for MCS-51 and their effort for developing and improving the devices.

Keywords: microcontroller, microchip, Intel 8051, embedded systems, microprocessor, microcircuit

## SISÄLTÖ

OPINNÄYTETYÖN TIIVISTELMÄ .....	2
THESIS ABSTRACT .....	3
SISÄLTÖ .....	4
KUVIO- JA TAULUKKOLUETTELO .....	8
1 JOHDANTO .....	10
1.1 Työn tausta .....	10
1.2 Työn tavoite .....	10
1.3 Työn rakenne .....	10
2 MIKROKONTROLLEREISTA .....	12
2.1 Mikä on mikrokontrolleri? .....	12
2.2 Sisäiset lohkot .....	13
2.3 Ulkoiset liitännät .....	14
2.4 Mikroprosessorin toiminta .....	15
2.5 von Neumann- ja Harvard-arkkitehtuurit .....	17
2.6 Mikroprosessorien käskykannat: RISC ja CISC .....	18
2.7 Miten mikrokontrolleri eroaa mikroprosessorista .....	18
2.8 Mikrokontrollerin muut lohkot .....	19
2.9 Mikrokontrollerien sovelluskohteita .....	19
2.10 Mikrokontrollerien ohjelmointi .....	20
2.11 Mikrokontrollerien ohjelmien testaus ja virheenjäljitys .....	22
3 INTEL 8051/8052 JA MCS-51 .....	23
3.1 Historia .....	23
3.2 Sisämallit ja johdannaiset .....	23
3.3 Rakenne .....	24
3.4 Prosessorilohkot ja väylät .....	26
3.5 Muistialueet .....	28
3.5.1 Sisäiset muistit ja SFR-sivut .....	29

3.5.2	Ulkoiset muistit.....	30
3.6	Rekisterit ja keskeytykset.....	32
3.7	Kehitystyökalut.....	35
3.8	Käskykanta .....	36
3.9	Debug-työkalut.....	38
3.10	Valmistajat.....	38
4	TUTKIMUS.....	40
4.1	Intel 8051 nykyisissä mikrokontrollereissa .....	40
4.2	Intel 8051 FPGA-piireissä ja SoC-tuotteet .....	42
4.3	Intel 8051:n vertailu Atmel AVR -arkkitehtuurin kanssa .....	42
4.4	Intel 8051:n ja Atmel AVR:n vertailu ohjelmatasolla.....	46
4.5	Intel 8051 ja ARM-prosessorit.....	47
5	TULOKSET JA YHTEENVETO .....	49
5.1	Intel 8051 nykyisin.....	49
5.2	Intel 8051:n käyttöönotto.....	50
5.3	Yhteenveto Intel 8051 -pohjaisista mikrokontrollereista .....	50

**KÄYTETYT TERMIT JA LYHENTEET**

<b>Assembler</b>	Assembly-kielen käännösohjelma.
<b>Assembly</b>	Symbolinen ohjelmointikieli.
<b>Asynkroninen</b>	Tietoliikenteessä data kulkee linjalla ilman tahdistusta.
<b>CISC</b>	Complex Instruction Set Computer. Mikroprosessorien käskykanta, jossa käskyt ovat eripituisia.
<b>CPU</b>	Central Processing Unit. KS. mikroprosessori.
<b>CMOS</b>	Complementary Metal-Oxide-semiconductor. Mikropiiri joka koostuu NMOS- ja PMOS-komponenteista.
<b>NMOS</b>	N-type Metal-Oxide-Semiconductor. Transistori, joka on lepotilassa kiinni, ja avautuu kytkettäessä.
<b>EPROM</b>	Erasable Programmable Read-Only Memory. Uudelleenkirjoitettava tallennusmuisti.
<b>FLASH</b>	Uudelleenkirjoitettava haihtumaton tallennusmuisti.
<b>FPGA</b>	Field Programming Gate Array. Ohjelmitava logiikkapiiri.
<b>Keskeyty</b>	Prosessorilogiikka ohjaa ohjelman suorituksen ohjelmalohkoon, joka on ohjelmitu keskeytystä varten.
<b>MIPS</b>	Million Instructions Per Second. Tietokoneen laskentakykyä kuvaava suure.

<b>Mikrokontrolleri</b>	Yhdelle mikrosirulle on integroitu mikroprosessori, muistipiirit ja oheislaitteet.
<b>Mikroprosessori</b>	Laskutoimituksia suorittava tietokoneen ydin.
<b>Muistiavaruus</b>	Muistialue, joka alkaa osoitteesta 0, ja päättyy muistin koon mukaiseen maksimikokoon.
<b>Muistiosoitus</b>	Toiminto, jossa muistia käsitellään numerolla, joka kertoo käytettävän muistipaikan.
<b>PMOS</b>	P-type metal-oxide-semiconductor. Transistori, joka on lepotilassa auki, ja sulkeutuu kytkettäessä.
<b>RISC</b>	Reduced Instruction Set Computer. Mikroprosessorityyppi, jossa käskyt ovat saman pituisia.
<b>RAM</b>	Random Acces Memory. Prosessorin työmuisti.
<b>Rekisteri</b>	Prosessorin muistiosoite, joka on sidottu tiettyyn toiminnallisuuteen.
<b>ROM</b>	Read-Only Memory. Vain luettavissa oleva muistityyppi.
<b>Synkroninen</b>	Tietoliikenteessä data kulkee yhdellä linjalla ja bitit tahdistetaan erillisellä linjalla kulkevalla kellopulssilla.
<b>Väylä</b>	Sarja- tai rinnakkaiskanava jossa tieto siirretään.

(MacFarland 2006; Ball & Stuart 2002; Vahtera 2003.)

## Kuvio- ja taulukkoluetelo

Kuva 1: Tyyppillinen mikrokontrollerin rakenne.....	12
Kuva 2: Esimerkki konekielisestä ohjelmasta.....	20
Kuva 3: Esimerkki assembly-kielisestä ohjelmasta (X86-assembly).....	21
Kuva 4: Esimerkki C-kielisestä ohjelmasta. ....	21
Kuva 5: Esimerkki flowcode-ohjelmasta.....	21
Kuva 6: Intel 8051 -lohkokaavio.....	25
Kuva 7: Intel 8051 -arkkitehtuurin rakenne. ....	26
Kuva 8: PSW-rekisterin rakenne.....	27
Kuva 9: Mikrokontrollerin sisäisen muistin rakenne. ....	29
Kuva 10: Sisäisen käyttömuistin alemman 128 tavun rakenne. ....	30
Kuva 11: Ohjelmamuistin rakenne. ....	31
Kuva 12: Ulkoisen muistin liittäminen mikrokontrolleriin.....	32
Kuva 13: Standardien SFR-rekisterien asettelu. ....	33
Kuva 14: Keskeytysten asettelu ohjelmamuistissa.....	34
Kuva 15: Atmel AT89LP213 -mikrokontrollerin INC R0 -käslyn suorituksen ajoituksesta.....	41
Kuva 16: AVR-tuoteperheen rakenne. ....	43
Kuva 17: Intel P8031AH:n ja ATmega8515:n pinnijärjestys PDIP-koteloituna. ....	44



Kuva 18: AVR-arkkitehtuurin rakenne.....	45
Taulukko 1: Intel 8051:n sisarmallit.....	24
Taulukko 2: Esimerkki ADD-komennon toiminnasta. ....	37

# 1 JOHDANTO

## 1.1 Työn tausta

Tässä työssä esitellään Intel 8051 -tyyppisiä mikrokontrollereita. Tutkimuksessa on tarkasteltu käyttöä uusissa tuotteissa ja pohditaan muiden valmistajien kilpailevien tuotteiden eroavaisuuksia. Mikä on Intel 8051:n tilanne nykypäivän markkinoilla? Tutkimusta tehdään Seinäjoen ammattikorkeakoululle.

## 1.2 Työn tavoite

Tämän työn tavoitteena on esitellä lukijalle mikrokontrollerin toimintaperiaate. Tutkimuksessa esitellään Intel 8051:n rakenne ja toiminta. Lisäksi tavoitteena on esitellä näkökulmia muihin 8-bittisiin mikrokontrollereihin, pääasiassa Atmel AVR -arkkitehtuuriin.

## 1.3 Työn rakenne

Luvussa 2 kerrotaan teoreettisesti mikrokontrollereiden ja mikroprosessorien toiminnasta.

Luvussa 3 esitellään Intel 8051 ja sen eri versioita. Luvussa kerrotaan mikrokontrollerin toiminnasta ja ominaisuuksista.

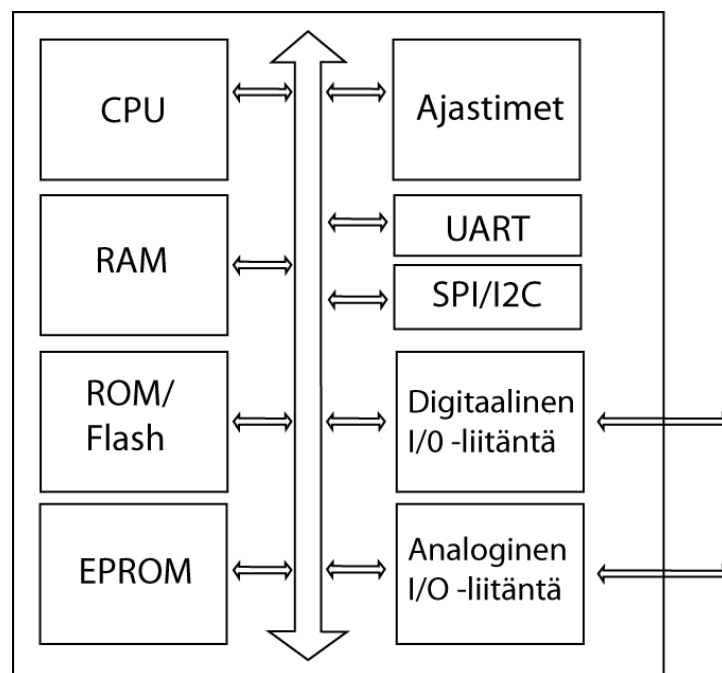
Luvussa 4 esitellään muutamia Intel 8051 -arkkitehtuuriin perustuvia mikrokontrollereita eri valmistajilta. Lisäksi vertaillaan Atmel AVR -arkkitehtuurin ja Intel 8051:n eroja, sekä pohditaan millainen on 8-bittisten mikrokontrollereiden tulevaisuus

Luvussa 5 esitellään saatuja tuloksia ja kerrotaan Intel 8051:n käyttöönottoa yleisesti.

## 2 MIKROKONTROLLEREISTA

### 2.1 Mikä on mikrokontrolleri?

Mikrokontrolleri on yksinkertainen tietokone, joka on sijoitettu yhdelle ainoalle mikropiirille. Mikrokontrolleriin on integroitu monia erilaisia osia, jotka olisivat tavallisessa mikroprosessorissa erillisiä laitteita. Mikrokontrolleri sisältää suoritusyksikön, erityyppisiä muisteja ja oheislaitteita. Mikrokontrollerin valinta onkin haasteellista, koska markkinoilla on suuri valikoima erilaisiin käyttötarkoituksiin suunniteltuja tuotteita. Mikrokontrolleri tuo elektroniikan suunnitteluun joustavuutta ja mahdollisuuksia. Mikrokontrolleri voidaan ohjelmoida suorittamaan monia erilaisia toimintoja tiettyyn tehtävään suunniteltujen yksittäisten mikropiirien sijaan. (Ball & Stuart 2002, 29.)



Kuva 1: Tyyppillinen mikrokontrollerin rakenne.  
Lähde: Gadre 2000, 14.

## 2.2 Sisäiset lohkot

Mikrokontrolleriin on integroitu monia erilaisia toimintoja ja lohkoja. Yleisesti voidaan puhua sisäisistä lohkoista, jotka eivät välttämättä näy mitenkään ulospäin. Yleisesti mikrokontrolleri sisältää seuraavia sisäisiä lohkoja:

**Mikroprosessori (CPU)** on mikrotietokoneen ydin, joka on rakennettu erilaisista logiikkapiireistä. Suoritettavat ohjelmakomennot valitsevat mikä ja miten logiikka toimii. Mikroprosessori rakentuu useista transistoreista, joista rakennetaan sopivia porttipiirejä ja erilaisia kiikkuja, laskureita ja rekistereitä. (Vahtera 2003, 18.)

**Muisteja** on käytössä mikrokontrollereissa useaa erilaista tyyppiä. ROM-muisti on ohjelmamuisti, joka sisältää suoritettavan ohjelman. RAM-muisti on käyttömuisti jota ohjelma käyttää suorituksen aikana. Flash- ja EPROM-muisteja voidaan käyttää haihtumattomana muistina, jossa tieto säilyy, vaikka virtaa ei olisi kytketty. Muisteja käytetään muistiväylän avulla, joka koostuu osoiteväylästä ja dataväylästä. Osoiteväylään annetaan käytettävän muistipaikan osoite, jolloin dataväylän avulla voidaan lukea tai kirjoittaa muistipaikka. (Vahtera 2003, 16.)

**Keskeytysyksikkö** ohjaa keskeytysten toimintaa. Keskeytysyksikkö ohjaa prosessorin suorittamaan keskeytykselle asetetun ohjelman, kun keskeytyksen kytkentälogiikka aktivoituu. (Vahtera 2003, 31.)

**Ajastimilla ja laskureilla** tehdään aikaan verrannollisia tehtäviä. Yksinkertainen ajastin on rekisteriarvo, jota kasvatetaan kellopulssien tahdissa. Kellopulssien tiheyttä voidaan muuttaa esijakajan avulla, jolloin laskurin arvo kasvaa hitaammin. Laskurien toimintaa voidaan hallita ohjausrekisterien avulla. Laskurille voidaan asettaa alustusarvo, josta laskeminen aloitetaan. Ajastimista saadaan myös monia keskeytyksiä, kuten ylivuotokeskeytykset, joka tapahtuu laskurin arvon pyörähtäessä ympäri. (Vahtera 2003, 22.)

**Tehonsäätöyksikkö** ohjaa mikrokontrollerin tehonkäyttöä. Mikrokontrolleri voidaan asettaa lepotilaan, jos ei ole tarvetta suorittaa ohjelmaa. Lepotiloja on monia

erilaisia. Lepotilassa mikrokontrollerista sammutetaan eri lohkoja ja käytettävissä olevat toiminnot riippuvat lepotilan tasosta. (Vahtera 2003, 22.)

**Valvontayksikkö** eli watchdog tarkistaa väliajoin tapahtuuko ohjelman suoritus oikein. Jos ohjelman suoritus ei etene oikein, vaan pysähtyy ongelman tai muun virheen takia, voi valvontayksikkö käynnistää mikrokontrollerin uudelleen ja aloittaa suorituksen alusta. (Vahtera 2003, 22.)

**Väyliä** löytyy yleisesti useita mikroprosessorista. Osoiteväylällä CPU valitsee käytössä olevan muistipaikan osoitteen. Dataväylällä kulkee osoitetun muistipaikan tieto ja liikenne voi olla yksi- tai kaksisuuntaista. Ohjausväylä käsittää monia ohjauslinjoja, jolla CPU kontrolloi lohkojen toimintaa. Väylät ovat useasti rinnakkaisia ja väylä leveys on suoraan verrannollinen osoitettavan muistiavaruuden kokoon. Muistiavaruuden koko voidaan määrittää kaavalla:  $2^n$ , jossa n on väylän leveys bitteinä. Väylät voivat olla myös sarjamuotoisia. (Vahtera 2003, 17 - 18.)

### 2.3 Ulkoiset liitännät

Ulkoiset I/O-liitännät ovat mikrokontrollerin rajapinta ulkoiseen maailmaan. Ulkoisilla liitännöillä voidaan ohjata ulkoisia kytkentöjä tai lukea arvoja antureilta. Ulkoisilla liitännöillä voidaan myös kommunikoida muiden laitteiden kanssa. (Vahtera 2003, 17.)

I/O-liitäntä voi olla:

- digitaalinen tai analoginen.
- sarja- tai rinnakkaismuotoinen.
- synkroninen tai asynkroninen.
- sisään tai ulospäin toimiva.

(Vahtera 2003, 17.)

Digitaalisella liitännällä voidaan siirtää binääristä tietoa ulos tai siitä voidaan lukea liitännän tila. Liitännän tilan määrittää siihen vaikuttava jännite. 0 voltia eli GND tulkitaan nolaksi ja tästä suuremmat jännitteet, yleensä lähellä mikrokontrollerin käyttöjännitettä olevat, tulkitaan ykköseksi. Mikrokontrolleriin liitetyn AD-muuntimen avulla voidaan lukea analogista signaalia ja vastaavasti DA-muuntimella antaa ulos analoginen signaali. (Vahtera 2003, 17.)

## 2.4 Mikroprosessorin toiminta

Mikroprosessorin toiminta perustuu prosessoriin rakennettuihin logiikkapiireihin. Ohjelmakäskyillä valitaan käytettävä logiikkapiiri ja operandeilla ohjataan sen toimintaa. Yhden käskyn käsittely koostuu seuraavista vaiheista:

1. Käskyn noutaminen ohjelmamuistista.
2. Käskyn tulkitseminen.
3. Käskyyn liittyvien operandien noutaminen muistista tai rekistereistä.
4. Käskyn suorittaminen.
5. Käskyn tuloksen kirjoittaminen takaisin, jos tarpeellista.

(MacFarland 2006, 129.)

Käskyt vaativat eripituisia käsittelyaikoja toiminnosta riippuen. Käskyjen pituus riippuu prosessorityypistä ja operandien määrästä. (Abd-El-Barr & El-Rewini 2005, 83 - 84.)

Mikroprosessorin toiminta vaatii monia erilaisia ohjausrekistereitä ja toimintalohkoja. Rekistereitä käytetään ohjelman suorituksen hallitsemiseen ja avustamiseen. Toimintalohkot on suunniteltu yhden tehtävän suorittamiseen prosessorin toiminnassa. Muutamia tärkeimpiä esitellään seuraavaksi.

**Ohjelmalaskuri** pitää kirjaa ohjelman suorituksesta ja osoittaa seuraavan ohjelmakäskyn muistipaikan ohjelmamuistissa. Ohjelmalaskuri aloittaa ohjelman suorituksen osoitteesta 0x00 ja kasvaa yhden yksikön ylöspäin jokaisen käsitellyn käskyn jälkeen. Ohjelmalaskurin arvoa voidaan muuttaa ohjelmallisesti tai keskeytysloogiikan toimesta. (Vahtera 2003, 19.)

**Tieto-osoitin**, josta käytetään myös nimitystä data pointer, osoittaa muistipaikkaa tai I/O-liitännän osoitetta, josta käsiteltävä tieto haetaan tai viedään. Käsiteltävä tieto on käskyn operandien määräämä osoite. (Vahtera 2003, 19.)

**Pinomuistiosoitin** osoittaa muistipaikan pinomuistista, joka on mikroprosessorin käyttöön varattu alue RAM-muistissa. Pinomuisti on ohjelmoijan vapaasti käytössä olevaa dynaamista muistia, jota käsitellään push- ja pop-käskyillä. (Vahtera 2003, 20.)

**Käskyrekisteri** sisältää käsiteltävän ohjelmakäskyn, joka on haettu ohjelmamuistista, mutta odottaa käskyn tulkitsemista (Vahtera 2003, 20)

**Käskytulkki** käsittelee noudetun käskyn ja ohjaa prosessorin suorittamaan käskyn liitetyt toiminnot prosessorissa. Tarvittaessa käsky pilkotaan pienempiin suoritettaviin osiin. (Vahtera 2003, 20.)

**Ohjausyksikkö** on ohjaus- ja valvontaosa, joka tahdistaa CPU:n ja ulkoisiin liitännöihin kytkettyjä toimintalaitteita (Vahtera 2003, 20).

**Accumulator** on lähellä aritmeettis-loogista yksikköä oleva apurekisteri, joka käsittelee suoritettavan käskyn tietoja (Vahtera 2003, 21).

**Aritmeettis-looginen yksikkö** ja accumulator yhdessä suorittavat erilaisia laskentatoimenpiteitä, bittien siirtelyä ja loogista vertailua (Vahtera 2003, 21).



**Tilarekisteri** eli lippurekisteri kertoo, mitä suoritettuna operaation jälkeen on tapahtunut. Tilarekisterissä on esimerkiksi tieto siitä, onko laskutoimituksen lopputulos positiivinen vai negatiivinen. (Vahtera 2003, 21).

Mikroprosessoreihin ja niiden toimintaan liittyy erilaisia osoitustapoja. Tietoa voidaan osoittaa prosessorin rekisteristä, josta käytetään nimitystä suora osoitus. Tietoa voidaan osoittaa myös epäsuorasti, antamalla vain muistiosoite ja miltä muistialueelta osoitus suoritetaan. Tyypillisesti esimerkiksi kaikkea käyttömuistia ei voida osoittaa suoraan, vaan tällöin täytyy käyttää epäsuoraa osoitusta. Muistin osoittamiseen tarvitaan yleisesti apurekistereitä, joihin käytettävä muistiosoite sijoitetaan. Välitön tieto tarkoittaa että käskyn operandeina on esimääritelty arvo, eikä sitä haeta erikseen rekisteristä tai muistista. (Abd-El-Barr & El-rewini 2005, 18 - 22.)

## **2.5 von Neumann- ja Harvard-arkkitehtuurit**

Mikroprosessoreissa on yleisesti käytössä kaksi pääarkkitehtuuria, von Neumann ja harvard tai muunneltu harvard-arkkitehtuuri. von Neumann määrittää, että muistiosoitteet ja data kulkevat samassa väylässä, kun Harvardissa molemmille on varattu oma väylä. (Ball & Stuart 2002, 14 - 15.)

Matemaatikko John von Neumannin mukaan nimetty von Neuman -arkkitehtuuri määrittää, että ohjelmakoodi ja datalle varattu muisti ovat samassa muistiavaruudessa. Käskyt ja data käyttävät yhteistä väylää muistin osoittamiseen ja tiedon siirtämiseen muistista. Tästä syystä seuraavaa ohjelmakäsky ja data on haettava vuorotellen muistista, mikä on hitaampaa harvardin arkkitehtuurin nähden. Modernit mikrotietokoneet, eli niin sanotut x86-mikroprosessorit, käyttävät von Neuman -arkkitehtuuria. (Ball & Stuart 2002, 14 - 15.)

Harvardin arkkitehtuurissa ohjelmamuisti ja data ovat omissa osoiteavaruuksissaan. Molemmille muistille on siis oma muistiväylänsä. Tämä tekee mikroprosessorin logiikasta monimutkaisemman suunnitella. Harvardin arkkitehtuurissa seu-

raava ohjelmakäsky ja data voidaan kuitenkin hakea samanaikaisesti muistista. (Ball & Stuart 2002, 14 - 15.)

## **2.6 Mikroprosessorien käskykannat: RISC ja CISC**

Mikroprosessoreita on pääsääntöisesti kahta hallitsevaa käskykanta-ajattelumallia: RISC (Reduced Instruction Set Computer) ja CISC (Complex Instruction Set Computer) (MacFarland 2006, 118).

RISC-tyyppisissä prosessoreissa käskyjen määrää supistetaan ja käskyistä tehdään mahdollisuuksien mukaan yhtä pitkiä. Käskyjen suoritus laitetaan tapahtumaan ns. liukuhihnalla. Yksinkertaiset käskyt voidaan suorittaa kuitenkin heti, ilman mikroprosessorin dekoodaamista. Tietoa ei voida osoittaa muistista, vaan kaikki tieto täytyy tuoda CPU:n rekistereihin. Rekisterien määrän lisääminen lisää nopeutta, koska välituloksia voidaan tallentaa CPU:n sisällä ilman, ilman että niitä vietäisiin välillä ulkoiseen muistiin. (MacFarland 2006, 119.)

CISC-tyyppinen prosessori on akku-rekisteripohjainen, jolloin jokaisella rekisterillä on oma tehtävänsä. CISC-prosessorien käskytulkki on monimutkainen, monimutkaisen käskykannan vuoksi. Yhden käskyn suoritus vie monta kellojaksoa ja käskyt ovat toisiinsa nähden eripituisia. Tästä seuraa, että niiden suoritus aika vaihtelee, jolloin työvaiheiden synkronointi on hankalaa. Yhdellä käskyllä voidaan tehdä enemmän toimintoja, kuin RISC-prosessoreissa. (MacFarland 2006, 119.)

## **2.7 Miten mikrokontrolleri eroaa mikroprosessorista**

Mikroprosessorilla tarkoitetaan yleiskäyttöistä tietokoneen laskentakeskusta, CPU:ta. Jossain tapauksissa saatetaan viitata nimikkeellä ”tietokone piirillä”, mikä johtuu siitä, että mikroprosessorin sisältämät lohkot olivat ensimmäisissä tietokoneissa erillisiä osia. (Kenneth 2004, 3 - 4.)

Mikrokontrolleri on täysin toimivat tietokone yhdellä ainoalla piirillä. Mikrokontrolleri sisältää mikroprosessorin ja siihen liittyvät lohkot. Tämän lisäksi siihen kuuluu sisäinen muisti ohjelmalle ja datalle, jotka olisivat tavallisessa mikroprosessorissa erillisiä ulkoisia komponentteja. Lisäksi mikrokontrolleriin kuuluvat ulkoiset liitännät. (Kenneth 2004, 3 - 5.)

## **2.8 Mikrokontrollerin muut lohkot**

Mikrokontrolleri voidaan varustaa monilla toimintaa laajentavilla lohkoilla. Pelkällä mikroprosessorilla ja muisteilla ei saada vielä kovin paljon toimintoja tehtyä. Avuksi tulevat erilaiset lisätoimintoja tarjoavat lohkot. Kommunikointia muiden laitteiden kanssa tarjoavat esimerkiksi UART-väylä (Universal Asynchronous receiver/transmitter) tai SPI-väylä (Serial Peripheral Interface bus). Analogista signaalia käsittelevät AD- ja DA-muuntimet toimivat myös omista lohkoissaan. Oskillaattorin tehtävä on tuottaa kellopulsseja, jonka tahdissa mikroprosessori ja muut lohkot toimivat. Reaaliaikakello pyrkii pitämään kellonaikaa tarkasti yllä, jopa silloin kun mikrokontrolleri on tehonsäästötilassa. (Gadre 2000, 12 - 13.)

## **2.9 Mikrokontrollerien sovelluskohteita**

Mikrokontrollereita on nykyisin monissa eri paikassa. Ihmiset käyttävät niitä usein edes huomaamatta koko asiaa. Mikrokontrollerit ovat tärkeä osa sulautettuja laitteita, jotka nimensä mukaan pyritään sulauttamaan käyttäjän ympäristöön. (Vahtera 2003, 12.)

Mikrokontrollereita on monia erilaisia ja moniin eri käyttötarkoituksiin soveltuvia. Hyvä esimerkki on matkapuhelin, jossa on käytössä useasti viimeisintä teknologiaa olevat tehokkaat ja pienitehoiset mikrokontrollerit. Vastaavasti taas television kaukosäätimeen riittää pieni ja vähän tehoa kuluttava mikrokontrolleri, joka voi toimia vuosia samoilla paristoilla. (Vahtera 2003, 13 - 14.)

## 2.10 Mikrokontrollerien ohjelmointi

Mikroprosessori vaatii ohjelma, joka ohjaa prosessorin toimintaa. Mikroprosessorien ohjelmoinnissa puhutaan matalan ja korkean tason ohjelmoinnista. (Vahtera 2003, 45 - 46.)

Mirkoprosessorin ohjelmointiin tarvitaan yleensä 2 - 3 erilaista kieltä. Kone ymmärtää ainoastaan numeroita, joten sitä ohjelmoidaan konekielellä. Konekielisessä koodissa prosessorille annetaan suoritettava käsky uniikilla numerolla. Käskyn jälkeen seuraavat parametrit, jotka kertovat mistä muistipaikasta prosessori hakee tarvittavan datan käskyn suorittamiseen. Konekielinen koodi toimii hyvin matalalla tasolla ja on vaikeaa, ellei jopa mahdotonta ihmisen lukea. (Kenneth 2004, 106.)

```
0x22 0x34 0x00 0x10 0x23 0xAE 0x5B 0x01 0x01 0xDD
```

Kuva 2: Esimerkki konekielisestä ohjelmasta.

Eräs paljon aikoinaan käytössä ollut ohjelmointikieli on symbolinen ohjelmointi eli Assembly. Assemblyssä ohjelma koostuu erilaisista mnenomeista (muistikas) ja symboleista. Assembly-kielinen ohjelma käännetään konekieliseksi ohjelmaksi assemblerilla, josta käytetään myös nimitystä macroassembleri. Yksi assembly-kielinen käsky vastaa yhtä konekielistä käskyä ja siihen liittyviä parametria. Assembly on aina arkkitehtuurikohtainen ja siksi huonosti siirrettävissä eri ympäristöjen välillä. Assembly on vielä hyvin matalan tason kieli, mutta se on helpompaa ihmisen ymmärtää. (Abd-El-Barr & Rewini 2005, 37 - 38.)

```
mov  eax, DWORD PTR _i$[ebp]
mov  DWORD PTR tv65[ebp], eax
mov  ecx, DWORD PTR _i$[ebp]
sub  ecx, 1
mov  DWORD PTR _i$[ebp], ecx
cmp  DWORD PTR tv65[ebp], 0
je   SHORT $LN1@main
```

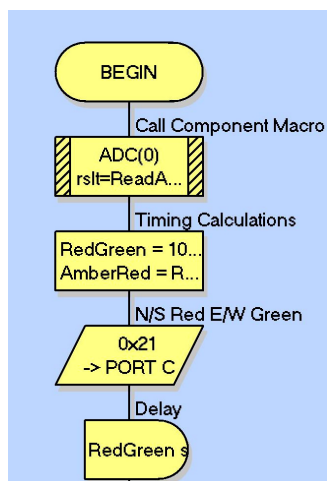
Kuva 3: Esimerkki assembly-kielisestä ohjelmasta (X86-assembly).

Korkean tason ohjelmointikielillä tarkoitetaan lausekieliä, joita käyttäjän on helppo omaksua ja ymmärtää. Näitä ovat esimerkiksi C ja C++. Lausekielinen ohjelma on ihmiselle helppoa lukea, mutta kone ei sitä sellaisenaan pysty ymmärtämään. Lausekieli käännetäänkin ensin symboliseksi kieleksi, kuten assemblyksi. Assemblystä voidaan tämän jälkeen kääntää konekielinen koodi, jota kone ymmärtää. Korkean tason kielet, kuten C, ovat vahvasti standardoituja, jolloin ohjelma on helposti siirrettävissä eri ympäristöjen välillä ainoastaan vaihtamalla kääntäjää käytettävälle ympäristölle sopivaksi. (Vahtera 2003, 47 - 48.)

```
#include <stdio.h>

int main(void){
    int i = 10;
    while(i--){
        printf("%d", i);
    }
    return 0;
}
```

Kuva 4: Esimerkki C-kielisestä ohjelmasta.



Kuva 5: Esimerkki flowcode-ohjelmasta.

Ylimmällä tasolla on graafinen ohjelmointi. Graafisessa ohjelmoinnissa käyttäjän ei tarvitse osata kirjoittaa ohjelmaa, vaan ohjelma rakennetaan visuaalisen käyttöliittymän välityksellä erilaisista komponenteista. Komponentit kytetään toisiinsa ja

niiden toimintaan voidaan lisätä ehtoja ja ohjausrakenteita. Esimerkiksi Matrix Multimedial Flowcode soveltuu Microchip PIC-, Atmel AVR- ja ARM-prosessoreiden ohjelmointiin. Flowcodessa käyttäjä rakentaa ohjelman vuokaavio-tyyppisellä ohjelmoinnilla. Ohjelma käännetään C-kielelle ja lopuksi mikrokontrollerille sopivaan muotoon. (Flowcode marketing datasheet, [Viitattu 8.2.2010].)

## **2.11 Mikrokontrollerien ohjelmien testaus ja virheenjäljitys**

On-Chip Debugger on tapa, jolla ohjelmakoodia voidaan suorittaa mikroprosessorilla, ja sen suoritusta voidaan ohjailta ulkopuolisella laitteella. Suoritus voidaan keskeyttää ja tarkkailla rekistereiden tilaa ulkopuolisella ohjelmalla PC-koneella. On-Chip Debugger -adapteria voidaan käyttää myös ohjelmakoodin lataamiseen ohjelmamuistiin. (Ball & Stuart 2002, 282.)

Simulaattori on ohjelmisto PC-tietokoneella, joka pyrkii jäljittelemään mikrokontrollerin toimintoja. Simulaattori on edullinen ottaa käyttöön, koska ulkopuolisia komponentteja tai laitteita ei tarvita. Huonona puolena on, että ohjelman suoritus ei ole täysin todellinen mm. ajoitusten ja keskeytyksien suhteen. (Ball & Stuart 2002, 135.)

Toimintakoodit ja tulosteet käyttävät hyväksi mikrokontrolleriin liitettyjä tulostuslaitteita tai tiedonsiirtoväyliä. Ohjelmakoodin lisätään kohtia, joissa tulostetaan tilan tietoa, jonka avulla voidaan seurata ohjelman suoritusta ja käyttäytymistä. (Ball & Stuart 2002. 172.)

## **3 INTEL 8051/8052 JA MCS-51**

### **3.1 Historia**

Intel 8051 pohjautuu vuonna 1976 esiteltyyn Intel 8048 -mikrokontrolleriin, jonka tuoteperhe tunnetaan nimellä MCS-48. Intel 8048 on täysin 8-bittinen laite, kuten myös Intel 8051. Intel 8048 oli käytössä monissa eri sovelluksissa, mutta parhaiten se tunnetaan IBM:n ensimmäisen PC-näppäimistön apuprosessorina. (Waclawek, [Viitattu 26.01.10], 1-2.)

Intel 8051 esiteltiin vuonna 1980. Arkkitehtuurisesti 8051 on laajennus Intel 8048 -arkkitehtuurista. Isoimmat muutokset ovat muistin koon kasvattaminen. Intel 8051 (kuten myös 8048) valmistettiin aluksi NMOS-tyyppisenä ja 1986 alkaen CMOS-tyyppisenä. CMOS-tyyppisiin laitteisiin viitataan joskus mallilla 80C51. (Waclawek, [Viitattu 8.2.2010], 2 - 3.)

Vuonna 2005 Intel 8051 juhli 25-vuotista historiaansa. Kuitenkin seuraavan vuonna Intel ilmoitti, että se lakkauttaa mcs-51-tuoteperheen (Ganssle 2006).

### **3.2 Sisarmallit ja johdannaiset**

Intel 8051 -mikrokontrollerista julkaistiin muutamia erilaisia variantteja. Intel 8031 on muuten sama, mutta siinä puuttuu ohjelmalle tarkoitettu ROM-muisti. Intel 8751 korvaa ROM-muistin EPROM-tyyppisellä muistilla, jota tavallisessa mallissa ei muuten ollut. Intel 8052 on sarjan parempi malli, jossa ROM- ja RAM-muistia on enemmän ja lisäksi siinä oli yksi 16-bittinen ajastin enemmän. Myöskin Intel 8052 -mikrokontrollerista oli saatavilla versio ilman ROM-muistia, Intel 8032, ja EPROM-muistilla varustettu versio Intel 8752. (Waclawek, [Viitattu 26.01.10], 3; MCS-51 microcontroller 1994, 10.)

Taulukko 1: Intel 8051:n sisarmallit.

Lähde: MCS-51 Microcontroller family user's manual.

Malli	ROM/EPROM -muisti (tavuina)	RAM-muisti (tavuina)	Ajastimia ja las- kureita
Intel 8051 -tuotelinja			
8031	Ei muistia	128	2
8051	4 kilotavun ROM	128	2
8751	4 kilotavua EPROM	128	2
Intel 8052 -tuotelinja			
8032	Ei muistia	256	3
8052	8 kilotavua ROM	256	3
8752	8 kilotavua EPROM	256	3
Intel 80C51 -tuotelinja (valmistettu CMOS-tekniikalla)			
80C31	Ei muistia	128	2
80C51	4 kilotavun ROM	128	2
87C51	4 kilotavun EPROM	128	2

Intel siirtyi lisensoimaan 8051-tekniikkaa myös muille valmistajille. Tässä yhteydessä siirryttiin käyttämään MCS-51-nimitystä (MicroController System). Aluksi lisensoijat valmistivat vain yhteensopivia tuotteita, mutta myöhemmin saataville tuli valmistajan itse suunnittelemaa muunneltuja malleja. (Waclawek, [Viitattu 26.01.10], 4.)

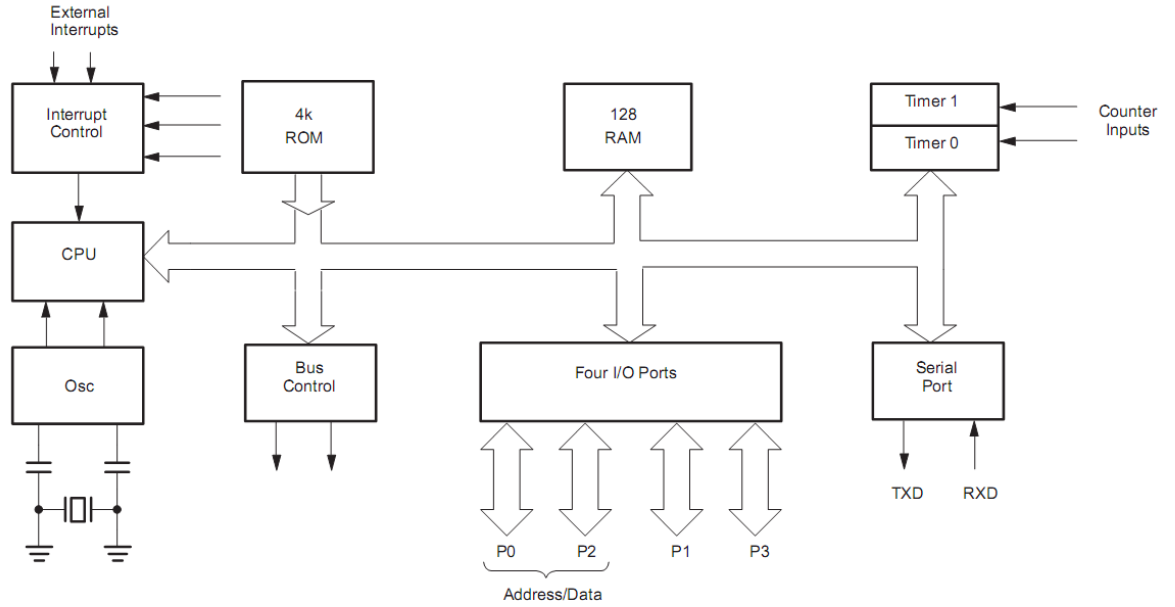
Tässä työssä käytetään nimitystä Intel 8051 tai MCS-51, kun viitataan mihintähän Intel 8051:n sisarmalliin tai johdannaiseen.

### 3.3 Rakenne

Intel 8051 -mikrokontrolleri koostuu erilaisista lohkoista, jotka ovat yhdistetty toisiinsa dataväylien avulla. Kaikki dataväylät ovat 8-bittisiä. Läheisesti yhdessä ovat prosessoriyksikkö (CPU), keskeytysten käsittelyjä ja oskillaattoriyksikkö. Ohjelma-

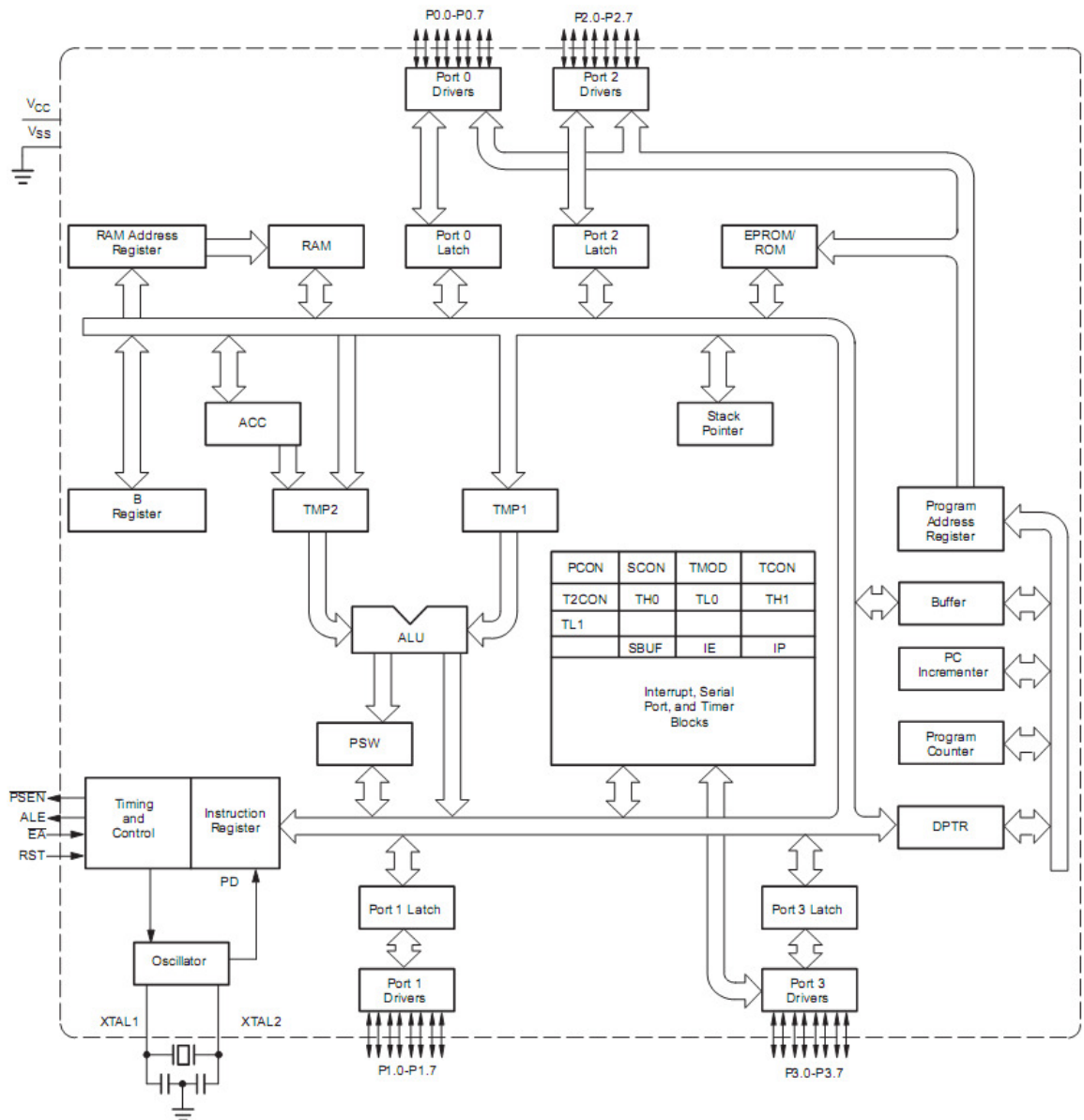


muistia (ROM) ja käyttömuistia (RAM) osoitetaan omien 8-bittisten väylien avulla.  
(80C51 programmer's guide 1995, 1.)



Kuva 6: Intel 8051 -lohkokaavio.  
Lähde: 80C51 family architecture.

### 3.4 Prosessorilohkot ja väylät



Kuva 7: Intel 8051 -arkkitehtuurin rakenne.  
Lähde: 80C51 family hardware description.

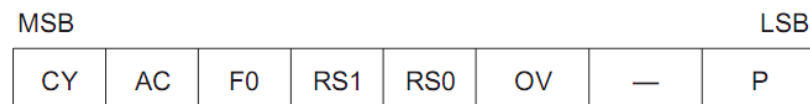
Arkkitehtuurisesti Intel 8051 on Harvardin arkkitehtuurin mukainen. Muisti ja osoiteväylä toimivat erillään toisistaan ja molempia voidaan käyttää samanaikaisesti. Prosessori on accumulator-tyyppinen ja sen käskyjen suoritus toimii yksinkertaisella "nouda, suorita ja kirjoita takaisin" -menetelmällä. (80C51 family 1995, 4 - 6.)

**ALU eli aritmeettis-looginen yksikkö** suorittaa laskutoimitukset ja se käyttää TMP1- ja TMP2-rekistereitä arvojen säilyttämiseen muistissa (80C51 family hardware 1997, 1 - 2).

**ACC eli accumulator** on rekisteri, jonne arvot tuodaan sisäisestä tai ulkoisesta muistista ennen niiden käsittelyä aritmeettis-loogisessa yksikössä (80C51 family hardware 1996, 1 - 2).

**B-rekisteriä** käytetään kerto- ja jakolaskuissa. Muissa laskutoimituksena se voi toimia ”suttupaperina” (80C51 family hardware 1997, 1 - 2).

**PSW eli Program Status Word** on bittikenttä, jota ALU muuttaa laskutoimituksen lopputuloksen mukaan. Tarkempi selvitys kuvassa 7. (80C51 family hardware 1997, 1 - 2.)



BIT	SYMBOL	FUNCTION
PSW.7	CY	Carry flag.
PSW.6	AC	Auxilliary Carry flag. (For BCD operations.)
PSW.5	F0	Flag 0. (Available to the user for general purposes.)
PSW.4	RS1	Register bank select control bit 1. Set/cleared by software to determine working register bank. (See Note.)
PSW.3	RS0	Register bank select control bit 0. Set/cleared by software todetermine working register bank. (See Note.)
PSW.2	OV	Overflow flag.
PSW.1	—	User-definable flag.
PSW.0	P	Parity flag. Set/cleared by hardware each instruction cycle to indicate an odd/even number of “one” bits in the Accumulator, i.e., even parity.

NOTE: The contents of (RS1, RS0) enable the working register banks as follows:

(0,0)	— Bank 0	(00H–07H)
(0,1)	— Bank 1	(08H–0fH)
(1,0)	— Bank 2	(10H–17H)
(1,1)	— Bank 3	(18H–17H)

SU00531A

Kuva 8: PSW-rekisterin rakenne.  
Lähde: 80C51 family hardware description.

**Program Counter -rekisteri** pitää kirjaa siitä, missä osoitteessa ohjelma suoritus on menossa ohjelmamuistissa (80C51 family hardware 1997, 1 - 2).

**DPTR-rekisterillä** voidaan osoittaa epäsuorasti muistipaikkaa sisäisessä tai ulkoisessa datamuistissa. DPTR-rekisteri on muista poiketen 16-bittinen, koska se kykenee osoittamaan enintään  $2^{16}$  bittiä. Sitä ohjataan 8-bittisesti kirjoittamalla ensin ylempi tavu ja myöhemmin alempi tavu. (80C51 family hardware 1997, 1 - 2.)

**Stack Pointer eli pino-osoitin** osoittaa käytössä olevan muistipaikan käyttömuistin alueella, josta pino on varattu (80C51 family hardware 1997, 1 - 2).

**Instruction Register** toimii timing and control -rekisterin kanssa hyvin lähekkäin. Rekisteri ohjaa prosessorin toimintaa käsiteltävän käskyn perusteella. (80C51 family hardware 1997, 1 - 2.)

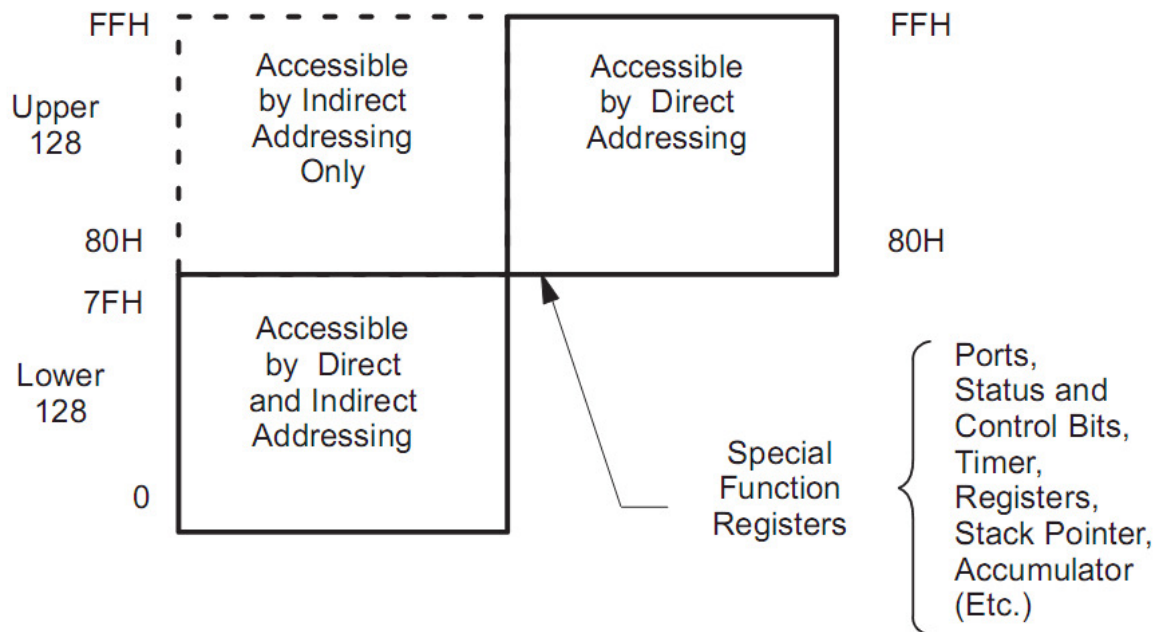
**Porttien 1 - 4** ohjaus tapahtuu kiikkupiireillä, jotka on kytketty prosessorin ohjauslinjoihin (80C51 family hardware 1997, 1 - 2).

Lohkot yhdistetään toisiinsa dataväylällä, jolla ne kommunikoivat keskenään. Yksittäisten lohkojen sisältöön eli rekistereihin päästään käsiksi muistin alkupäähän sijoitetun Special Function (SFR) -rekisterin avulla. (80C51 family hardware 1997, 2.)

### 3.5 Muistialueet

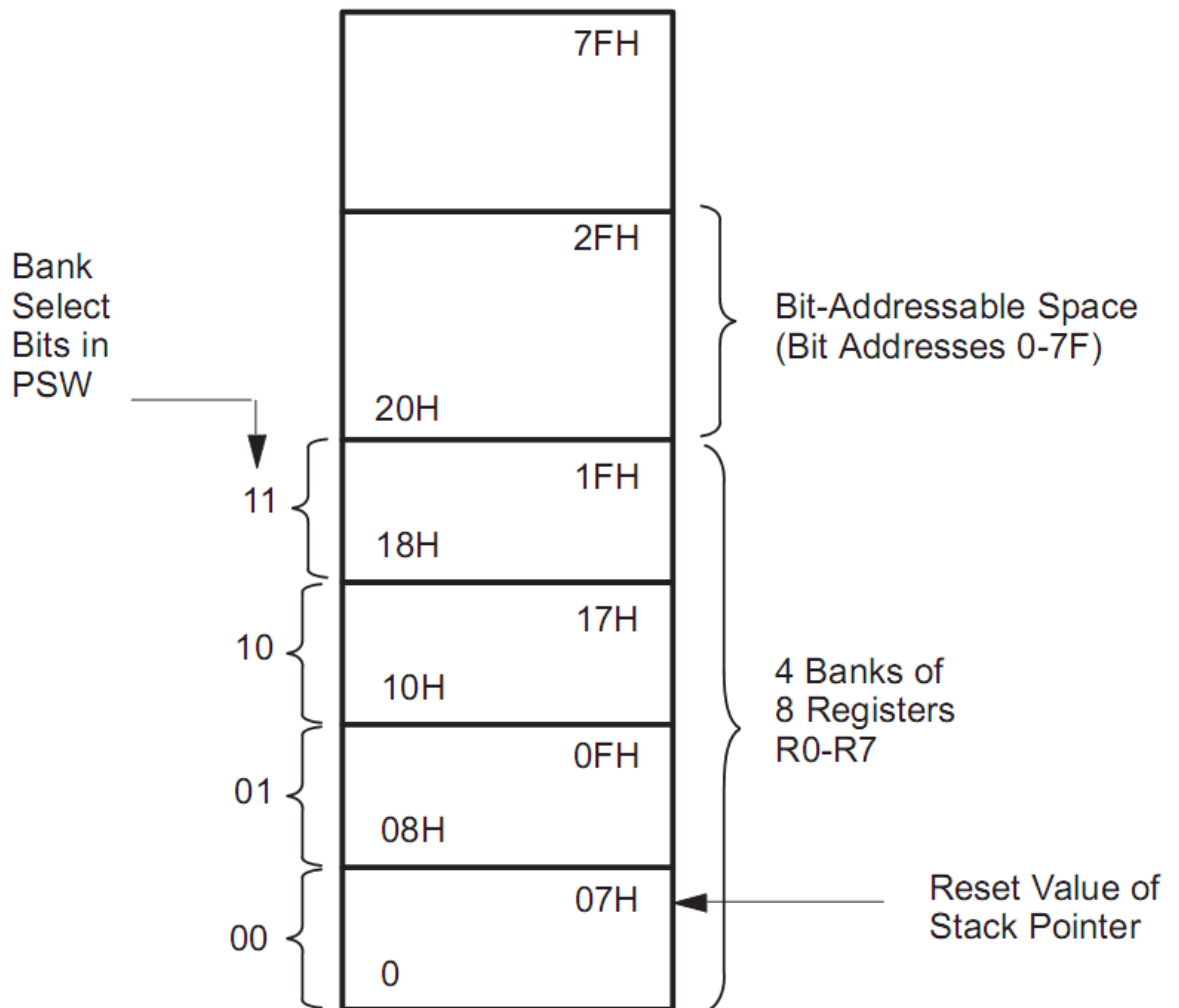
Intel 8051:n muistialueet jaetaan kahteen eri luokkaan, sisäiset ja ulkoiset muistit. Eri muistialueiden käyttö poikkeaa toisistaan, mikä täytyy ottaa huomioon ohjelmoinnissa. (80C51 family architecture 1995, 1 - 6.)

### 3.5.1 Sisäiset muistit ja SFR-sivut



Kuva 9: Mikrokontrollerin sisäisen muistin rakenne.  
Lähde: 80C51 family architecture.

Sisäistä muistia on 256 tavua, joka on jaettu kahteen eri osaan. Alempi 128 tavun lohko on käytettävissä suoralla tai epäsuoralla osoituksella. Ylemmän 128 tavun lohkon toiminta taas vaihtelee osoitustyyppin mukaan. Epäsuoralla osoituksella sitä voidaan käyttää, kuten tavallista muistia (vain Intel 8052). Suoralla osoituksella se toimii SFR-rekisterinä, josta päästään käsiksi prosessorilohkojen ohjausrekisterien sisältöön. (80C51 family architecture 1995, 2 - 3.)



Kuva 10: Sisäisen käyttömuistin alemman 128 tavun rakenne.  
Lähde: 80C51 family architecture.

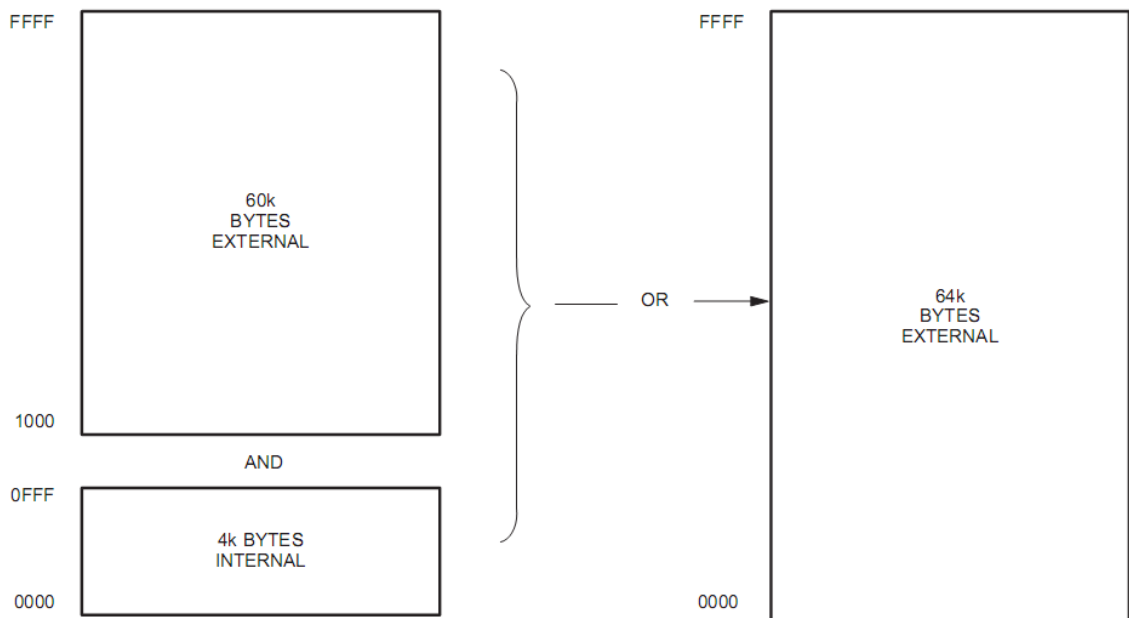
Sisäisen muistin alemmassa 128 tavussa on säilötty yleisrekisterit R0-R7 (osoitteet 0x00 - 0x1F), kahden tavun mittainen bittirekisteri (0x20 - 0x2F) ja käyttäjälle vapaa käyttömuistin alue. Rekisteripankeille varattua aluetta ei ole pakko käyttää yleisrekistereinä, vaan ylimääräistä aluetta voidaan käyttää tavallisena muistina. (80C51 family programmer's guide 1997, 1)

### 3.5.2 Ulkoiset muistit

Intel 8051 voi käsitellä 16-bittisen osoitevaruuden ansiosta maksimissaan 64 kilotavua ulkoista ohjelma- ja käyttömuistia. Termi "ulkoisen muisti" ei välttämättä viit-

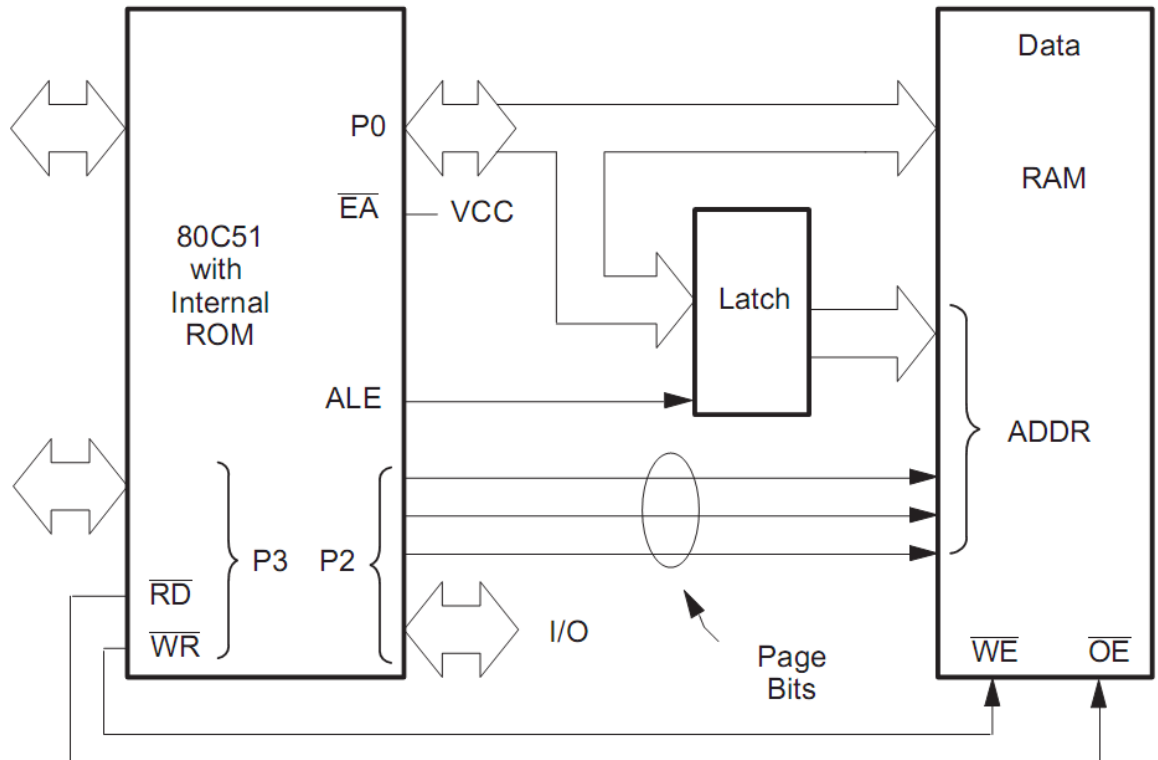
taa siihen että muisti olisi fyysisesti mikrokontrollerin ulkopuolella. Muisti voi olla myös samalla piisirulla, mutta se on kytketty 8051-mikrokontrolleriin niin, että sitä käytetään kuten ulkoista muistia. Käyttäjä valitsee ohjelmakoodissa komentojen avulla käytetäänkö muistina sisäistä vai ulkoista aluetta. (80C51 family architecture 1995, 1 - 3.)

Käyttömuisti (RAM) voi toimia sisäisellä alueella tai ulkoisella alueella. Sisäistä muistia on 128 tavua (8051) tai 256 tavua (8052), ja muistipaikat osoitetaan 8-bittisellä osoitteella. Samanaikaisesti käytössä voi olla enimmillään 64 kilotavua ulkoista muistia. Ulkoista muistia osoitetaan 16-bittisellä osoitteella. Käytettävä muistialue voidaan määritellä komentoon liitettyjen operandien avulla. (80C51 programmer's guide 1997, 1.)



Kuva 11: Ohjelmamuistin rakenne.  
Lähde: 80C51 family programmer's guide.

Ohjelmamuistia voidaan käyttää siten, että 4 kilotavua on varattu sisäisesti ja loput 60 kilotavua varataan ulkoisesti. Vaihtoehtoisesti kaikki 64 kilotavua voidaan osoittaa ulkoisesti. Ohjelmamuistin osoitteet ovat 16-bittisiä. (80C51 programmer's guide 1997, 1 - 2.)



Kuva 12: Ulkoisen muistin liittäminen mikrokontrolleriin.  
Lähde: 80C51 family architecture.

Ulkoisen muisti liitetään mikrokontrolleriin porttien 0 ja 2 kautta. Portti 0 kykenee käsittelemään vain 8-bittiä kerrallaan, mutta 16-bittistä osoitetta voidaan käyttää erillisen kiikkupiirin kanssa. Ulkoista ohjelmamuistia liitettäessä portti 2 voidaan jättää vapaaksi, jos tarvitaan vain 8-bittistä osoiteavaruutta. Käyttömuistia käytettäessä portin 2 varattujen pinnien määrä vaihtelee muistin sivumäärän mukaan. Yksi sivu on 256 tavua ja osoitettava muistialue määräytyy valitun sivun mukaan. (80C51 family architecture 1994, 2 - 3.)

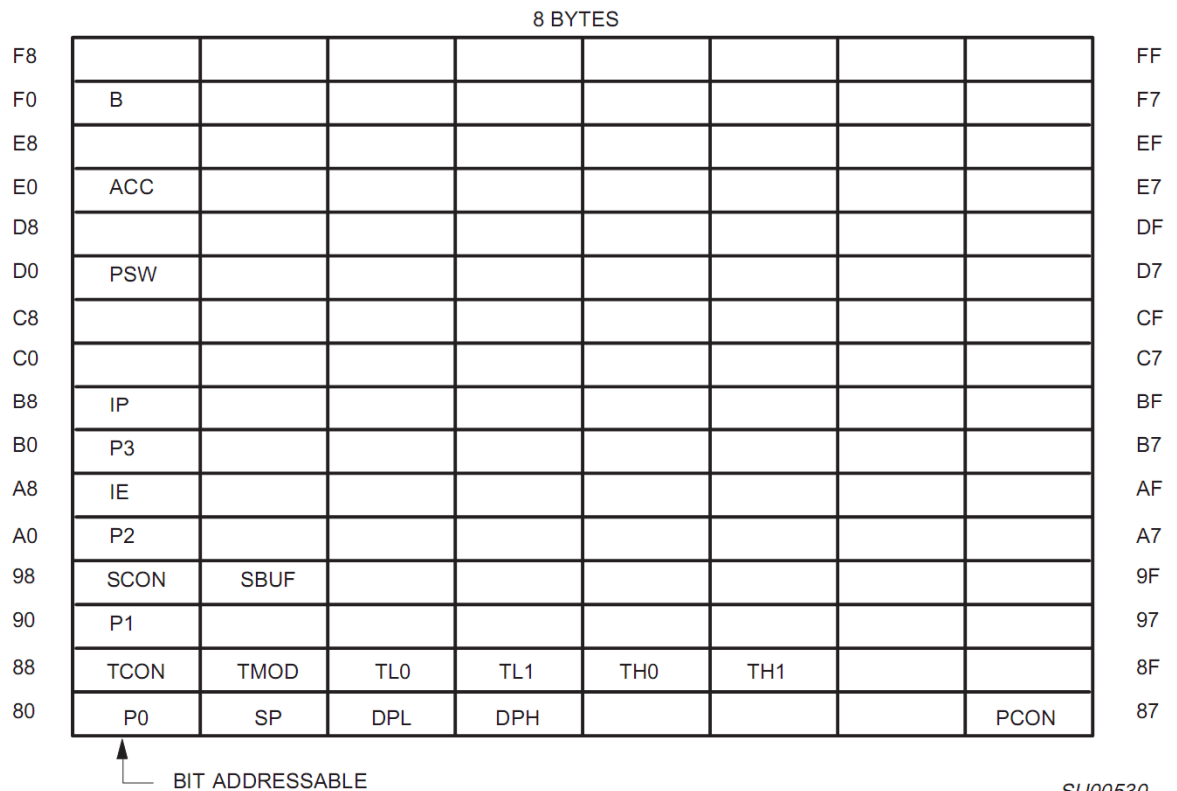
### 3.6 Rekisterit ja keskeytykset

Rekisteripankit 0 - 7 sijaitsevat siis sisäisen muistin alemman 128 tavun muistialueen alkupäässä. Näitä muistipaikkoja voidaan osoittaa epäsuoralla tai suoralla osoituksella. Rekisteripankkeja tarvitaan, kun halutaan osoittaa epäsuorasti muistipaikkaan tai siihen voidaan sijoittaa komennon vaatimien parametrien tiedot. Re-



kisteripankeilla on käytössä 4 eri sivua. Sivua vaihdetaan PSW-rekisterin RS1- ja RS0-bittejä muuttamalla. Käytössä on siis 4 x 8 tavua rekisteripankkien käyttöön. (80C51 family architecture 1995, 4.)

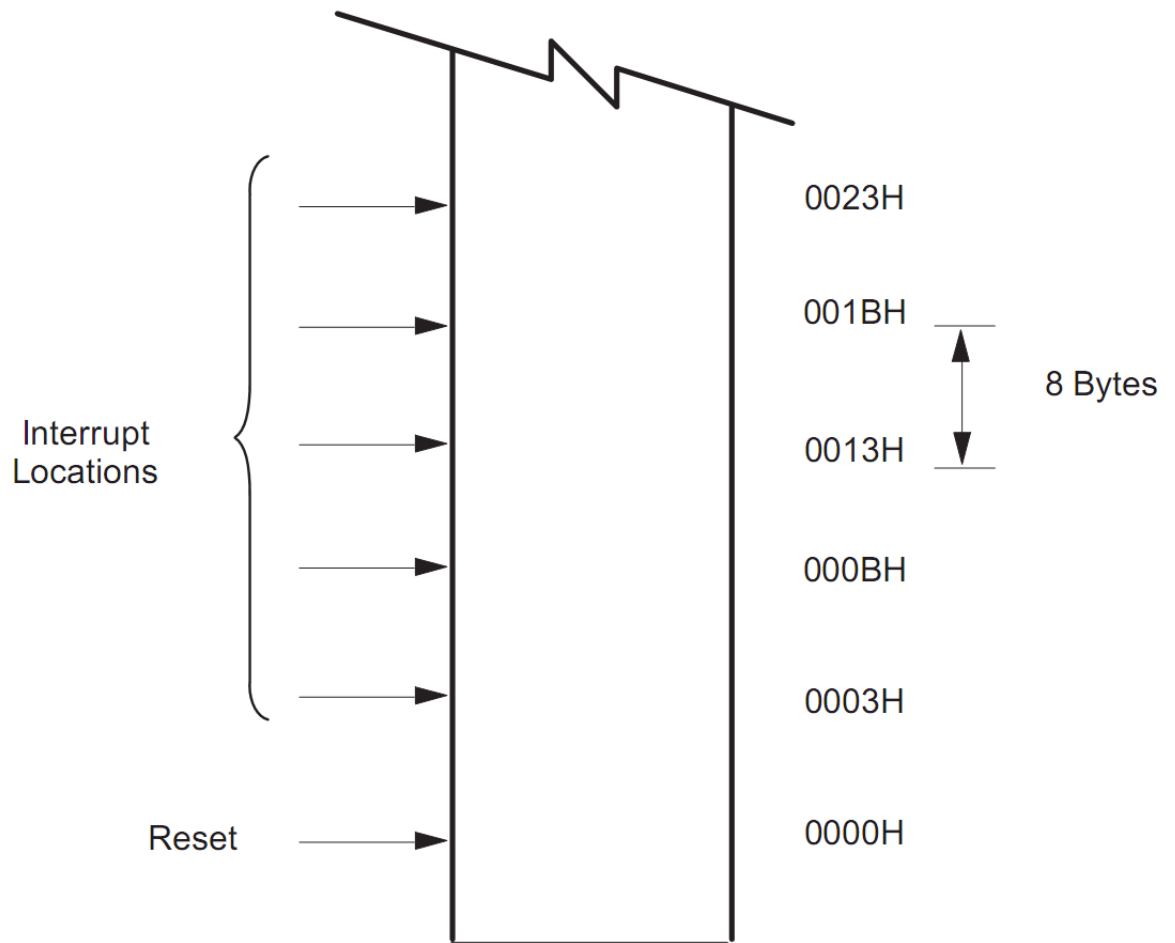
Alemman sisäisen käyttömuistin 128 tavun lohkon 0x20-0x2F osoitteiden välillä sijaitsee niin kutsuttu bittirekisteri. Rekisterin koko on 128 bittiä. Bittirekisteri eroaa tavallisesta rekisteristä siten, että siinä tiedolle on varattu tasan yksi bitti. Bitin tilaa voidaan muuttaa yhdellä konekielisellä komennolla. Tavallisessa 8-bittisessä rekisterissä komentoja tarvittaisiin yhden bitin tilan muuttamiseen useampia. (80C51 family architecture 1995, 3.)



Kuva 13: Standardien SFR-rekisterien asettelu.  
Lähde: 80C51 family hardware description.

Prossessorin ohjaukseen tarvittavat rekisterit sijaitsivat ylemmässä 128 tavun muistialueessa ja niitä tulee käyttää epäsuoralla osoituksella (80C51 family architecture 1995, 3).

Kuvassa 12 näkyvät 21 rekisteriä ovat MCS-51:n standardin määrittelemiä ja kaikkien MCS-51-yhteensopivien mikrokontrollereiden täytyy toteuttaa ne. Tyhjät tavut ovat vapaasti valmistajan käytössä, eli niihin voidaan sijoittaa mikrokontrollerin toimintoja laajentavien yksiköiden ohjausrekistereitä. (80C51 family hardware 1997, 2.)



Kuva 14: Keskeytysten asettelu ohjelmamuistissa.  
Lähde: 80C51 family architecture.

MCS-51-standardissa keskeytyksille on varattu ennalta määrätystä muistipaikasta 8 tavun kokoinen muistialue käyttöön. Käynnistyksen jälkeen ohjelman suoritus alkaa aina osoitteesta 0x0000. Keskeytysten muistiosoitteet on määritelty kiinteiksi

ja keskeytyksen tapahtuessa, prosessori osaa siirtää ohjelman suorituksen oikeaan paikkaan ohjelmamuistissa. Keskeytyslohkon täytyy aina päätyä palautuskomentoon. (80C51 family architecture 1995, 1.)

### 3.7 Kehitystyökalut

MCS-51-yhteensopivia työkaluja on saatavilla useammalta eri valmistajalta. Kaikki työkalut sisältävät vähinään kääntäjät assemblylle ja C-kielellä, linkittäjän ja debuggerin. Joissain paketeissa toimitetaan myös IDE, simulaattori ja valmiita ohjelmakirjastoja.

**Small Device C Compiler (SDCC)** on ainoa ilmaiseksi saatavilla oleva kääntäjä Intel 8051 -mikrokontrollereille. Pakettiin kuuluu kääntäjä C-kielellä ja assemblylle, linkittäjä, debuggeri ja  $\mu$ sim simulaattorin. SDCC on avoimen lähdekoodin projekti, joten se on saatavilla myös käännettävänä lähdekoodina. Lisätietoja löytyy osoitteesta: <http://sdcc.sourceforge.net/>

**Keil C51** on kaupallinen kehitystyökalupaketti 8051:lle. Paketti sisältää kääntäjät C-kielelle ja assemblylle, linkittäjän, debuggerin ja  $\mu$ Vision IDE. Lisäksi Keil tarjoaa valmista RTOS-käyttöjärjestelmää kehitystyökalupaketin yhteydessä. Keilillä on valikoimissa valmiita paketteja, jotka sisältävät kehitystyökalut ja evaluointikortin. Valmistajan tuotesivu: <http://www.keil.com/c51/>

**IAR Embedded Workbench for 8051** on ruotsalaisen IAR Systemsin tarjoama kaupallinen kehitystyökalupaketti. Paketti sisältä kääntäjän C-kielellä, mutta myös C++ -kieli on osittain tuettu. Assembleri ja linkittäjä kuuluvat myös kokonaisuuteen. Paketti sisältää myös C-SPY-debuggerin, joka toimii simulaattorina tai hardware debuggerina. Valmistajan tuotesivu: <http://www.iar.com/website1/1.0.1.0/244/1/>

**Raisonance** tarjoaa kattavat kaupalliset työkalut Intel 8051:n ohjelmointiin. Tarjolla on C-kielen kääntäjä, assembleri, linkkeri, simulaattori, debuggeri ja valmis RTOS-käyttöjärjestelmä. Työkalut toimivat ilmaiseksi saatavilla olevan Ride 7

-kehitysympäristön kanssa. Valmistajan tuotesivu: [http://www.mcu-raisonance.com/~8051-family\\_\\_microcontrollers\\_\\_fp~fp\\_\\_T015:4cn8nlhlel62.html](http://www.mcu-raisonance.com/~8051-family__microcontrollers__fp~fp__T015:4cn8nlhlel62.html)

Intel 8051:n kaikissa kääntäjissä on valittavissa ohjelman kääntämisen yhteydessä millaista muistimallia kääntäjä käyttää RAM- ja ROM-muistille. Yleensä valittavana on 3 erilaista muistimallia: small, compact ja large. Small rajoittaa RAM-muistin koon 128 tavuun, eli käytännössä vain sisäinen muisti on käytössä. Lisäksi ROM-muisti on rajattu 4 kilotavuun. Compact antaa käyttää RAM-muistia 256 tavua ulkoista ja 128 tai 256 tavua sisäistä muistia. Ohjelmamuistia voi käyttää kaiken 64 kilotavua, mutta yksittäinen ohjelmalohko ei voi olla yli 2 kilotavua pitkä. Large avaa käyttöön koko muistialueen. Käytännössä tämä siis tarkoittaa 256 tavua sisäistä RAM-muistia ja 64 kilotavua ulkoista. Ohjelmamuistia voi käyttää 64 kilotavua, ja yksittäisillä ohjelmalohkoilla ei ole kokorajoitusta. (Beach 2006, 24 - 26.)

### 3.8 Käskykanta

MCS-51-käskykanta koostuu 113:sta assembly-kielisestä käskystä. Arkkitehtuurin ja muistinkäsittelyn luonteen vuoksi monista käskyistä on 4 eri versiota, joilla voidaan osoittaa haluttua muistialuetta. Käskyjen pituudet vaihtelevat 1 - 3 tavun välillä. (MCS-51 Microcontroller family 1993, 51 - 54.)

Käskyjen käsittelyaika riippuu niiden vaatimasta suoritusajasta. Yksinkertaiset käskyt toimivat nopeammin, mutta monimutkaiset käskyt tarvitsevat enemmän suoritusaikaa. Intel 8051 on siis CISC-tyyppinen suoritin. Standardi 8051 suorittaa yhden järjestelmän kierroksen (Machine Cycle) 12 kellopulssin aikana. Yksi järjestelmäkierros on jaettu kuuteen osaan (State) ja yksi osa kahteen vaiheeseen (Phase). Käskyt ovat pääsääntöisesti 1 tai 2 kierroksen mittaisia. MUL- ja DIV-käskyt, joita käytetään kerto- ja jakolaskun suoritukseen vaativat eniten aikaa. Molempien vaatima suoritus aika on 4 järjestelmäkierrosta eli 48 kellopulssia. (80C51 family architecture 1995, 12.)

Esimerkiksi käsky ADD lisää arvon accumulatorissa olevaan arvoon.

Taulukko 2: Esimerkki ADD-komennon toiminnasta.

Assembly-kielinen käsky	Toiminto	Pituus	Suoritus aika	Operaatiokoodit
ADD a, Rn	Lisää rekisterin arvon accumulatoriin.	1 tavu. Vain operaatiokoodi.	12 kellopuls- sia.	0x28 - 0x2F  (R0 - R7)
ADD a, direct	Lisää suoraan osoitetun tavun accumulatoriin.	2 tavua. Operaatiokoodi + rekisterin osoite.	12 kellopuls- sia.	0x25
ADD @Ri	Lisää epäsuorasti käyttömuistissa olevan tavun accumulatoriin (Arvo seuraa @-merkkiä).	1 tavu. Vain operaatiokoodi.	12 kellopuls- sia.	0x26 - 0x27  (@R0 - @R1)
ADD #data	Lisää välittömän arvon accumulatoriin. (Luku seuraa #-merkkiä).	2 tavua. Operaatiokoodi + data.	12 kellopuls- sia.	0x24

Vaikka erilaisia assembly-kielisiä käskyjä on hyvin maltillinen määrä, ovat operaatiokoodit numeroitu välillä 0x00 - 0xFF. Operaatiokoodien suuri määrä johtuu siitä että jokaiselle yleisrekisterille on varattu oma operaatiokoodinsa käskyä kohti. (MCS-51 Microcontroller family 1993, 55.)

Esimerkiksi käskyn ADD operaatiokoodit ovat 0x24 - 0x2F. Koodi 0x24 vastaa ADD-komentoa kun käytetään välitöntä arvoa. Koodia 0x25 käytetään kun osoitetaan suoraan. Koodit 0x26 - 0x27 tarkoittavat epäsuoraa osoitusta muistiin (yleisrekisterit R0 tai R1 sisältävät käytettävän muistiosoitteen). Koodit 0x28 - 0x2F ovat vastaavasti varattu siten, että jokaiselle rekisteripankille on oma koodinsa. (MCS-51 Microcontroller family 1993, 55.)

### **3.9 Debug-työkalut**

MCS-51-standardi ei määrittele yleistä ratkaisua On-Chip Debuggaukseen, vaan liitäntä ja protokolla ovat valmistajan itse päätettävissä (What is the 8051 2008, 3 - 8).

Ilmaisia ja kaupallisia ohjelmistopohjaisia simulaattoreita on tarjolla useampia. Yksi ilmainen on JSIM-51. Myös SDCC-kääntäjän mukana toimitetaan ilmainen simuloitiohjelma. (What is the 8051 2008, 7.)

### **3.10 Valmistajat**

MCS-51 on lisensoitava tekniikka ja se on levinnyt monen valmistajan tuotteisiin. Suurimmat tuotteissaan 8051-arkkitehtuuria käyttävät yritykset ovat: Analog Devices, Atmel Corporation, Maxim Integrated Products, Infineon Technologies, Texas Instruments ja Cypress Semiconductor. (What is the 8051 2008, 9.)

Monet valmistajat ovat laajentaneet alkuperäisen MCS-51-standardin mukaista arkkitehtuuria ja parannelleet alkuperäistä. Kuitenkin, jos valmistaja haluaa kutsua

tuotetta yhteensopivaksi, sen täytyy tukea vähintään MCS-51:n määrittelemiä toimintoja.

## 4 TUTKIMUS

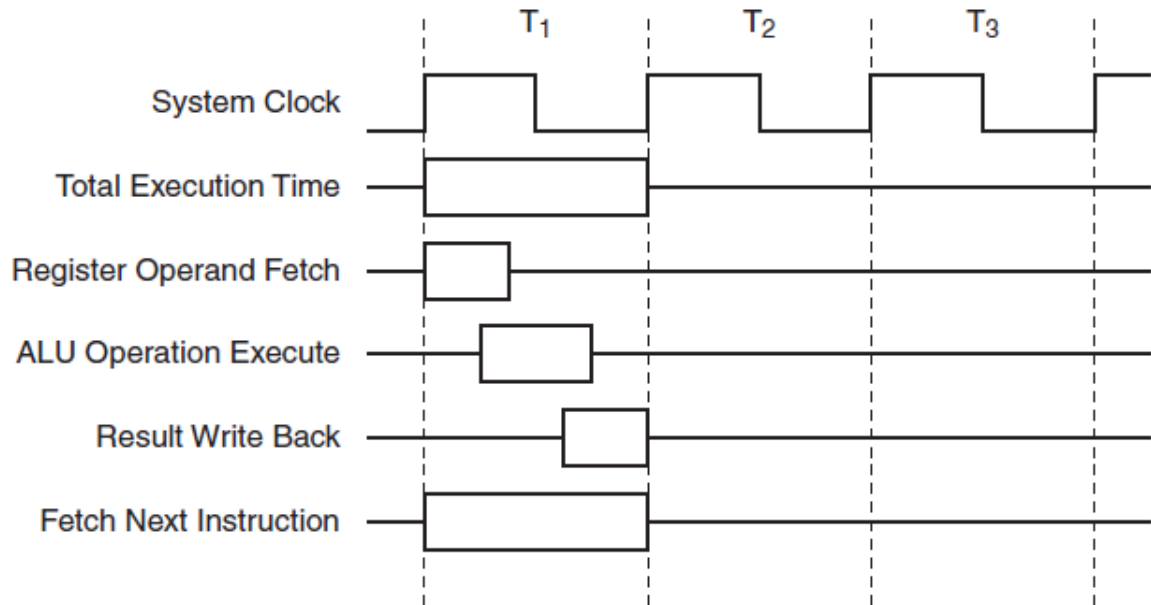
### 4.1 Intel 8051 nykyisissä mikrokontrollereissa

Intel 8051 on käytössä monien eri valmistajien uusissa tai uudehkoissa tuotteissa. Esimerkkinä ovat vähävirtaiset laitteet ja sovellukset, joihin on suunniteltu **Silicon Laboratories C8051F9xx -sarja**. Mikrokontrollerin käyttöjännite toimii 0,9 voltin ja 3,6 voltin välillä. Silicon Labs on tehostanut 8051-ytimen toimintaa niin että 70 % käskyistä voidaan suorittaa yhden tai kahden järjestelmäkierron aikana. Alkuperäisen standardin mukaan tarvittiin vähintään 6 kierrosta. Mikrokontrollerin hetkellinen suorituskapasiteetti onkin 25 MIPS kun käytetään 25 MHz:n kellotaajuudella. Mikrokontrolleriin on myös integroitu sisäinen hakkurivirtalähde, jota voidaan hallita ohjelmallisesti. Sisäinen esikalibroitu oskillaattori tarjoaa tarkan ajoituksen oheislaitteille, jolloin ulkoista kideä ei ole pakko käyttää.

Myös Atmel Corporationilla on tarjolla monia 8051-pohjaisia mikrokontrollereita. **AT89C5132** on iso ja monilla ominaisuuksilla varustettu, joita harvemmin on tämän kokoluokan mikrokontrollereissa. Ominaisuuslistaan kuuluu mm. rajapinta äänilähteiden käyttöön, USB-liitäntä, näppäimistöliitäntä, MultiMedia Card -liitäntä, IDE-liitäntä ja lisäksi vielä tavanomaiset I2C, SPI ja UART. Kaikki oheislaitteet on liitetty sisäisen väylän kautta C51-ytimeen, joka voi toimia maksimissaan 20 MHz:n taajuudella. Käskyjen suoritusta on tehostettu X2-tilalla, joka suorittaa käskyt 6 kellopulssin aikana alkuperäisen 12 sijaan.

Atmelilla on tarjolla myös "single cycle core" -sarja, jossa C51 ydin (viittaus Intel 8051 yhteensopivaan ytimeen) suorittaa käskyjä nimensä mukaisesti yhden kellojakson aikana. Kaikkia käskyjä ei kuitenkaan voida suorittaa näin nopeasti, joten ne levittäytyvät useammalle kellojaksolle.





Kuva 15: Atmel AT89LP213 -mikrokontrollerin INC R0 -käskeyn suorituksen ajoituksesta.

Lähde: AT89LP213 datasheet.

Jos nopeutta tarvitaan vielä enemmän, niin **Silicon Laboratories C8051F36x** -sarja tarjoaa 50 MIPS:n tai jopa 100 MIPS:n tehon. Mikrokontrollerissa on 24,5 MHz sisäinen oskillaattori, mutta PLL-tekniikan avulla prosessoriosaa voidaan nopeuttaa suorittamaan käskyjä 50 tai 100 MIPS tehokkuudella. C8051F36x onkin tehokkaimpia 8-bittisiä mikrokontrollereita.

Kun siirrytään taas äärimmäisen pieniin mikrokontrollereihin, **Silicon Laboratories C8051T606** vaatii fyysisesti tilaa vain 2 mm x 2 mm QFN10-koteloituna. Pienen fyysisen koon vuoksi ulkoisia liitäntöjä ei ole paljon, mutta mikrokontrolleri tarjoaa kuitenkin saman 1MIPS / 1Mhz suorituskyvyn kuin vastaavat tuotteet. Mikrokontrolleri on suunnattu valmiisiin tuotteisiin, koska se on varustettu OTP-muistilla (One Time Programmable). Tarvittavien ulkoisten komponenttien määrä on myös minimaalinen, koska esimerkiksi mikrokontrollerissa on sisäinen oskillaattori, jolloin ulkoista kidettä ei tarvita.

Muut valmistajat, kuten Maxim, Cypress Semiconductor, Infineon Technologies ja Texas Instruments tarjoavat hyvin vastaavia ratkaisuja 8-bittisissä 8051-

pohjaisissa mikrokontrollereissa. Yhteistä kaikilla on kuitenkin, että alkuperäistä 8051-prosessoria on paranneltu omilla laajennuksilla ja tehostamalla käskyjen suoritusta, jolloin suorituskky on kaikissa 20 - 25 MIPS:n luokkaa.

Yleinen puolijohteiden valmistustekniikan kehittyminen on vaikuttanut myös mikrokontrollereiden pienentymiseen. Pienempään tilaan saadaan sijoitettua nyt sama 8051-ydin ja enemmän muistia kuin 20 vuotta sitten. Prosessoreiden fyysinen pienentäminen laskee myös tehontarvetta ja lämmöntuottoa.

#### **4.2 Intel 8051 FPGA-piireissä ja SoC-tuotteet**

Intel 8051 -ydin on saatavilla ohjelmallisena FPGA-piireille monilta eri valmistajilta. Myös muutamia ilmaisia on tarjolla. IP (Intellectual Property) on saatavilla Asic-piireille, alteran, xilinxin ja actellin FPGA-piireille tai pelkästään VHDL- tai verilog-kielisenä pakettina. (What is the 8051 doing 2008, 10.)

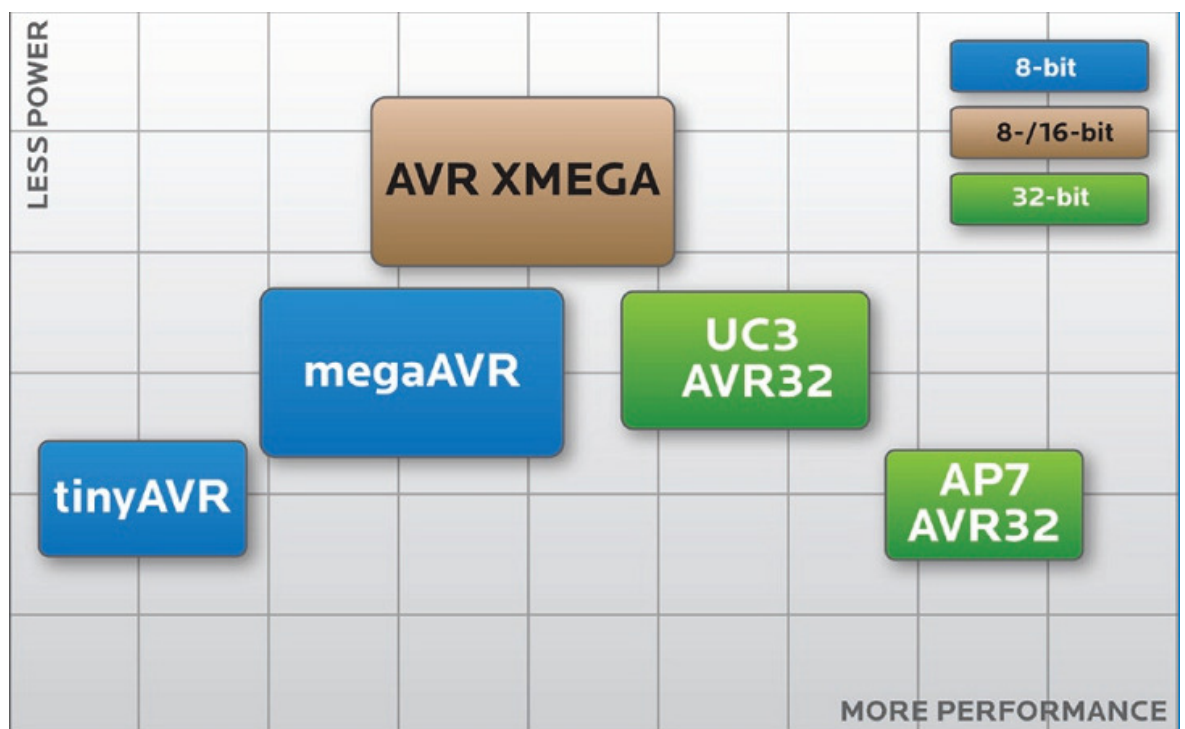
SoC-ratkaisuja (System on Chip) tarjoavat ainakin Texas Instruments, Nordic Semiconductors ja Silicon Labs jotka ovat integroineet 8051-pohjaisen mikrokontrollerin ja lyhyen kantaman radiopiirin samalle mikropiirille. Radiopiirisovelluksia suunnitellessa tarvitaan useasti sekä mikrokontrolleri, että radiopiiri. On siis luontevaa että nämä kaksi komponenttia integroidaan samalle sirulle, jolloin tarvitaan vähemmän komponentteja ja säästetään tuotteen komponenttikustannuksissa, kun voidaan käyttää kahden erillisen piirin sijasta yhtä. (Product brief: nRF24LE1, [Viitattu 8.3.2010].)

#### **4.3 Intel 8051:n vertailu Atmel AVR -arkkitehtuurin kanssa**

Atmel AVR -arkkitehtuuri on Atmel Corporationin tarjoama oma tuotesarja 8-bittisiä mikrokontrollereita.

Tutkimusyhtiö Gartnerin tekemässä tutkimuksessa puolijohdevalmistajien markkinoista todettiin, että Atmel on maailman nopeimmin kasvava 8-bittisten mikrokontrollereiden toimittaja maailmassa. Kasvua ovat olleet vauhdittamassa AVR-tuotepihe, joka oli ensimmäisiä mikrokontrollereita flash-muistilla varustettuna. (Atmel confirmed 2009.)

AVR-tuotepihe kattaa monia erilaisia tuotteita. Valikoimaan kuuluu eritasoisia ratkaisuja tehon ja ominaisuuksien suhteen. Myös erikoissovelluksiin kohdistettuja tuotteita on valikoimassa.

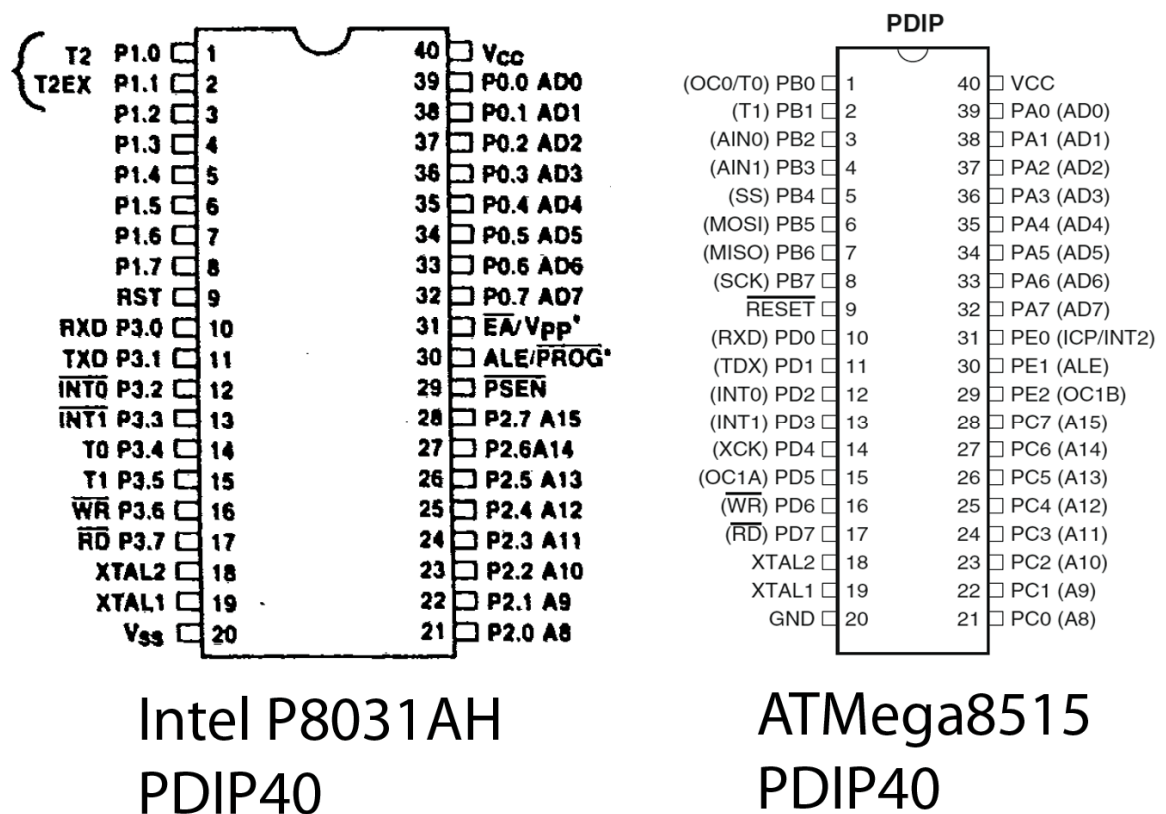


Kuva 16: AVR-tuotepiheen rakenne.  
Y-akseli kuvaa tehontarvetta ja X-akseli tuotettua suorituskykyä.  
Lähde: Atmel AVR/AVR32 Quick reference guide.

Atmel tinyAVR on pienin yleiskäyttöinen mikrokontrolleri ja se tarjoaa vain muutamia toimintoja ja ominaisuuksia pienessä koossa. Atmel megaAVR on hyvin yleiskäyttöinen ja monipuolinen mikrokontrolleri, joka tarjoaa monia käytännöllisiä ominaisuuksia. Atmel XMEGA on suurin ja monipuolisin tuotesarjan yleiskäyttöinen mikrokontrolleri. Valikoimaan kuuluu myös monia erikoistuneita malleja, kuten

USB AVR -sarja, joissa piiriä voidaan käyttää USB-väylässä. (AVR/AVR32 Quick Reference Guide, [Viitattu 25.2.2010].)

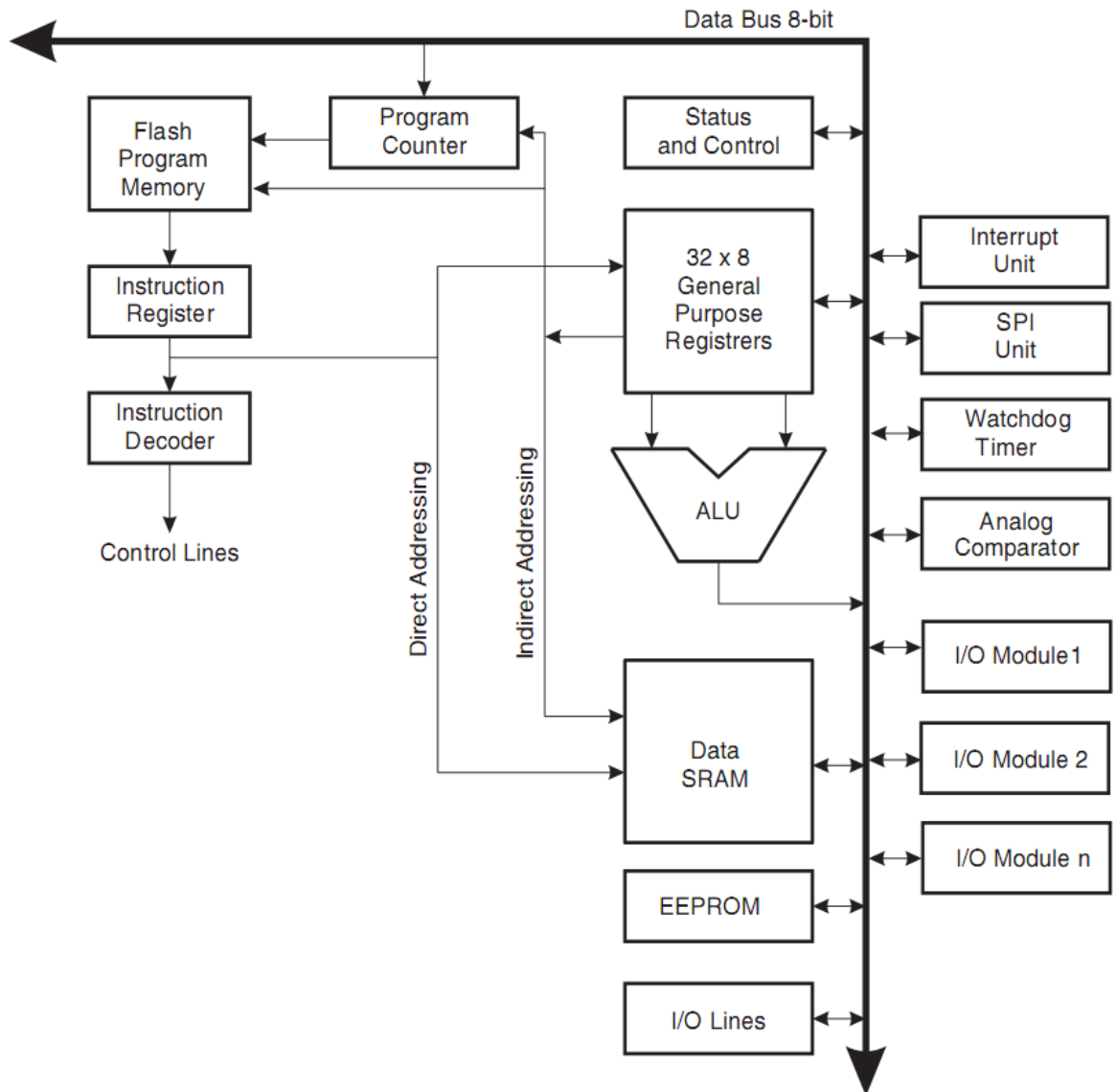
Mielenkiintoinen yksityiskohta on, että ensimmäiset AVR-arkkitehtuurin pohjautuvat mikrokontrollerit olivat Intel 8051:n kanssa pinniyhteensopivia. Kuva 17 havainnollistaa asiaa tarkemmin. Näin voitiin helposti ja nopeasti vaihtaa omassa tuotteessa käytössä ollut 8051-pohjainen mikrokontrolleri uuteen. Ensimmäiset AVR-arkkitehtuuriin perustuvat mikrokontrollerit esiteltiin 90-luvun puolivälissä. Niiden päätavoite on yhdistää tehokas 8-bittinen mikroprosessori, flash ja EEPROM-muisti samalle piisirulle. (Gadre 2000, 21.)



Kuva 17: Intel P8031AH:n ja ATMega8515:n pinnijärjestys PDIP-koteloituna. Lähde: Intel P8041AH datasheet ja ATmega 8515 datasheet.

Arkkitehtuurisesti Atmel AVR ja Intel 8051 ovat hyvin samankaltaisia. Kummatkin perustuvat harvard-arkkitehtuuriin ja kummassakin on CISC-prosessorin piirteitä, mutta Atmel AVR on virallisesti RISC-tyyppinen. Kummassakin prosessoreissa laskutoimitukset tehdään ALU-yksiköllä. AVR kykenee myös yhden kellojakson

toimintaan, jossa käselyn vaatima tietoa haetaan, suoritetaan ja kirjoitetaan takaisin. AVR-arkkitehtuurin tullessa markkinoille, se oli jopa hurjan tehokas 8051:n verrattuna. Erot ovat kuitenkin myöhemmin tasoittuneet kehittyneiden 8051-ytimien ansiosta.



Kuva 18: AVR-arkkitehtuurin rakenne.

Lähde: ATmega8515 datasheet.

AVR-arkkitehtuurissa on käytössä 32 kappaletta 8-bittistä yleiskäyttöistä rekisteriä, joihin voidaan varastoida tietoa ennen suoritusta ALU:ssa. Kaikki prosessorin si-

säiset lohko on yhdistetty 8-bittisellä dataväylällä. Erona 8051 -arkkitehtuuriin on accumulatorin puuttuminen, koska AVR osaa käyttää arvoja suoraan yleisrekistereistä. AVR pohjautuu 8051:n kanssa samantyyppisen avoimen väylän suunnitteluun ja vastaavasti sisäiset lohkot kommunikoivat keskenään yhden yhteisen väylän avulla. (Atmega 8515 datasheet, [Viitattu 25.2.2010], 8.)

#### **4.4 Intel 8051:n ja Atmel AVR:n vertailu ohjelmatasolla**

Atmel AVR ohjelmointiin voidaan käyttää C-kieltä tai Assemblyä. Saatavilla on myös kääntäjä C++-kielelle. Yleisin käytetty ohjelmointikieli on kuitenkin C. Avoimen lähdekoodin GNU GCC -kääntäjästä ja glibc-kirjastosta on saatavilla AVR:llä räätälöity versio, joka on ehdottomasti suosituin käytetyistä kääntäjistä. (Phung 2008.)

Kun puhutaan ohjelmoinnista assemblyllä, voidaan sanoa että AVR on joissain määrin helpompi ohjelmoida. Tätä toteamusta voidaan tukea sillä, että AVR:n muistinhallinta on yksinkertaisempi ja selkeämpi. Kuten 8051:ssä, myös AVR:ssä voidaan osoittaa muistia suorasti tai epäsuorasti. AVR:ssä muistin osoituksen apuna voidaan käyttää X, Y ja Z-rekistereitä, jolla muistiosoitetta voidaan ”korostaa” tai rekisterien arvoa voidaan kasvattaa tai supistaa käskyn suorituksen jälkeen. Korostuksella tarkoitetaan että käskyssä olevaan operandiin lisätään rekisterissä oleva arvo ennen muistin osoitusta. (AVR Instruction set, [Viitattu 25.2.2010], 5.)

C-kielellä ohjelmointi ei poikkea 8051:stä paljon, koska itse kielen syntaksin on standardoinut ANSI. Mukana on ainakin 8051:n tapauksessa paljon kääntäjäkohtaisia avainsanoja. AVR käyttämä GCC-kääntäjä noudattelee paremmin standardia, eikä sisällä poikkeavia avainsanoja. Käytännössä jokaisessa kääntäjässä ja käännösympäristössä on omat tapansa eri asioiden tekemiseen, esimerkiksi keskeytysten. (Phung 2008.)

Muisti on AVR-arkkitehtuurissa jaoteltu samaan tapaan 8051:n kanssa. Ohjelma-muisti eli flash, on omassa osoiteavaruudessaan. RISC-arkkitehtuurin luonteen mukaan kaikki ohjelmakomennot ovat yhden sanan mittaisia. Komento sisältää sekä operaatiokoodin että operandit. (ATMega8515 datasheet 2002, 16 - 18.)

Keskeytysvektorit ovat 8051:n tapaan kiinteissä muistiosoitteissa ohjelmamuistin alussa, mutta ne ovat vain yhden käskyn mittaisia (2 tavua). Käyttömuisti toimii myös omassa muistiavaruudessaan ja sen alkuosassa on 32 kappaletta yleisrekistereitä. Näitä seuraa I/O-laiterekisterit, joiden jälkeen alkaa normaali sisäinen käyttömuisti. Ulkoista muistia ei ole mahdollista käyttää kaikissa AVR:n malleissa. Yksi käyttömuistin osoite vastaa yhtä tavua. 8051 erottava tekijänä on kolmas muistityyppi, EPROM-muisti. EPROM-muistiin ei voida osoittaa suoraan, vaan sen käsittely tapahtuu prosessorin rekisterin avulla. (ATMega8515 datasheet 2002, 16 - 18.)

AVR ei sisällä bittirekisteriä, mutta tietyillä komendoilla voidaan ohjata yksittäistä bittiä yleisrekisterissä tai tilarekisterissä. Kaikki muistinkäsittely toimii AVR-arkkitehtuurissa 8-bittisesti. (AVR Instruction set, [Viitattu 25.2.2010], 124.)

#### **4.5 Intel 8051 ja ARM-prosessorit**

8-bittisiä mikrokontrollereita voidaan tarkastella siltäkin kannalta, milloin niiden rajat tulevat vastaan ja koska on järkevää siirtyä suurempiin, 16- tai 32-bittisiin prosessoreihin. ARM on lisensoitava 32-bittinen prosessoriarkkitehtuuri, joka on hyvin suosittu monissa sovelluksissa. Syynä ARM:iin siirtymiseksi voi olla esimerkiksi lisääntynyt suoritustehon tarve. 8-bittisten prosessoreiden laskentakyvyt ovat hyvin rajoittuneita ja esimerkiksi liukulukulaskut ovat jo vaativia toimenpiteitä. ARM toimii kuitenkin suuremmalla kellotaajuudella ja siinä on enemmän muistia mikä helpottaa monista vaativista operaatioista suoriutumista. ARM soveltuu myös hyvin käyttöjärjestelmän ajamiseen, jos sellaista tarvitaan sovelluksessa. (Wendell, [Viitattu 8.3.2010].)

ARM on lanseerannut uuden Cortex M0 -tuoteperheen, joka on tarkoitettu suoraan kilpailemaan 8-bittisten mikrokontrollereiden kanssa. 32-bittisen tehokkuus 8-bittisen hinnalla ja samassa kokoluokassa ei kuulosta lainkaan huonolta paketilta. (Wikström 2009, 26 - 29.)



## 5 TULOKSET JA YHTEENVETO

### 5.1 Intel 8051 nykyisin

Tutkimuksessa kävi ilmi, että Intel 8051 ja MCS-51 ovat varsin kilpailukykyisiä vielä nykyisinkin mikrokontrollereiden markkinoilla, vaikka tekniikka on 30 vuotta vanhaa. Vahvuutena voidaan pitää avointa lisensointia, joka mahdollistaa myös itse mikrokontrollerin ominaisuuksien kehittämisen. Lukuisista valmistajista ja eri mallien ominaisuuksista huolimatta ohjelmointi on pystytty pitämään yhtenäisenä MCS-51-standardin avulla.

Yhtenä ratkaisevana asiana Intel 8051:n säilymisessä markkinoilla voidaan katsoa olevan sen jatkuvasti kehittynyt suorituskyky alkuperäisestä. Komentojen suoritus-aikaa on nopeutettu ja toimintoja tehostettu, jolloin on saavutettu vastaava suorituskyky MIPS:nä tarkasteltaessa kuin esimerkiksi Atmel AVR:ssä. Monet valmistajat eivät myöskään halua lähteä kehittämään ja ylläpitämään omaa arkkitehtuuria, vaan ovat ottaneet käyttöön valmiin ja laajalle levinneen ratkaisun.

Emitt Solutions:n tekemässä tutkimuksessa mikrokontrollerien markkinoista vuodelta 2008 käy ilmi, että 8051-arkkitehtuuriin perustuvia laitteita on 19% kokonaismarkkinoista. Perässä tulevat Renesas 8- ja 16-bittisillä mikrokontrollereilla 17% markkinaosuudella. Freescalen (entinen Motorola) 8-bittiset mikrokontrollerit saavuttavat 15% markkinaosuuden. Markkinaosuudet on laskettu sellaisten mikrokontrollerien kesken joita ei ole integroitu muihin laitteisiin. Jos tutkitaan kaikkia mikrokontrollereita, myös piille integroituja, on ARM selvästi johtava arkkitehtuuria 55% osuudella. (Emitt Solutions, [Viitattu 8.3.2010].)

Myös valmistajat ovat pitäneet 8051-pohjaiset tuotesarjat pitkään saatavilla, samalla tarjoamalla päivityksiä ja tukea omille työkaluilleen. Osaamista 8051-ohjelmointiin on myös monilla ihmisillä, niin uusilla kuin vanhoillakin tekijöillä.

## 5.2 Intel 8051:n käyttöönotto

Intel 8051:n käyttöönotto ei ole vaikeaa kokeneelle ohjelmistosuunnittelijalle, joka on aikaisemmin työskennellyt vastaavien laitteiden kanssa. Kaikissa mikrokontrollereissa on kuitenkin omat piirteensä, jotka täytyy oppia tuntemaan. 8051 tapauksessa on tärkeää tuntea 8051:n muistin rakenne ja sen käyttö. Myös kääntäjiin on hyvä tutustua tarkemmin, sillä esille saattaa nousta eroavaisuuksia esimerkiksi tavallisen PC:n kääntäjän kanssa.

Myös debug-toimintoihin on hyvä tutustua ennen käytettävän mikrokontrollerin valintaa. Debug-toiminnallisuus on hyvin monilla valmistajilla omanlaisensa ja toimii yleensä vain yhden valmistajan laitteissa. Suositeltavaa onkin siis varmistaa valmistajan valikoiman sopivuus ja kattavuus omissa sovelluksissa. Huomionarvoista on myös prosessorin sisältämä bittirekisteri, jota ei esimerkiksi AVR-järjestelmissä tai ARM-järjestelmissä ole lainkaan.

## 5.3 Yhteenveto Intel 8051 -pohjaisista mikrokontrollereista

Yhteenvetona voidaan todeta, että Intel 8051 on hyvin kilpailukykyinen mikrokontrolleri vielä nykypäivänäkin. Kilpailijoita 8-bittisillä markkinoilla on monia ja samalla monia kilpailevia arkkitehtuureja. Intel 8051 on löytänyt tiensä vielä nykyäänkin moniin erityyppisiin mikrokontrollereihin, aina pienistä ja vähävirtaisista erikoismalleista suuriin ja hyvin varusteltuihin tehopakkausiiin.

Vertailtaessa Intel 8051 Atmel AVR -arkkitehtuureja keskenään, nousi esiin huomio siitä, että 8-bittiset mikroprosessorit eivät ole muuttuneet kovinkaan paljon vuosikymmenten aikana. Atmel AVR yrittää tarjota ehkä hiukan helpomman ja selkeämmän lähestymistavan ohjelmoinnissa, mutta loppujen lopuksi puhutaan enemmän makuasioista. Valintaan vaikuttavia tekijöitä on lisäksi sähköisten ominaisuuksien puolella. Suorituskyvyn ja muistin määrän suhteen erot ovat kuitenkin pieniä. Valmistajat ovat onnistuneet parantamaan 8051 toimintaa niin, että siitä on saatu sekä tehokas että vähävirtainen.

## LÄHTEET

- 80C51 family architecture. 1995. [Datalehti]. Philips Semiconductors (NXP).
- 80C51 family hardware description. 1997. [Datalehti]. Philips Semiconductors (NXP).
- 80C51 family programmer's guide and instruction set. 1997. [Käyttöohje]. Philips Semiconductors (NXP).
- Abd-El-Barr, M. El-Rewini, H. 2005. Fundamentals of Computer Organization and Architecture. New Jersey: John Wiley & Sons, Incorporated.
- Atmel Confirmed as Fastest Growing Among top ten 8-bit Microcontroller suppliers. 2009. [Lehdistöiedote]. Atmel corporation.
- ATMega8515 datasheet. 2002. [Datalehti]. Atmel Corporation.
- AVR/AVR32 Quick Reference Guide. 2009. [Esite]. Atmel Corporation.
- AVR Instruction set. [Viitattu 9.3.2010]. [Datalehti]. Atmel Corporation.
- Ball, P.E. Stuart R. 2002. Embedded Microprocessor Systems: Real World Design. 3. painos. Amsterdam: Newnes.
- Beach, M. The C51 primer. 2006. [Verkkojulkaisu]. Phaedrus Systems. [Viitattu 25.2.2010]. Saatavana: [http://www.phaedsys.demon.co.uk/chris/papers/QuEST4\\_1.pdf](http://www.phaedsys.demon.co.uk/chris/papers/QuEST4_1.pdf)
- Boys, R. 2008. What is the 8051 doing in the year 2008? [Verkkojulkaisu]. ARM Ltd. [Viitattu 25.2.2010]. Saatavana: [http://www.keil.com/download/files/8051\\_market\\_in\\_2008.pdf](http://www.keil.com/download/files/8051_market_in_2008.pdf)
- Gadre, D. 2000. Programming and customizing the AVR microcontroller. New York: McGraw-Hill.
- Ganssle, J. 2006. Intel bows out. [Verkkoartikkeli]. [Viitattu 24.01.2010]. Saatavana: <http://www.embedded.com/columns/embeddedpulse/188500905>
- Microcontroller market and technology analysis report 2008. [Tutkimus]. [Viitattu 8.3.2010]. Emitt Solutions.

- Flowcode marketing datasheet. [Esite]. Matrix Systems. [Viitattu 9.3.2010] Saatavana: <http://www.matrixmultimedia.com/datasheets/TEFLC-60-4.pdf>
- Kenneth, J. A. 2004. The 8051 microcontroller. 1. painos. Yhdysvallat: Kentucky: Cengage Learning.
- McFarland, G. 2006. Microprocessor Design. New York: McGraw-Hill Professional Publishing.
- MCS-51 8-bit control-oriented microcomputers. 1988. [Datalehti]. Intel Corporation.
- MCS-51 Microcontroller family user's manual. 1994. [Käyttöohje]. Intel Corporation.
- Phung, L. 2008. Getting started with C programming for the Atmel AVR microcontroller. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 8.3.2010]. Saatavana: <http://www.elec.uow.edu.au/avr>
- Product brief: nRF24LE1. [Esite]. [Viitattu 8.3.2010]. Nordic Semiconductor.
- Vahtera, P. 2003. Mikro-ohjaimen ohjelmointi C-kielellä. 1. painos. Porvoo: WS Bookwell Oy (WSOY).
- Waclawek, J. The unofficial history of 8051. [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 24.01.2010]. Saatavana: <http://www.efton.sk/t0t1/history8051.pdf>
- Wendell, S. Moving to the ARM® Cortex™-M3 from 8-bit applications. [Verkkójulkaisu]. Luminary micro. [Viitattu 8.3.2010]. Saatava: <http://www.newark.com/pdfs/techarticles/luminaryMicro/MTCM-3.pdf>
- Wikström, K. 2009. Yksi on ylitse muiden: ARM on 32-bittisten ykkösten. Prosessori 31(9), 26 - 29.

