

1918  
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY


Arvutitehnika instituut  
ati.ttu.ee

**IAF0042**

**Arvutid II  
(Sardsüsteemid -  
Embedded Systems)**

**I Loeng**


Gert Jervan  
Arvutitehnika instituut  
ati.ttu.ee/~gerje



Graphics © Alexander Noh, Gesina Minwieski, 2003

**Üldine informatsioon**

✓ Sisu:  
Sardsüsteemid  
*Embedded Systems*  
või  
*Cyber-physical Systems*  
www.pld.ttu.ee/IAF0042



✓ Loengud ja eksamineerija:  
Gert Jervan  
IT-229 620 2261  
gert.jervan@ati.ttu.ee  
ati.ttu.ee/~gerje

1918  
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

© Gert Jervan

2

**Üldine informatsioon**

✓ Loenguid annavad veel ka:

- Prof. Peeter Ellervee, TTÜ/ATI, IT-226
- Arvo Toomsalu, TTÜ/ATI, IT-301
- Erkki Moorits, Cybernetica AS

✓ Neljapäeviti 10:00 – 11:30

1918  
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

© Gert Jervan

3

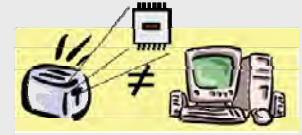
1918  
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Arvutitehnika instituut  
ati.ttu.ee

**Sissejuhatus – Mis on sardsüsteemid?**

**Arvutitehniline vaade**

✓ Arvuti, mis ei paista väljastpoolt välja nagu arvuti  
✓ Suhtleb välise maailmaga  
✓ Primitiivne kasutajaliides või puudub see täiesti  
✓ Osa suuremast süsteemist



1918  
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

© Gert Jervan

5

**Elektroniline vaade**

✓ Toode, mis sisaldab programmeeritavat protsessorit  
✓ Tarkvara on toote loomise lahutamatu koostisosa



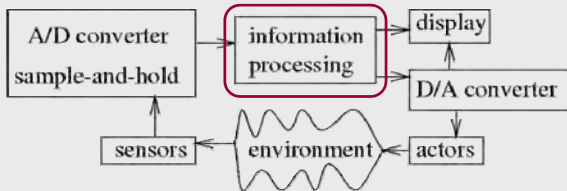
1918  
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

© Gert Jervan

6

## Sardsüsteem

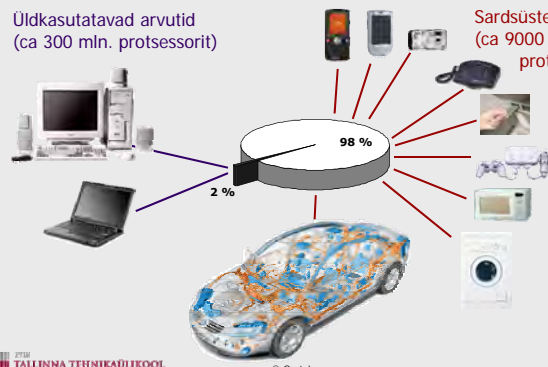
- ✓ Arvutit kasutatakse taolistes süsteemides ennekõike süsteemi lihtsustamiseks ning pakkumaks paindlikust.
- ✓ Seadme kasutaja ei ole tihti isegi teadlik arvuti olemasolust.



## Sardsüsteemide levik

Üldkasutatavad arvutid  
(ca 300 mln. protsessorit)

Sardsüsteemid  
(ca 9000 mln.  
protsessorit)



## Sardsüsteemid

„Dortmund“ Definition:

**Information processing systems embedded into a larger product**

Main reason for buying is **not** information processing

Berkeley Model [Ed Lee]:

**Embedded software is software integrated with physical processes. The technical problem is managing time and concurrency in computational systems.**

## Sardsüsteemide tähtsus (1)

- ✓ Sardüsteemid osatähtsus (nii meie igapäevases elus kui ka rahalises mõttes) kasvab VÄGA kiiresti:

- 4 miljardit mobiiltelefonide kasutajat aastaks 2011, iga-aastane müük: 1 miljard [Nokia@Norchip 2008]
- 2011 müüakse maailmas rohkem nutitelefone kui PC-sid. [www.itfacts.biz]
- WiFi toetusega seadmete arv kahekordistub iga aastaga [www.itfacts.biz]

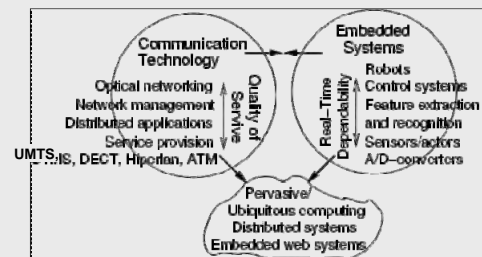


## Sardsüsteemide tähtsus (2)

- Püsiühenduste arv on kasvanud 5 mln. kliendilt (1999) 215 miljoni kliendini (2005) ja 635 kliendini (2010) [www.itfacts.biz]
- USA DVRI (digital video recorders) kasutajaskond kasvab 5% majapidamistest (2004) 41% (2009). [www.itfacts.biz]
- Euroopas on autotööstusega otseselt seotud rohkem kui 4 mln. inimest, kuid kaudselt rohkem kui 8 mln. Kokku annab nimetatud sektor 7% EU GNPst. [OMI bulletin]
- Elektroonika moodustab tänase auto hinnast ca. 25% (võib tõusta kuni 50%-ni) [EE Times 2010].

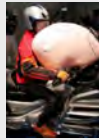
## Sardsüsteemid ja lausandmetöötlus

- ✓ Lausandmetöötlus: Informatsioon, mis on kõikjal ja alati.
- ✓ Sardüsteemid on põhiline tehnoloogia.



## Rakendusvaldkonnad (1)

- Autode elektroonika
- Lennundus
- Rongid
- Telekom



## Rakendusvaldkonnad (2)

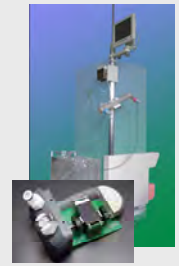
- ✓ Meditsiinisüsteemid.



Nähtamatu elektroonika  
TTÜ tippkeskus CEBE



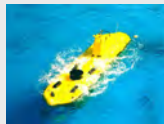
Dialüüs,  
TTÜ/CEBE/PERH



DiaSens,  
LDIAMON AS

## Rakendusvaldkonnad (3)

- Militaarrakendused



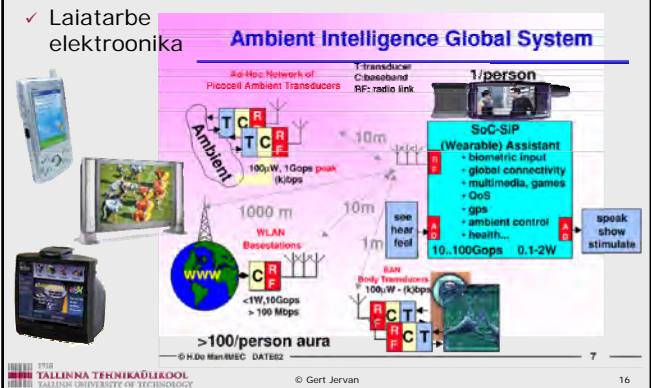
[http://www.submarine.co.mp/wallpaper/submarine\\_640.jpg](http://www.submarine.co.mp/wallpaper/submarine_640.jpg)

- Tuvastamine



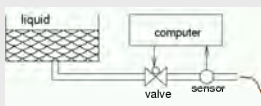
## Rakendusvaldkonnad (4)

- ✓ Laiatarbe elektroonika



## Rakendusvaldkonnad (5)

- Tööstuslik automaatika



- Targad hooned



## Robotika

Robot „Johnnie“ (© H.Ulbrich, F. Pfeiffer, TU München)



1978 TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Arvutitehnika instituut  
ati.ttu.ee

## Näited

Mõningad sardsüsteemide näited igapäevasest elust

## Tark õlleklaas

- Erinevad integreeritud tehnoloogiad:
  - Raadioside
  - Sensorid
  - Magnetiline induktiivsus
  - Arvuti kalibreerimiseks
- Võimatu ilma arvutita
- Mõtetu ilma elektronikata

CPU ja andmete lugeja asetsevad laual. Teatab klaasis oleva õlle taseme, teavitab ettekandjaid kui peaaegu tühi.

© Jakob Engblom  
© Gert Jervan

## Sammulugeja

- ✓ Tavaline arvutustöö:
  - Sammude lugemine
  - Aja arvestamine
  - Keskmiste arvutamine
  - jne.
- ✓ Tõsine arvutustöö:
  - Sammude identifitseerimine
  - Sensor tunnetab seadme liikumist, mitte jalgade tööd

© Jakob Engblom  
© Gert Jervan

## Mobilitelefoniid

- ✓ Multiprotsessor
  - 8-bit/32-bit kasutajaliidesele
  - DSP raadio osale
  - 32-bit IR liidesele
  - 32-bit Bluetoothile
  - 10-200 MHz CPU
- ✓ 8-100 MB mälu (N95 – 8GB)
- ✓ Individualiseeritud kiibid
- ✓ Võimustarve & aku eluiga sõltuvad ennekõike tarkvarast

© Gert Jervan

## Mobilitelefoniid: TI OMAP 5910

<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/omap5910.html>

- ✓ Kahetuimaline HW/SW platvorm mobiiltelefonidele
  - ARM925T 150 MHz
  - TI C55 DSP 150 MHz
  - Võimsustarve: 230 mW
- ✓ Kasutavad Nokia, Sony-Ericssoni jpt.
- ✓ Analooigid:
  - Motorola
  - Infineon

© Gert Jervan  
© Jakob Engblom

## Multipurpose: TI DaVinci (DM3730)

- ✓ 45 nm
- ✓ Android & Linux ready
- ✓ 1 GHz ARM
- ✓ 800 MHz DSP
- ✓ Applications:
  - Navigation
  - Medical imaging
  - Home automation
  - HCI
  - ...

© Gert Jervan

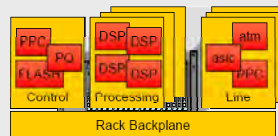
## Mobiilside tugijaamad

- ✓ Massiivne signaalitöötlus
  - Mitmeid tegumeid iga ühenduses oleva mobiiltelefoni kohta
- ✓ Põhinevad DSP-del
  - Standardsed või individualiseeritud
  - Sadu protsessoreid



© Jakob Engblom

## Switchid



© Jakob Engblom

- ✓ Racki põhised
  - 12-20 kaarti, mitmeid riiuleid, 100 CPUsid
  - Juhtimine, IO, DSP
- ✓ Kontroll ja andmed
  - Kontroll: üldisem
  - Andmed: DSP & ASIC
- ✓ Optilised ja vasepõhised ühendused
- ✓ Digitaal- & analoosignaaliid
- ✓ Liiasus (võimus, HW)

## Targad keevitusaparaadid

- ✓ Elektroonika kontrollib pinget ja traadi etteandmist
- ✓ Kohandub operaatoriga
  - andmete lugemine kHz sagedusel
  - 1000-id otsuseid/sekundis
- ✓ Ideaalne keevitus isegi viletsa operaatori korral
- ✓ Lihtsustatud kasutamisega toode, kui olevat seotud arvutitega...



© Jakob Engblom

## Õmblusmasin

- ✓ Kasutajaliides
  - Tikkimismustrid
  - Puuetundlik ekraan
- ✓ "Tark"
  - Avaldab õiget survet
  - Vabastab riide operatsiooni lõppemisel
- ✓ Uusi funktsioone lisatakse läbi tarkvara uuenduste



© Jakob Engblom

## Harvesterid

- ✓ Võrku ühendatud arvutisüsteem
  - Haaratsite ja töövahendite kontroll
  - Navigeerimine metsas
  - Raamatupidamine metsa ülestootmise kohta
  - Oluline efektiivseks tööks
- ✓ Protssessorid
  - 16-bitised protssessorid, ühendatuna CAN võrku
- ✓ Ekstreemsed tingimused



© Jakob Engblom

## C167CS

- ✓ Infineon
- ✓ Spetsiaalselt autotööstusele
- ✓ Protssessor
  - 16-bit C16X tuum
  - 4-osaline lihtne konveier
  - 40 MHz
  - 16 MB mälu
- ✓ 144 väljaviiguga korpus
  - Kannatab -40 ... +125 °C
- ✓ Ca 25 USD

Devices	
CAN 2.0b controllers	2
General-Purpose Timers (GPT)	5
Watch-Dog Timer (WDT)	1
Pulse-Width Modulator (PWM)	1
Analog-Digital Converter Channels	24x8
USART	1
Synchronous Serial Comm. (SSC)	1
Capture/Compare Channels	2x16
External Ports	
CAN interfaces	2
8-bit ports from devices	8
16-bit ports from devices	1
Memory	
ROM	32 kB
Fast General Internal RAM (IRAM)	3 kB
Extension Internal RAM (XRAM)	8 kB

## Operaatori paneel

- ✓ Embedded PC
  - Graafiline ekraan
  - Puutetundlik ekraan
  - Joystick
  - Nupud
  - Klaviatuur
- ✓ Kuid piisavalt keeruline, et "ära eksida"



© Jakob Engblom

## Autod

- ✓ Erinevad funktsioonid
  - ABS: Anti-lock braking systems
  - ESP: Electronic stability control
  - Turvapadjad
  - Automaatkäigukast
  - Immobiliser
  - Surnud nurga hoiatussüsteem
  - ... jne ...
- ✓ Mitmed võrgud
  - Kere, mootor, telemetria, meedia, ohutus
- ✓ Mitmed protsessorid
  - Kuni 100
  - Ühendatud võrku
- ✓ Miljoneid ridu koodi



## Autod

- ✓ Väga erinevad protsessorid:
  - 8-bit – ukسلukud, tuled, jne.
  - 16-bit – enamus funktsioone
  - 32-bit – mootori kontroll, turvapadjad
- ✓ Uued vajadused:
  - Töötlemine seal, kus tegevus toimub
  - Sensorid ja aktuaatorid on hajutatud üle sõiduki

## Ülisuured süsteemid

- ✓ Funktsioonid, mis nõuavad arvuteid:
  - Radar
  - Relvasüsteemid
  - Kahjustuste kontroll
  - Navigatsioon
  - sisuliselt kõik
- ✓ Arvutid:
  - Suured serverid
  - Tuhendeid protsessoreid



## Sinu PC

- ✓ Eriprotsessorid
  - Graafika, häälekaart
- ✓ 32-bit protsessorid
  - IR, Bluetooth
  - Võrk, WLAN
  - Kõvaketas
  - RAID kontrollierid
- ✓ 8-bit protsessorid
  - USB
  - Hiir, klaviatuur



## Aine ülevaade



## Loengud

- ✓ Sissejuhatus
- ✓ Arvutusmudelid
- ✓ Protsessorite arhitektuurid
- ✓ Arvutite klassifikatsioon Flynn'i järgi (SISD, SIMD, MISD, MIMD), mälusüsteemi hierarhia
- ✓ Arvutusprotsesside organiseerimine
- ✓ RTOS ja planeerimine
- ✓ Sardtarkvara
- ✓ Võimsus- ja energiatarbe optimeerimine
- ✓ Töökindlus

## Loengud

- ✓ Sardtarkvara:
  - Alusarhitektuuride valikud, nende erinevused, energisääst
  - (Energiasäästlikud) ühendused
  - Programmeerimiskeelte valik
  - Debugimine
  - Optimeerimine ja koodi korrasolek
  - Operatsioonisuseemid
  - ...

## Laborid

- ✓ Kaks ülesannet:
  - Sardtarkvara loomine ja selle sidumine riistvaraga
- ✓ Laborid on eksamile pääsemise eelduseks
- ✓ Esimene labor: 13. septembril
- ✓ Laborite assistendid:
  - Vadim Pesonen, IT-226
  - Maksim Gorev, IT-226

## Kirjandus

- ✓ Soovituslik lugemine:
  - Embedded System Design, Peter Marwedel, Springer, 2006
    - <http://ls12-www.cs.tu-dortmund.de/~marwedel/es-book/>
  - Wayne Wolf: Computers as Components. Principles of Embedded Computing System Design. Morgan Kaufmann/Elsevier Publishers, 2005.



## Võimalus ise katsetada

- ✓ Lego mindstorms robotics kit
  - Standardne kontrollor
    - 8-bit protsessor
    - 64 kB mälu
  - Mootorite ja sensorite elektrooniline kontroll
- ✓ Hea moodus sardsüsteemide õppimiseks



## Võimalused lõputööks

- ✓ Arvutitehnika instituudis on välja pakkuda palju sardsüsteemidega seotud lõputööde teemasid
- ✓ Sama teemaga tegeletakse palju ka magistrantuuris, doktoriõppes ning ATI teadustöös. Koostöös paljude rahvusvaheliste uurimisgruppidega.
- ✓ Vaata ati.ttu.ee või
- ✓ Võta ühendust aine õppejõududega IT-maja, ruumid 226, 229, 301

1978 TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Arvutitehnika instituut  
ati.ttu.ee

## Sardsüsteemide iseloomustus

© Gert Jervan

## Sardsüsteemide üldiseloomustus (1)

- Peab olema usaldusväärne (**dependable**),
- Töökindlus (Reliability)  $R(t)$**  = tõenäosus, et süsteem töötab korralikult kui ta töötab ajahetkel  $t=0$
- Remonditavus (Maintainability)  $M(d)$**  = tõenäosus, et süsteem töötab taas korralikult  $d$  ajaühikut peale vea esinemist.
- Töövalmidus (Availability  $A(t)$ )**: Tõenäosus, et süsteem töötab ajahetkel  $t$
- Ohutus (Safety)**: Süsteem ei põhjusta kahju.
- Turvalisus (Security)**: Konfidentsiaalne ja usaldatav kommunikatsioon

Isegi ideaalselt loodud süsteemid võivad läbi kukkuda, kui eeldused süsteemi töökoormuse võimalike vigade kohta on valed. Süsteeme ei saa teha usaldusväärseks tagantjärele, vaid sellega tuleb arvestada süsteemi loomise algusest alates.

© Gert Jervan

## Sardsüsteemide üldiseloomustus (2)

- Peavad olema efektiivsed
  - Energiaefektiivsus
  - Koodi efektiivsus (eriti kiipsüsteemide puhul)
  - Töö efektiivsus
  - Dimensiooniline efektiivsus
  - Maksumuse efektiivsus
- Loodud mingi spetsiifilise ülesande jaoks. Teadmine süsteemi käitumisest süsteemi loomise ajal aitab vähendada süsteemi loomisele kuluvaid ressursse ning suurendada stabiilsust
- Spetsiaalne kasutajaliides (mitte aga hiir, klaviatuur ja ekraan)

© Gert Jervan

## Sardsüsteemide üldiseloomustus (3)

- Mitmed sardsüsteemid peavad vastama reaalaja nõudmistele
  - Reaalaja süsteem peab reageerima välistele stiimulitele mingi keskkonna poolt etteantud ajaühiku jooksul
  - Reaalajasüsteemides on õiged vastused, mis hilinevad, valed vastused.
  - „Reaalaja piirangut nimetatakse tugevaks, kui selle mitte saavutamine viib katastroofini“ [Kopetz, 1997].
  - Kõiki ülejäänud reaalaaja piiranguid nimetatakse pehmeteks.

© Gert Jervan

## Reaalaja süsteemid

✓ Kas reaalaaja ja sardsüsteemid on sünonüümid?

- Enamus sardsüsteemid on reaalaajasüsteemid
- Enamus reaalaaja-süsteemid on sardsüsteemid

© Jakob Engblom

© Gert Jervan

## Sardsüsteemide üldiseloomustus (4)

- Tihti ühendatud välismaailmaga läbi sensorite ja täiturite
- Hübriidsüsteemid (analoog + digitaal).
- Tüüpilised sardsüsteemid on reageerivad süsteemid: „Reageeriv süsteem on see, mis pidevalt suhtleb oma keskkonnaga ja töötab keskkonna poolt dikteeritud tempoga“ [Bergé, 1995] Käitumine sõltub sisenditest ja praegusest olekust. ☞ sobivad automaadi mudelid.

© Gert Jervan

## Erinevad väljakutsed

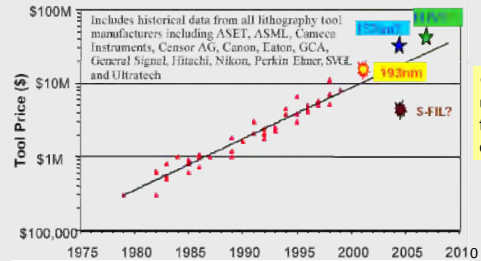
### ✓ Usaldusväärsus?

- Tavaliste protokollide kasutamine reaajasüsteemides (Berliini tuletõrje ja Y2K)
- Mudelite liigne lihtsustamine (TCAS)
- Mitte-ohutuskriitiliste rakenduste kasutamine ohutuskriitilistes süsteemides (Los Angelese piirkonna lennujuhtimissüsteem; ~ 800 lennukit ilma lennujuhita > 3 tunni)



## Riistvara väljakutsed

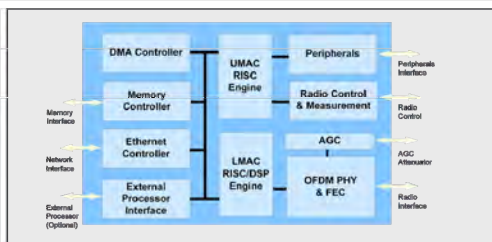
- ✓ Paindlikkuse puudumine (muutuvad standardid)
- ✓ Maskide ülikõrge maksuvus



☞ Suund on üha suuremale tarkvara osatähtsusele

## Integratsioon

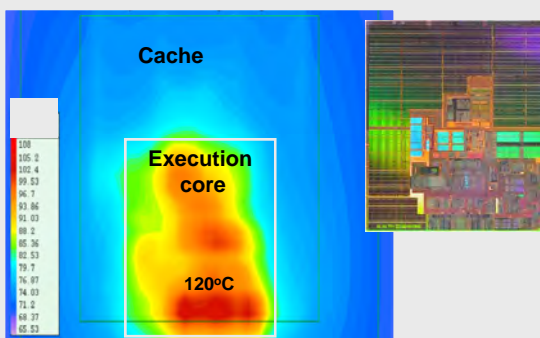
- ✓ Üks kiip: CPU, mälu, perifeeria, ...: System-on-Chip (SoC)



## Kuid...

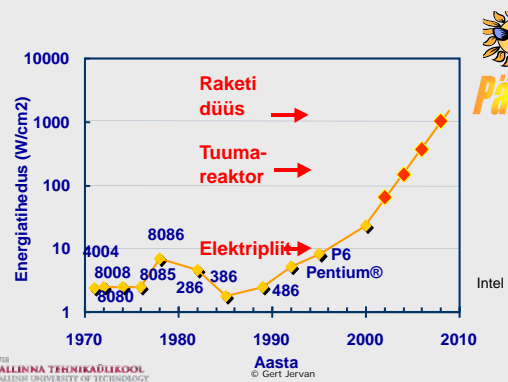


## Termokaart: 1.5 GHz Itanium-2



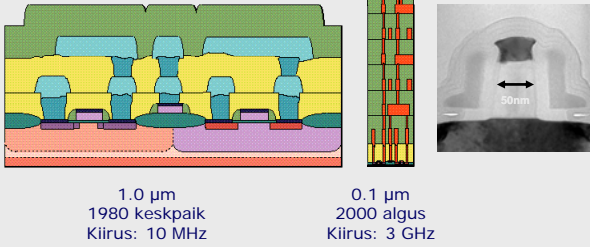
[Source: Intel Corporation and Prof. V. Oklobdzija]

## Energiatihedus



## Mis on tehnoloogia sklaerumine?

Joonistatud samas skaalas

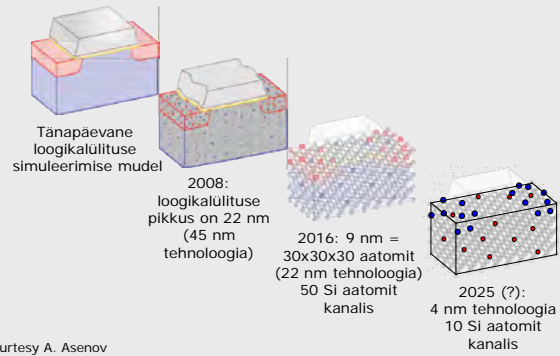


1.0 µm  
1980 keskpaik  
Kiirus: 10 MHz

0.1 µm  
2000 algus  
Kiirus: 3 GHz

Täna: 65 nm, väheneb 22 nm aastaks 2016

## Sklaerumine



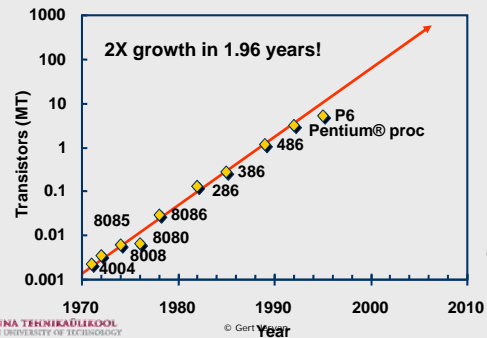
Courtesy A. Asenov

## Tehnoloogia sklaerumise eelised

- ✓ 30% dimensionaalne vähenemine:
  - Loogikalülituse viide väheneb 30% (töösagedus tõuseb 43%)
  - Kahekordistub transistoride tihedus
  - Ühe siirde energia väheneb 65% (50% võimustarbe vähenemine 43% kiiruse tõusu juures)

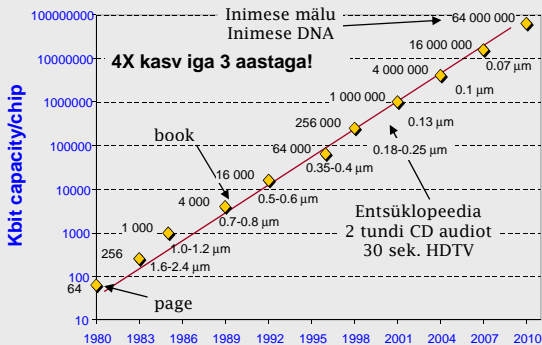
## Moore'i seadus

Transistoride arv juhtivates mikroprotsessorites kahekordistub iga 2 aastaga



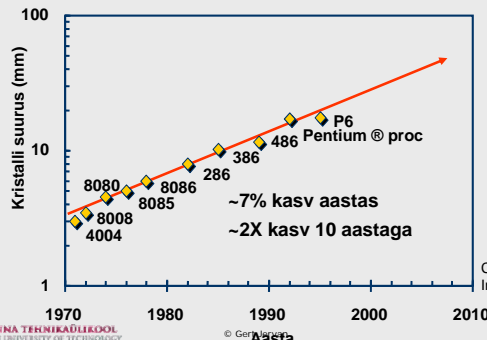
Courtesy, Intel

## DRAM mälu mahtuvuse areng



## Kristallide suuruse kasv

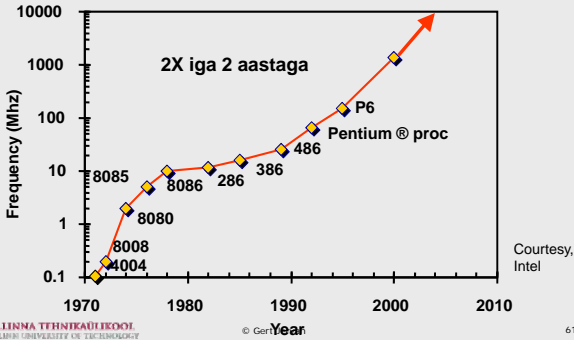
Kristallide suurus peab kasvama 14%, et rahuldada Moore'i seadust



Courtesy, Intel

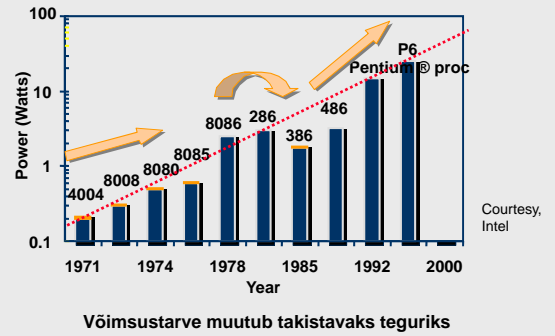
## Taktsagedus

Juhtivate protsessorite taktsagedus kahekordistub 2 aastaga

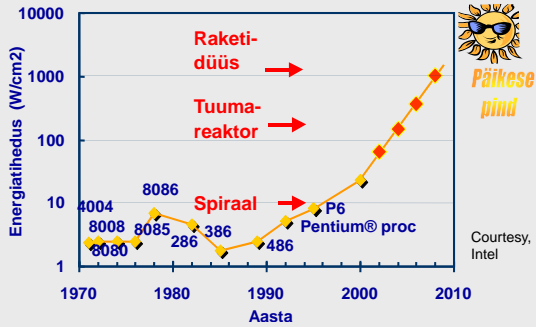


## Võimsustarve

KASVAB!!!

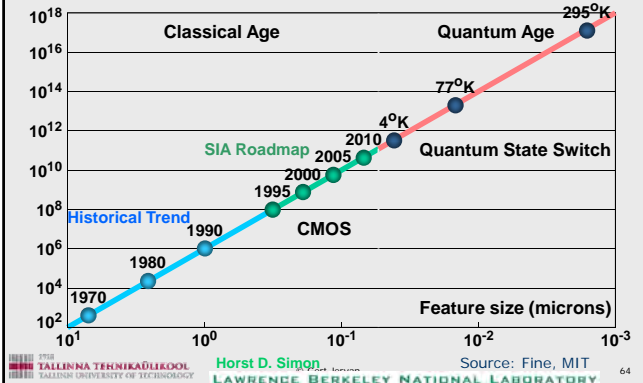


## Energiatihedus



## Roadmap for Electronic Devices

Number of chip components



## Tarkvara

## Sardtarkvara ja sardtprotsessorite tähtsus

"... New York Times hinnangul puutub keskmine ameeriklane ühe päeva jooksul kokku ca 60 mikroprotsessoriga..." [Camposano, 1996]

Viimased BMW, Volvo, MB, VW jt mudelid sisaldavad üle 100 mikroprotsessori

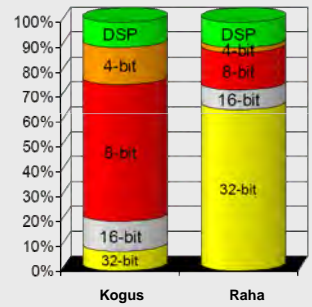


## Sardtarkvara

- ✓ **Tarkvara on väga oluline**
  - Annab tootele olemuse
  - Sama platvormi pealt erinevate toodete loomine
  - Võib muuta väga hilise hetkeni
  - Mitmed tootjad kasutavad sama riistvara
  - Protsessorid on odavamad kui ASICud
  - Riistvara loomine on väga kallis!

## Protsessorid

- ✓ 4, 8, 16, 32, 64-bit...
- ✓ Digital Signal Processors (DSP)
- ✓ 50% pooljuhtide tööstuse tulust on protsessorite tootmises
- ✓ 30% kogu turust on 32 bitised
- ✓ 15% kogu turust on PC CPUd (Intel & AMD)



## Tarkvara väljakutsed

Kui enamus funktsionaalsust realiseeritakse tarkvaras, siis miks me ei rahuldu sellega, mida tarkvara loojad teevad?



## Tarkvara keerukuse kasv

### Lennundus:

- ✓ Boeing 747 → 0.4 M LOC
- ✓ Boeing 777 → 4 M LOC

Technology Review 2002

### Autotööstus:

- ✓ 2010 Premium → 100 M LOC
- ✓ 1995 – 2000 → 52%/Year
- ✓ 2001 – 2010 → 35%/Year

Tony Scott, GM CIO

Mõningates valdkondades koodi suurus kahekordistub 9 kuuga

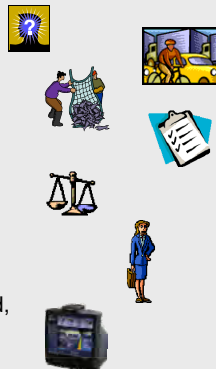
### Laiatarbe elektroonika:

- ✓ ... > 70% keerukate süsteemide (autode elektroonika, kommunikatsioonisüsteemid) arenduskuludest moodustavad kulused tarkvara arendusele



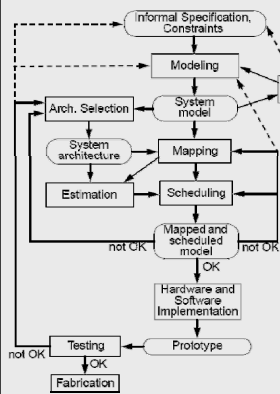
## Sardtarkvara väljakutsed

- Dünaamilised keskkonnad
- Ettenähtud funktsionaalsuse hõivamine!
- Valideeri spetsifikatsioon!
- Efektive implementeerimine
- Kuidas tagada reaalaaja nõudmised?
- Kuidas valideerida reaalaaja sardtarkvara? (suured andmemahud, testimine võib olla ohutus-kriitiline)



## Disainivoog ja selle muutused

## Disainivoog



- ✓ Arhitektuuri valik
- ✓ Ressurssidele sidumine (mapping)
- ✓ Planeerimine (scheduling)
- ✓ Palju simuleerimist ja emuleerimist
- ✓ Design space exploration

an

73

## Maailm on paralleelne...

### ✓ Threads!

- Probleemid:
  - Absoluutselt mittedeterministlikud
  - Täitmisjärjekord tuleb jõuga paika panna (näiteks mutex-itega)
- "... **threads as a concurrency model are a poor match for embedded systems.** ... they work well only ... where best-effort scheduling policies are sufficient."

Ed Lee: Absolutely Positively on Time, IEEE Computer, July, 2005

TÜBI  
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

© Gert Jervan

74

## Von Neuman'i mudel on surnud!

- ✓ **"The lack of timing in the core abstraction is a flaw, from the perspective of embedded software, ..."**

Ed Lee: Absolutely Positively on Time, IEEE Computer, July, 2005

- ✓ **"Timing is everything"**

Frank Vahid, WESE 2008

- ✓ **What is needed is nearly a reinvention of computer science.**

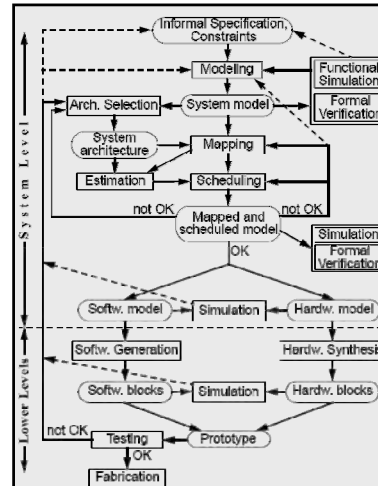
Ed Lee: Absolutely Positively on Time, IEEE Computer, July, 2005

TÜBI  
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

© Gert Jervan

75

## Disainivoog (2)



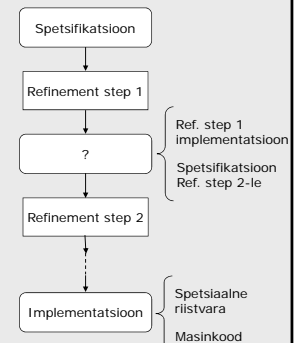
- ✓ Riistvara/tarkvara koosdisain
  - Partitsioneerimine
- ✓ Tarkvara genereerimine
- ✓ Riistvara süntees
- ✓ Integreerimine
- ✓ Prototüüpimine

76

## Spetsifikatsioonid ja implementatsioonid

- ✓ Spetsifikatsioon: Süsteemi käitumuse ja muude omaduste kirjeldus

- Projekteerija saab oma tööks (sisendiks) spetsifikatsiooni ja loob selle põhjal implementatsiooni (toote). Toodet luuakse paljude täiustavate sammude jooksul (refinement steps)



TÜBI  
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

© Gert Jervan

78

## Arvutusmudelid

Spetsifitseerimine

TÜBI  
TALLINNA TEHNIKAÜLIKOOL  
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

Arvutitehnika instituut  
atl.ttu.ee

## Spetsifikatsioon

- ✓ Spetsifikatsioonid võivad olla:
  - Mitteformaalsed (loomulikus keeles)
  - Detailsemad ja ühetähenduslikumad, kasutades spetsifikatsioonikeeli
- ✓ Spetsifikatsioonikeeled peavad:
  - Olema võimelised hästi väljendama peamisi süsteem omadusi ja erinevaid aspekte sisutihedal ja selgel kujul
  - Sobima hästi nõuete täitmise kontrolliks ja implementatsioonide sünteesiks (soovitavalt automaatselt)
- ✓ Alati tuleb valida see keel, mis antud süsteemi jaoks sobiks kõige paremini!

## Spetsifikatsioonikeeled

- ✓ Spetsifikatsioonikeeled võivad olla
  - Graafilised
  - Tekstilised
- ✓ Spetsifikatsioonikeeled võivad olla
  - Tavalised programmeerimiskeeled (C, C++)
  - Riistvara kirjelduskeeled (VHDL, Verilog)
  - Spetsiaalsed keeled, mida kasutatakse erinevates valdkondades süsteemide spetsifitseerimiseks. Tihti põhinevad need mingil arvutusudelil (model of computation)

## Süsteemide spetsifitseerimine

- ✓ Mida me tahame sardsüsteemi spetsifikatsiooniga peale hakata?
  - Valideerida süsteemi kirjeldust, et kontrollida, kas funktsionaalsus vastab soovitud ja et vajadused on kirjeldatud korrektselt. Selleks kasutatakse:
    - Formaalset verifitseerimist
    - Simuleerimist
  - Et sünteesida efektiivseid rakendusi

## Formaalsed mudelid

- ✓ Me sooviksime, et spetsifitseerimiskeeled oleks hästi defineeritud semantikaga → spetsifikatsioonid peaksid olema ühetähenduslikud
  - Semantika on reeglite kogu, mis seob tähenduse (interpretatsiooni) süntaktiliste keelekonstruktsioonidega (sümbolite kombinatsiooniga)
  - Semantika põhineb aluseks oleval arvutusudelil
- Nimetatud mudel määrab ära, milliseid süsteeme saab selle keelega kirjeldada
- Arvutusmudel määrab ära keele väljendusvõime

## Formaalsed mudelid (2)

- ✓ Kas me sooviksime kasutada suure väljendusvõimega keeli (et saaksime kirjeldada mida iganes)?  
**Vahest mitte!**
  - Suur väljendusvõime: imperatiivne mudel (näiteks C või Java piiranguteta kasutamine):
    - Võime kirjeldada "kõike"
    - Puudub võimalus formaalseks analüüsiks (või see on väga keerukas)
  - Piiratud väljendusvõime, mis põhineb hästi valitud arvutusudelil:
    - Spetsifitseerida saab ainult valitud süsteeme
    - Formaalne analüüs on võimalik
    - Efektive (võib-olla isegi automaatse) sünteesi võimalus

## Spetsifitseerimine

- ✓ Sardsüsteemide jaoks on vaja arvutusmudeleid, mis ei põhineks threadidel ja mis ei põhineks von Neumanni arvutusudelil