



Mooren laki ja mikroprosessorien kehitys

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

Sähkötekniikan kandidaatintyö

2022

Akseli Kasteenpohja

Tarkastaja: DI Mikko Nykyri

TIIVISTELMÄ

Lappeenrannan–Lahden teknillinen yliopisto LUT

LUT Energiajärjestelmät

Sähkötekniikka

Akseli Kasteenpohja

Mooren laki ja mikroprosessorien kehitys

Sähkötekniikan kandidaatintyö

20 sivua, 2 kuvaa ja 1 taulukko

Tarkastaja: DI Mikko Nykyri

Avainsanat: Mooren laki, mikroprosessori, suoritin, mikropiiri, transistori

Tutkimuksessa selvitettiin Mooren lain historiaa sen toimivuutta ja tulevaisuutta. Lisäksi tarkasteltiin aiheeseen hyvin liittyen mikroprosessorien eli suorittimien kehitystä eri vuosikymmeninä ja niiden tulevaisuutta, vertaillen vanhempaa x86 arkkitehtuuria uudempaan mahdolliseen ratkaisuun. Lähtökohtana löytyy paljon kattavaa englanninkielistä aineistoa Intelin perustamisesta alkaen aina nykypäivään asti. Tavoitteena työssä on kartoittaa Mooren lakia ja sen yhteydessä muita muodostuneita vastaavia ennustuksia sekä havainnollistaa mikroprosessorien kehityksen monimuotoisuutta.

Keskeisimpänä aineistona Mooren lain yhteydessä hyödynnettiin Gordon Mooren vuonna 1965 julkaisemaa artikkelia transistorien määrästä mikroprosessorilla. Mooren teorian mukaan näiden transistorien määrä kaksinkertaistuu joka vuosi. Havainnot osoittavat tämän pitäneen hyvin toden alun 10 vuoden ajan, myöhemmin tarkennettu arvio myös osoitti paikkansapitävyyden.

Mikroprosessorien kehitys havaittiin olleen nopeaa ja monipuolista. Suorituskyky nousi tasaista tahtia, lähes miten Mooren kollega David House arvioi. Samalla piirien energiatehokkuus parani, kellotaajuudet nousivat ja moniydintekniikasta haettiin lisää laskentatehoa.

Isoimpana johtopäätöksenä saatiin Mooren lain toteutunut tarkkuus ja sen tuomat muut tulkinnat suorittimien kehittymisestä eri tavoin. Nykyään yksi suoritin voi hoitaa kaikki yleistehtävät.

ABSTRACT

Lappeenranta–Lahti University of Technology LUT

School of Energy Systems

Electrical Engineering

Akseli Kasteenpohja

Moore's law and the evolution of microprocessors

Bachelor's thesis

2022

20 pages, 2 figures and 1 table

Examiner: M.Sc. Mikko Nykyri

Keywords: Moore's law, microprocessor, processor, microcircuit, transistor

The study looked at the history of Moore's Law, how it works and what the future holds. It also looked at the development of microprocessors, or CPUs, over the decades and their future, comparing the older x86 architecture with a newer solution. The aim of the work is to identify Moore's law and other similar predictions that have emerged in this context, and to illustrate the diversity of microprocessor developments.

The main data used for Moore's Law is a paper published by Gordon Moore in 1965 on the number of transistors in a microprocessor. According to Moore's theory, the number of these transistors doubles every year. Observations show this to have been true for an initial 10 years, with a later revised estimate also showing this to be true.

The development of microprocessors was found to be rapid and diverse. Performance increased at a steady pace, at what David House estimated. At the same time, the energy efficiency of the circuits improved, the clock speeds increased, and multi-core technology was used to gain more computing power.

LYHENNELUETTELO

CISC	Complex Instruction Set Computer
RISC	Reduced Instruction Set Computer
ARM	Advanced RISC Machines
SOC	System on a chip
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers

Sisällysluettelo

Tiivistelmä

Abstract

Lyhenneluettelo

1	Johdanto.....	6
2	Mooren laki	7
2.1	Alkuperäinen laki	7
2.2	Päivitetty määritelmä	8
2.3	Dennard-Skaalaus	8
2.4	Mooren toinen laki ja Housen laki	9
2.5	Mooren lain tarkkuus ja toteutuminen	10
3	Mikroprosessorien kehitys.....	11
3.1	70–90 luvut.....	11
3.2	90-Nyky aika.....	11
3.3	Mikropiirien sukupolvet.....	12
3.4	Tulevaisuus	13
3.4.1	ARM ja RISC	14
3.4.2	RISC-V	15
4	Johtopäätökset ja yhteenveto	16
	Lähteet	18

1 Johdanto

Viimeisten vuosikymmenten aikana puolijohhteiden merkitys on noussut ja niiden kehitykseen on sijoitettu aina vain isompia summia. Monesti puhuttaessa mikroprosessorien kehityksestä termi Mooren laki tulee esille. Kyseessä ei ole oikea fysiikan laki, vain puhekielessä ja keskusteluissa yleistynyt termi.

Gordon Moore työskenteli Fairchild Semiconductorilla, kun hän julkaisi oman artikkelinsa *Electronics* – lehteen vuonna 1965. Tässä artikkelissa Moore antoi karkean arvion komponenttien määrän kaksinkertaistuvan mikropiirillä ainakin seuraavan 10 vuoden ajan. Alkuperäistä arviota Moore muutti myöhemmin 1975, jolloin myös lain nimi vakiintui hänen ystävänsä Carver Meadin toimesta ”Moore’s law” muotoon (Intel 2005).

Tässä kandidaatintyössä tarkastellaan, kuinka Mooren laki on toteutunut vuosikymmenten aikana. Työn tavoitteena on etsiä kuvioita mikroprosessorien kehityksessä ja millä tavoin kehitys on siirtynyt eteenpäin fysiikan lakeja noudattaen. Työn keskeiset tutkimuskysymykset ovat, miten mikroprosessorit ovat kehittyneet ja kuinka suoritusteho on kasvanut. Tutkimusmenetelmänä käytetään kirjallisuuskatsausta, jossa päälähteinä Mooren lain tulkinat ja analyysit. Lisäksi tarkastellaan myös eri valmistajien keskeisiä teknologisia saavutuksia.

Teoriaosassa selvitetään Mooren lain kehittymistä ja sen kanssa tai avulla tehtyjen muiden tulkintojen tarkkuutta sekä taustoja. Tämän jälkeen tarkastellaan mikroprosessorien kehitystä eri vuosikymmeninä tarkemmin ja minkälaisia teknisiä huippukohtia on tapahtunut. Lopussa keskitytään lain tulevaisuuden näkymiin, uusiin haasteisiin sekä miten muut täysin erilaiset arkkitehtuurit ovat edistyneet ja niiden tarjoaman ratkaisut.

2 Mooren laki

Mooren laki on vuosien aikana muuttunut kahteen kertaan, ja siitä on muodostunut useampia eri tulkintoja. Tässä pääluvussa tutustutaan Mooren lain alkuperäiseen- ja myöhempisiin versioihin sekä Dennard-skaalaukseen.

2.1 Alkuperäinen laki

Vuonna 1965 tuleva Intelin perustaja Gordon E. Moore julkaisi *Electronics* lehdessä artikkelin nimeltä ”Cramming more components onto integrated circuits”. Tämän artikkelin heti alussa Moore antaa oman arvionsa kymmenvuoden päähän komponenttien määrästä piipiiirillä. Hänen mukaansa komponenttien määrä puolijohdepiirillä tulee kaksinkertaistumaan joka vuosi ainakin seuraavan 10 vuoden ajan. Artikkelissa hän tukee arviotaan valmistuskulujen voimakkaalla laskulla ja otsikon mukaisesti komponenttien ahtamisella pienen tilaan. (Moore 1965.)

Artikkelissa Moore epäoi ennustetta muun muassa suuren määrän komponenttien tuottaman lämmön vuoksi. Tämä ei hänen mielestään ole ongelma, jos nämä lämpöä tuottavat systeemit ovat asetettu pienelle keskitetylle alueelle. Myös tuotannollisia ongelmia hänen oli hankala arvioida, kun isomman luokan laitoksia ei ollut vielä yritetty. Intelin oma ensimmäinen tuotantolaitos avattiin 1968 Kaliforniaan, samoihin tiloihin, joissa alkoi muu yrityksen toiminta. Yhtiön tavoitteena oli tutkia sekä valmistaa itse useita erilaisia elektronikan tuotteita. (Intel 1968).

Lisäksi alkuperäisessä artikkelissa Moore ottaa eri tavoin kantaa esimerkiksi mikropiirien määrästä tietokoneissa ja miten ne voivat levittää tietokoneen sisällä paljon laajemmin (Moore 1965.) Tämä näkyy parhaiten suorittimen lisäksi olevien apusuorittimien kohdalla. Ne ovat monesti joko vanhempia suorittimia tai tiettyyn tehtävään suunniteltuja. Intelin

suunnittelemien emolevyjen kohdalla ne suorittavat ja ohjaavat useita toimintoja, kuten datan siirtoa, muistia sekä lisälaitteita. Tällöin kuorma tippuu pois pääsuorittimelta.

2.2 Päivitetty määritelmä

Vuonna 1975 Gordon Moore päivitti antamaansa arviota IEEE:n julkaisussa ”Progress In Digital Integrated Electronics”. Tässä julkaisussa hän analysoi miten mikropiirien kehitys on edennyt. Viimeisessä kappaleessa Moore käy läpi voiko tämänhetkiset trendit jatkua vakiona eteenpäin. Vastauksena hänen mukaansa kompleksisuus käyrä tulee osumaan rajaan noin vuonna 1980. Tämän takia hän muutti omaa alkuperäistä arviota muotoon, että komponenttien määrä kaksinkertaistuu joka toinen vuosi. (Moore 1975)

Samoihin aikoihin Mooren ystävä (professori) Carver Mead yhdessä Larry Waller:in kanssa keskustellessaan aiheesta saavat idean termille Mooren laki. Myöhemmin termi päätyi printattuun artikkeliin, *Electronics* lehteen, ja se jäi täten käyttöön. Tämä tapahtui paljon ennen lainauksen löytymistä Oxfordin sanakirjasta vuonna 1977. Ei ole olemassa virallista tietoa, missä termiä on ensimmäisen kerran käytetty. Kuitenkin avustamassa on ollut todella vahvasti Mead ja hänen uskonsa elektroniikan tulevaisuuteen. (Courtland 2015)

2.3 Dennard-Skaalaus

Vuonna 1974 julkaistussa artikkelissa *Design of Ion-Implanted MOSFET's with Very Small Physical Dimensions* Robert H. Dennard antaa oman arvionsa prosessoreiden skaalauslaiksi. Hänen teoriansa mukaan transistorin pienentyessä, sen energiatiheys pysyy vakiona. Tämän takia virta sekä jännite skaalautuu alaspäin kanavan pituuden mukana. (Robert Dennard 1974)

Myöhemmin havaittiin, että pienemmät transistorit mahdollistavat entistä korkeammat kellotaajuudet. Eli energiankulutus on kuormakapasitanssin, toimintataajuuden ja syöttöjännitteen funktio (Texas Instruments 1997).

Vuonna 2011 konferenssin yhteydessä julkaistussa artikkelissa todetaan Dennard-skaalauksen säännön loppuneen noin vuonna 2005. Tällöin prosessorivalmistajat siirtyivät käyttämään moniydin tekniikoita, tämä johti suoraan energiankäytön nousemiseen. Täten Robert Dennardin julkaisema ennuste ei enää pidä paikkaansa. (Esmaeilzadeh 2011)

Skaalausteoria antoi hyvän tavan seurata suorittimien kehitystä, kun transistorien koko pieneni huomattavaa vauhtia. Tämä toimi hyvin, kunnes esimerkiksi Intel joutui jumiin oman 14nm valmistustekniikan kanssa ja moniydin prosessorit yleistyivät kovaa vauhtia. 14nm valmistustekniikka oli Intelin myyntinimi valmistusprosessille, jonka kanssa he olivat jumissa noin 2013–2019. Tänä aikana valmistusprosessi ei parantunut huomattavasti heidän suunnitelmien mukaan ja samalla kilpailijat pääsivät eteenpäin.

2.4 Mooren toinen laki ja Housen laki

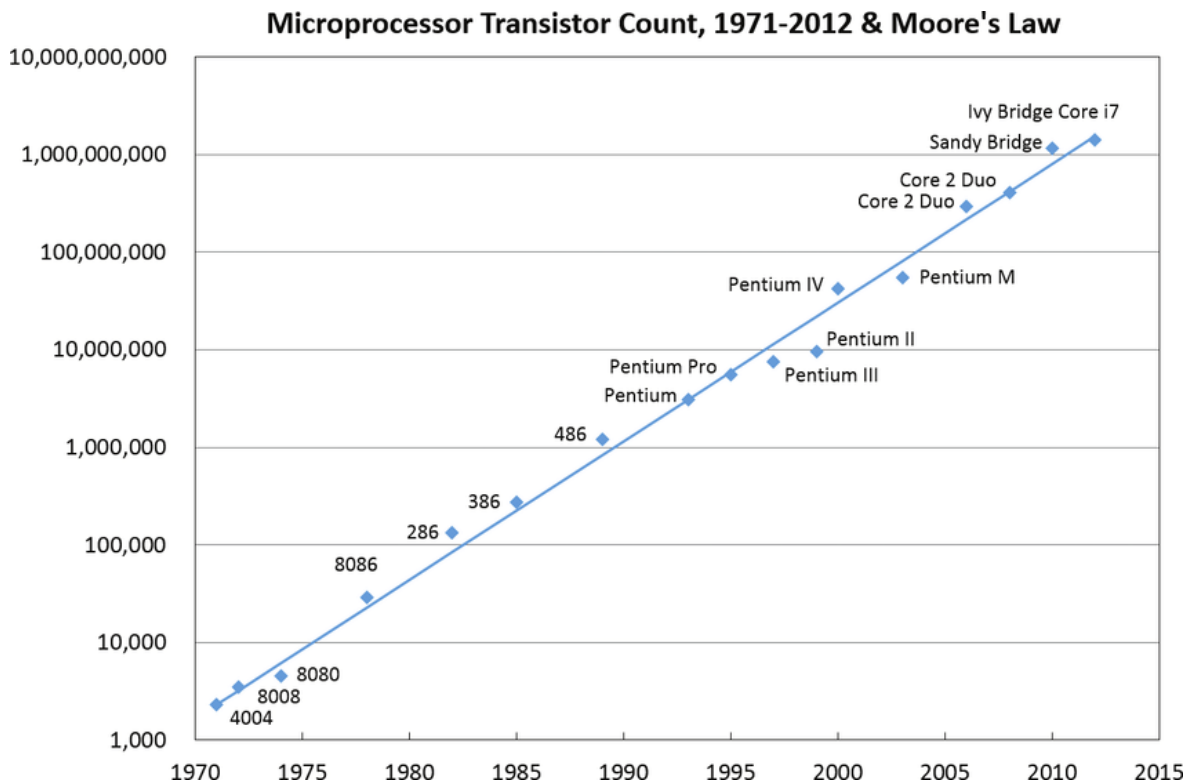
Vuosien varrella Mooren laki on tulkittu ja ymmärretty eri tavoin kontekstin mukaan. Epäselvänä ajanhetkenä alkuperäisen ja sen päivitetyn version rinnalle muodostui uusi tulkinta, Mooren toinen laki. Lain mukaan mikropiirien valmistustehtaan kokonaishinta kaksinkertaistuu joka neljäs vuosi. Tämä kyseinen laki tai tulkinta ei liity mitenkään Mooreen tai hänen sanomaansa. Sen nimi on muodostunut Arthur Rockin tukemana arviolta 80-luvulla ja sitä kutsutaan myös nimellä Rock's law eli Rockin laki. (Charles King 2015)

Suorittimen nopeuden kasvaminen tai yleisesti suorituskyvyn nouseminen yhdistetään helposti Mooren lakiin. Alkuperäisessä julkaisussa vuodelta 1965 Moore mainitsee, että komponenttien pientyminen antaa mahdollisuuden korkeampaan nopeuteen (Moore 1965.) Tätä ei silti voida yhdistää suoraan komponenttien eli transistoreiden määrän skaalautumiseen, sen ollessa eri asia. Intelin sen aikainen johtaja, David House, vuonna 1975 totesi laskentatehon kaksinkertaistuvan joka 18 kuukausi. House osui lähelle omaa arviotaan, noin 20 kuukautta on kaksinkertaistumisaika. Moore korostaa, että tämän arvion antoi House, ei hän itse. (Michael Kanellos 2003). Moni sekaannus asian suhteen liittyy toden-

näköisesti tähän tilanteeseen, sillä Housen arvio tuli vain noin 10 vuotta Mooren julkaisun jälkeen ja samoihin aikoihin päivitetyn Mooren lain kanssa. Housen antamaa arviota on myös nimitetty Housen laiksi, myös uusien väärinymmärrysten välttämiseksi.

2.5 Mooren lain tarkkuus ja toteutuminen

Mooren lain tarkkuutta on aina sen olemassaolon ajan epäilty. 2000-luvun alussa, samoihin aikoihin, kun Dennard-skaalauksen ennusteen todettiin päättyneen.



Kuva 1. Intelin suorittimien transistorien määrä (Chang Yeol Lee 2018)

Kun yleisiä Intelin kuluttajasuorittimien transistorimäärää tarkastellaan, voidaan huomata logaritmisella asteikolla todella selvä trendi. Kuten kuvassa 1 näkyy, transistorimäärät nousevat tasaisesti kaksinkertaistuen joka toinen vuosi. Tämä noudattaa vahvasti Mooren päivitettyä lakia. Vastaavaa voidaan havaita myös esimerkiksi AMD:n (toinen suuri kuluttajasuorittimia valmistava yritys) prosessoreiden yhteydessä, heillä tosin kehitys on ollut todella pyrhäysmäistä. Tämä aiheuttaa vastaavassa kuvaajassa hyppyjä, mutta lopullinen havainto pysyy samana.

3 Mikroprosessorien kehitys

Mikroprosessorit ovat kehittyneet monilla eri tavoin todella nopeaan tahtiin 70-luvusta alkaen. Tässä kappaleessa käydään läpi eri vuosikymmenien isoimmat läpimurrot, niiden sukupolvet ja lopussa tarkemmin eri arkkitehtuureista. x86-arkkitehtuuri on pitkälti Intelin kehittämä suoritinarkkitehtuuri, jota lisensoivat myös muut suoritinvalmistajat.

3.1 70–90 luvut

Intel julkaisi heidän ensimmäisen oman suorittimensa vuonna 1971 nimeltään Intel 4004. Alkujaan suunniteltu käytettäväksi laskimessa, tämä prosessori kolmen muun sirun kanssa korvasi alun perin suunnitellut 12 eri tiettyyn tehtävään tehtyä sirua. Intelin mukaan tämä laitto käyntiin insinööriyön, joka muutti dramaattisesti elektroniikan kehitystä. (Intel 2022)

Vuonna 1978 Intel julkaisi ensimmäisen x86-arkkitehtuuriin perustuvan 8086 suorittimensa (Benj Edwards 2018). Nykyään x86 pohjaisia prosessoreita käytetään todella laajasti erilaisissa tietokoneissa, ainoastaan puhelimissa ja kevyissä kannettavissa arkkitehtuuria ei paljoa nähdä. Tässä käytettiin arkkitehtuurin 16 bittistä versiota, kun Intel siirtyi laajasti tuottamaan 64 bittisiä suorittimia 90-luvun loppupuolella. Itse pohja-arkkitehtuuri ei siis itsessään ei ole muuttunut radikaalisti 1978 jälkeen. (Wolfgang Gruener 2018)

3.2 90-Nyky aika

Näinä aikoina suorituskyvyn kasvua aloitettiin etsimään myös prosessoriytimien määrää kasvattamalla ja samalla myös hieman kellotaajuuksia nostamalla.

Intelin ensimmäinen kaksiytiminen suoritin, Pentium D, julkaistiin vuonna 2005 90nm valmistustekniikaltaan. Siinä oli noin 230 miljoonaa transistoria ja todella korkea kel-

lonopeus 3.2 GHz, tämä johti myös korkeaan energiankulutukseen jopa 130W asti (Wolfgang Gruener 2018). Vertailuna nykypäivänä työpöytäkäytössä suorittimien perustaso on yleisesti kolmesta gigahertsistä ylöspäin, palvelimissa jopa paljon alempana

Pentium D aloitti uuden kilpajuoksun suoritinmarkkinoilla, kun Intel, AMD sekä muut valmistajat kiirehtivät lisäämään laskentaytimiä tuotteisiinsa. Vuonna 2019 julkaistussa Intelin koodinimeltään ”Comet Lake” suoritinperheeseen kuului työpöytäkäyttöön jopa 10 ytimisiä ja 20 säikeisiä prosessoreita. Samaan aikaan AMD:n valikoimasta löytyi myös korkean ydinmäärän suorittimia, hieman eri tavalla toteutettuna.

3.3 Mikropiirien sukupolvet

Mikropiirit voidaan jakaa eri sukupolviin eli generaatioihin. Niitä hyödynnettiin ennen 1980-vuotta aktiivisemmin, myöhemmin hyödyntäminen ja käyttö on kadonnut. Tämä on todennäköisesti koska itse nimillä ja transistorien määrällä ei ole väliä vertailun osalta. Aiemmin näitä sukupolvia on voitu hyödyntää eri tuotteita vertaillessa, jos ne ovat olleet samalta valmistajalta ja samaa sukupolvea. Ongelmaksi muodostuu nopeasti näiden muuttujen tuomat isot erot, jolloin suorassa vertailussa ei ole hyötyä.

Taulukko 1: Mikropiirien sukupolvet ja transistorien määrät. (Kim Ho Yeap ja Humaira Nisar 2018)

Lyhenne	Koko nimi	Vuosi	Transistorien määrä, kpl
SSI	Small-scale integration	1950	Alle 100
MSI	Medium-scale integration	1960	100–1000
LSI	Large-scale integration	1970	1000–10 000
VLSI	Very large-scale integration	1980	10 000–100 000
ULSI	Ultra-large-scale Integration	1990	100 000–10 000 000
SLSI	Super large-scale integration	2000	Yli 10 000 000

Taulukossa on esitetty integroinnin englanninkielinen nimi, tämän lyhenne, vuosi ja transistorien määrä. Huomataan selvä logaritminen skaalautuminen vuosikymmenien kanssa. Jotkin lähteet lopettavat listauksen jo 80 tai 90-luvuille, tähän on vielä lisätty yli 100 000 transistoria sisältävät sukupolvet.

Toisaalta näin jakamalla kaikki mikropiirit pelkästään transistorien määrällä on hieman harhaanjohtavaa. Monet varsinkin vanhat piirit ovat rakennettu vain tiettyä tehtävää varten, tällöin ne eivät sisällä mitään ylimääräistä. Myös eri valmistajien välillä voi olla eroja, kuinka nämä määrät lasketaan. Osa voi ottaa huomioon erilaiset sisäiset ohjaimet tai virranjakoa varten olevat piirit.

3.4 Tulevaisuus

Tulevaisuudessa voidaan odottaa tasaista kehitystä suorittimissa monella osa-alueella. Mooren lakia joko noudattaen tai ei, transistorien määrä tulee aina nousemaan perinteisissä suorittimissa. Tämän yhteydessä myös on helppoa olettaa prosessorin yleisen kellotaajuuden nousevan myös tasaisesti. Myös eri väylien, välimuistien ja näytönohjainten kehitys etenee tasaista tahtia. Prosessoriydinten määrä ei välttämättä nouse, sillä se on suoraan verrannollinen itse mikropiirin kokoon. Pienemmissä laitteissa kuten kannettavissa ja teollisuudessa energiatehokkuus on aina ratkaiseva tekijä, jonka tasapainottaminen voi olla haastavaa.

Uusimmissa Intelin Xeon suorittimissa tulee ensimmäisten joukossa ominaisuus varustaa suoritin vain tietyillä ominaisuuksilla, ellei asiakas niitä erikseen halua tai tilaa. Tämä tarkoittaa, että suoritin on lukittu sen oman laiteohjelmiston tasolla vain ennalta määrättyihin ominaisuuksiin. Hankintaa ennen tai jopa sen jälkeen asiakas voi halutessaan muuttaa näitä ominaisuuksia täysin ohjelmistojen avulla, eikä fyysisiä toimenpiteitä kuten huoltoa tarvita. Tämä antaa asiakkaalle mahdollisuuden ostaa suorittimia, joiden ominaisuuksia voidaan parantaa myöhemmin, jos esimerkiksi käyttötarkoitus muuttuu. (Anton Shilov 2021)

Suurena hankaluutena x86-arkkitehtuurin kanssa on pidetty sen monimutkaisuutta ja epä-sopivuutta mobiilimarkkinoilla. x86 on yleisesti tuomittu liian energiasyöpöksi varsinkin pienemmissä ja yksinkertaisissa laskentatehtävissä. Yhtenä selvästi toimivana ratkaisuna on löytynyt seuraavassa luvussa käsitelty ARM.

3.4.1 ARM ja RISC

RISC tarkoittaa ”Reduced instruction set computer” tarkasti suomennettuna *Pelkistetty ohjesarja tietokone* ja hieman vapaammin *Yksinkertainen käskykanta*. RISC ottaa tavoitteeksi sisällyttää konekielen käskyt mahdollisimman yksinkertaisina ja nopeina. Samalla näitä käskyjä ei sisällytetä suorittimen käyttöön, ellei sitä erikseen haluta. RISC käskykanta panostaa paljon ohjelmistopuolen yhteensopivuuteen ja optimointiin. Tämä on suora vastakohta perinteiseen CISC-käskykantaan, jossa käskyjä on paljon ja ne voivat olla monimutkaisia sekä kehnompia eri tavoin. Tunnetuin CISC pohjainen suoritinarkkitehtuuri on Intelin x86, joka löytyy nykyään lähes kaikista pöytätietokoneista. RISC vaatii enemmän kelloosyklejä suorittaakseen saman käskyn CISC:ssä, mutta voi tehdä sen energiatehokkaammin, mikä tekee niistä ihanteellisia mobiilisovelluksiin. (Magugliani 2021)

ARM eli *Adanced RISC Machines* on vuonna 1990 Iso-Britanniassa perustettu puolijohde ja niiden liittyvien ohjelmistojen kehittäjäryitys. He ovat tunnettuja eniten omista lisensoiduista mikroprosessoriarkkitehtuuristaan, joka on yksi vanhimmista RISC-arkkitehtuureista. He eivät itse valmista suorittimia, vain myyvät niiden suunnitelmia eteenpäin.

ARM:in suoritinarkkitehtuuri on todella isossa kysynnässä ja varsinkin korostuneena 2000-luvun alkupuolelta. Nykyään ARM:in kokonaan tai osittain suunnittelemlia suorittimia löytyy lähes kaikista puhelimista ja tableteista. Osa kannettavista on myös siirtynyt pois x86 monien tekijöiden vuoksi ARM-arkkitehtuurin puolelle. ARM tarjoaa näihin laitteisiin tarkemman suunnitteluprosessin ja yleisesti paremmat edut vanhaan, työpöytäkäyttöön

tehtyyn x86 verrattuna. Hyvänä esimerkkinä on Applen itse suunnittelemat ja ARM arkkitehtuuriin perustuvat ”M1” suorittimet kannettavissa- sekä työpöytätietokoneissa. Applen mukaan heidän uudet suorittimensa ovat laskennassa, grafiikassa ja koneoppimisen laskutehtävissä reilusti nopeampia kuin aiemmat Intelin tuotteet. Samalla myös energiankulutus laskee roimasti ja kannettavien akkukesto kasvaa. (Clover 2022)

ARM tarjoaa moderneihin x86-suorittimiin verrattuna monipuoleisempaa integrointia eri käyttötarkoituksiin ja samalla pienempää energiankulutusta suhteessa laskentatehoon. Heillä on todella hyvä markkinatilanne, mutta sitä on hyödynnettävä mahdollisimman tehokkaasti, jos seuraavassa kappaleessa käsiteltävä RISC-V pääsee vauhtiin.

3.4.2 RISC-V

RISC-V yritys monesti sekoitetaan helposti ARM:iin. He suunnittelevat suorittimia samoilla tavoilla kuten ARM, mutta eroavat yllättävän paljon. RISC-V kuten nimi jo kertoo, suunnittelee suorittimia käyttäen pohjana RISC-suoritinarkkitehtuuria eli samaa kuten myös ARM. Isoimpana erona on suunnittelunsa avoimuus ja hinta, heidän kehittämä arkkitehtuuri on vapaa valmistaa sekä käyttää. Heidän tekniikkaansa ei suoraan koeta suorana kilpailijana muille valmistajille, vaan vahvana vaihtoehtona tietynlaisiin tehtäviin. (Magugliani 2021)

Muutamit yhden piirilevyn tietokonevalmistajat käyttävät jo RISC-V suunnittelemaa suoritinarkkitehtuuria, esimerkiksi ESP8266 ja ESP32 moduuleita valmistava Espressif on siirtynyt jo osittain RISC-V pohjaisiin mikroprosessoreihin osassa tuotteistaan. Kun RISC-V kehittyy ja sen tuki paranee, monet myös isommat suunnittelijat voivat kiinnostua täysin avoimesta alustasta sekä laajoista mahdollisuuksista (Magugliani 2021).

4 Johtopäätökset ja yhteenveto

Työn tarkoituksena oli tutustua Mooren lain historiaan, sen toteutumiseen, tulevaisuuden näkymiin ja yleisesti mikroprosessorien kehitykseen. Käytiin läpi Mooren lain eri versiot ja siitä johdotettuja lakeja ja sen erilaisia tulkintoja. Tämän jälkeen tarkasteltiin mikroprosessorien historiaa eri vuosikymmeninä ja tulevia suurempia muutoksia sekä haasteita.

Tutkimuksessa huomattiin Mooren lain tarkka paikkaansa pitävyys jopa nykyvuosikymmenille asti. Toisaalta Dennard-skaalaus, joka nojaa vahvasti Mooren lakiin, ei toiminut enää noin vuodesta 2005 eteenpäin. Mooren oman lain muuttuminen 10 vuoden jälkeen toi selvästi hämmennystä aiheeseen ja hankaloittaa aiheen tarkastelua. Lisäksi David Housen toteamus vei huomion väärään suuntaan, vaikka Moore itse korosti arvion olevan täysin Housen oma.

Erityistä hyötyä Mooren lain tarkkuudesta ei pystytty löytämään. Sen tärkeys on tippunut monen tekijän myötä. Eniten on vaikuttanut uudet prosessori arkkitehtuurit, joita ei voi vertailla edellisiin, vanhempiin, niiden ollessa täysin vastakohtia tavoitteiltaan. Aiemmin pyrittiin tekemään yksi vahva mikroprosessori, joka kykenee kaikenlaiseen laskemiseen. Nykyään siirrytään entistä enemmän pienempiin, tehtäviin soveltuviin mikroprosessoreihin, joissa on ainoastaan välttämättömät ominaisuudet.

Tutkimusta selvästi rajoitti osan materiaalien julkaisuaika. Internet lähteiden käyttäminen 70-luvun asioihin on todella haastavaa. Parhaiten isot yritykset kuten Intel on arkistoinut vanhat lehtiartikkelit digitaaliseen muotoon, kaikille nähtäviksi. Myös IEEE on tallentanut hyvin omaan toimintaansa liittyvät artikkelit jakoon omalle alustallensa.

Lähteet

Gordon E. Moore. Cramming more components onto integrated circuits, Electronics, vol. 38, no. 8, 1965. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.1.2022]. Saatavissa:

<https://newsroom.intel.com/wp-content/uploads/sites/11/2018/05/moores-law-electronics.pdf>

Erik P. DeBenedictis. It's Time to Redefine Moore's Law Again Computer, vol. 50, issue 2, Feb 2017. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 3.1.2022]. Saatavissa: <https://ieeexplore-ieee.org.ezproxy.cc.lut.fi/document/7842840>

DJ Wardynski. End Of Moore's Law - What's Next For The Future Of Computing, December 19, 2019. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 5.1.2022]. Saatavissa:

<https://www.brainspire.com/blog/end-of-moores-law-whats-next-for-the-future-of-computing>

Ilkka Tuomi. The Lives and Death of Moore's Law, November 4, 2002. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 10.1.2022]. Saatavissa:

<https://journals.uic.edu/ojs/index.php/fm/article/view/1000/921>

Intel, 2005. Excerpts from A Conversation with Gordon Moore: Moore's Law. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.2.2022]. Saatavissa:

https://web.archive.org/web/20121029060050/http://download.intel.com/museum/Moores_Law/Video-Transcripts/Excepts_A_Conversation_with_Gordon_Moore.pdf

Intel, 18.7.1968. Intel's Founding. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.2.2022]. Saatavissa:

<https://www.intel.com/content/www/us/en/history/virtual-vault/articles/intels-founding.html>

Intel, 24.5.2018. Intel at 50: Bunny Suits. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.2.2022]. Saatavissa: <https://newsroom.intel.com/articles/intel-50-bunny-suits/>

Robert Dennard, 1999. Design of Ion-Implanted MOSFET's with Very Small Physical Dimensions. PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 87, NO. 4. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 10.3.2022]. Saatavissa:

https://web.ece.ucsb.edu/courses/ECE225/225_W07Banerjee/reference/Dennard.pdf

Texas Instruments, 1997. CMOS Power Consumption and C_{pd} Calculation. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa:

<https://www.ti.com/lit/an/scaa035b/scaa035b.pdf>

H. Esmaeilzadeh, E. Blem, R. S. Amant, K. Sankaralingam and D. Burger, Dark silicon and the end of multicore scaling, 2011 38th Annual International Symposium on Computer Architecture (ISCA), 2011, s. 365-376. . [Verkkoaineisto]. [Viitattu 15.3.2022]. Saatavissa:

<https://ieeexplore.ieee.org/document/6307773>

Gordon E. Moore. 1975. Progress in digital integrated electronics, s. 11-13. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 20.3.2022]. Saatavissa: <https://ieeexplore.ieee.org/document/4804410>

Rachel Courtland, 28.4.2015. The Murky Origins of “Moore's Law”. [Verkkoaineisto].

[Viitattu 22.3.2022]. Saatavissa: <https://spectrum.ieee.org/the-murky-origins-of-moores-law>

Charles King, 21.4.2015. Moore’s Law is golden. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 22.3.2022].

Saatavissa: <https://www.computerworld.com/article/2912683/moore-s-law-is-golden.html>

Intel, 2022. The story of Intel 4004. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 25.3.2022]. Saatavissa:

<https://www.intel.com/content/www/us/en/history/museum-story-of-intel-4004.html>

Benj Edwards, 8.6.2018. Birth of a standard: The Intel 8086 microprocessor turns 40 today. [Verkkoaineisto]. [Viitattu 25.3.2022]. Saatavissa:

<https://www.pcworld.com/article/535966/article-7512.html>

Wolfgang Gruener ja Christopher Miconi, 24.5.2018. Intel Processors Over the Years.

[Verkkoaineisto]. [Viitattu 01.04.2022]. Saatavissa:

<https://www.businessnewsdaily.com/10817-slideshow-intel-processors-over-the-years.html>

Chang Yeol Lee, 2018. Transistor Degradations in Very Large-Scale-Integrated CMOS Technologies [Verkkoaineisto]. [Viitattu 1.4.2022]. Saatavissa:

https://www.researchgate.net/publication/323459912_Transistor_Degradations_in_Very_Large-Scale-Integrated_CMOS_Technologies

Anton Shilov, 29.9.2021. Intel Preps Software Defined Xeon CPUs: Buy Now, Add Features Later [Verkkoaineisto]. [Viitattu 4.4.2022]. Saatavissa:

<https://www.tomshardware.com/news/intel-preps-software-defined-xeon-cpus>

Fabrizio Magugliani, 16.9.2021. The debate is getting hotter and hotter: ARM or RISC-V?
ARM and RISC-V? Are ARM and RISC-V competitors or synergic? [Verkkoaineisto].
[Viitattu 13.4.2022]. Saatavissa:

<https://www.e4company.com/en/2021/09/the-debate-is-getting-hotter-and-hotter-arm-or-risc-v-arm-and-risc-v-are-arm-and-risc-v-competitors-or-synergic/>

Juli Clover, 9.5.2022. Apple M1 Chip: Everything You Need to Know. [Verkkoaineisto].
[Viitattu 20.5.2022]. Saatavissa:

<https://www.macrumors.com/guide/m1/>