

ARHITEKTURA RAČUNALA 2

Nositelji:

Prof.dr.sc. Slobodan Ribarić

Prof.dr.sc. Siniša Šegvić

Doc.dr.sc. Tomislav Hrkać

Asistenti:

Branko Samaržija, dipl.inž

Marijo Maračić, dipl.inž.

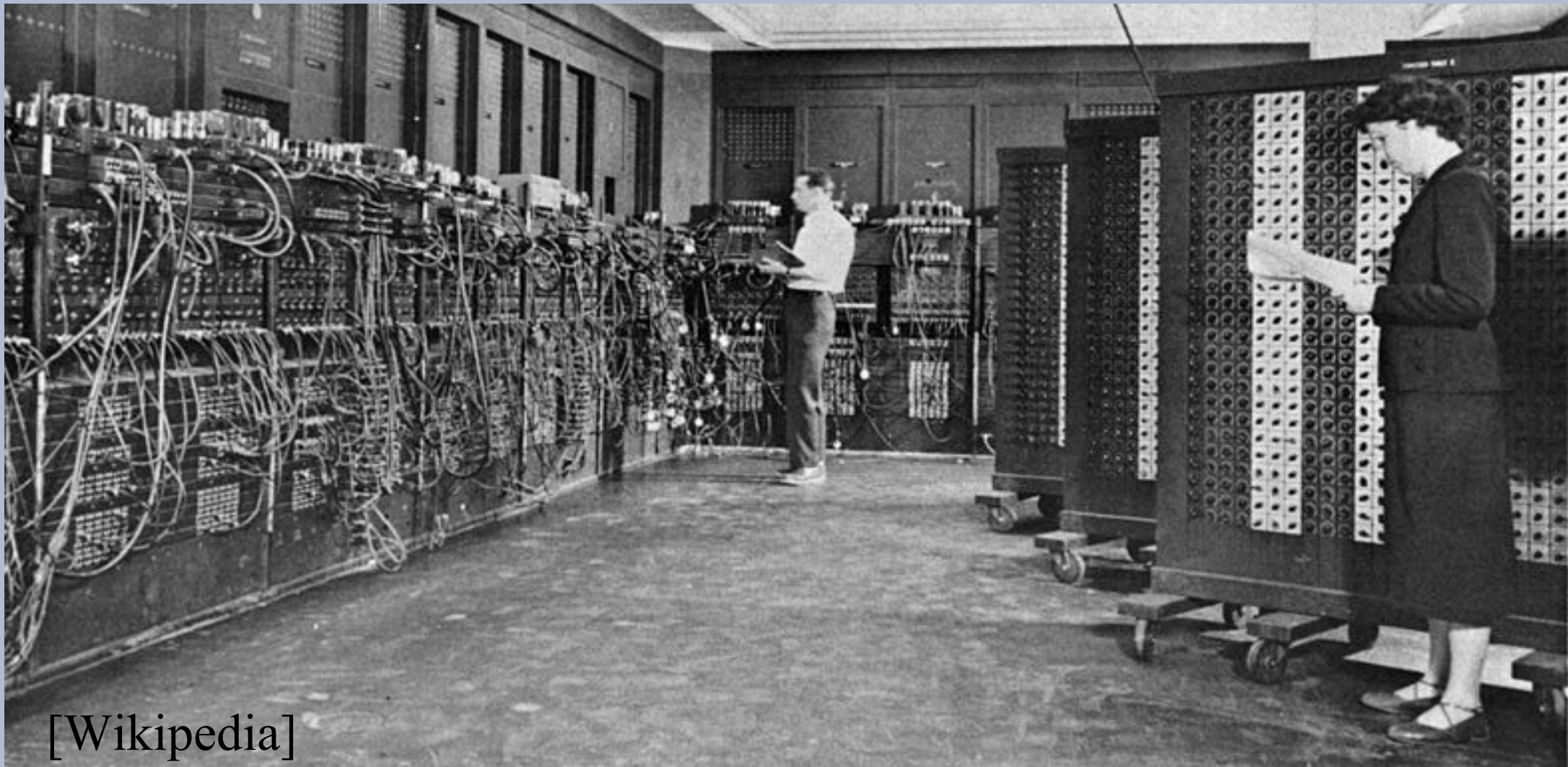
Zavod za elektroniku, mikroelektroniku, računalne
i inteligentne sustave (ZEMRIS), 3. kat D zgrade

Uvodno predavanje

- **Sadržaj:** što ćemo proučavati?
- **Motivacija:** zašto je to korisno znati?
- **Kontekst:** aktualni tehnološki trendovi
- **O predmetu:** način održavanja nastave, razdioba bodova, literatura, teme

Zašto koristimo računala?

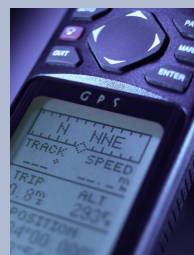
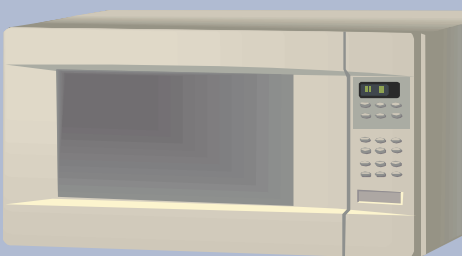
- Računalni sustav nekad (Eniac, 1943-1946, \$5e5)



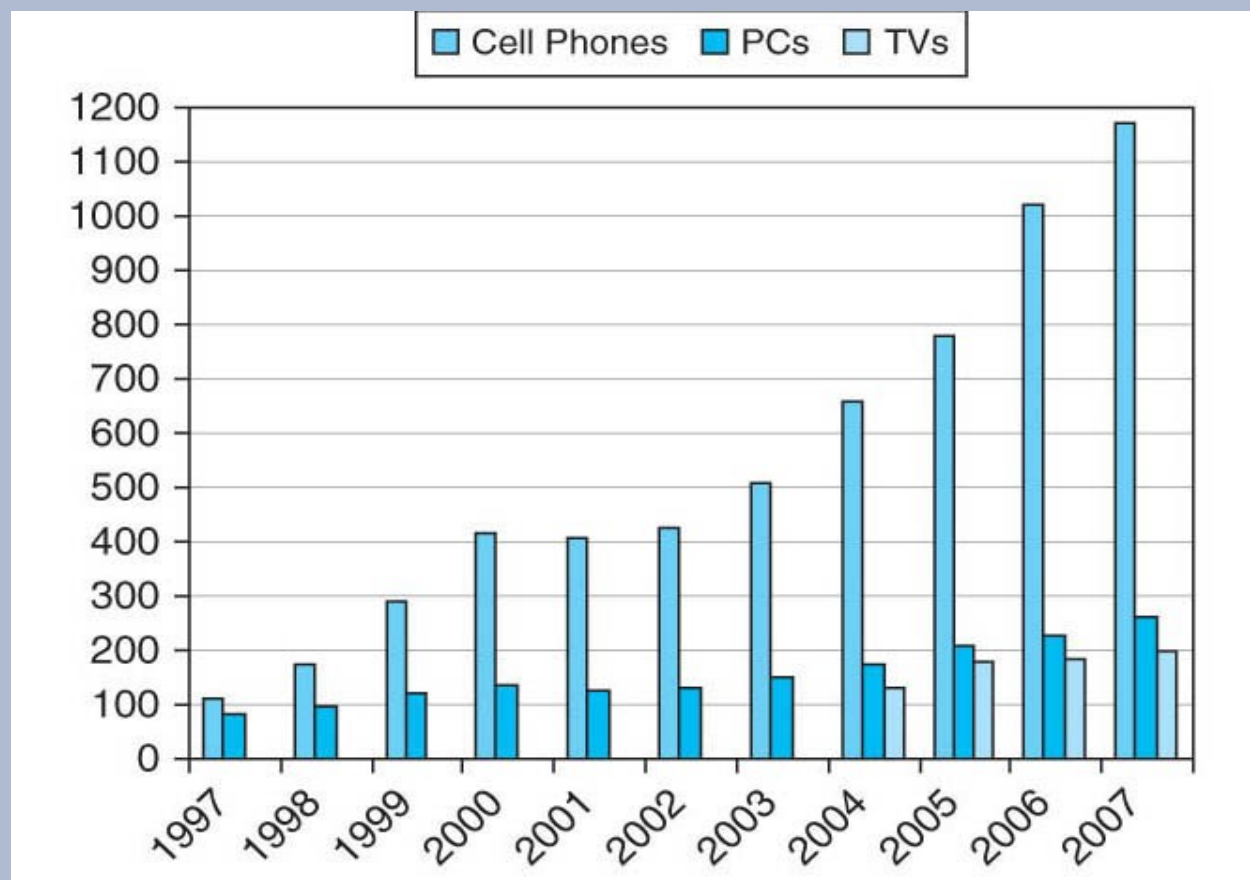
[Wikipedia]

Zašto koristimo računala? (2)

- Računalni sustavi danas



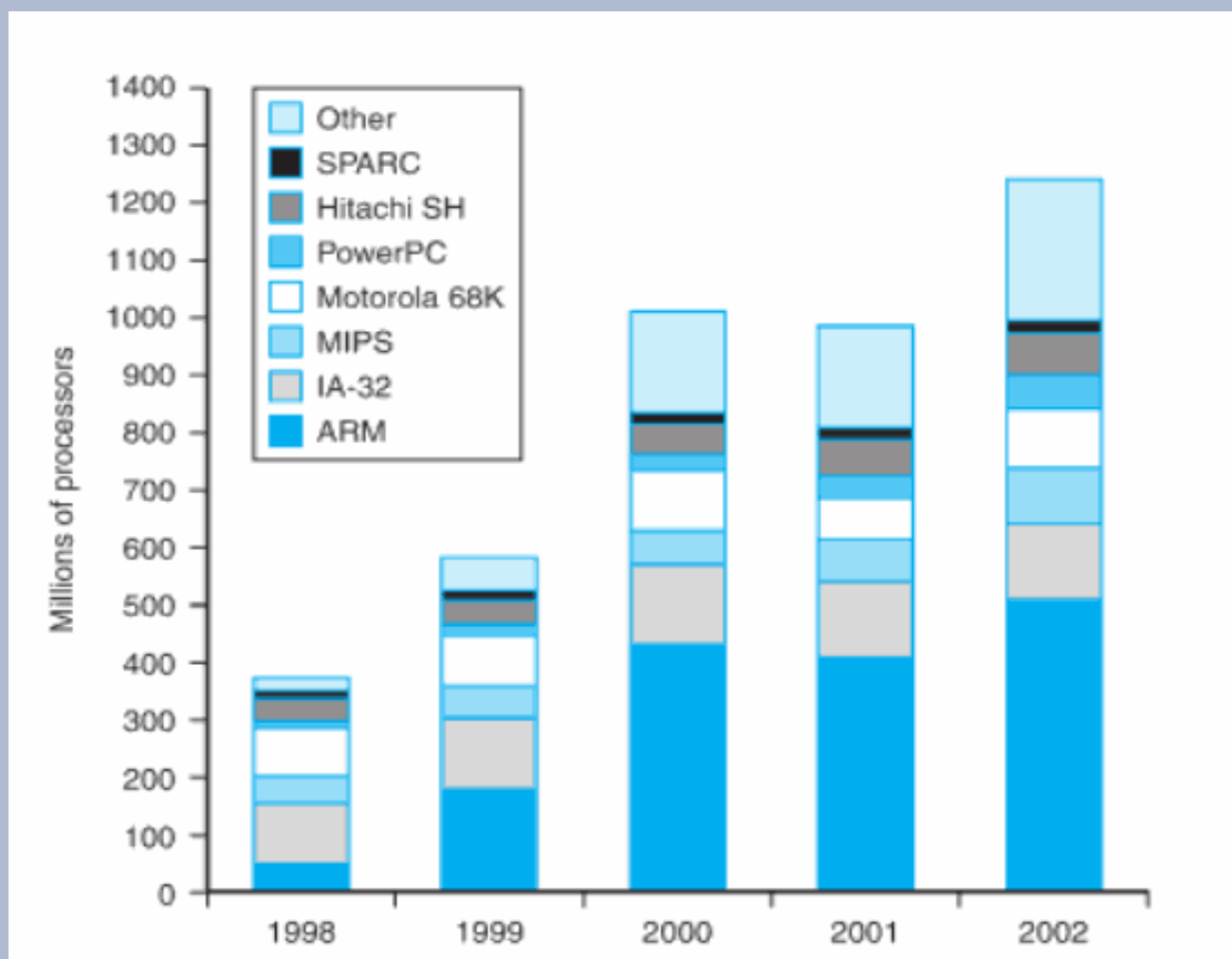
Opseg proizvodnje elektroničkih uređaja



[Patterson09]

- Slika prikazuje milijune proizvedenih uređaja godišnje (svijet)
- Broj korištenih uređaja (2004): $2e9$ TV-a, $1.8e9$ mobitela, $8e8$ PCja

Zastupljenost procesorskih arhitektura



[Patterson07]

Što je arhitektura računala?

- Veza između korisnika i **logičkih komponenata** (registara, zbrajala, ...) grozno komplicirana
- Moderni sustavi tu vezu izvode u više **slojeva**
- **Arhitektura računala** (IBM 360, 1964):
 - proučava hijerarhijsko organiziranje sklopovlja za **obradu podataka** na različitim razinama apstrakcije
 - **cilj**: postići **optimalna** svojstva primjenom **dostupnih** tehnologija
 - performansa (brzina izvođenja, fokus na višim programskim jezicima)
 - cijena
 - utrošak energije
 - pouzdanost, raspoloživost, ...
- Arhitektura računala ne razmatra tzv. fizičko oblikovanje (tranzistore i bistabile oblikuju mikroelektroničari)

Razine apstrakcije u modernim sustavima

**Fokus
kolegija!!**

Aplikacija
Programski jezik
Operacijski sustav
Instrukcijski skup
Mikroarhitektura (organizacija računala)
Oblikovanje podsustava (sabitnice, memorija, registri, ...)
Sklopovi
Elementi
Fizika materijala

**Arhitektura
računala**

**Oblikovanje
sklopovlja**

Analogija s građevinskom djelatnošću

- **Arhitekti** razmatraju komponente više razine (ALU, upravljanje, priručne memorije, ...), te kako ih posložiti u funkcionalnu cjelinu
- **Izvedbeni inženjeri** (mikroelektroničari) razvijaju građevne elemente (sklopove, tranzistore) i inoviraju tehnološke procese

Područja glavnog interesa kolegija

- Specifičnosti računala opće namjene
 - prijenosnici, radne stanice, poslužitelji
 - izvorni kod pisan u višem programskom jeziku
- Detalji organizacije procesora (arhitektura)
- Iskorištavanje paralelizma
 - instrukcijski paralelizam (ILP)
 - vektorske instrukcije (SIMD)
 - višeprocorska računala (MIMD)

Motivacija: zašto bi se studenti računarstva trebali upoznati s konceptima arhitekture računala?

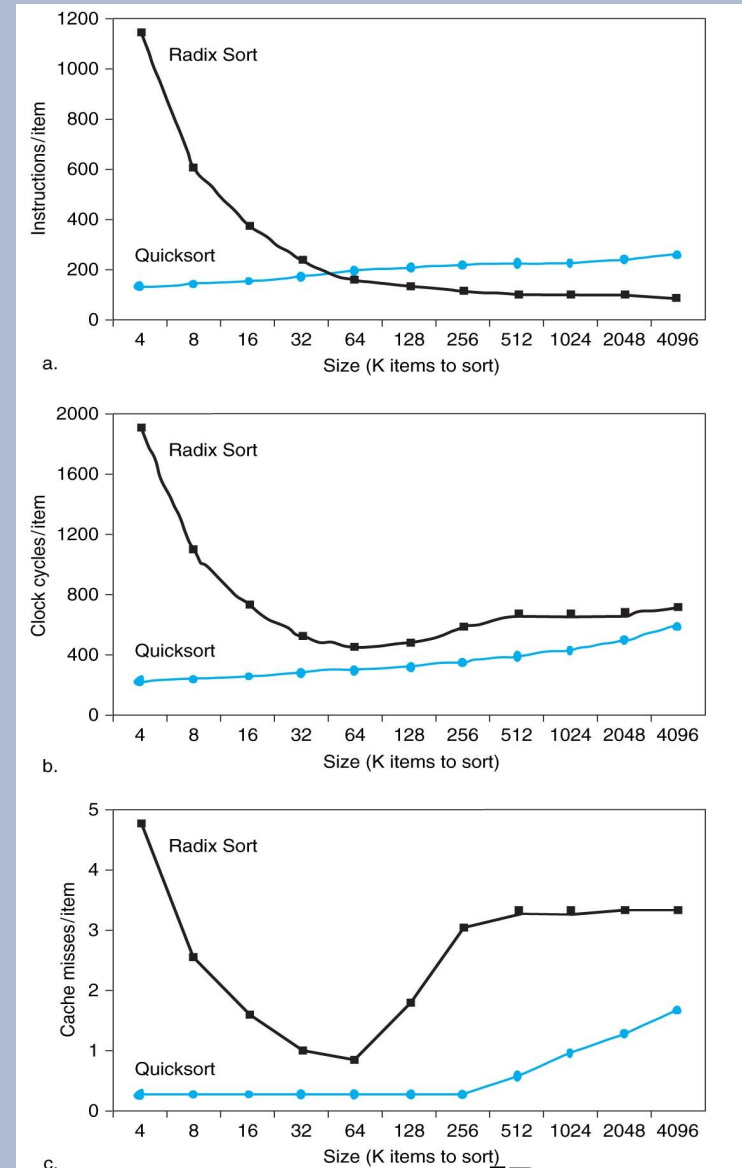
- Steći **osjećaj** što definira svojstva računala
 - moći odabrati optimalnu konfiguraciju s obzirom na zahtjeve (performansa, cijena, potrošnja, dostupnost, pouzdanost)
- Biti sposoban optimirati program na **standardnom procesoru**
 - razumijevanje organizacije računala kritično za optimiranje performanse
 - porast brzine integriranih sklopova je usporen, dok tržište svejedno traži sve sofisticiraniju funkcionalnost
 - moderne arhitekture postaju sve složenije, formalna naobrazba važna
- Projektiranje složenih digitalnih sustava kao **profesija** (ne biste bili prvi FER-ovac koji sudjeluje u stvaranju vrhunskog sklopovlja)
- **Ugrađene aplikacije** obično zahtijevaju posebno dobro poznavanje arhitekture i organizacije računala

Koji su ciljevi kolegija?

- Upoznati termine i koncepte arhitekture i organizacije računala
- Razumjeti kako temeljni koncepti utječu na svojstva računala i performansu programa
- Naučiti čitati i evaluirati arhitektonske opise modernih računala
- Upoznati se s instrukcijskim skupovima procesora MC680x0, RISC i x86
- Biti sposoban oblikovati upotrebljivi procesor na razini logičkih vrata

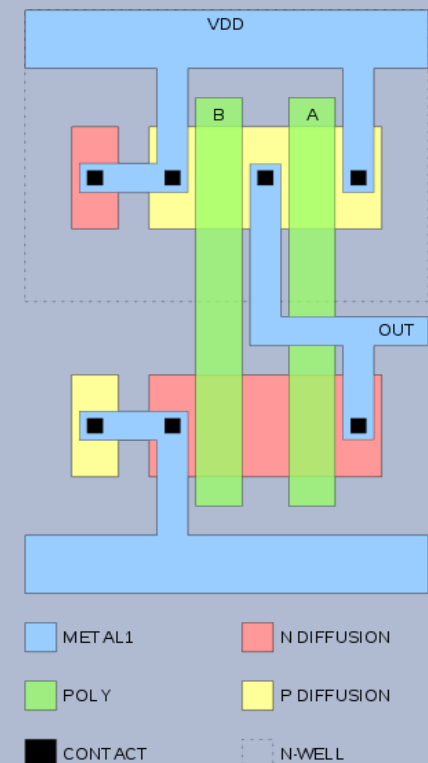
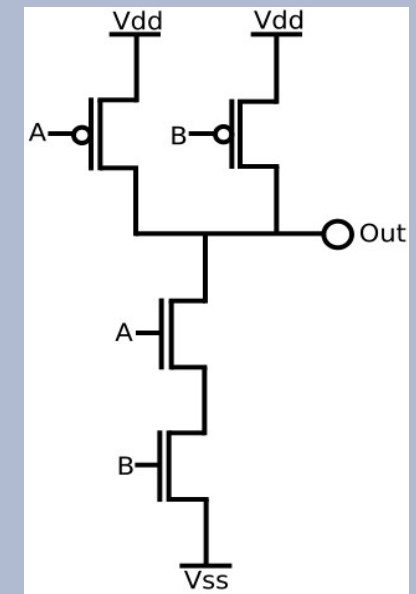
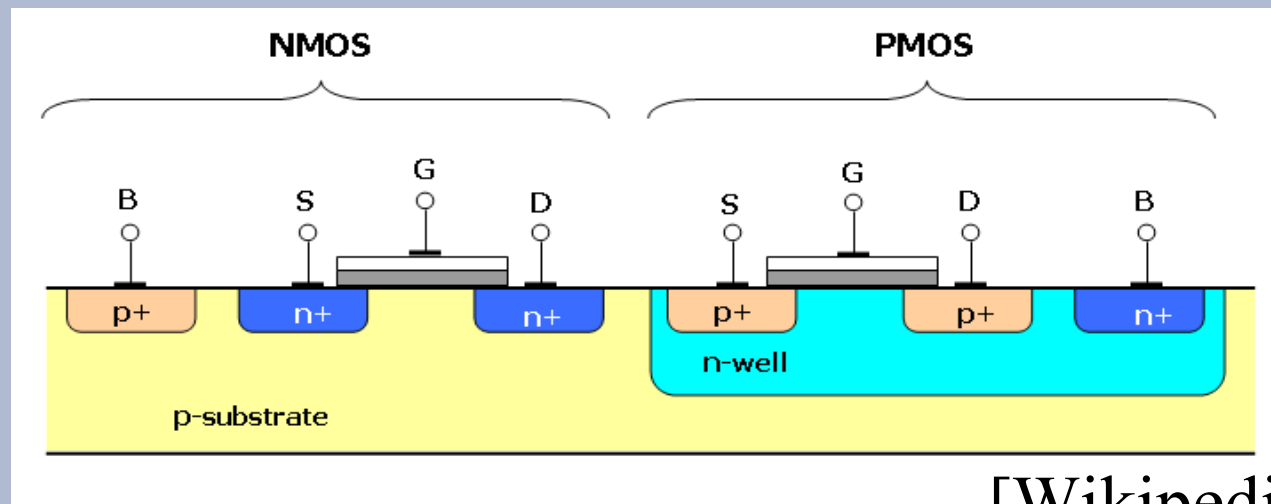
Motivacijski primjer

- Quicksort, $O(n \log(n))$, vs Radix sort, $O(k n)$
- teorijska složenost (gore) i vrijeme izvođenja (sredina)
- složeniji algoritam brži zbog veće lokalnosti radnog skupa (dolje: učestalost promašaja PM)!
- lijepa ilustracija razlike između matematike i računarstva

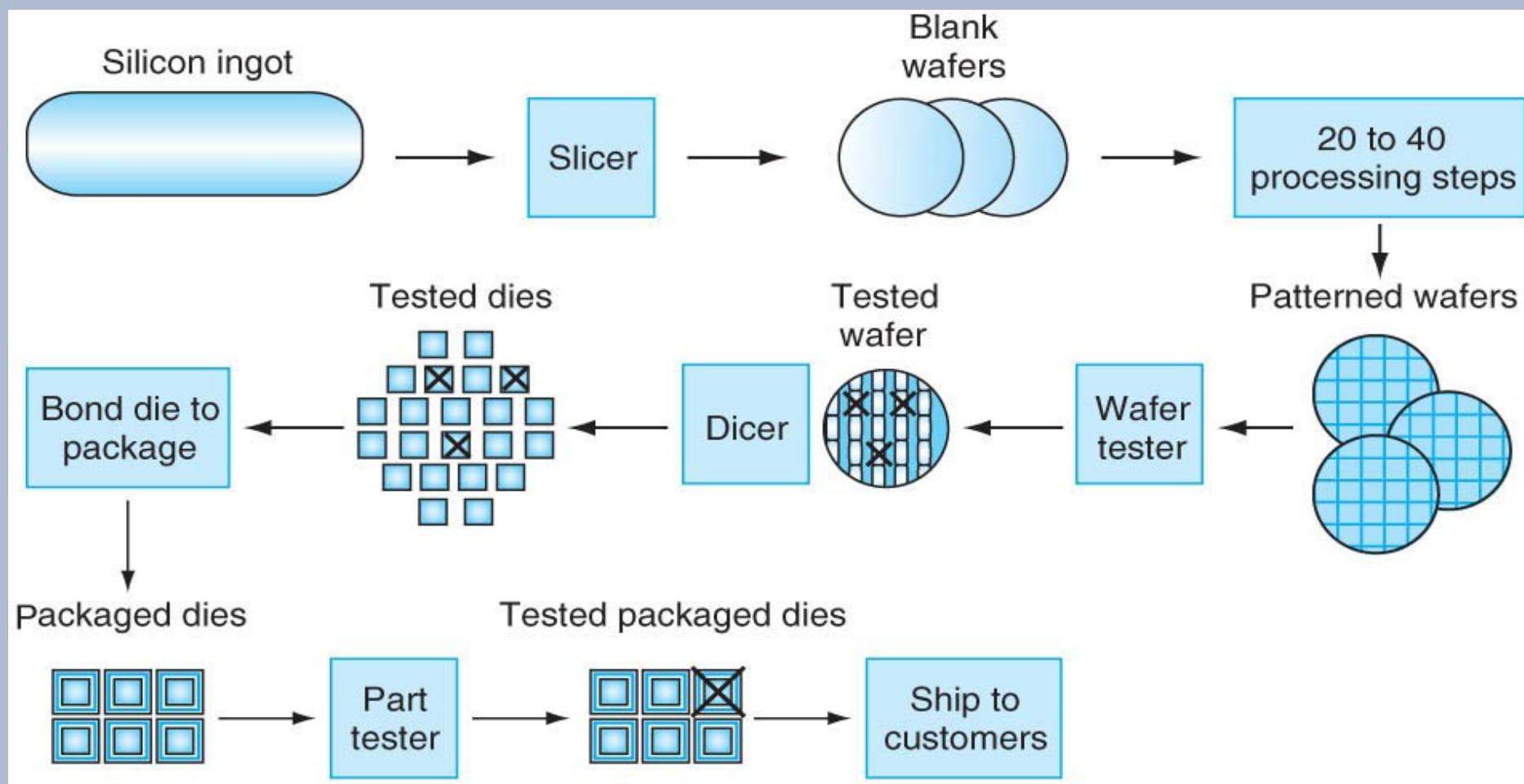


Tehnološki kontekst

- računala se (uglavnom) izvode na površini silicija (dominantna je tehnologija CMOS)
- logika se ostvaruje **upravljivim sklopkama**
- komunikacija preko vanjskih izvoda **spora** → trebamo što veću **površinu** integriranog sklopa
- komunikacija to **brža** što su sklopovi bliži → trebamo što sitnije tranzistore

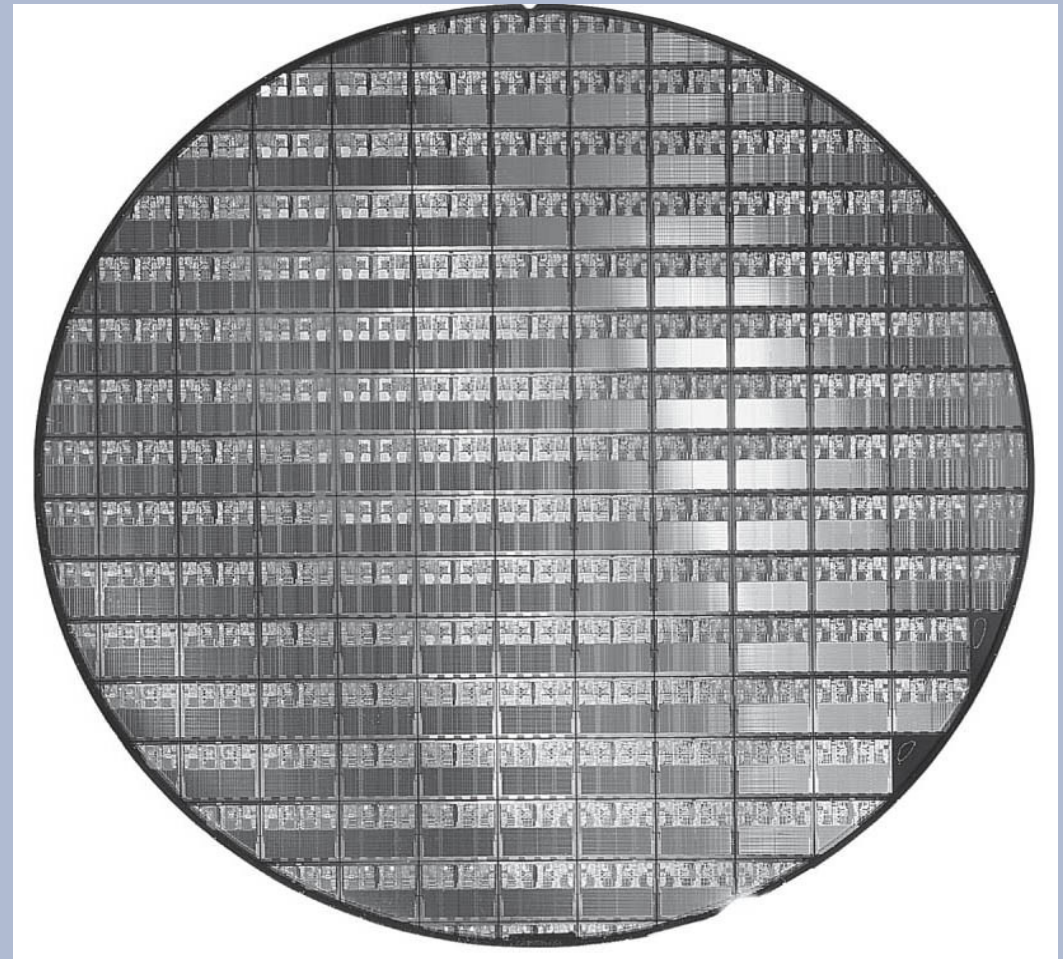


Proizvodni proces (1)



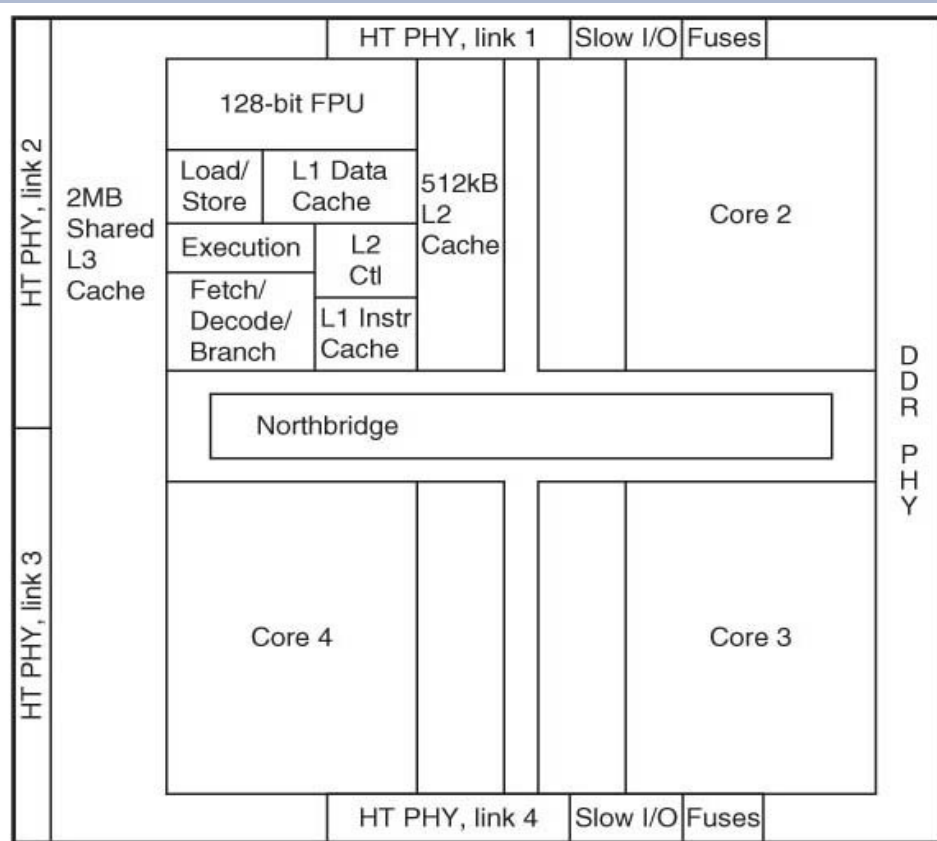
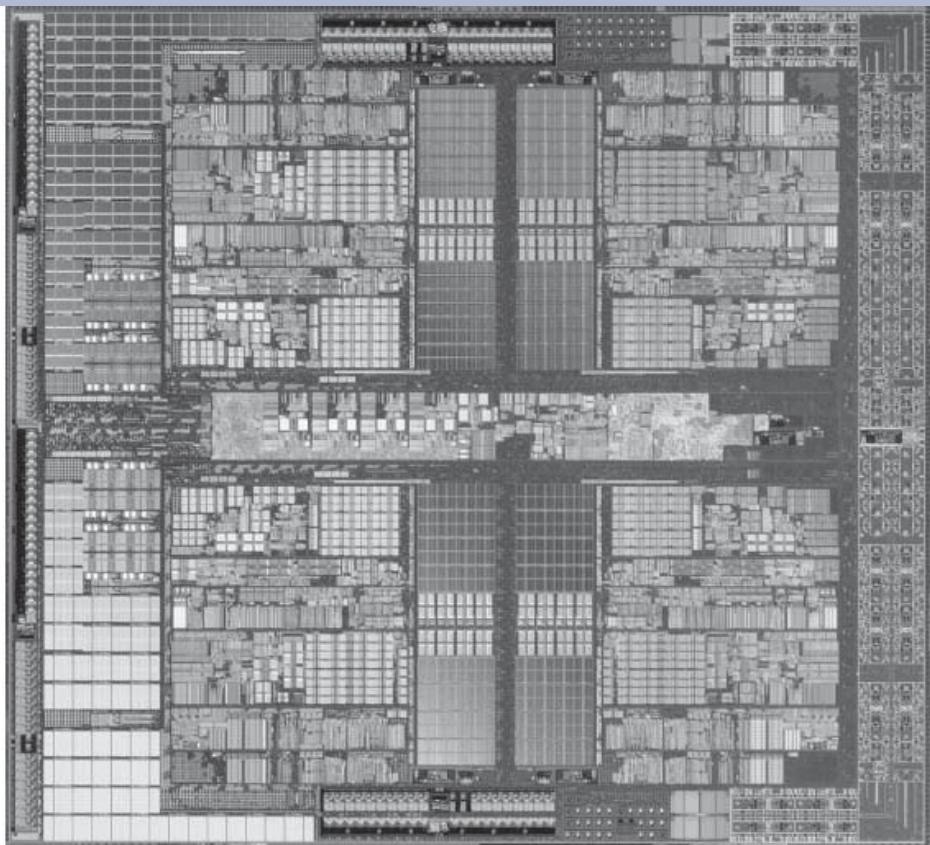
Proizvodni proces (2)

- silicijski wafer $d=20\text{cm}$
- uz 100% prinos \rightarrow 117 čipova AMD Opteron X2
- konkretni proces u praksi postiže prinos od oko 85%
- prinos utječe na cijenu i tako ograničava veličinu integriranog sklopa
- \rightarrow površina čipa je **kompromis** između performanse i cijene!



[Patterson07]

Proizvodni proces (3)



[Patterson07]

- AMD Opteron Barcelona X4, fizički raspored, 285 mm²

Tehnološki trendovi (1970-2000):

- Gustoća tranzistora: 35% godišnje
- Površina sklopa: 10%-20% godišnje
- Broj tranzistora na sklopu: 40%-55%
Moore: udvostručenje svake 2 godine
- Brzina tranzistora raste s korijenom gustoće (linearno s rezolucijom tehnologije)
- Kašnjenje signalnih linija slabo pada: važna lokalnost obrade u digitalnom sklopu
- “Višak” tranzistora stvara prilike za arhitekte: protočnost, cachevi, predviđanje grananja, šire sabirnice (8, 14, 32, 64), više jezgri, ...

Number of transistors on
an integrated circuit

10,000,000,000

1,000,000,000

100,000,000

10,000,000

1,000,000

100,000

10,000

2,300

Number of transistors doubling every 18 months.

Number of transistors doubling every 24 months.

1971

1980

1990

2000

2004

4004

8008

8080

8086

286

386

486

Pentium

Pentium II

Pentium III

Pentium 4

Itanium

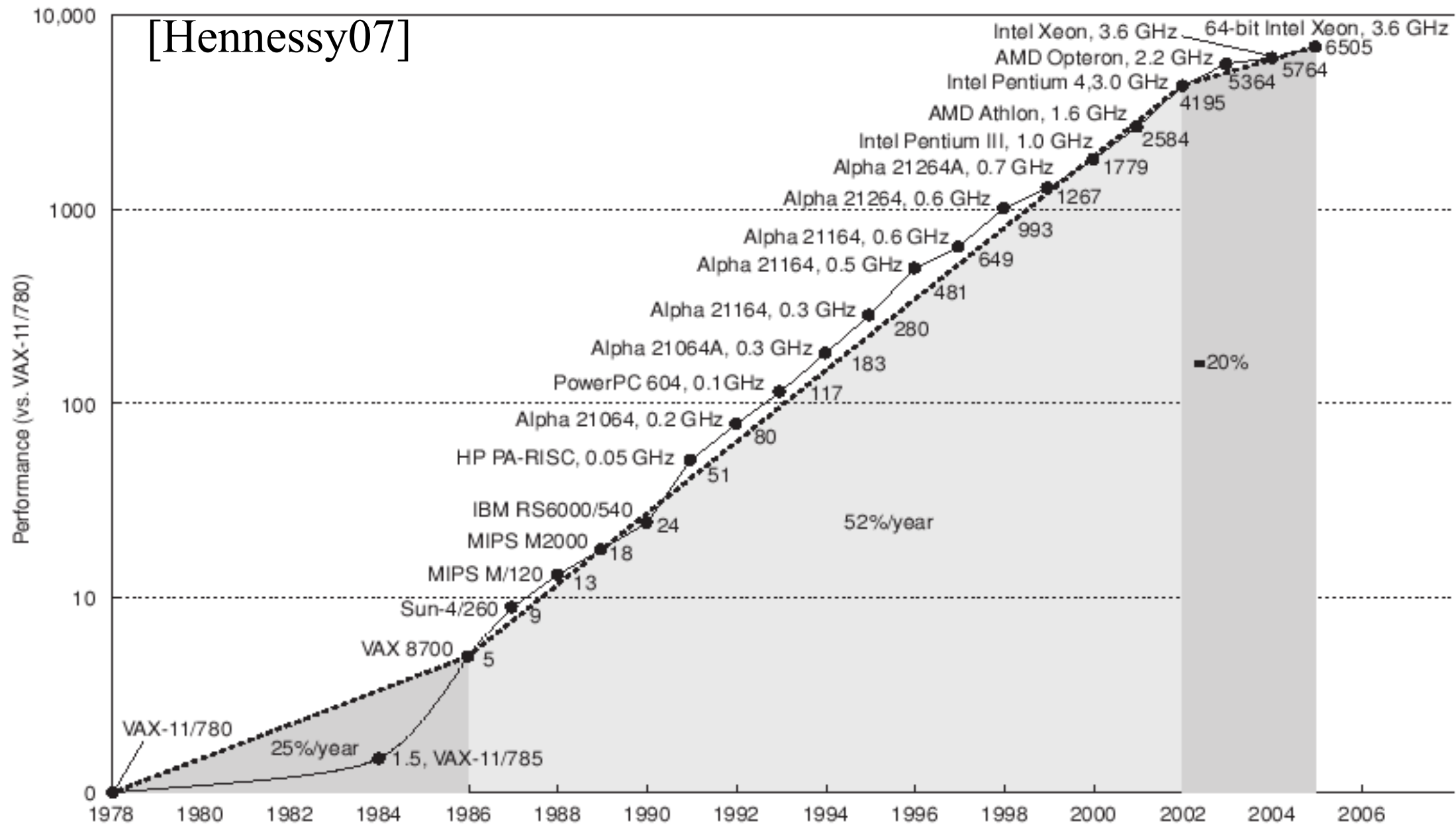
Itanium 2

Itanium 2
(9 MB cache)

Performansa uniprocatora

- zahvaljujući povoljnom tehnološkom okruženju, 1986-2002 zabilježen konstantni rast od oko 50% godišnje
 - povećanje broja tranzistora na sklopu
 - povećanje radnog takta
- dostupnost performanse potiče stvaranje novih aplikacija (npr, face whisperer!)
 - a nove aplikacije traže još performanse
 - performanse neće nikad biti dovoljno!
- međutim, u 21 stoljeću imamo porast performanse od samo 20% godišnje
- što se dogodilo?

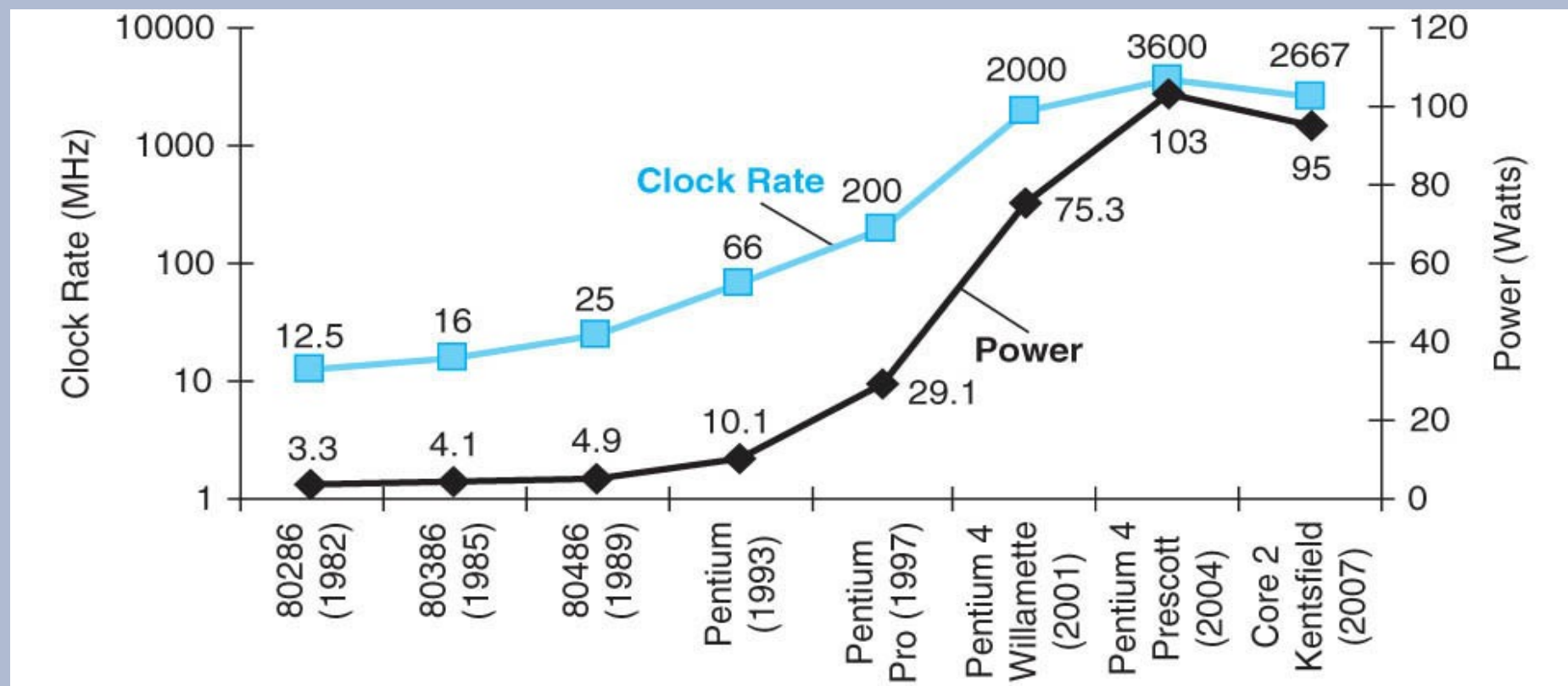
[Hennessy07]



Novi tehnološki trendovi (2000-):

- Tehnologija je dosegla graničnu gustoću disipacije
 - problemi s hlađenjem, energijom, udaljenošću elemenata
 - kraj porasta radnog takta (veći takt \Rightarrow veća disipacija, $0.1\text{W} \rightarrow 135\text{W}$)
 - “=Power wall”
- Procesna moć i propusnost rastu (puno) brže od latencije
 - pristup glavnoj memoriji $25\times$ sporiji od FP množenja
 - “=Memory wall”
- Usložnjavanje arhitekture donosi sve manje koristi
 - instrukcijski paralelizam (ILP) donosi sve manje prinose
 - protočnost, superskalarnost, izvođenje izvan redosljeda ...
 - tranzistora imamo više nego što ih možemo iskoristiti u uniprocessoru!
 - (“=ILP wall”)
 - razvoj složenih sklopova u agresivnoj tehnologiji sve skuplji
 - kašnjenja i preslušavanje linija, sinkronizacija signala takta, ...

Kretanje disipacije procesora



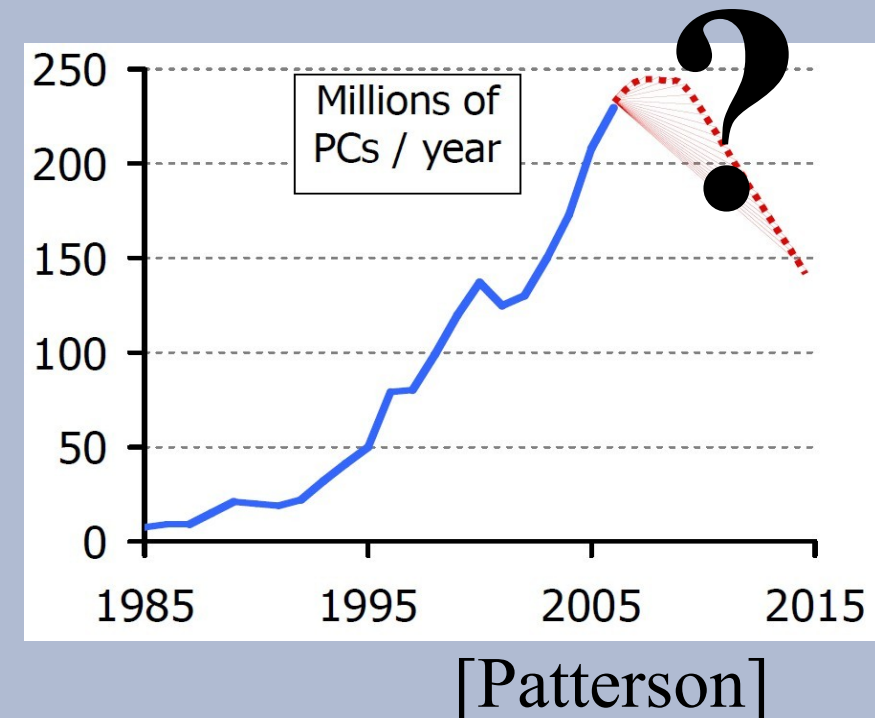
[Patterson07]

Zašto performansa slabije raste?

- Promjena tehnološkog konteksta!
 - disipacija ograničava gustoću elemenata
 - instrukcijski paralelizam iscrpljen
 - sporo poboljšanje latencije memorije
 - power wall + ILP wall + memory wall = **brick wall**
- Kraj ere uniprocссора!
 - nitko nije proizveo uniprocссора opće namjene već godinama
- Inovacije: **multicore**, SMP, MPP, ...

Akutan tehnološki kontekst

- svijet se mijenja: industrija navikla na ogromne prihode u velikom je strahu!
 - crni scenario (slika!): što ako ljudi počnu kupovati računala tek kad se pokvare?
 - sve nade usmjerene prema paralelizmu (teži problem od svih dosadašnjih!)
- postotak uspjeha tvrtki koje su se do sada bavile paralelizmom: **0%**



ambiciozni cilj industrije i istraživača:

- odustati od uniprocorske performanse (!)
- rast postići udvostručenjem jezgara svake dvije godine (!!)
- stvoriti povoljno ozračje prikladnim inovacijama (podrška za paralelno programiranje, ...)

Informacije o predmetu

- Službene stranice predmeta:
 - obavijesti, forum,
 - raspored i zadatci za laboratorij,
 - repozitorij datoteka
 - <http://www.fer.hr/predmet/arhrac2>
- Neslužbene stranice predmeta:
 - studentski projekti
 - zanimljivi članci
 - <http://www.zemris.fer.hr/~ssegvic/ar2/>

Kakvo predznanje očekujemo?

- Digitalna logika
- Arhitektura računala 1
- Programiranje i programsko inženjerstvo
- (Elektronika)

Predavanja

- Ponedjeljkom 11-14, B2 i B3
- Povremene kratke provjere znanja
- Materijali dostupni na stranicama predmeta nakon predavanja
- Nazočnost ne bismo provjeravali

Laboratorij

- Tijekom semestra održavaju se tri grupe laboratorijskih vježbi
 - mikroprogramiranje,
 - programiranje u zbirnom jeziku (MC68000, IA32),
 - utjecaj arhitekture na izvođenje programa u C-u
- Vježbe se pripremaju **kod kuće** te predaju u **Ferku**
 - rok za predaju je dan prije izvođenja vježbi
 - temeljem programa napisanih kod kuće ne dobivaju se bodovi
 - za pristup laboratoriju potrebno je predati barem 50% vježbe
 - moći će se nadoknaditi jedna vježba
 - uz ispričnicu ili najavu barem tjedan dana prije vježbe
 - termin u 3. ciklusu će biti pravovremeno oglašen
- Protokol vježbi u laboratoriju:
 - 20 minuta za slobodnu diskusiju s asistentima
 - 20 minuta za rješavanje praktičnog zadatka na računalu (1/3 bodova)
(upotrebu mobitela i interneta ćemo na žalost morati zabraniti)
 - 20 minuta za rješavanje blica (10 zadataka, abcd, 2/3 bodova)
- Zadatci će biti zamrznuti tri tjedna prije termina odgovarajućih vježbi

Razdioba bodova

- Periodičke provjere znanja
 - ABCD pitalice ili kratke nadopune teksta
 - **5** bodova
- Izlazni testovi laboratorijskih vježbi
 - **15** bodova
- Međuispit i završni ispit
 - **35 i 45** bodova
- Projektni zadatci (?)

Detalji

- Ponovljeni međuispit: **nema**
- Ponovljeni završni ispit: **nema**
- Preduvjeti za izlazak na završni ispit: **nema**
- Klasični ispitni rok
 - nakon završnog ispita, preduvjet za izlazak je 50% laboratorija
- Usmeni dio ispita
 - prag za izlazak je 50% bodova do tada
 - izlazak na usmeni ispit nije obavezan
- Pragovi su fiksni: 50 (2), 63 (3), 76 (4), 89 (5)

Literatura

- S. Ribarić, *Građa računala - arhitektura i organizacija računarskih sustava*, Algebra, Zagreb, 2011
- S. Ribarić, *Arhitektura računala RISC i CISC*, Školska knjiga, Zagreb, 1996.
- J. L. Hennessy, D. A. Patterson, *Computer Architecture, A Quantitative Approach*, Morgan Kaufmann, 4th ed, 2006
- D. A. Patterson, J. L. Hennessy, *Computer Organization & Design, The Hardware/Software Interface*, Morgan Kaufmann, 4th ed, 2009.

Struktura kolegija

0. Uvodno predavanje

1. Klasična arhitektura računala

- Von Neumannov model računala
- Pojednostavnjeni model organizacije računala
- Ožičena izvedba upravljačke jedinice
- Mikroprogramirano upravljanje
- Sučelje prema programskoj podršci:
 - upravljački stogovi i iznimke
 - prevođenje, povezivanje i pokretanje programa

2. Moderna računala opće namjene

- Performansa računala, klasifikacija modernih arhitektura
- Instrukcijske arhitekture procesora (x86, tipični RISC)
- (međuispit)
- Put podataka protočnog procesora (arhitektura MIPS)
- Iskorištavanje instrukcijskog paralelizma
- Priručna Memorija
- Virtualna Memorija
- Višejezgrene arhitekture
- SMT, NUMA