

Sardsüsteemid (Embedded Systems)

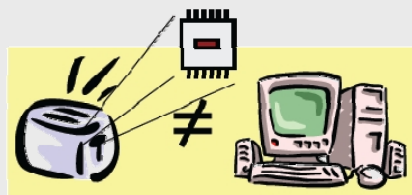
Gert Jervan
Arvutitehnika instituut
www.pld.ttu.ee/~gerje



Graphics © Alexandra Nalla, Gesine Marwedel, 2003

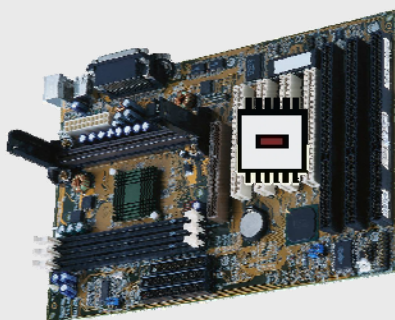
Arvutitehniline perspektiiv

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



Elektronika perspektiiv

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

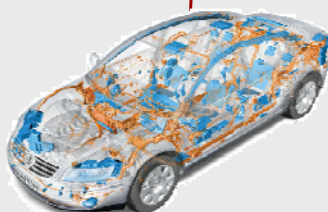


Sardsüsteemide levik

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:



- Gartner Dataquest andmetel müüdi maailmas 2004 II kvartalis 156,4 mln. mobiiltelefoni, 35% kasv võrreldes 2003 II kv. [www.itfacts.biz]
- MP3 mängijate turg on alates 2003. a. arenenud plahvatuslikult, kasvades 12,5 mln. ühikult (2003) 50 mln. ühikuni [www.itfacts.biz]
- Wireless World Forumi andmetel kasvas 3G abonementide arv 45 mln. (2004) 85 mln. (2005). [www.itfacts.biz]

Sardsüsteemide tähtsus (2)

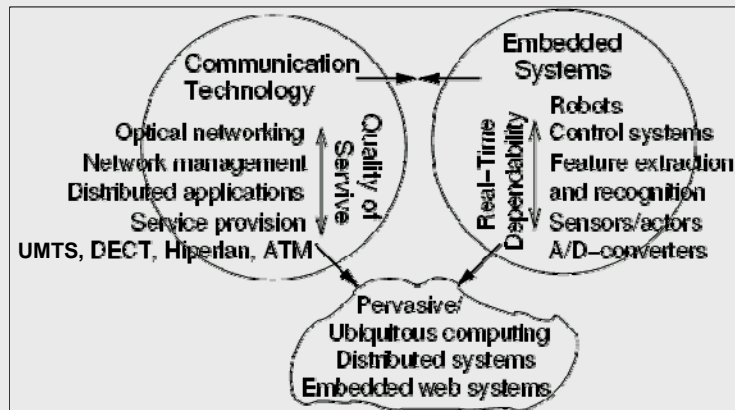
- Püsiühenduste arv on kasvanud 5 mln. kliendilt (1999) 215 miljoni kliendini (2005). Aastaks 2011 ennustatakse 536 mln. klienti [www.itfacts.biz]
- Tänapäevane USA DVRi (digital video recorders) kasutajaskond - 5% majapidamistest – kasvab lähima viie aasta jooksul 41%. [www.itfacts.biz]
- Euroopas on autotööstusega otseselt seotud rohkem kui 4 mln. inimest, kuid kaudselt rohkem kui 8 mln. Kokku annab nimetatud sektor 7% EU GNPst. [OMI bulletin]

Sardsüsteemide tähtsus (3)

- .. kuid sardkiibid moodustavad meie igapäevase elektroonika täis elu selgroo ... neid on sisuliselt kõikjal, kus kasutatakse elektrit. [Mary Ryan, EEDesign, 1995]
- 79% kõikidest suure võimsusega protsessorites on kasutusel sardsüsteemides
- Tulevik on "embedded", "Embedded" on tulevik!

Sardsüsteemid ja lausandmetöötlus

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



Rakendusvaldkonnad (1)

- Autode elektroonika
- Lennundus
- Rongid
- Telekom



Rakendusvaldkonnad (2)

✓ Meditsiinisüsteemid. Näiteks:

■ Kunstlik nägemine: erinevad lähenemised, nagu näiteks:

- Kaamera, mis on kinnitatud prillide külge; arvuti on kinnitatud vöö külge; signaalid saadetakse otse aju, William Dobelle teedrajav töö.



- Häälede tõlkimine; [http://www.seeingwithsound.com/etumble.htm]



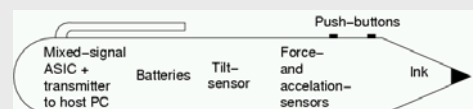
Rakendusvaldkonnad (3)

■ Militaarrakendused



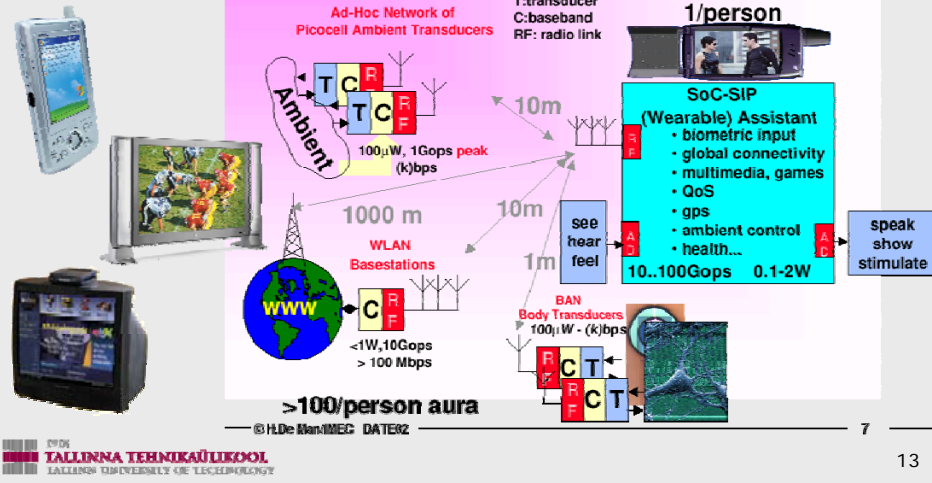
http://www.submarine.co.mp/wallpaper/submarine_640.jpg

■ Tuvastamine



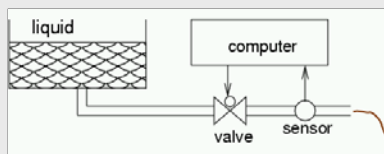
Rakendusvaldkonnad (4)

Laiatarbe
elektroonika



Rakendusvaldkonnad (5)

▪ Tööstuslik automaatika



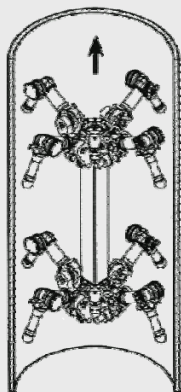
▪ Targad hooned



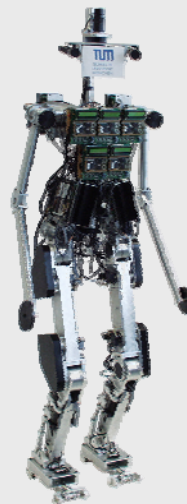
Rakendusvaldkonnad (6)

▪ Robotika

„Toruronija“



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



Näited

Mõningad sardüsteemide näited igapäevasest elust

Tallinna Tehnikaülikool
Arvutitehnika instituut

Tark õlleklaas

Mahtuvuslik sensor vedeliku taseme mõõtmiseks

8-bitine protsessor

Traadita ühendus energia ja lugemite ülekandeks

Induktiivne mähis RFID aktiveerimiseks & energia ülekandeks

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

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

© Jakob Engblom

TALLINNA TEHNIKAÜLKOOL
TALLINN UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

17

Sammulugeja

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



18

Mobiiltelefonid



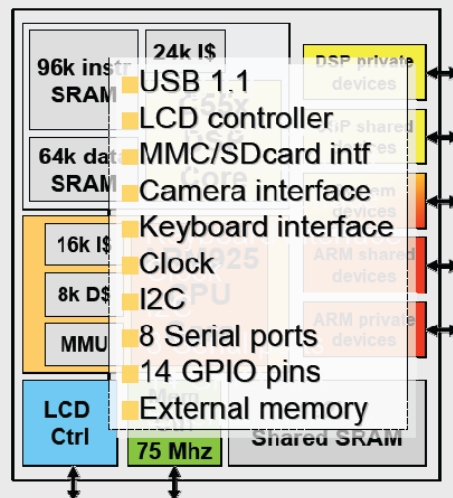
© Jakob Engblom

- ✓ 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

19

Mobiiltelefonid: TI OMAP 5910

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

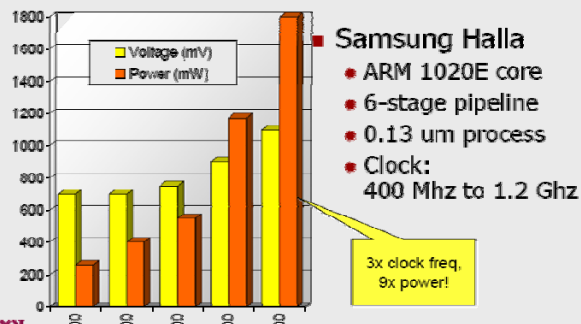
<http://focus.ti.com/docs/prod/folders/print/omap5910.html>


© Jakob Engblom

20

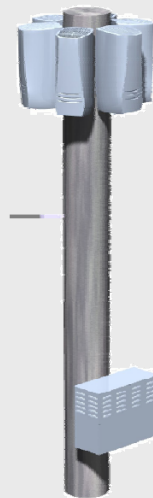
Kiirus ja võimsustarve

- ✓ Taktsagedus ja pinget on omavahel sõltuvuses
 - Kõrgem sagedus nõuab kõrgemat pinget
- ✓ $\frac{1}{2}$ kiirusest = $\frac{1}{4}$ võimsustarvet

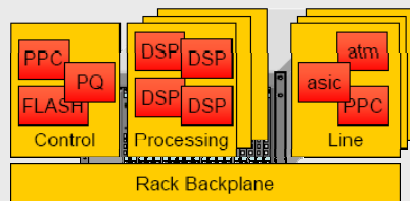


Mobiilside tugijaamad

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



Switchid



© Jakob Engblom

- ✓ Racki põhised
 - 12-20 kaarti, mitmeid riuleid, 100 CPUsid
 - Juhtimine, IO, DSP
- ✓ Kontroll ja andmed
 - Kontroll: üldisem
 - Andmed: DSP & ASIC
- ✓ Optilised ja vasepõhised ühendused
- ✓ Digitaal- & analoogsignaaliid
- ✓ 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, kuigi ei tundu olevat seotud arvutitega...



Õmblusmasin



© Jakob Engblom

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

Harvesterid



© Jakob Engblom

- ✓ Vörku ühendatud arvutisüsteem
 - Haaratsite ja töövahendite kontroll
 - Navigeerimine metsas
 - Raamatupidamine metsa ülestöötamise kohta
 - Oluline efektiivseks tööks
- ✓ Protsessorid
 - 16-bitised protsessorid, ühendatuna CAN võrku
- ✓ Ekstreemsed tingimused

C167CS

- ✓ Infineon
- ✓ Spetsiaalselt autotööstusele
- ✓ Protsessor
 - 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	24+8
USART	1
Synchronous Serial Comms (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

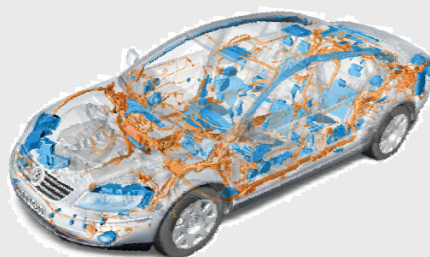


© Jakob Engblom

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

Autod

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

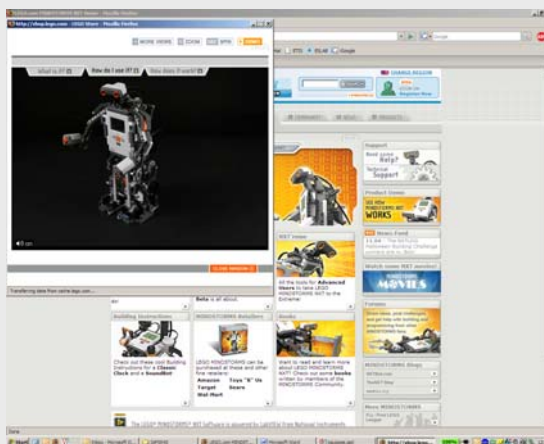


Autod

- ✓ 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

Võimalus ise katsetada




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



Sardsüsteemide iseloomustus









Sardsüsteemide üldiseloostus (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.

Sardsüsteemide üldiseloostus (2)

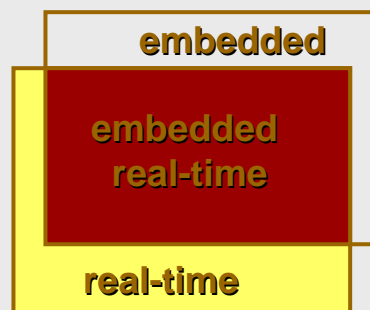
- Peavad olema efektiivsed
 - Energiaefektiivsus 
 - Koodi efektiivsus (eriti kiipsüsteemide puhul) 
 - Töö efektiivsus 
 - Dimensiooniline efektiivsus 
 - Maksumuse efektiivsus 
- Loodud mingi spetsiifilise ülesande jaoks. Teadmine süsteemi käitumisest süsteemi loomise ajal aitab vähendada süsteemi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

Sardsüsteemide üldiseloomustus (3)

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

Reaallaja süsteemid

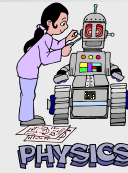
- ✓ Kas reaallaja ja sardsüsteemid on sünonüümid?
 - Enamus sardsüsteeme on reaallajasüsteemid
 - Enamus reaallajasüsteeme on sardsüsteemid



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.



Erinevad väljakutsed

- ✓ Usaldusväärsus?



- Tavaliste protokollide kasutamine reaajasüsteemides (Berliini tuletõrje ja Y2K)



- Mudelite liigne lihtsustamine (TCAS)

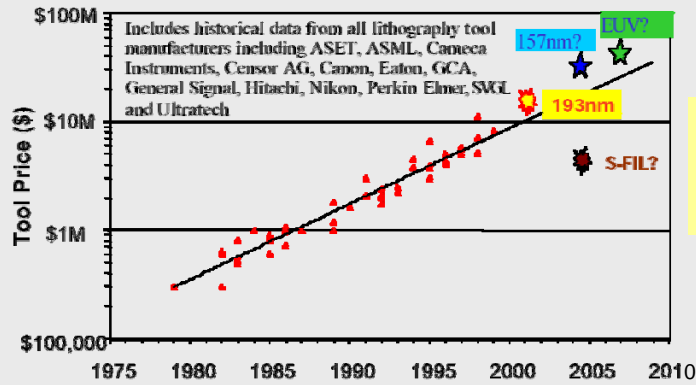


- Mitte-ohutuskriitiliste rakenduste kasutamine ohutuskriitilistes süsteemides (Los Angelese piirkonna lennujuhtimissüsteem; ~ 800 lennukit ilma lennujuhita > 3 tunni)



Riistvara väljakutsed

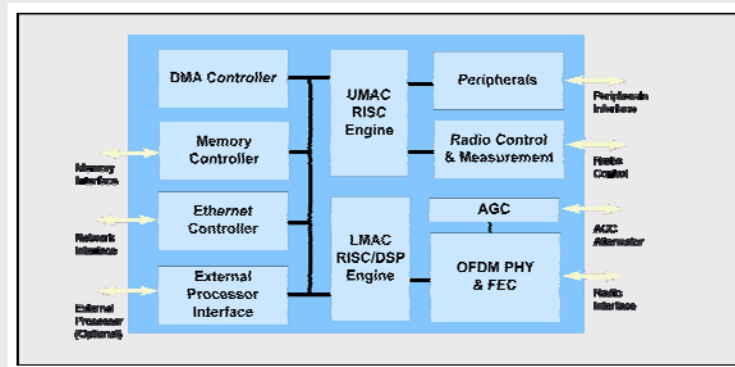
- ✓ Paindlikkuse puudumine (muutuvad standardid)
- ✓ Maskide ülikõrge maksuvus



☞ Suund on üha suuremale tarkvara osatähtsusele

Integratsioon

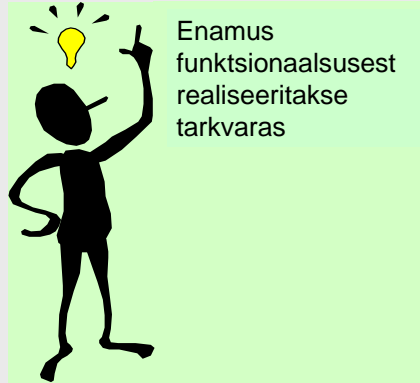
- ✓ Üks kiip: CPU, mälu, perifeeria, ..., : System-on-Chip (SoC)



Sardtarkvara ja sardprotsessorite tähtsus

“... New York Timesi hinnangul puutub keskmine ameeriklane ühe päeva jooksul kokku ca 60 mikroprotsessoriga....”
[Camposano, 1996]

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



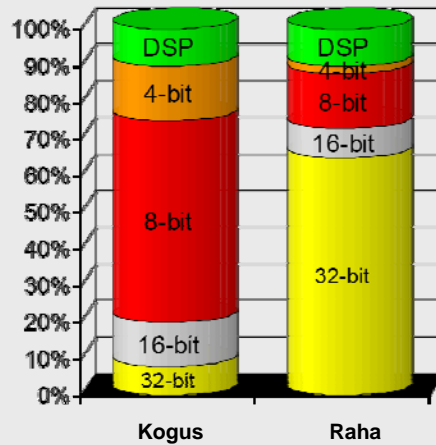
Enamus funktsionaalsusest realiseeritakse tarkvaras

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 keerukus on samuti väljakutse

- Eksponentsiaalne keerukuse kasv
- Mõningates valdkondades koodi suurus kahekordistub 9 kuuga [ST Microelectronics, Medea Workshop, Sügis 2003]
- ... > 70% keerukate süsteemide (autode elektroonika, kommunikatsioonisüsteemid) arenduskuludest moodustavad kulutused tarkvara arendusele [A. Sangiovanni-Vincentelli, 1999]



Rob van Ommering, COPA Tutorial, as cited by: Gerrit Müller: Opportunities and challenges in embedded systems, Eindhoven Embedded Systems Institute, 2004

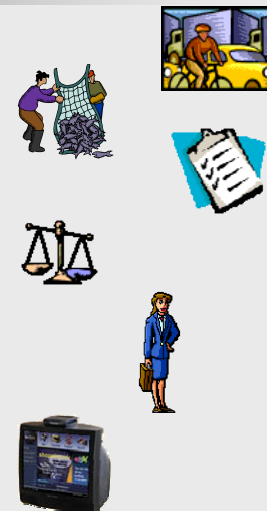


47



Sardtarkvara väljakutsed

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

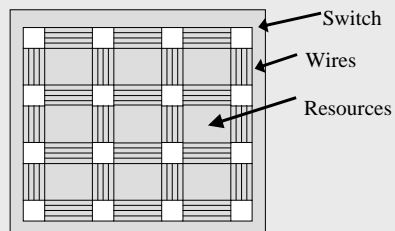


48

Trendid

- ✓ Miniaturiseerumine ja integreerimine
 - Paarist protsessoritest → tuhandete protsessoriteni

- ✓ Üks kiip → üks süsteem
 - Kiibis sees aga sadu protsessoreid
 - System-on-chip (SoC)
 - Network-on-chip (NoC)

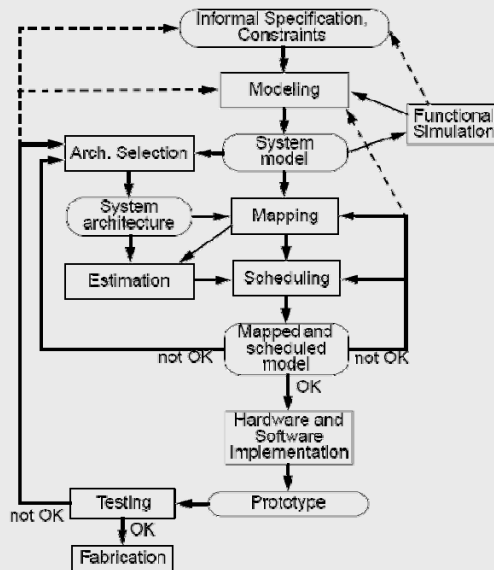


Trendid

- ✓ 32 bitised protsessorid domineerivad üha enam
 - ARM Cortex-M3, TriCore (Infineon)
 - Muutuvad ajapikku soodsamaks
 - Kergem programmeerida, kiirem täitmine, suuremad programmid ja andmehulgad

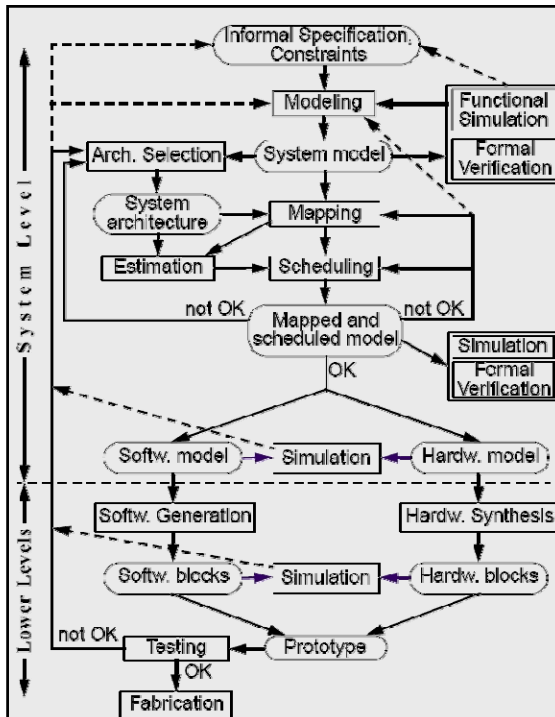
- ✓ Mitu tuuma ja mitu haru (thread)
 - Suurem võimus, väiksem võimsustarve
 - Suured tarkvaraprobleemid – vajadus paralleeltarkvarainseneride järele!

Disainivoog



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

Disainivoog (2)



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

Töövahendid

- ✓ Madalamatel tasemetel on saadaval palju:
 - Koodi generaatorid, kompilaatorid, testide generaatorid ja debuggerid, simulaatorid, emulaatorid, sünteesivahendid
- ✓ Kõrgemal tasemel paljud töövahendid puuduvad ja sinna on koondunud tänapäevase CAD teadustöö teravik
 - Saadaval mitmeid akadeemilisi vahendeid

Kokkuvõte

- Sardüsteemide tähtsuse kasv
- Sardüsteemide definitsioon
- Rakendusvaldkonnad
- Näited
- Iseloomustus
 - Töökindlus
- Väljakutsed
- Disainivoog