



# 64-040 Modul InfB-RSB

## Rechnerstrukturen und Betriebssysteme

[https://tams.informatik.uni-hamburg.de/  
lectures/2020ws/vorlesung/rsb](https://tams.informatik.uni-hamburg.de/lectures/2020ws/vorlesung/rsb)

– Kapitel 14 –

Andreas Mäder



Universität Hamburg  
Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften  
Fachbereich Informatik

**Technische Aspekte Multimodaler Systeme**

Wintersemester 2020/2021



## Rechnerarchitektur II

### Pipelining

- Befehlspipeline

- MIPS

- Bewertung

### Parallelität

- Amdahl's Gesetz

- Superskalare Rechner

- Parallelrechner

- Symmetric Multiprocessing

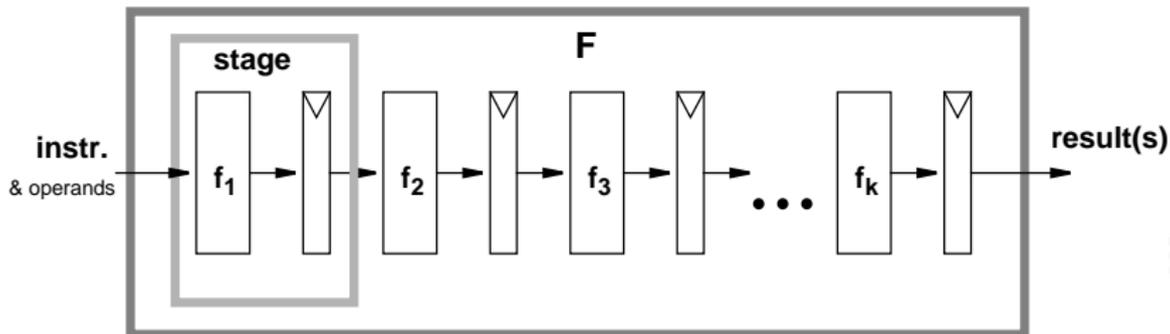
### Speicherhierarchie

- Speichertypen

- Cache Speicher

### Literatur





## Grundidee

- ▶ Operation  $F$  kann in Teilschritte zerlegt werden
- ▶ jeder Teilschritt  $f_i$  braucht ähnlich viel Zeit
- ▶ Teilschritte  $f_1 \dots f_k$  können parallel zueinander ausgeführt werden
- ▶ Trennung der Pipelinestufen („stage“) durch Register
- ▶ Zeitbedarf für Teilschritt  $f_i \gg$  Zugriffszeit auf Register ( $t_{FF}$ )



## Pipelining-Konzept

- ▶ Prozess in unabhängige Abschnitte aufteilen
- ▶ Objekt sequenziell durch diese Abschnitte laufen lassen
  - ▶ zu jedem Zeitpunkt werden zahlreiche Objekte bearbeitet
  - ▶ —"– sind alle Stationen ausgelastet

## Konsequenz

- ▶ Pipelining lässt Vorgänge gleichzeitig ablaufen
- ▶ reale Beispiele: Autowaschanlagen, Fließbänder in Fabriken

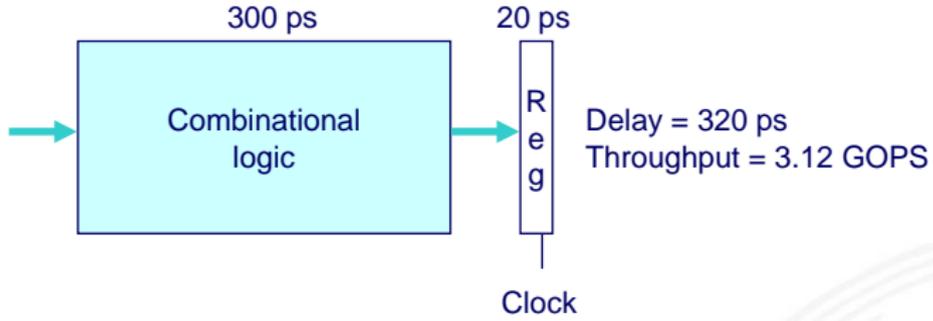
## Arithmetische Pipelines

- ▶ Idee: lange Berechnung in Teilschritte zerlegen  
wichtig bei komplizierteren arithmetischen Operationen
  - ▶ die sonst sehr lange dauern (weil ein großes Schaltnetz)
  - ▶ die als Schaltnetz extrem viel Hardwareaufwand erfordern
  - ▶ Beispiele: Multiplikation, Division, Fließkommaoperationen ...
- + Erhöhung des Durchsatzes, wenn Berechnung mehrfach hintereinander ausgeführt wird

## Befehlspipeline im Prozessor

- ▶ Idee: die Phasen der von-Neumann Befehlsabarbeitung (Befehl holen, Befehl decodieren ...) als Pipeline implementieren
- folgt in *Befehlspipeline*, ab Folie 1037

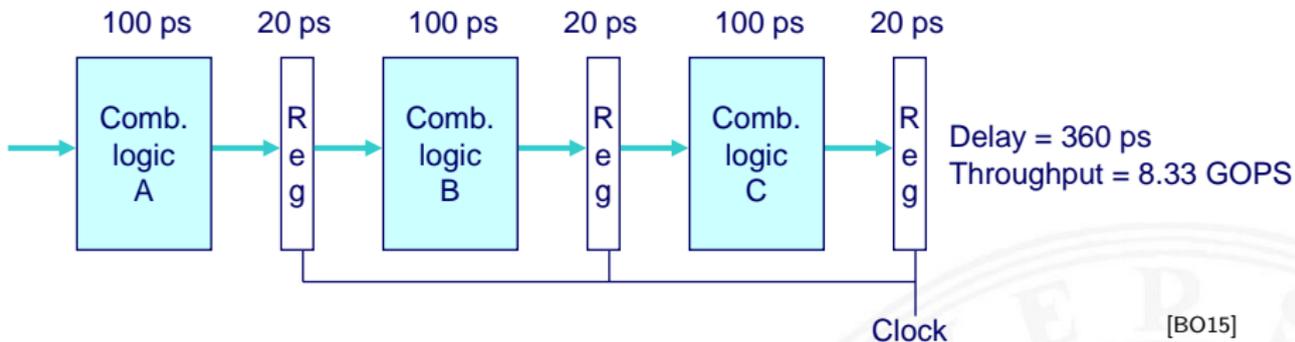
# Beispiel: Schaltnetz ohne Pipeline



[BO15]

- ▶ Verarbeitung erfordert 300 ps
- ▶ weitere 20 ps um das Resultat im Register zu speichern
- ▶ Zykluszeit: mindestens 320 ps

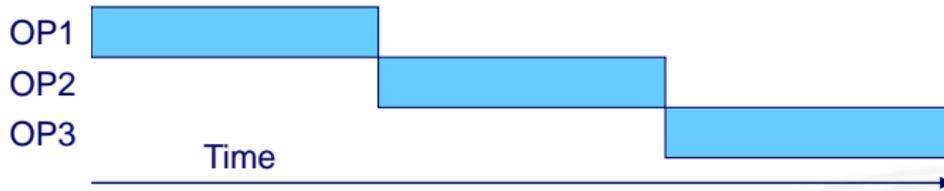
# Beispiel: Version mit 3-stufiger Pipeline



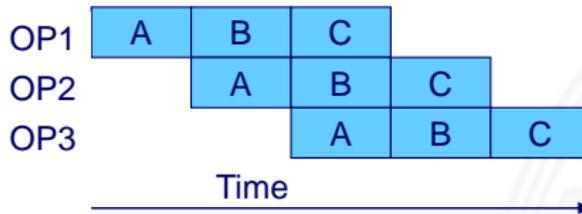
- ▶ Kombinatorische Logik in 3 Blöcke zu je 100 ps aufgeteilt
- ▶ neue Operation, sobald vorheriger Abschnitt durchlaufen wurde  
⇒ alle 120 ps neue Operation
- ▶ allgemeine Latenzzunahme  
⇒ 360 ps von Start bis Ende

# Prinzip: 3-stufige Pipeline

## ▶ ohne Pipeline

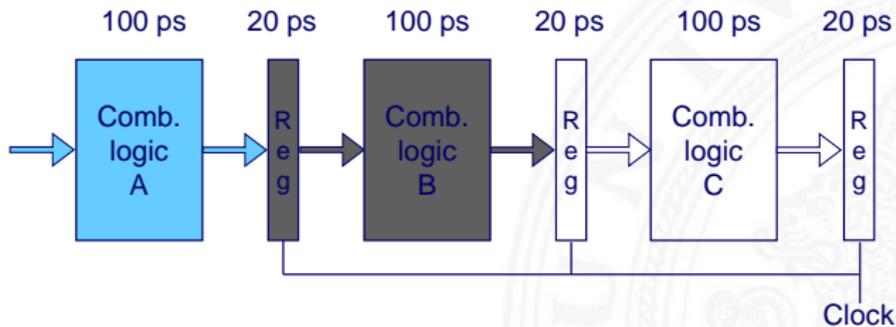
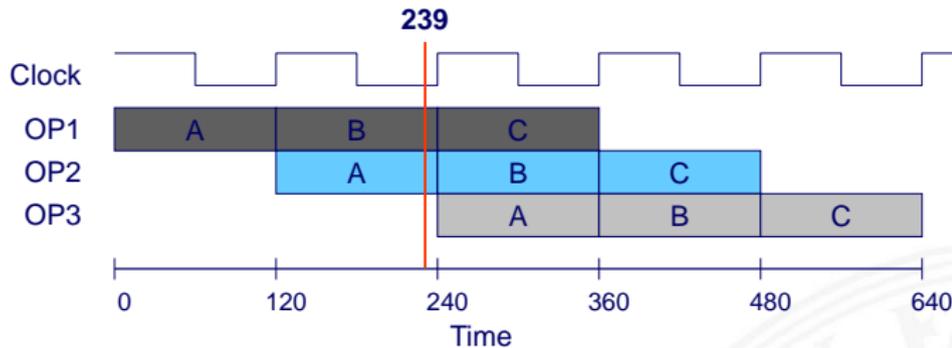


## ▶ 3-stufige Pipeline



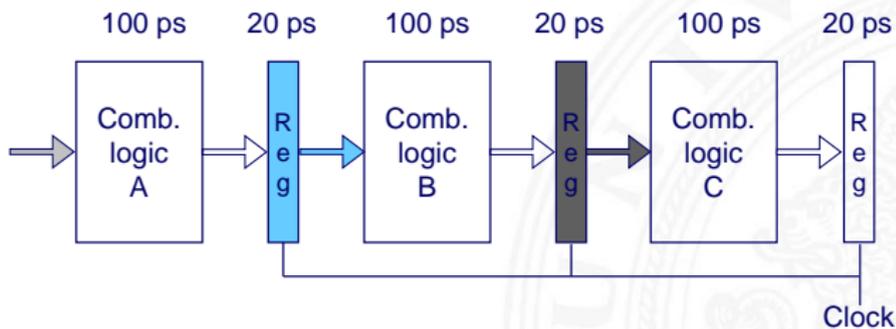
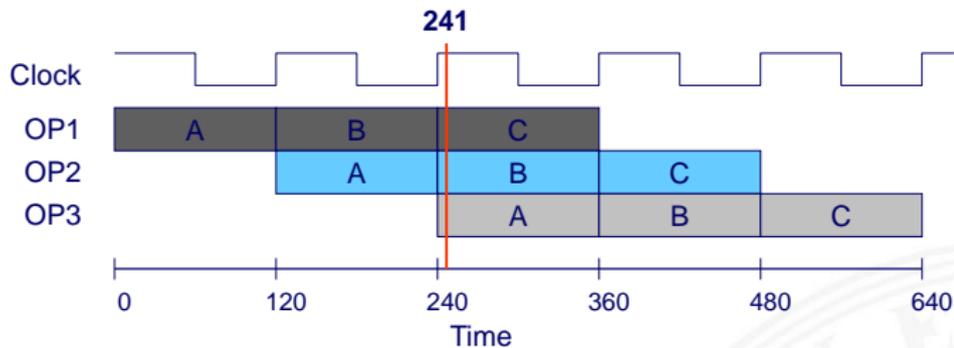
[BO15]

# Timing: 3-stufige Pipeline



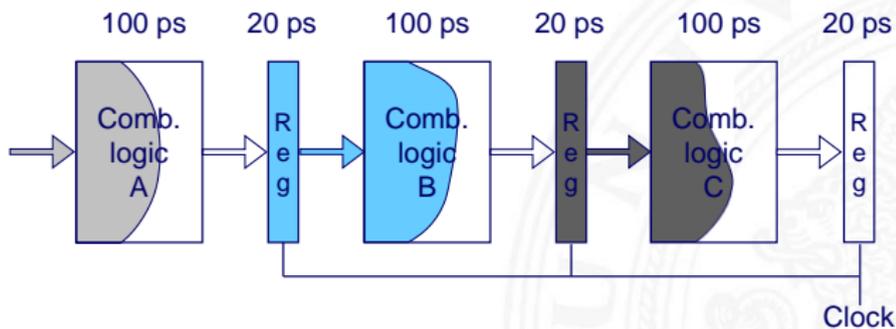
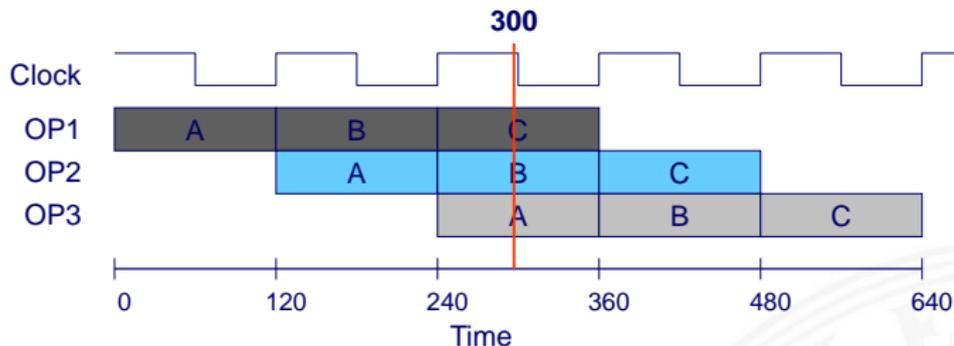
[BO15]

# Timing: 3-stufige Pipeline



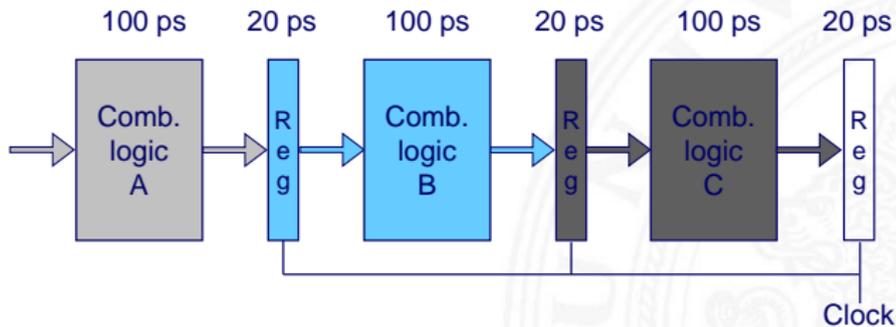
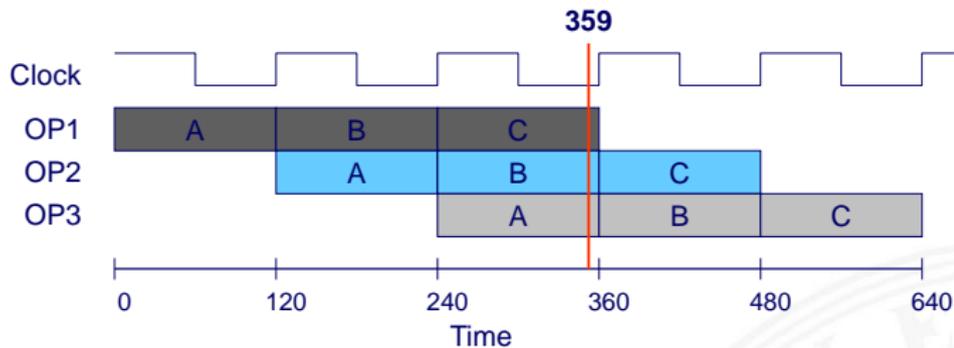
[BO15]

# Timing: 3-stufige Pipeline



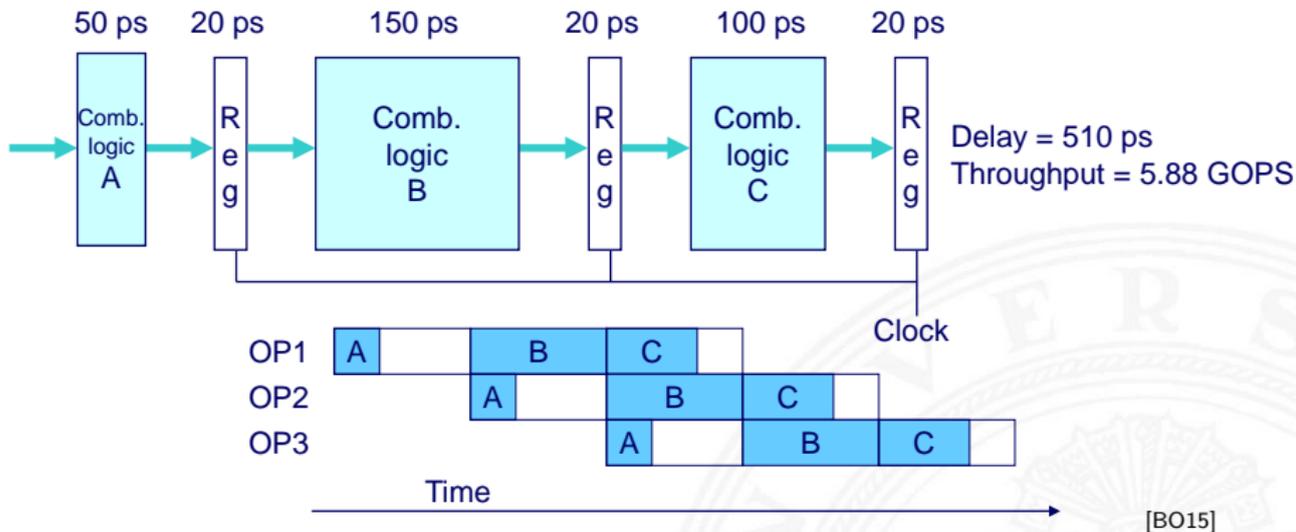
[BO15]

# Timing: 3-stufige Pipeline



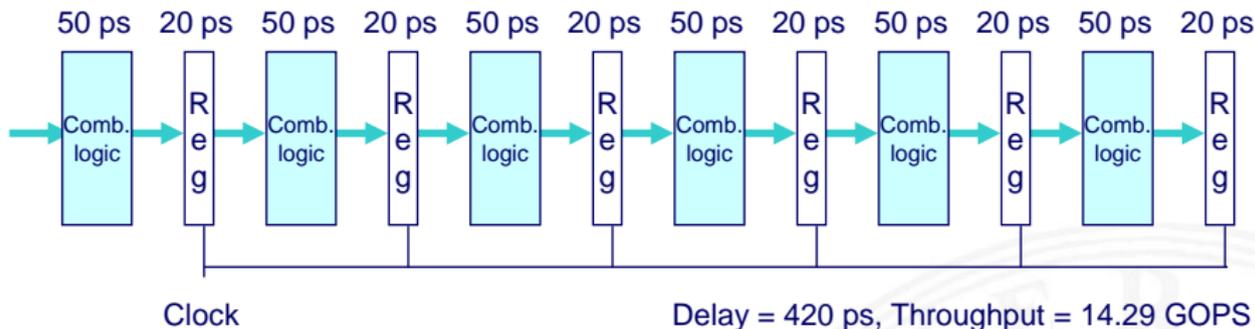
[BO15]

# Limitierungen: nicht uniforme Verzögerungen



- ▶ Taktfrequenz limitiert durch langsamste Stufe
- ▶ Schaltung in möglichst gleich schnelle Stufen aufteilen

# Limitierungen: Register „Overhead“

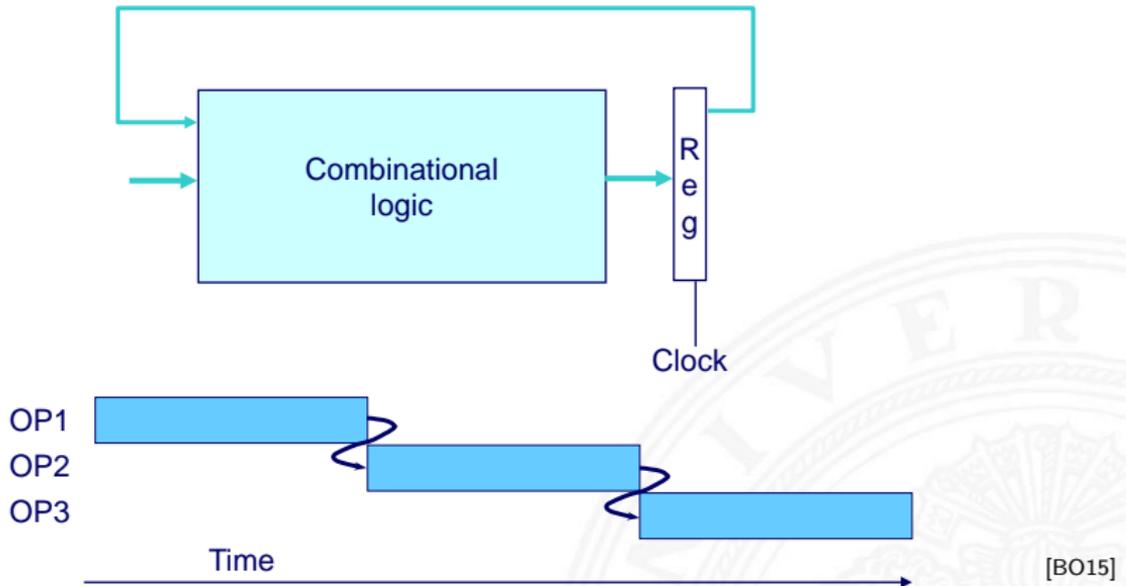


[BO15]

- ▶ registerbedingter Overhead wächst mit Pipelinelänge
- ▶ (anteilige) Taktzeit für das Laden der Register

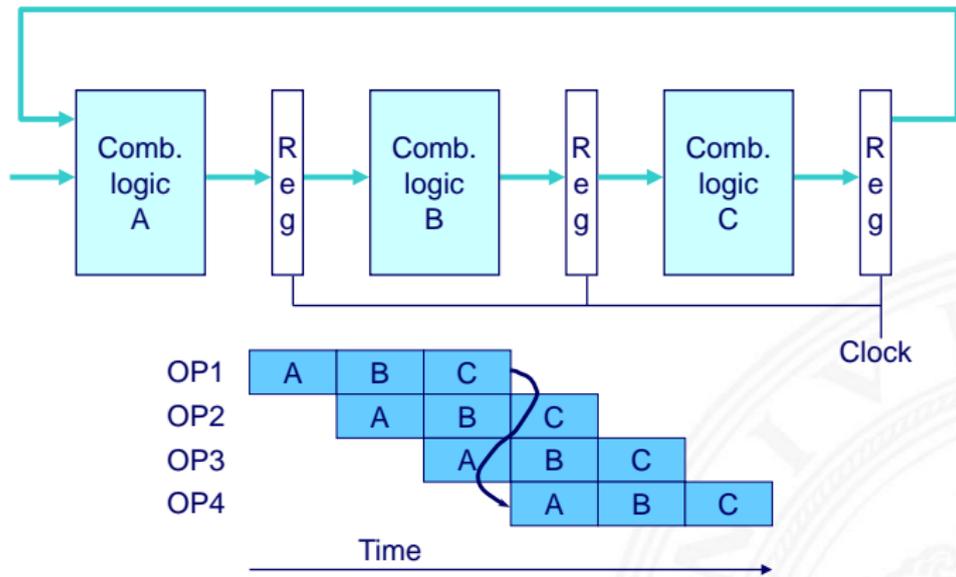
	Overhead	Taktperiode
1-Register:	6,25% 20 ps	320 ps
3-Register:	16,67% 20 ps	120 ps
6-Register:	28,57% 20 ps	70 ps

# Limitierungen: Datenabhängigkeiten



- ▶ jede Operation hängt vom Ergebnis der Vorhergehenden ab

# Limitierungen: Datenabhängigkeiten (cont.)



[BO15]

- ⇒ Resultat-Feedback kommt zu spät für die nächste Operation
- ⇒ Pipelining ändert Verhalten des gesamten Systems

typische Schritte der Befehlsabarbeitung (von ISA abhängig)

- ▶ **IF**      **I**nstruction **F**etch  
Instruktion holen, in Befehlsregister laden

---

- ID**      **I**nstruction **D**ecode  
Instruktion decodieren

---

- OF**      **O**perand **F**etch  
Operanden aus Registern holen

---

- EX**      **E**xecute  
ALU führt Befehl aus

---

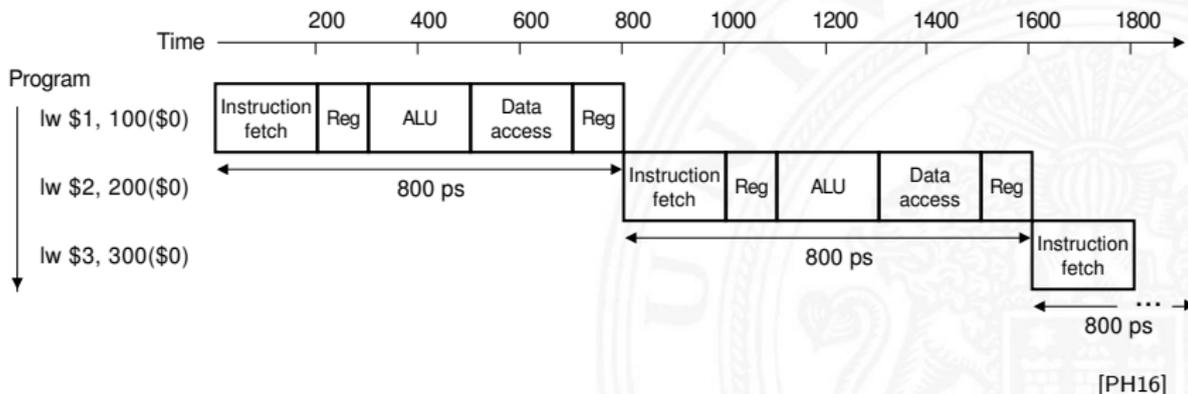
- MEM**    **M**emory access  
Speicherzugriff: Daten laden/abspeichern

---

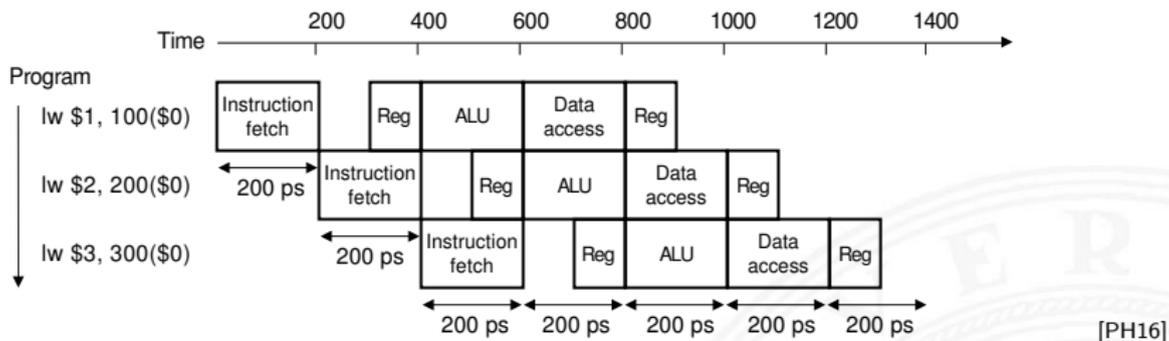
- WB**      **W**rite **B**ack  
Ergebnis in Register zurückschreiben

- ▶ je nach Instruktion sind nicht alle Schritte notwendig
  - ▶ *nop*: nur Instruction-Fetch
  - ▶ *jump*: kein Speicher- und Registerzugriff
  - ▶ *aluOp*: kein Speicherzugriff
- ▶ Pipeline kann auch feiner unterteilt werden (meist mehr Stufen)

## serielle Bearbeitung ohne Pipelining

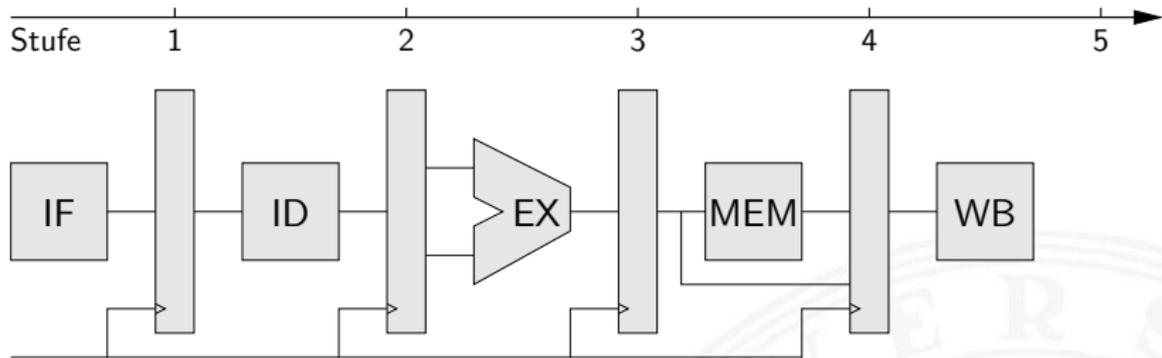


## Pipelining für die einzelnen Schritte der Befehlsausführung



- ▶ Befehle überlappend ausführen: neue Befehle holen, dann decodieren, während vorherige noch ausgeführt werden
- ▶ Register trennen Pipelinestufen

# Klassische 5-stufige Pipeline



- ▶ Grundidee der ursprünglichen RISC-Architekturen
- + Durchsatz ca.  $3 \dots 5 \times$  besser als serielle Ausführung
- + guter Kompromiss aus Leistung und Hardwareaufwand

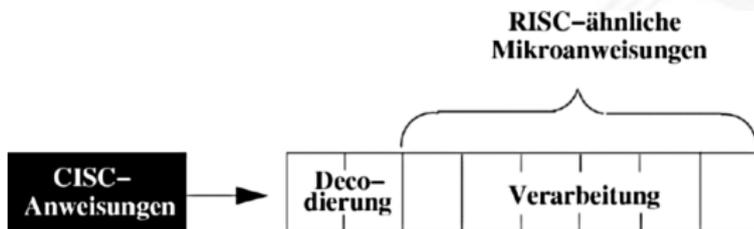
## ▶ MIPS-Architektur (aus Patterson, Hennessy [PH16])

▶ MIPS ohne Pipeline

▶ MIPS Pipeline

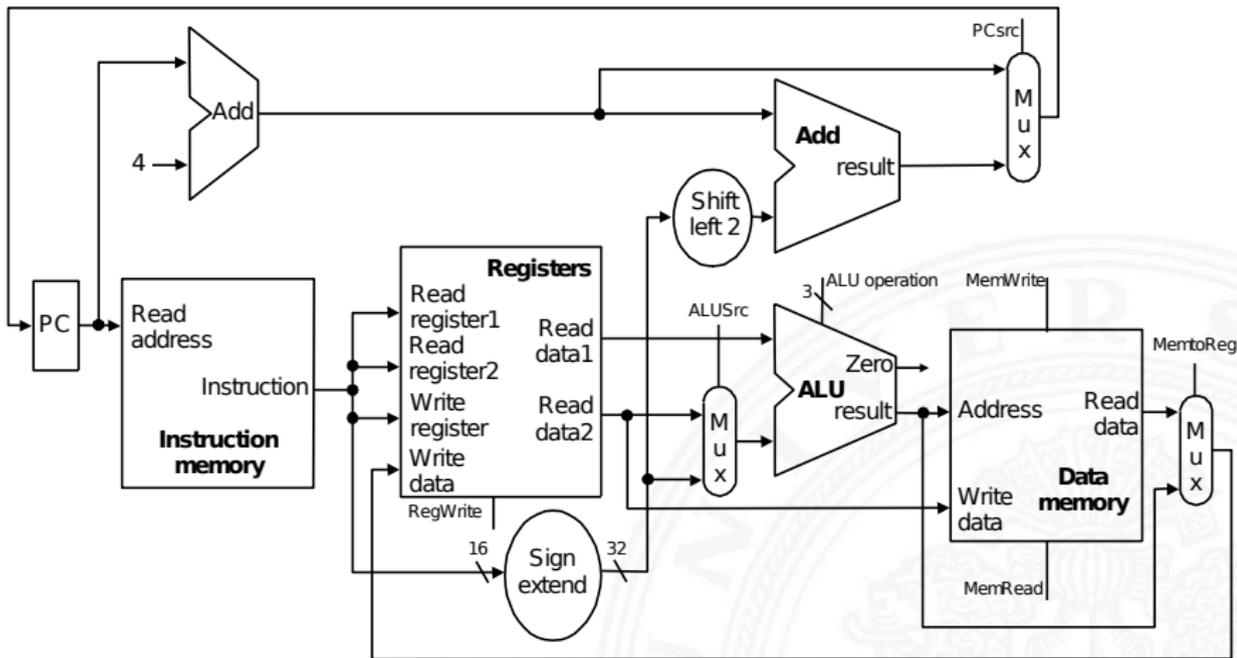
▶ Pipeline Schema

- ▶ RISC ISA: Pipelining wird direkt umgesetzt
  - ▶ Befehlssätze auf diese Pipeline hin optimiert
  - ▶ IBM-801, MIPS R-2000/R-3000 (1985), SPARC (1987)
- ▶ CISC-Architekturen heute ebenfalls mit Pipeline
  - ▶ Motorola 68020 (zweistufige Pipeline, 1984), Intel 486 (1989), Pentium (1993) ...
  - ▶ Befehle in Folgen RISC-ähnlicher Anweisungen umsetzen



- + CISC-Software bleibt lauffähig
- + Befehlssatz wird um neue RISC Befehle erweitert

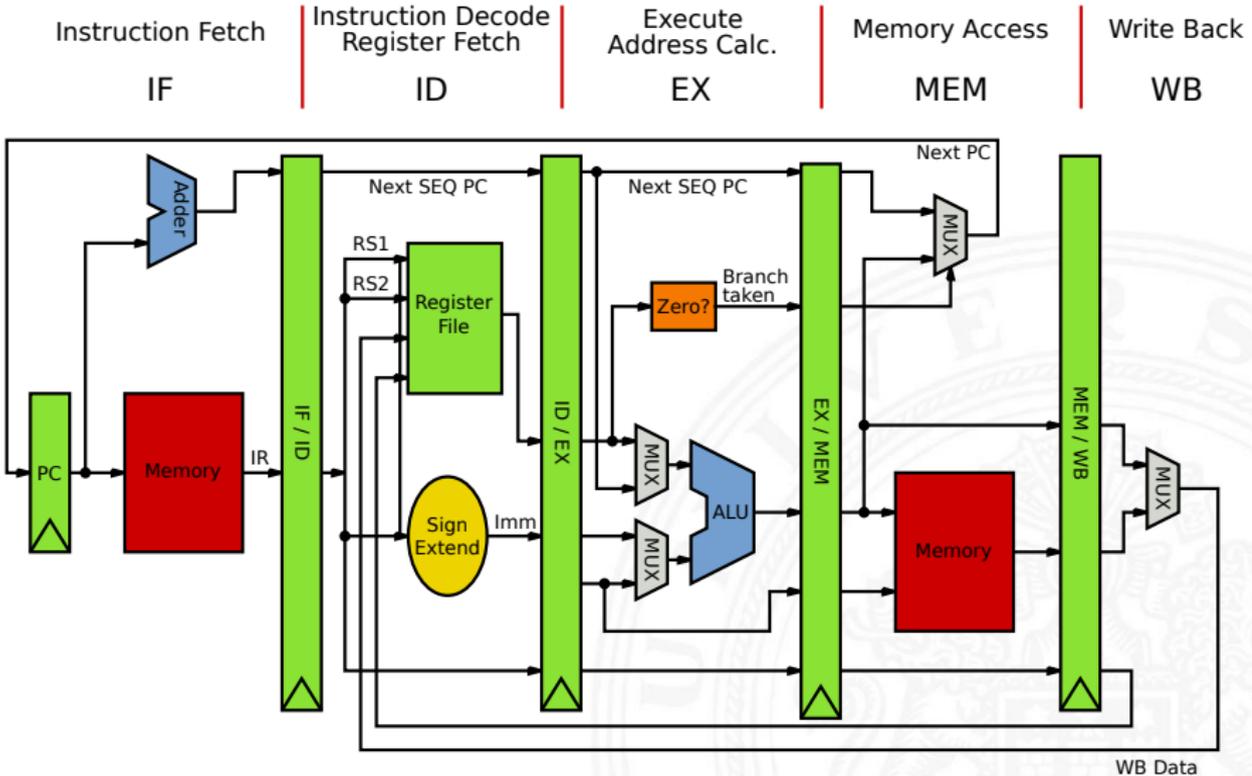
# MIPS: serielle Realisierung ohne Pipeline



längster Pfad: PC - IM - REG - MUX - ALU - DM - MUX - PC/REG

[PH16]

# MIPS: mit 5-stufiger Pipeline



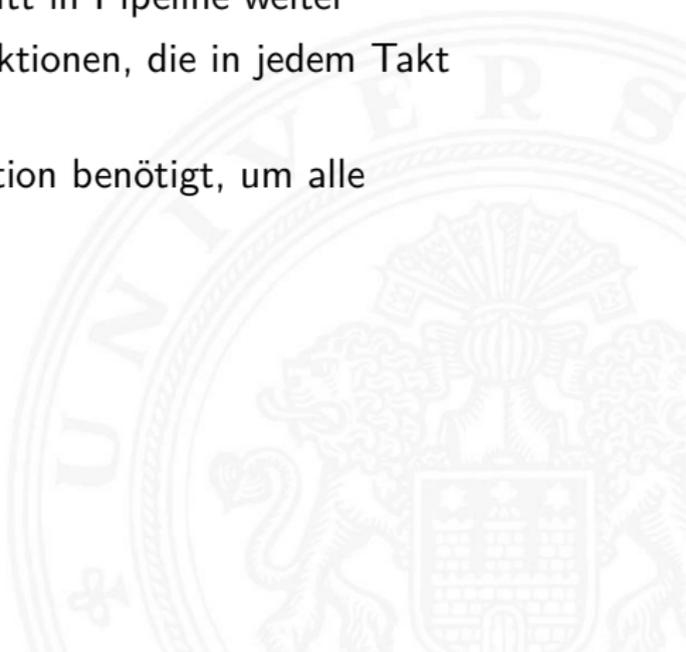
# MIPS: mit 5-stufiger Pipeline (cont.)

- ▶ die Hardwareblöcke selbst sind unverändert
  - ▶ PC, Addierer fürs Inkrementieren des PC
  - ▶ Registerbank
  - ▶ Rechenwerke: ALU, sign-extend, zero-check
  - ▶ Multiplexer und Leitungen/Busse
- ▶ vier zusätzliche Pipeline-Register
  - ▶ die (decodierten) Befehle
  - ▶ alle Zwischenergebnisse
  - ▶ alle intern benötigten Statussignale
- ▶ längster Pfad zwischen Registern jetzt eine der 5 Stufen
- ▶ aber wie wirkt sich das auf die Software aus?!



## Begriffe

- ▶ **Pipeline-Stage:** einzelne Stufe der Pipeline
- ▶ **Pipeline Machine Cycle:**  
Instruktion kommt einen Schritt in Pipeline weiter
- ▶ **Durchsatz:** Anzahl der Instruktionen, die in jedem Takt abgeschlossen werden
- ▶ **Latenz:** Zeit, die eine Instruktion benötigt, um alle Pipelinestufen zu durchlaufen



## Vor- und Nachteile

- + Schaltnetze in kleinere Blöcke aufgeteilt  $\Rightarrow$  höherer Takt
- + im Idealfall ein neuer Befehl pro Takt gestartet  $\Rightarrow$  höherer Durchsatz, bessere Performanz
- + geringer Zusatzaufwand an Hardware
- + Pipelining ist für den Programmierer nicht direkt sichtbar!
  - Achtung: Daten-/Kontrollabhängigkeiten (s.u.)
- Latenz wird nicht verbessert, bleibt bestenfalls gleich
- Pipeline Takt limitiert durch langsamste Pipelinestufe  
unausgewogene Pipelinestufen reduzieren den Takt und damit die Performanz
- zusätzliche Zeiten, um Pipeline zu füllen bzw. zu leeren

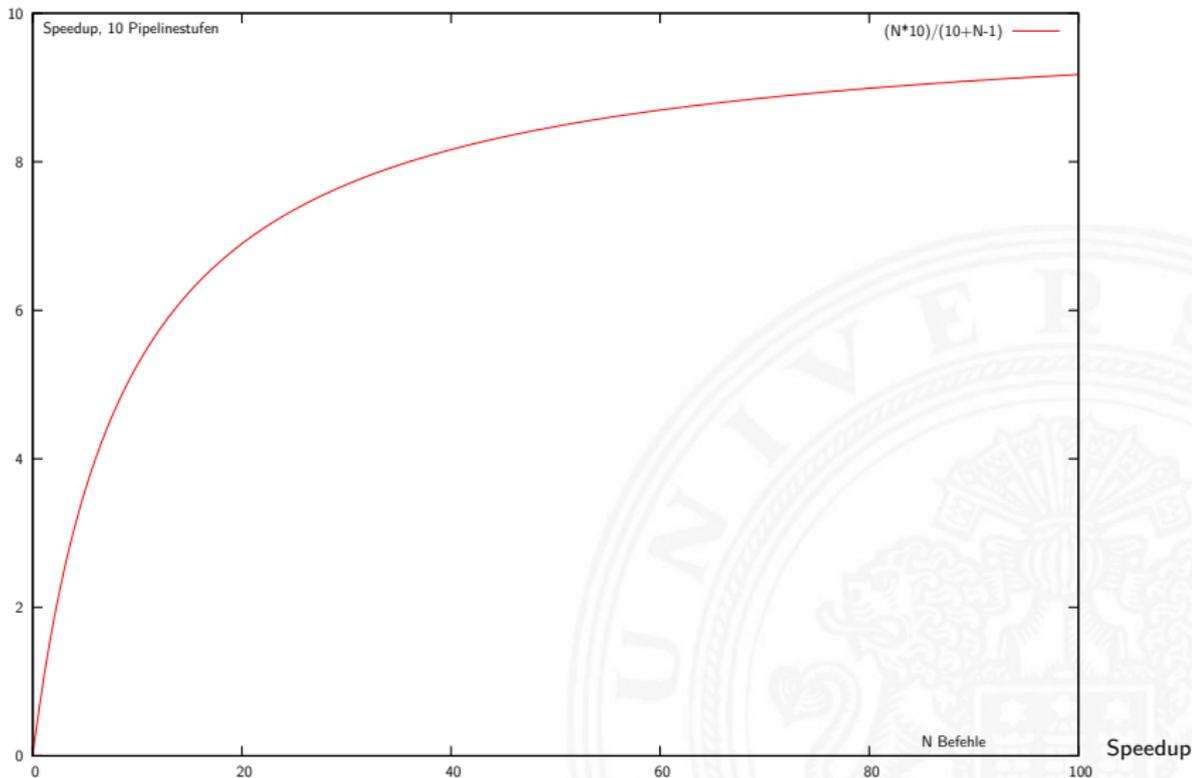
## Analyse

- ▶  $N$  Instruktionen;  $K$  Pipelinestufen
- ▶ ohne Pipeline:  $N \cdot K$  Taktzyklen
- ▶ mit Pipeline:  $K + N - 1$  Taktzyklen
  
- ▶ „Speedup“  $S = \frac{N \cdot K}{K + N - 1}$ ,  $\lim_{N \rightarrow \infty} S = K$

⇒ ein großer Speedup wird erreicht durch

- ▶ große Pipelintiefe:  $K$
- ▶ lange Instruktionssequenzen:  $N$
  
- ▶ wegen Daten- und Kontrollabhängigkeiten nicht erreichbar
- ▶ außerdem: Register-Overhead nicht berücksichtigt

# Prozessorpipeline – Bewertung (cont.)



- ▶ größeres  $K$  wirkt sich direkt auf den Durchsatz aus
- ▶ weniger Logik zwischen den Registern, höhere Taktfrequenzen
- ▶ zusätzlich: technologischer Fortschritt (1985 ... 2017)
- ▶ Beispiele

CPU	Pipelinestufen	Taktfrequenz [MHz]
80386	1	33
Pentium	5	300
Motorola G4	4	500
Motorola G4e	7	1000
Pentium II/III	12	1400
Athlon XP	10/15	2500
Athlon 64, Opteron	12/17	$\leq 3000$
Pentium 4	20	$\leq 3800$
Core i-..	14/19	$\leq 4200$
Ryzen ..	19	$\leq 4000$

Architekturentscheidungen, die sich auf das Pipelining auswirken

gut für Pipelining

- ▶ gleiche Instruktionslänge
- ▶ wenige Instruktionsformate
- ▶ Load/Store Architektur

## BASIC INSTRUCTION FORMATS

<b>R</b>	opcode	rs	rt	rd	shamt	funct	
	31	26 25	21 20	16 15	11 10	6 5	0
<b>I</b>	opcode	rs	rt	immediate			
	31	26 25	21 20	16 15	0		
<b>J</b>	opcode	address					
	31	26 25					0

## FLOATING-POINT INSTRUCTION FORMATS

<b>FR</b>	opcode	fmt	ft	fs	fd	funct	
	31	26 25	21 20	16 15	11 10	6 5	0
<b>FI</b>	opcode	fmt	ft	immediate			
	31	26 25	21 20	16 15	0		

MIPS-Befehlsformate [PH16]



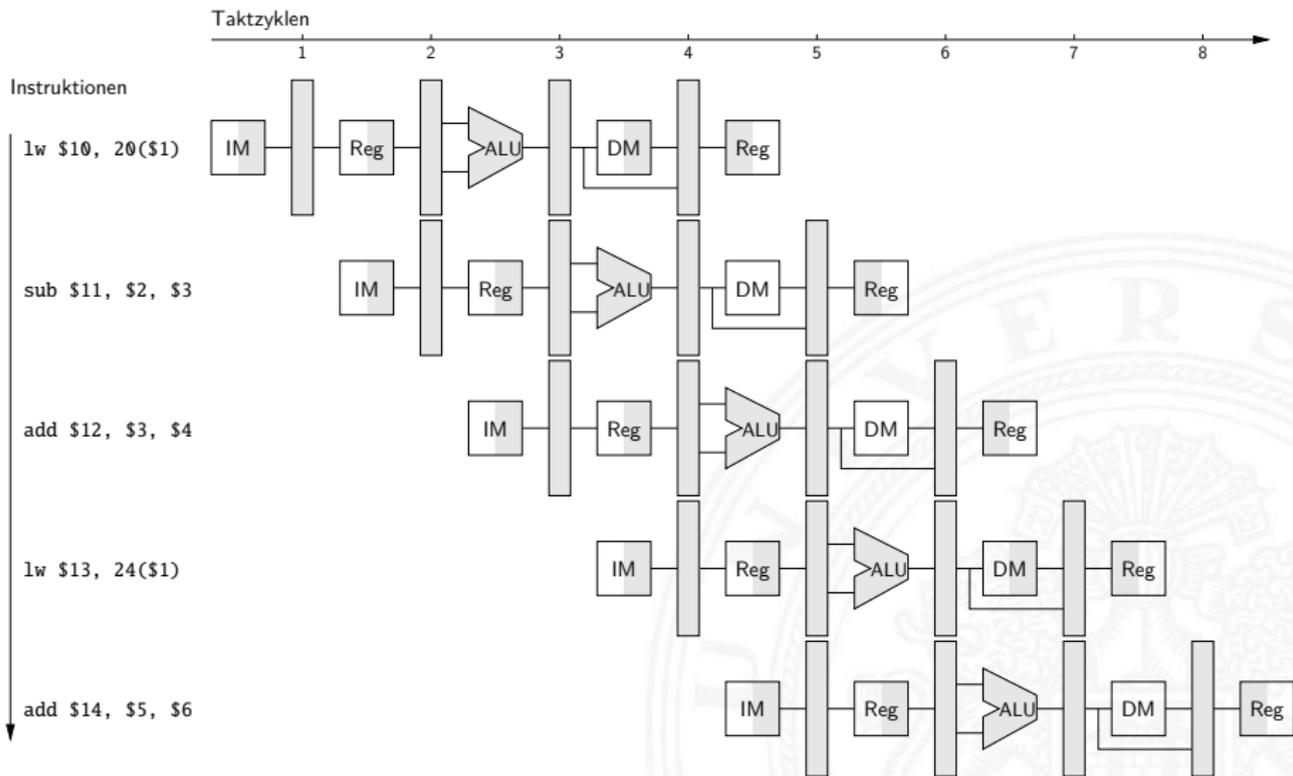
**schlecht** für Pipelining: *Pipelinekonflikte / -Hazards*

- ▶ Strukturkonflikt: gleichzeitiger Zugriff auf eine Ressource durch mehrere Pipelinestufen
- ▶ Datenkonflikt: Ergebnisse von Instruktionen werden innerhalb der Pipeline benötigt
- ▶ Steuerkonflikt: Sprungbefehle in der Pipelinesequenz

**sehr schlecht** für Pipelining

- ▶ Unterbrechung des Programmkontexts („*Context Switch*“): Interrupt, System-Call, Exception, Prozesswechsel ...

# Pipeline Schema



# Motivation: ständig steigende Anforderungen

- ▶ Simulationen, Wettervorhersage, Gentechnologie ...
- ▶ Datenbanken, Transaktionssysteme, Suchmaschinen ...
- ▶ Softwareentwicklung, Schaltungsentwurf ...
  
- ▶ Performanz eines einzelnen Prozessors ist begrenzt
- ⇒ Hardware: Verteilen eines Programms auf mehrere Prozessoren
- ⇒ Software: kommunizierende Prozesse und Multithreading

## Vielfältige Möglichkeiten

- ▶ wie viele und welche Prozessoren?
- ▶ Kommunikation zwischen den Prozessoren?
- ▶ Programmierung und Software/Tools?

- ▶ **Antwortzeit:** die Gesamtzeit zwischen Programmstart und -ende, inklusive I/O-Operationen, Unterbrechungen etc. („wall clock time“, „response time“, „execution time“)

$$\text{performance} = \frac{1}{\text{execution time}}$$

- ▶ **Ausführungszeit:** reine CPU-Zeit

```
Unix time-Befehl: 597.07u 0.15s 9:57.61 99.9%
                  597.07 user CPU time [sec.]
                   0.15 system CPU time
                   9:57.61 elapsed time
                   99.9 CPU/elapsed [%]
```

- ▶ **Durchsatz:** Anzahl der bearbeiteten Programme / Zeit

- ▶ **Speedup:**  $s = \frac{\text{performance } x}{\text{performance } y} = \frac{\text{execution time } y}{\text{execution time } x}$

# Wie kann man Performanz verbessern?

- ▶ Ausführungszeit =  $\langle \text{Anzahl der Befehle} \rangle \cdot \langle \text{Zeit pro Befehl} \rangle$
- ▶ weniger Befehle
  - ▶ *gute* Algorithmen
  - ▶ bessere Compiler
  - ▶ mächtigere Befehle (CISC)
- ▶ weniger Zeit pro Befehl
  - ▶ bessere Technologie
  - ▶ Architektur: Pipelining, Caches ...
  - ▶ einfachere Befehle (RISC)
- ▶ parallele Ausführung
  - ▶ superskalare Architekturen, SIMD, MIMD



Möglicher Speedup durch Beschleunigung einer Teilfunktion?

1. **System** berechnet Programm  $P$ ,  
darin Funktion  $X$  mit Anteil  $0 < f < 1$  der Gesamtzeit
2. **System** berechnet Programm  $P$ ,  
Funktion  $X'$  ist schneller als  $X$  mit Speedup  $S_X$

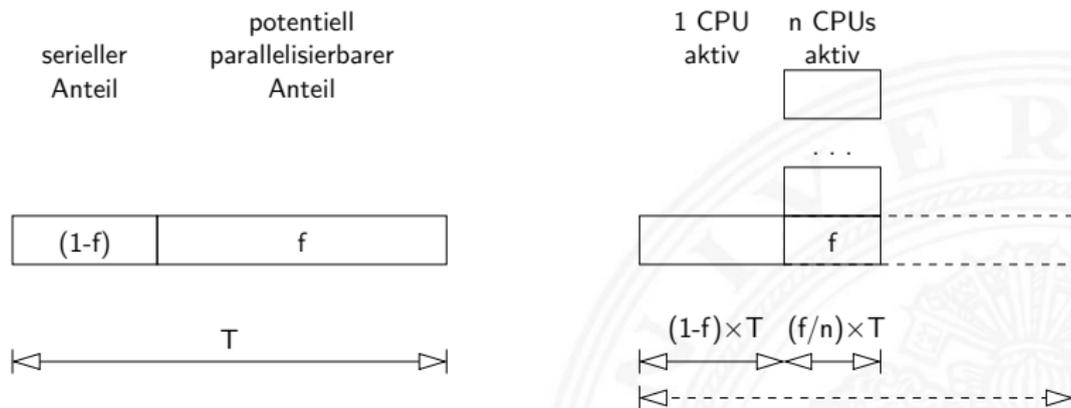
Amdahl's Gesetz

Gene Amdahl, Architekt der IBM S/360, 1967

► Speedup 
$$S_{gesamt} = \frac{1}{(1 - f) + f/S_X}$$

Speedup  $S_{gesamt} = \frac{1}{(1-f) + f/S_x}$

- ▶ nur ein Teil  $f$  des Gesamtproblems wird beschleunigt



- ⇒ möglichst großer Anteil  $f$
- ⇒ Optimierung lohnt nur für relevante Operationen  
allgemeingültig: entsprechend auch für Projektplanung, Verkehr ...

- ▶ ursprüngliche Idee: Parallelrechner mit  $n$ -Prozessoren

$$\text{Speedup} \quad S_{\text{gesamt}} = \frac{1}{(1 - f) + k(n) + f/n}$$

$n$  # Prozessoren als Verbesserungsfaktor

$f$  Anteil parallelisierbarer Berechnung

$1 - f$  Anteil nicht parallelisierbarer Berechnung

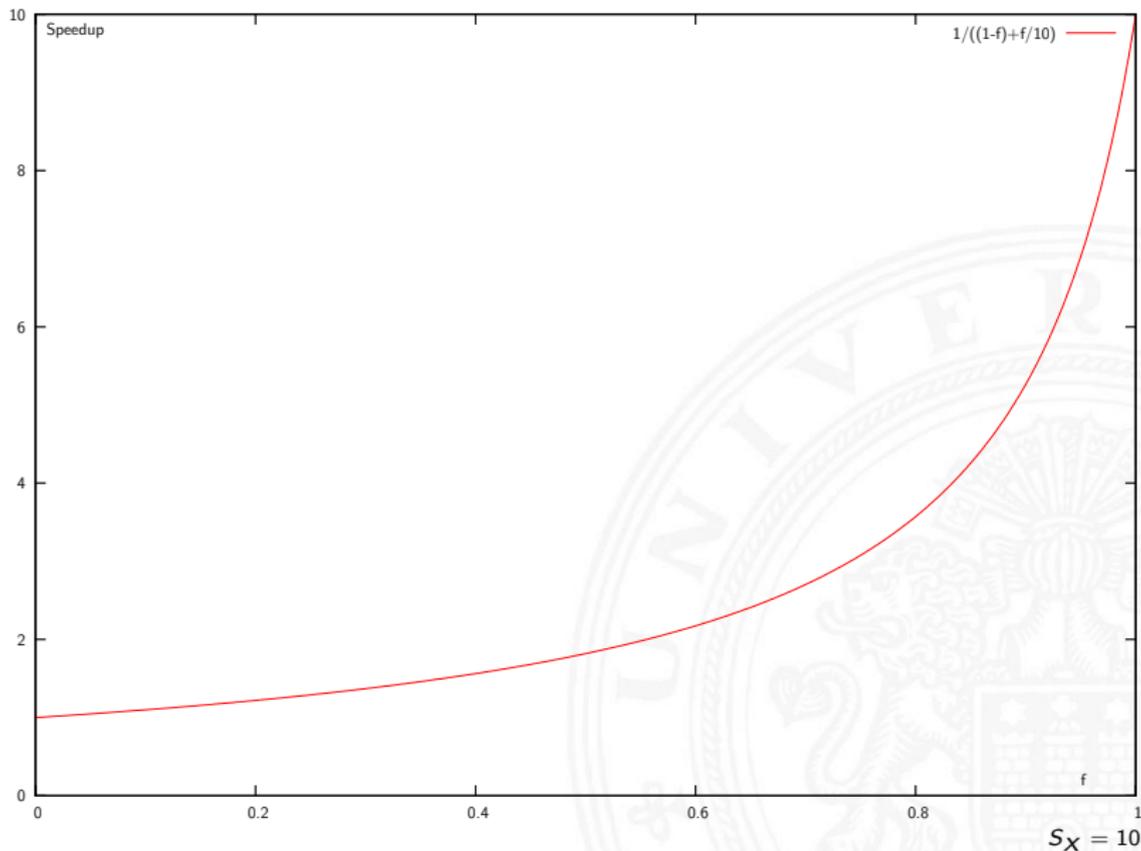
$k()$  Kommunikationsoverhead zwischen den Prozessoren

- ▶ Aufgaben verteilen
- ▶ Arbeit koordinieren
- ▶ Ergebnisse zusammensammeln

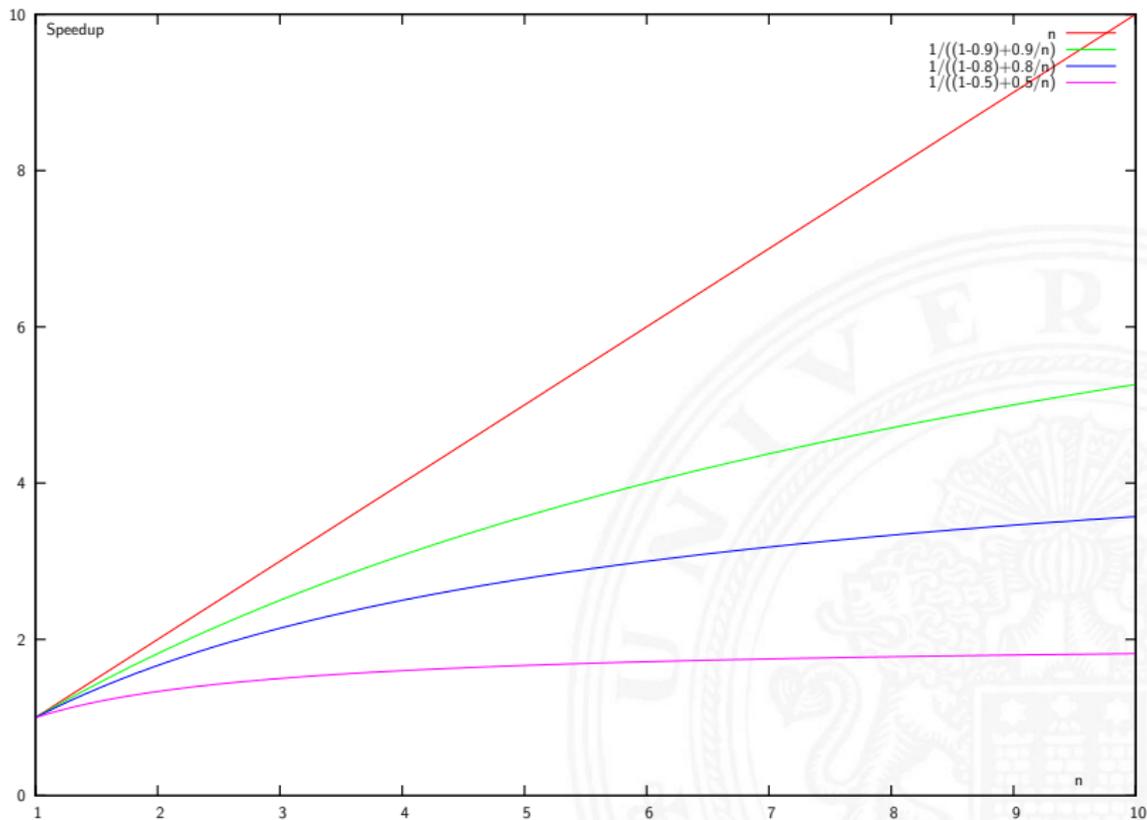
$S_X$	$f$	$S_{gesamt}$
10	0,1	$1/(0,9 + 0,01) = 1,1$
2	0,5	$1/(0,5 + 0,25) = 1,33$
2	0,9	$1/(0,1 + 0,45) = 1,82$
1,1	0,98	$1/(0,02 + 0,89) = 1,1$
4	0,5	$1/(0,5 + 0,125) = 1,6$
4536	0,8	$1/(0,2 + 0,0\dots) = 5,0$
9072	0,99	$1/(0,01 + 0,0\dots) = 98,92$

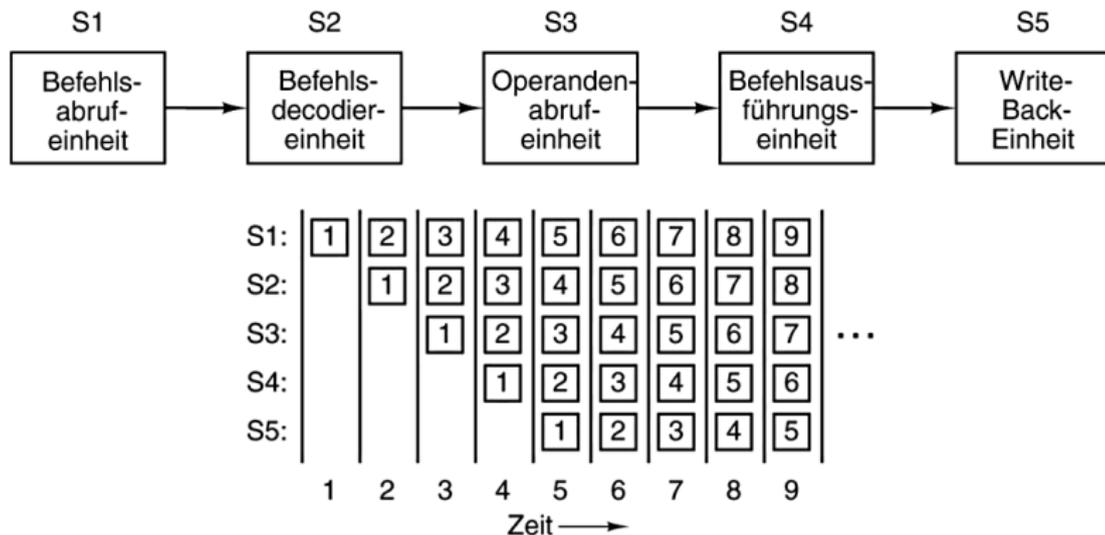
- ▶ Optimierung bringt nichts, wenn der nicht beschleunigte „serielle“ Anteil  $(1 - f)$  eines Programms überwiegt
- $n$ -Prozessoren (große  $S_X$ ) wirken *nicht linear*
- die erreichbare Parallelität in Hochsprachen-Programmen ist gering, typisch  $S_{gesamt} \leq 4$
- + viele Prozesse/Tasks, unabhängig voneinander: Serveranwendungen, virtuelle Maschinen, Container ...

# Amdahl's Gesetz: Beispiele (cont.)



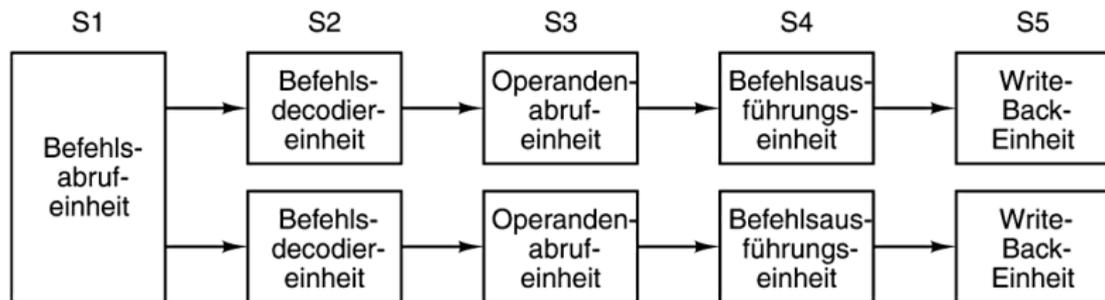
# Amdahl's Gesetz: Beispiele (cont.)





[TA14]

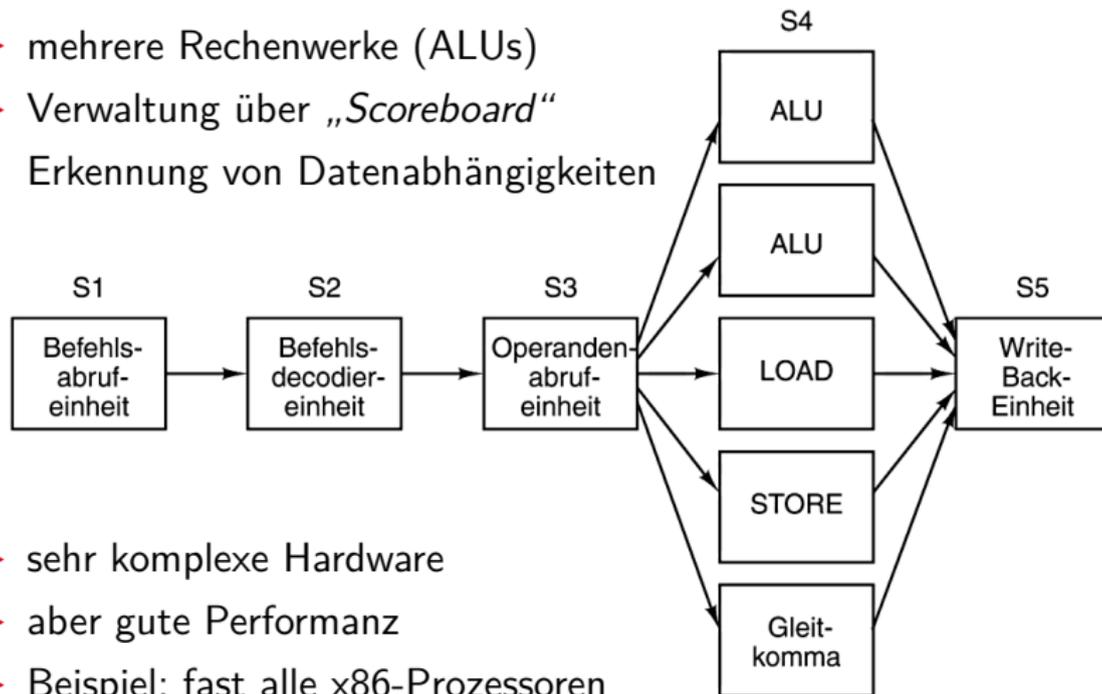
- ▶ Befehl in kleinere, schnellere Schritte aufteilen ⇒ höherer Takt
- ▶ mehrere Instruktionen überlappt ausführen ⇒ höherer Durchsatz



[TA14]

- ▶ im Bild jeweils zwei Operationen pro Pipelinestufe
- ▶ parallele („superskalare“) Ausführung
- ▶ komplexe Hardware (Daten- und Kontrollabhängigkeiten)
- ▶ Beispiel: Pentium

- ▶ mehrere Rechenwerke (ALUs)
- ▶ Verwaltung über „Scoreboard“  
Erkennung von Datenabhängigkeiten



- ▶ sehr komplexe Hardware
- ▶ aber gute Performanz
- ▶ Beispiel: fast alle x86-Prozessoren seit Pentium II

[TA14]

- ▶ Superskalare CPUs besitzen mehrere Recheneinheiten: 4...12
  - ▶ in jedem Takt werden (dynamisch) mehrere Instruktionen eines konventionell linearen Instruktionsstroms abgearbeitet
- ⇒ ILP (Instruction **L**evel **P**arallelism)
- ▶ Hardware verteilt initiierte Instruktionen auf Recheneinheiten
  - ▶ pro Takt kann *mehr als eine* Instruktion initiiert werden  
Die Anzahl wird dynamisch von der Hardware bestimmt:  
0... „*Instruction Issue Bandwidth*“
- + sehr effizient, alle modernen CPUs sind superskalar
- Abhängigkeiten zwischen Instruktionen sind der Engpass, das Problem der Hazards wird verschärft

## Datenabhängigkeiten

- ▶ RAW – **R**ead **A**fter **W**rite  
Instruktion  $I_x$  darf Datum erst lesen, wenn  $I_{x-n}$  geschrieben hat
- ▶ WAR – **W**rite **A**fter **R**ead  
Instruktion  $I_x$  darf Datum erst schreiben, wenn  $I_{x-n}$  gelesen hat
- ▶ WAW – **W**rite **A**fter **W**rite  
Instruktion  $I_x$  darf Datum erst überschreiben, wenn  $I_{x-n}$  geschrieben hat

## Datenabhängigkeiten superskalarer Prozessoren

- ▶ RAW: echte Abhängigkeit; Forwarding ist kaum möglich und in superskalaren Pipelines extrem aufwändig
- ▶ WAR, WAW: „*Register Renaming*“ als Lösung

## „Register Renaming“

- ▶ Hardware löst (einige) Datenabhängigkeiten der Pipeline auf
- ▶ zwei Arten von Registersätzen
  1. Architektur-Register: „logische Register“ der ISA
  2. viele Hardware-Register: „Rename Register“ (180 Int, 168 FP)
    - ▶ dynamische Abbildung von ISA- auf Hardware-Register
- Kontextwechsel aufwändig: „Rename Register“ speichern

## ▶ Beispiel

### ▶ Originalcode

```
tmp = a + b;  
res1 = c + tmp;  
tmp = d + e;  
res2 = tmp - f;
```

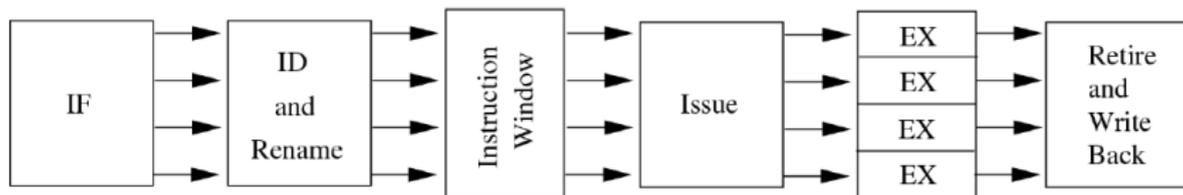
### nach Renaming

```
tmp1 = a + b;  
res1 = c + tmp1;  
tmp2 = d + e;  
res2 = tmp2 - f;  
tmp = tmp2;
```

### ▶ Parallelisierung des modifizierten Codes

```
tmp1 = a + b;          tmp2 = d + e;  
res1 = c + tmp1;      res2 = tmp2 - f;      tmp = tmp2;
```

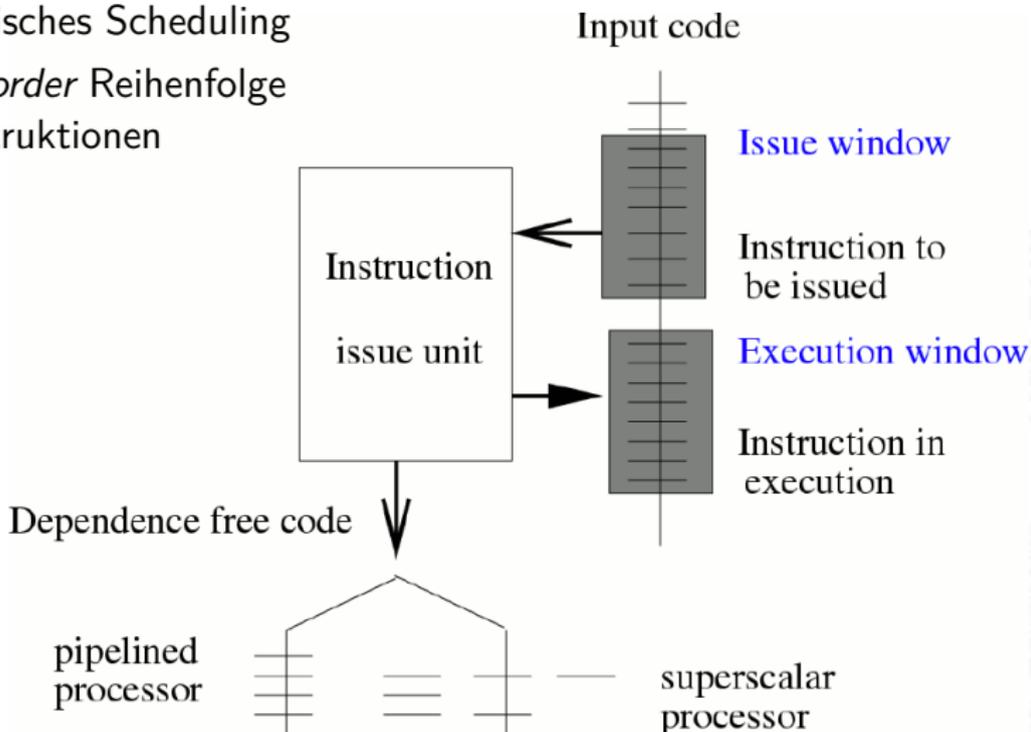
## Aufbau der superskalaren Pipeline



- ▶ lange Pipelines mit vielen Phasen: Fetch (Prefetch, Predecode), Decode / Register-Renaming, Issue, Dispatch, Execute, Retire (Commit, Complete / Reorder), Write-Back
- ▶ je nach Implementation unterschiedlich aufgeteilt
- ▶ entscheidend für superskalare Architektur sind die Schritte vor den ALUs: Issue, Dispatch  $\Rightarrow$  *out-of-order* Ausführung  
nach "-" : Retire  $\Rightarrow$  *in-order* Ergebnisse

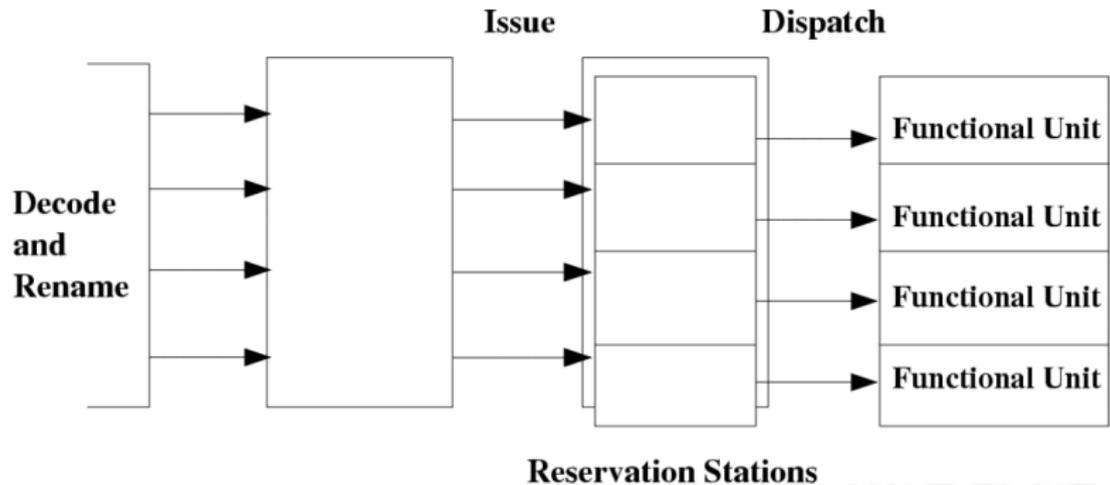
# Superskalar – Pipeline (cont.)

- ▶ Dynamisches Scheduling
- ⇒ *out-of-order* Reihenfolge der Instruktionen



# Superskalar – Pipeline (cont.)

- ▶ Issue: globale Sicht  
Dispatch: getrennte Ausschnitte in „Reservation Stations“



- ▶ Reservation Station für jede Funktionseinheit
  - ▶ speichert: initiierte Instruktionen die auf Recheneinheit warten
  - ▶ –"– zugehörige Operanden
  - ▶ –"– ggf. Zusatzinformation
  - ▶ Instruktion bleibt blockiert, bis alle Parameter bekannt sind und wird dann an die zugehörige ALU weitergeleitet
- ▶ ggf. „Retire“-Stufe
  - ▶ Reorder-Buffer: erzeugt wieder *in-order* Reihenfolge
  - ▶ commit: „richtig ausgeführte“ Instruktionen gültig machen
  - ▶ abort: Instruktionen verwerfen, z.B. Sprungvorhersage falsch
- ▶ Dynamisches Scheduling: zuerst '67 in IBM 360 (R. Tomasulo)
  - ▶ Forwarding
  - ▶ Registerumbenennung und Reservation Stations

## Spezielle Probleme superskalarer Pipelines

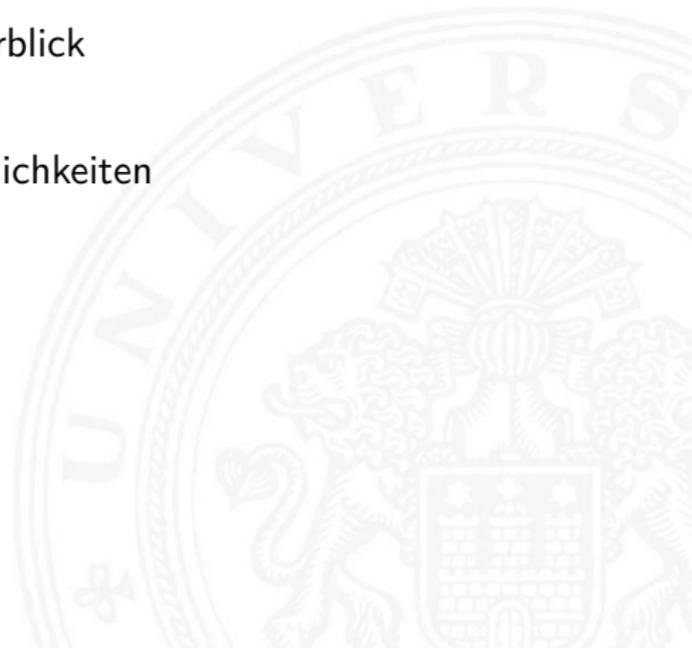
- komplexe Datenabhängigkeiten
  - ▶ die verschiedenen ALUs haben unterschiedliche Latenzzeiten
  - ▶ Befehle „warten“ in den Reservation Stations
- ⇒ Datenabhängigkeiten können sich mit jedem Takt ändern
- Kontrollflussabhängigkeiten:  
Anzahl der Instruktionen zwischen bedingten Sprüngen limitiert Anzahl parallelisierbarer Instruktionen
- ⇒ Kontextwechsel noch aufwändiger, muss ggf. warten
- ⇒ Optimierungstechniken wichtig
  - ▶ optimiertes (dynamisches) Scheduling: Scoreboard, Tomasulo-Algorithmus
  - ▶ „*Loop Unrolling*“ (längere Codesequenzen ohne Sprünge)



## Softwareunterstützung für Pipelining superskalarer Prozessoren „Software Pipelining“

- ▶ Codeoptimierungen beim Compilieren als Ersatz/Ergänzung zur Pipelineunterstützung durch Hardware
- ▶ Compiler hat „globalen“ Überblick

⇒ zusätzliche Optimierungsmöglichkeiten



- ▶ superskalare Architektur (mehrere ALUs)
- ▶ CISC-Befehle werden dynamisch in „ $\mu$ OPs“ (1...3) umgesetzt
- ▶ Ausführung der  $\mu$ OPs mit „Out of Order“ Maschine, wenn
  - ▶ Operanden verfügbar sind
  - ▶ funktionelle Einheit (ALU) frei ist
- ▶ Ausführung wird durch „Reservation Stations“ kontrolliert
  - ▶ beobachtet die Datenabhängigkeiten zwischen  $\mu$ OPs
  - ▶ teilt Ressourcen zu
- ▶ „Trace“ Cache
  - ▶ ersetzt traditionellen Anweisungscache
  - ▶ speichert Anweisungen in decodierter Form: Folgen von  $\mu$ OPs
  - ▶ reduziert benötigte Rate für den Anweisungsdecoder
- ▶ „Double pumped“ ALUs (2 Operationen pro Taktzyklus)

- ▶ große Pipelinelänge  $\Rightarrow$  sehr hohe Taktfrequenzen

## Basic Pentium III Processor Misprediction Pipeline

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Fetch	Fetch	Decode	Decode	Decode	Rename	ROB Rd	Rdy/Sch	Dispatch	Exec

## Basic Pentium 4 Processor Misprediction Pipeline

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
TC	Nxt IP	TC	Fetch	Drive	Alloc	Rename	Que	Sch	Sch	Sch	Disp	Disp	RF	RF	Ex	Flgs	Br Ck	Drive	

- ▶ umfangreiches Material von Intel unter:  
[ark.intel.com](http://ark.intel.com), [www.intel.com](http://www.intel.com)

# Beispiel: Pentium 4 / NetBurst Architektur (cont.)

14.2.2 Rechnerarchitektur II - Parallelität - Superskalare Rechner

64-040 Rechnerstrukturen und Betriebssysteme

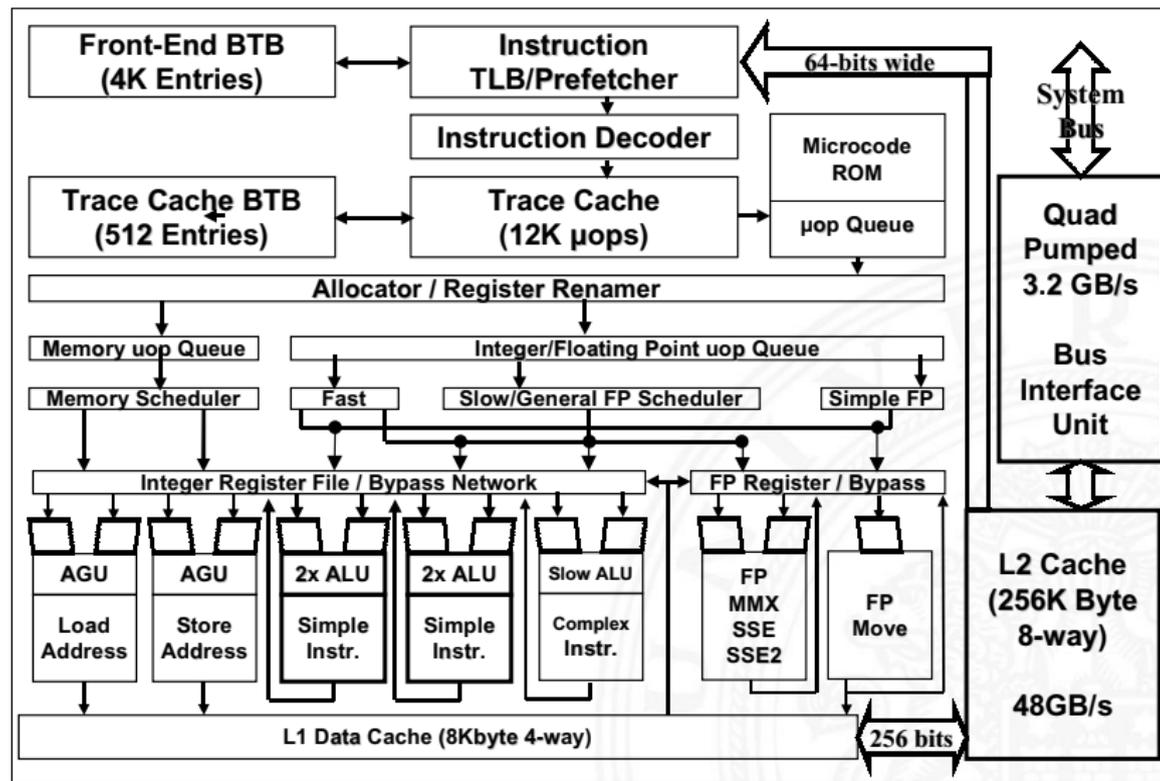
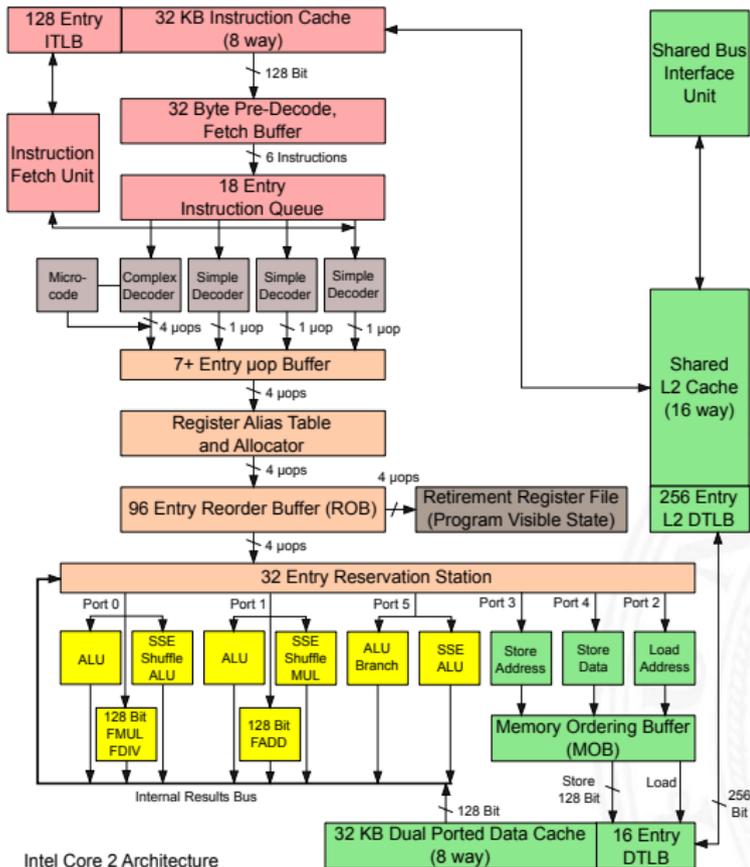


Figure 4: Pentium® 4 processor microarchitecture

Intel: Q1, 2001 [Intel]

# Beispiel: Core 2 Architektur



Intel Core 2 Architecture

- ▶ *Moore's Law* – technischer Fortschritt
  - ▶ immer schnellere Schaltungen
  - ▶ immer mehr Transistoren pro IC möglich
- ▶ Taktfrequenzen  $> 10$  GHz nicht sinnvoll realisierbar
  - ▶ hoher Takt nur bei einfacher Hardware möglich
  - ▶ Stromverbrauch bei CMOS proportional zum Takt
- ⇒ höhere Rechenleistung durch Mehrprozessorsysteme
  - ▶ Datenaustausch
    1. gemeinsamer Speicher („*Shared-memory*“) oder
    2. Verbindungsnetzwerk („*Message-passing*“)
  - ▶ Probleme
    - ▶ Overhead durch Kommunikation
    - ▶ Parallelität in den Algorithmen
    - ▶ Komplexität bei der Programmierung



**SISD** „*Single Instruction, Single Data*“

- ▶ jeder klassische von-Neumann Rechner (z.B. PC)

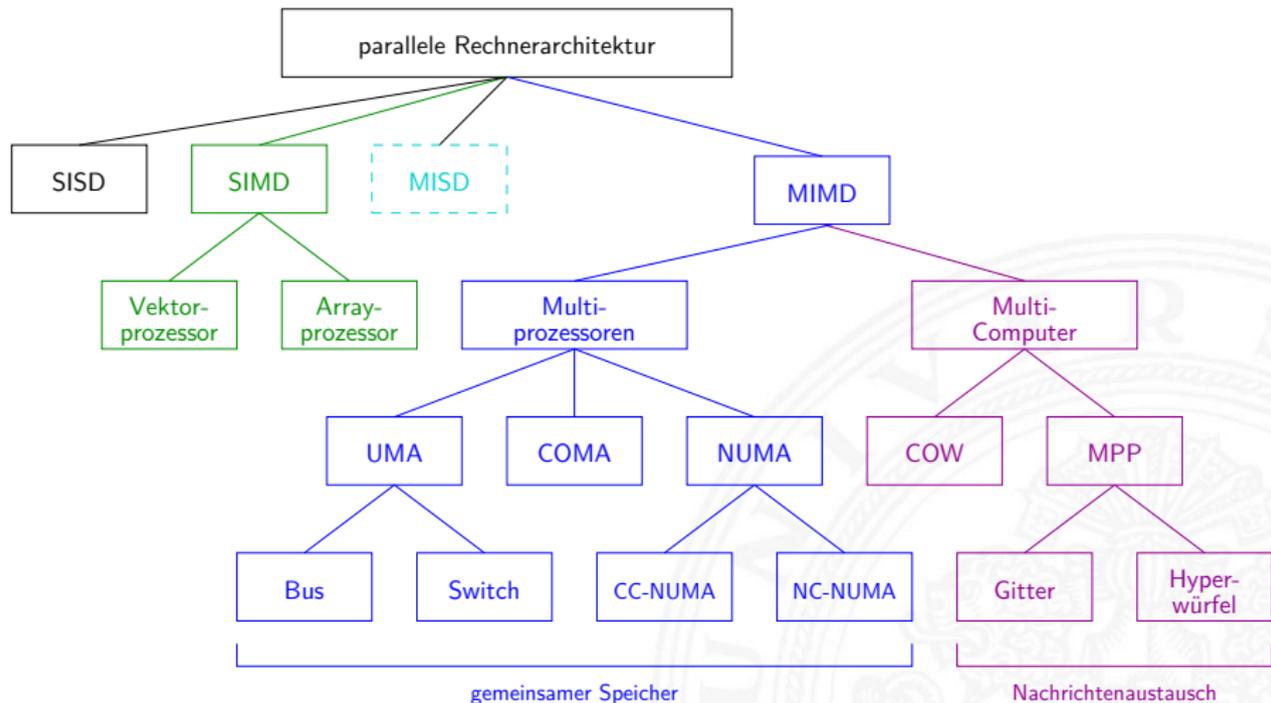
**SIMD** „*Single Instruction, Multiple Data*“

- ▶ Vektorrechner/Feldrechner  
z.B. Connection-Machine 2: 65 536 Prozessoren
- ▶ Erweiterungen in Befehlssätzen: superskalare Recheneinheiten werden direkt angesprochen  
z.B. x86 MMX, SSE, VLIW-Befehle: 2...8 fach parallel

**MIMD** „*Multiple Instruction, Multiple Data*“

- ▶ Multiprozessormaschinen  
z.B. Compute-Cluster, aber auch Multi-Core CPU

**MISD** „*Multiple Instruction, Single Data*“ :-)



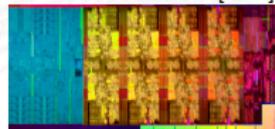
[TA14]

- ▶ Programmierung: ein ungelöstes Problem
  - ▶ Aufteilung eines Programms auf die CPUs/Rechenknoten?
    - ▶ insbesondere bei komplexen Kommunikationsnetzwerken
- ▶ Programme sind nur teilweise parallelisierbar
  - ▶ Parallelität einzelner Programme: kleiner 8
    - gilt für Desktop-, Server-, Datenbankanwendungen etc.
  - ⇒ hochgradig parallele Rechner sind dann Verschwendung
- ▶ *Wohin mit den Transistoren aus „Moore's Law“?*
  - ⇒ SMP-/Mehrkern-CPU's (2...64 Proz.) sind technisch attraktiv
- ▶ Grafikprozessoren (GPUs)
  - ▶ neben 3D-Grafik zunehmender Computing-Einsatz (OpenCL)
  - ▶ Anwendungen: Numerik, Simulation, „Machine Learning“ ...
  - ▶ hohe Fließkomma-Rechenleistung

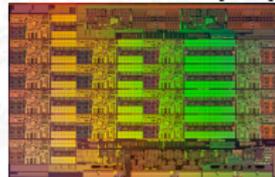
- ▶ mehrere (gleichartige) Prozessoren
- ▶ gemeinsamer Hauptspeicher und I/O-Einheiten
- ▶ Zugriff über Verbindungsnetzwerk oder Bus
- ▶ geringer Kommunikationsoverhead
- + Bus-basierte Systeme sind sehr kostengünstig
- aber schlecht skalierbar: Bus als Flaschenhals!
- Konsistenz der Daten
  - ▶ lokale Caches für gute Performanz notwendig
  - ▶ Hauptspeicher und Cache(s): Cache-Kohärenz  
MESI-Protokoll und „*Snooping*“
- siehe 14.3 Speicherhierarchie – Cache Speicher
  - ▶ Registerinhalte: ? **problematisch**
- Prozesse wechseln CPUs: „*Hopping*“
  - ▶ Multi-Core Prozessoren sind „SMP on-a-chip“



8-Kern Core-i9 9xxx [Intel]

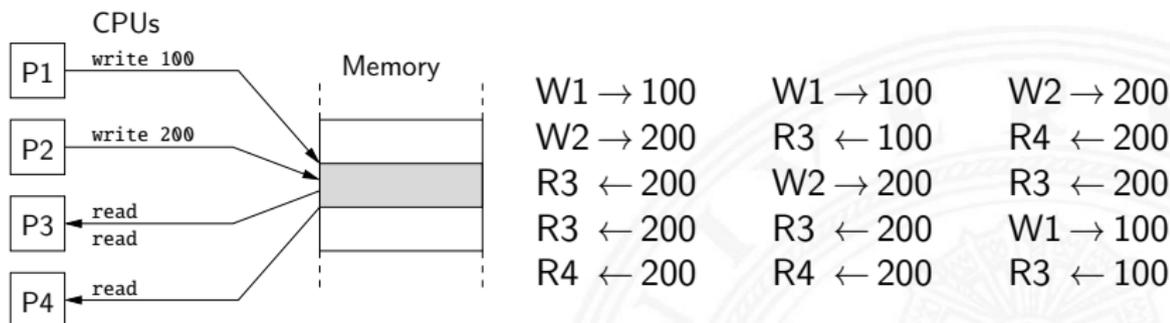


18-Kern Xeon E7 v3 [Intel]



## Symmetric Multiprocessing

- ▶ alle CPUs gleichrangig, Zugriff auf Speicher und I/O
- ▶ Konsistenz: *Gleichzeitiger Zugriff auf eine Speicheradresse?*



⇒ „Locking“ Mechanismen und Mutexe

- ▶ spez. Befehle, atomare Operationen, Semaphore etc.
  - ▶ explizit im Code zu programmieren
- siehe 15.3 Betriebssysteme – Synchronisation und Kommunikation

Cache für schnelle Prozessoren notwendig

- ▶ jede CPU hat eigene Cache (L1, L2 ...)
- ▶ aber gemeinsamer Hauptspeicher

Problem der *Cache-Kohärenz*

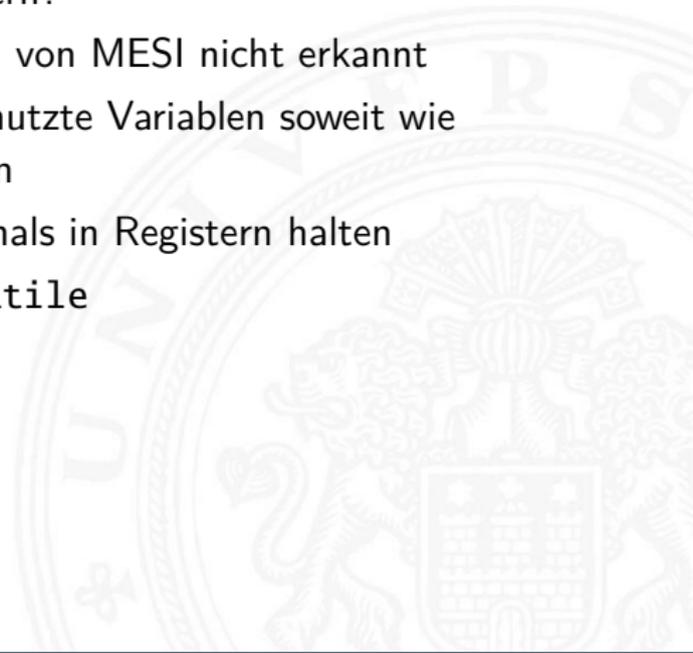
- ▶ Prozessor  $P_2$  greift auf Daten zu, die im Cache von  $P_1$  liegen
    - ▶  $P_2$  Lesezugriff:  $P_1$  muss seinen Wert  $P_2$  liefern
    - ▶  $P_2$  Schreibzugriff:  $P_1$  muss Wert von  $P_2$  übernehmen oder seinen Cache ungültig machen
    - ▶ Was ist mit *gleichzeitigen Zugriffen* von  $P_1, P_2$ ?
  - ▶ diverse Protokolle zur Cache-Kohärenz
    - ▶ z.B. MESI-Protokoll mit „*Snooping*“  
*Modified, Exclusive, Shared, Invalid*
    - ▶ Caches enthalten Wert, Tag und 2 bit MESI-Zustand
- siehe 14.3 *Speicherhierarchie – Cache Speicher*, ab Folie 1099



- ▶ MESI-Verfahren garantiert Cache-Kohärenz für Werte im Cache und im Hauptspeicher

**Vorsicht:** Was ist mit den Registern?

- ▶ Variablen in Registern werden von MESI nicht erkannt
- ▶ Compiler versucht, häufig benutzte Variablen soweit wie möglich in Registern zu halten
- ▶ globale/*shared*-Variablen niemals in Registern halten
- ▶ Java, C: Deklaration als *volatile*



# SMP: Erreichbarer Speedup (bis 32 Threads)

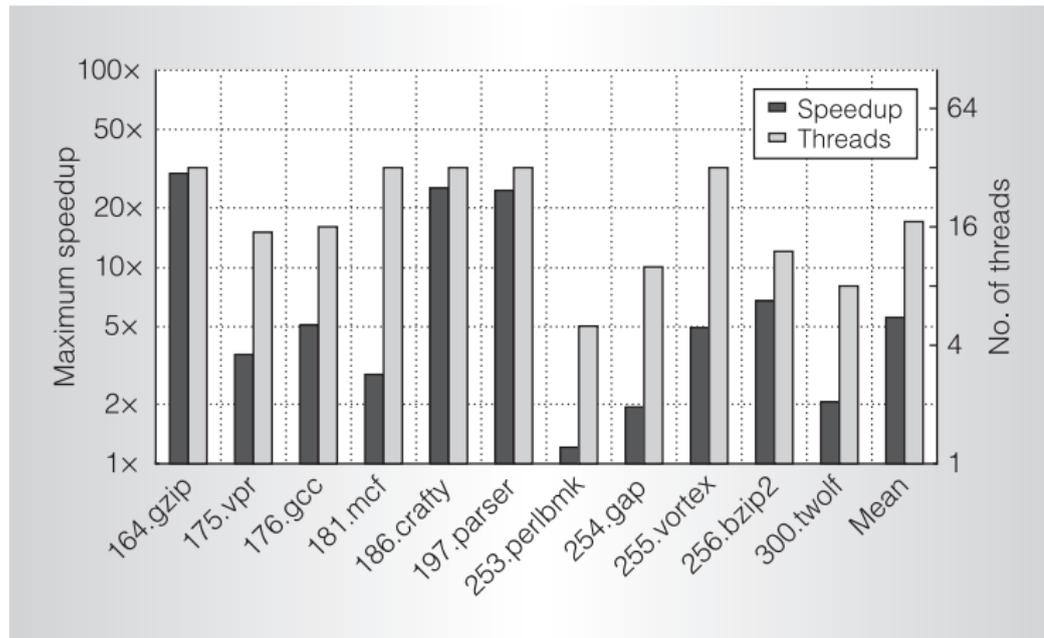
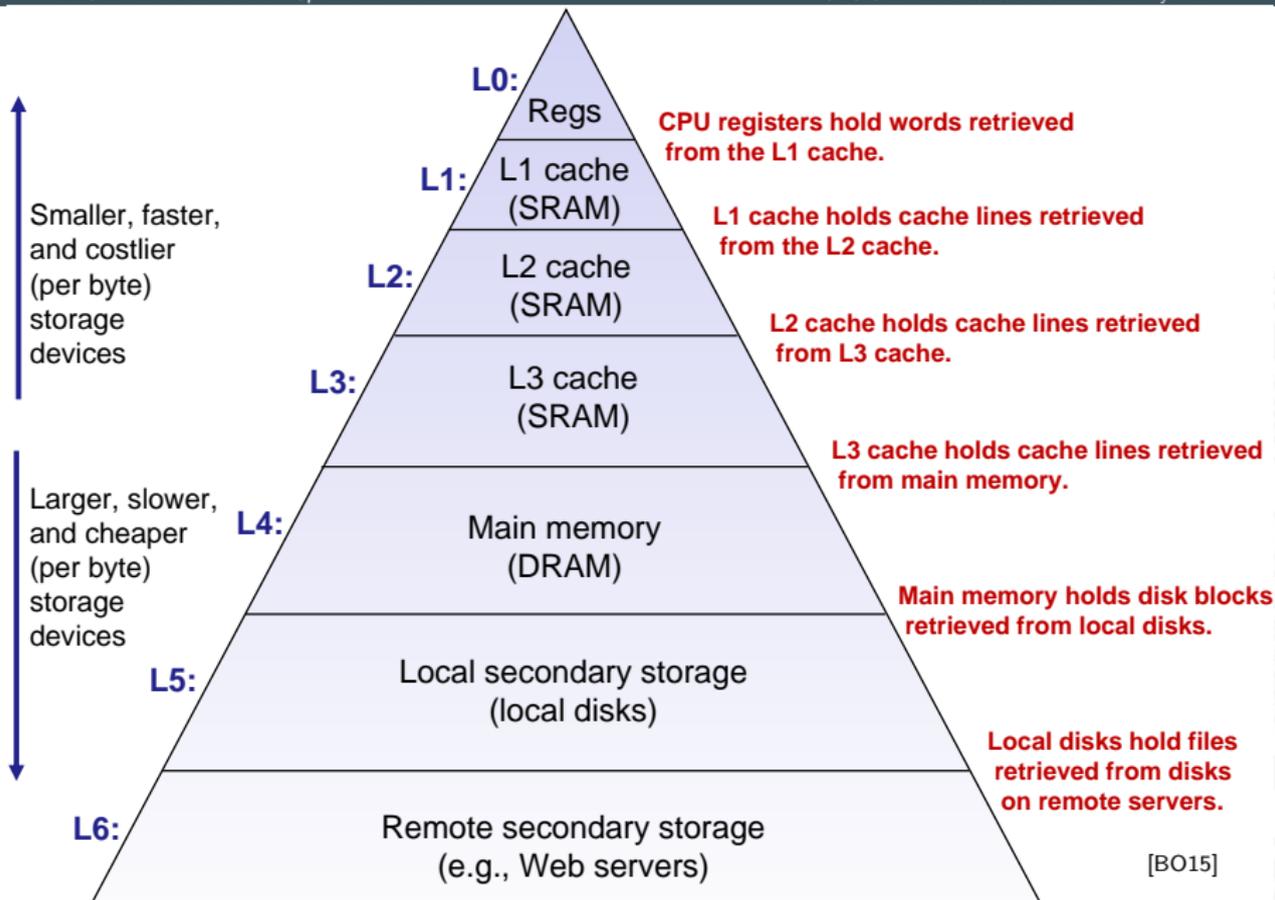


Figure 4. Maximum speedup achieved on up to 32 threads over single-threaded execution (black bars) and minimum number of threads at which the maximum speedup occurred (gray bars).



[BO15]



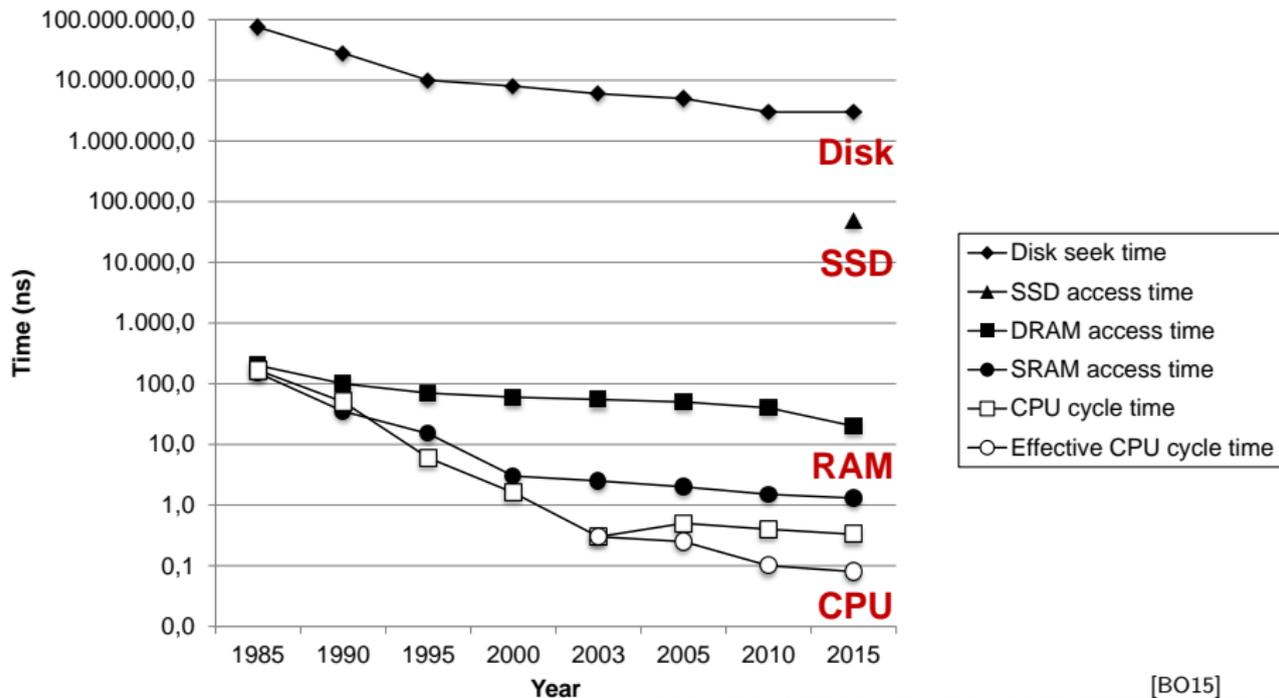
Gesamtsystem kombiniert verschiedene Speicher

- ▶ wenige KByte Register (-bank) im Prozessor
- ▶ einige MByte SRAM als schneller Zwischenspeicher
- ▶ einige GByte DRAM als Hauptspeicher
- ▶ einige TByte Festplatte als nichtflüchtiger Speicher
- ▶ Hintergrundspeicher (CD/DVD/BR, Magnetbänder)
- ▶ das WWW und Cloud-Services

Kompromiss aus Kosten, Kapazität, Zugriffszeit

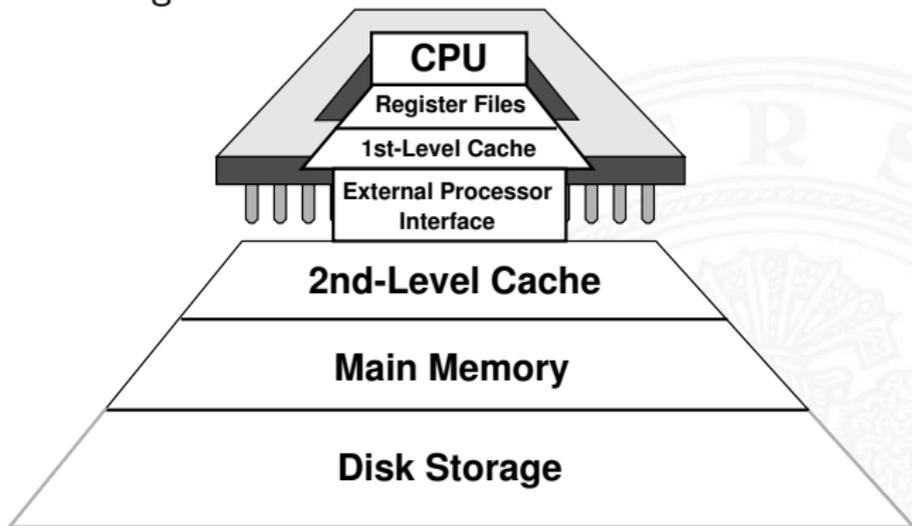
- ▶ Illusion aus großem schnellem Speicher
- ▶ funktioniert nur wegen räumlicher/zeitlicher Lokalität

- ▶ stetig wachsende Lücke zwischen CPU-, Memory- und Disk-Geschwindigkeiten



[BO15]

- ▶ Geschwindigkeit der Prozessoren
- ▶ Kosten für den Speicherplatz
- ▶ permanente Speicherung
  - ▶ magnetisch
  - ▶ optisch
  - ▶ mechanisch



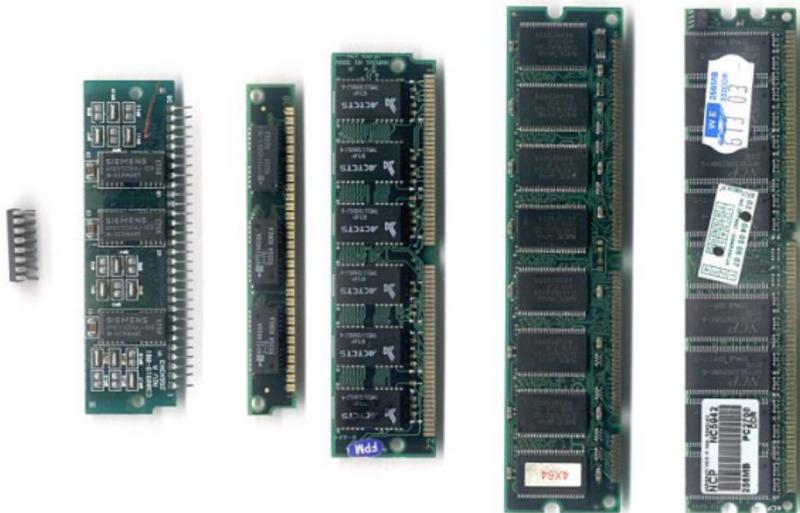
- ▶ schnelle vs. langsame Speichertechnologie  
schnell : hohe Kosten/Byte geringe Kapazität  
langsam : geringe Kosten/Byte hohe Kapazität
  - ▶ wachsender Abstand zwischen CPU und Speichergeschwindigkeit
    - ▶ Prozessor läuft mit einigen GHz Takt
    - ▶ Register können mithalten, aber nur einige KByte Kapazität
    - ▶ DRAM braucht 60...100 ns für Zugriff: 100 × langsamer
    - ▶ Festplatte braucht 10 ms für Zugriff: 1 000 000 × langsamer
  - ▶ Lokalität der Programme wichtig
    - ▶ aufeinanderfolgende Speicherzugriffe sind meistens „lokal“
    - ▶ gut geschriebene Programme haben meist eine gute Lokalität
- ⇒ Motivation für spezielle Organisation von Speichersystemen
- ## Speicherhierarchie

- ▶ Register ↔ Memory
  - ▶ Compiler
  - ▶ Assembler-Programmierer
- ▶ Cache ↔ Memory
  - ▶ Hardware
- ▶ Memory ↔ Disk
  - ▶ Hardware und Betriebssystem: Paging, Segmentation
  - ▶ Programmierer und –"– : Dateien

- ▶ Register im Prozessor integriert
  - ▶ Program-Counter und Datenregister für Programmierer sichtbar
  - ▶ ggf. weitere Register für Systemprogrammierung
  - ▶ zusätzliche unsichtbare Register im Steuerwerk
- ▶ Flipflops oder Registerbank mit 6 Trans.-Speicherzellen
  - ▶ Lesen und Schreiben in jedem Takt möglich
  - ▶ ggf. mehrere parallele Lesezugriffe in jedem Takt
  - ▶ Zugriffszeiten ca. 100 ps
- ▶ typ. Größe einige KByte, z.B. 16 Register á 64-bit *x86-64*

# L1-L4: Halbleiterspeicher RAM

- ▶ „Random-Access Memory“ (RAM) aufgebaut aus Mikrochips
- ▶ Grundspeichereinheit ist eine Zelle (ein Bit pro Zelle)
- ▶ SRAM (6T-Zelle) oder DRAM (1T-Zelle) Technologie
- ▶ mehrere RAM Chips bilden einen Speicher

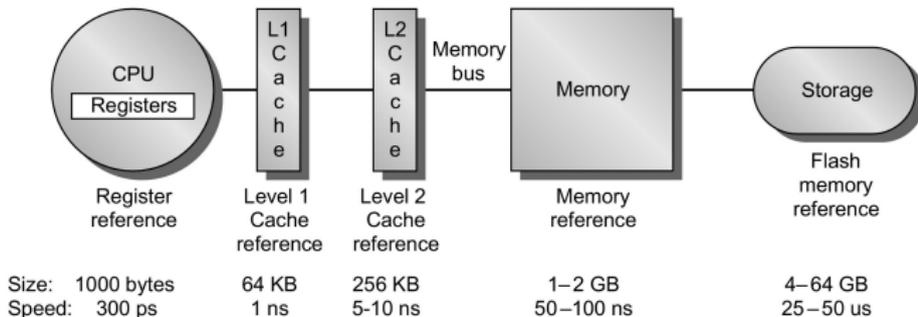


- ▶ dominierende Technologie für nichtflüchtigen Speicher
- ▶ hohe Speicherkapazität, derzeit einige TB
  - ▶ Daten bleiben beim Abschalten erhalten
  - ▶ aber langsamer Zugriff
  - ▶ besondere Algorithmen, um langsamen Zugriff zu verbergen
- ▶ Einsatz als Speicher für dauerhafte Daten
- ▶ Einsatz als erweiterter Hauptspeicher („*virtual memory*“)
- ▶ FLASH/SSD zunehmend als Ersatz für Festplatten
  - ▶ Halbleiterspeicher mit sehr effizienten multibit-Zellen
  - ▶ Verwaltung (derzeit) wie Festplatten
  - ▶ signifikant schnellere Zugriffszeiten

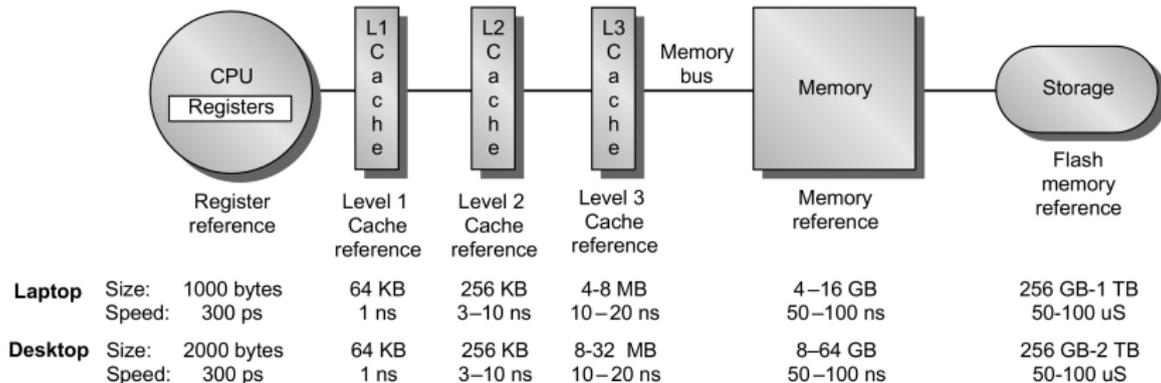


- ▶ enorme Speicherkapazität
- ▶ langsame Zugriffszeiten
  
- ▶ Archivspeicher und Backup für (viele) Festplatten
  - ▶ Magnetbänder
  - ▶ RAID-Verbund aus mehreren Festplatten
  - ▶ optische Datenspeicher: CD-ROM, DVD-ROM, BlueRay
  
- ▶ WWW und Internet-Services, Cloud-Services
  - ▶ Cloud-Farms ggf. ähnlich schnell wie L5 Festplatten, da Netzwerk schneller als der Zugriff auf eine lokale Festplatte
  
- ▶ in dieser Vorlesung nicht behandelt

# Speicherhierarchie: zwei Beispiele



(A) Memory hierarchy for a personal mobile device



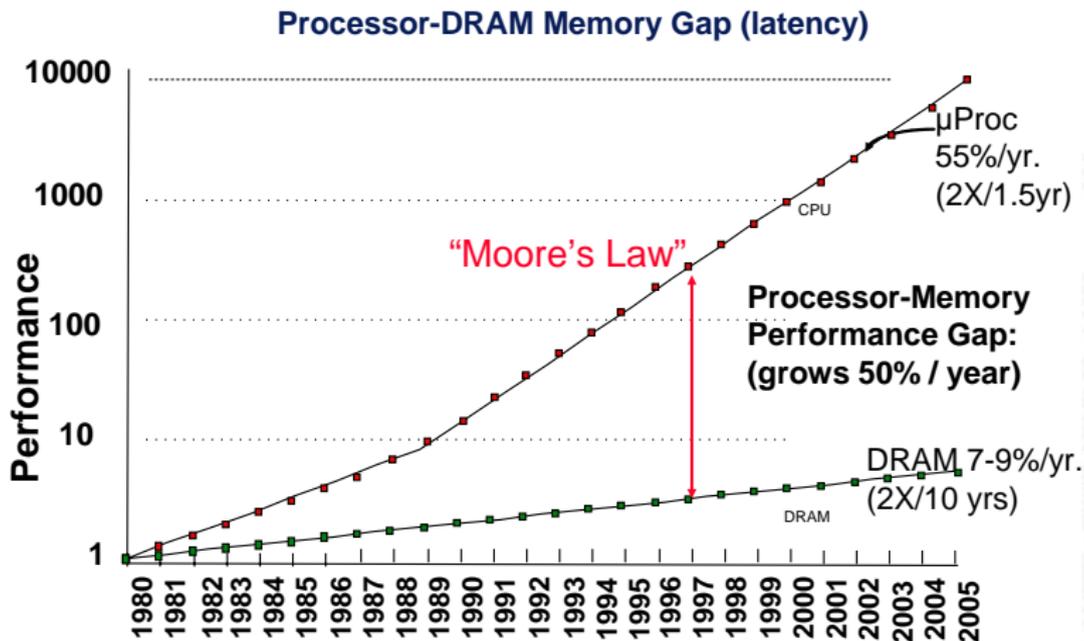
(B) Memory hierarchy for a laptop or a desktop

[HP17]

# Eigenschaften der Speichertypen

▶ Speicher	Vorteile	Nachteile	
Register	sehr schnell	sehr teuer	
SRAM	schnell	teuer, große Chips	
DRAM	hohe Integration	Refresh nötig, langsam	
Platten	billig, Kapazität	sehr langsam, mechanisch	
▶ Beispiel	Hauptspeicher	Festplatte	SSD
Latenz	8 ns	4 ms	0,2/0,4 ms
Bandbreite	25,6 GB/sec (pro Kanal, bis 4)	1,5 GB/sec	3/2 GB/sec (r/w)
Kosten/GB	6 €	2,5 ct. 1 TB: 25 €	25 ct.

- ▶ „Memory Wall“: DRAM zu langsam für CPU

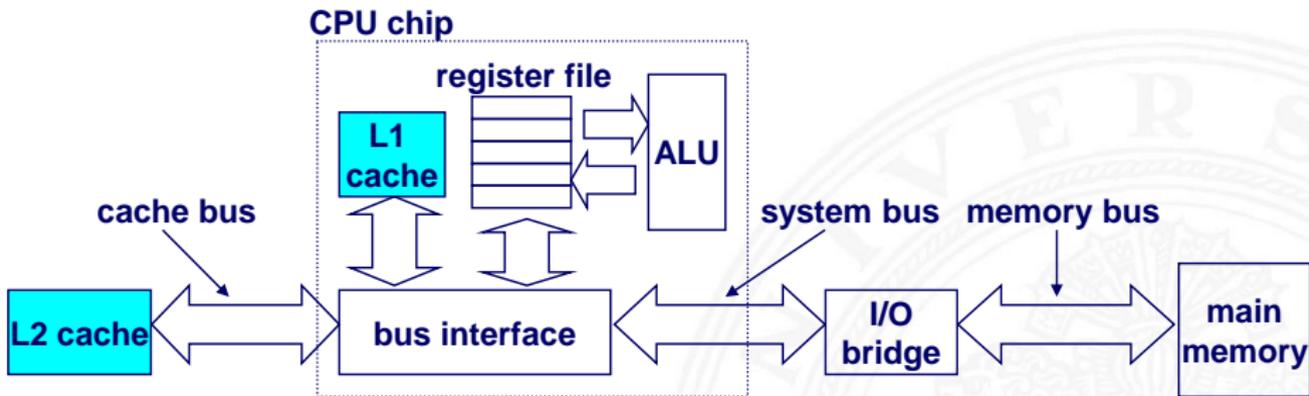


[PH16]

⇒ Cache als schneller Zwischenspeicher zum Hauptspeicher

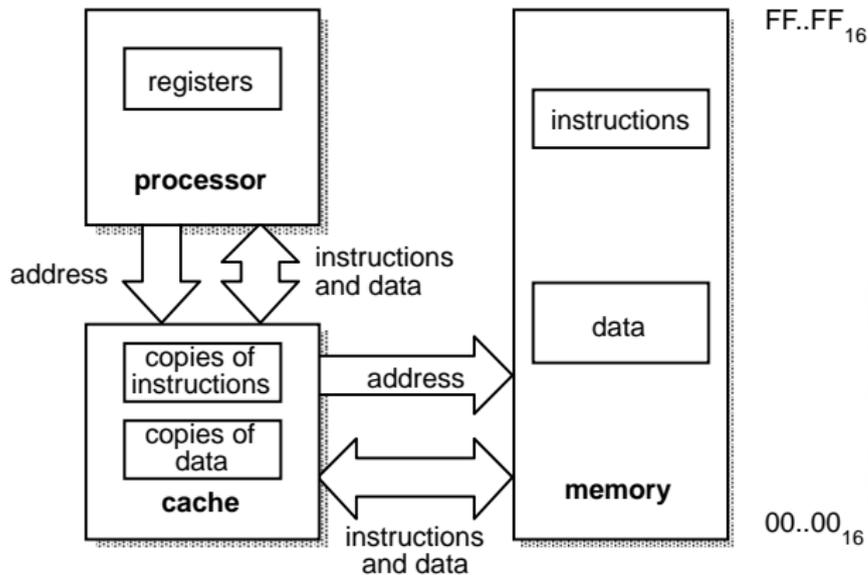
- ▶ technische Realisierung: SRAM
- ▶ transparenter Speicher
  - ▶ Cache ist für den Programmierer nicht sichtbar!
  - ▶ wird durch Hardware verwaltet
- ▶ ggf. getrennte Caches für Befehle und Daten
- ▶ enthält Hauptspeicherblöcke mit erhöhter Zugriffswahrscheinlichkeit
- ▶ basiert auf Prinzip der Lokalität von Speicherzugriffen durch ein laufendes Programm
  - ▶ ca. 80% der Zugriffe greifen auf 20% der Adressen zu
  - ▶ manchmal auch 90% / 10% oder noch besser
- ▶ <https://de.wikipedia.org/wiki/Cache>  
[https://en.wikipedia.org/wiki/CPU\\_cache](https://en.wikipedia.org/wiki/CPU_cache)  
[https://en.wikipedia.org/wiki/Cache\\_\(computing\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Cache_(computing))

- ▶ CPU referenziert Adresse
  - ▶ parallele Suche in L1 (level 1), L2 ... und Hauptspeicher
  - ▶ erfolgreiche Suche liefert Datum, Abbruch laufender Suchen

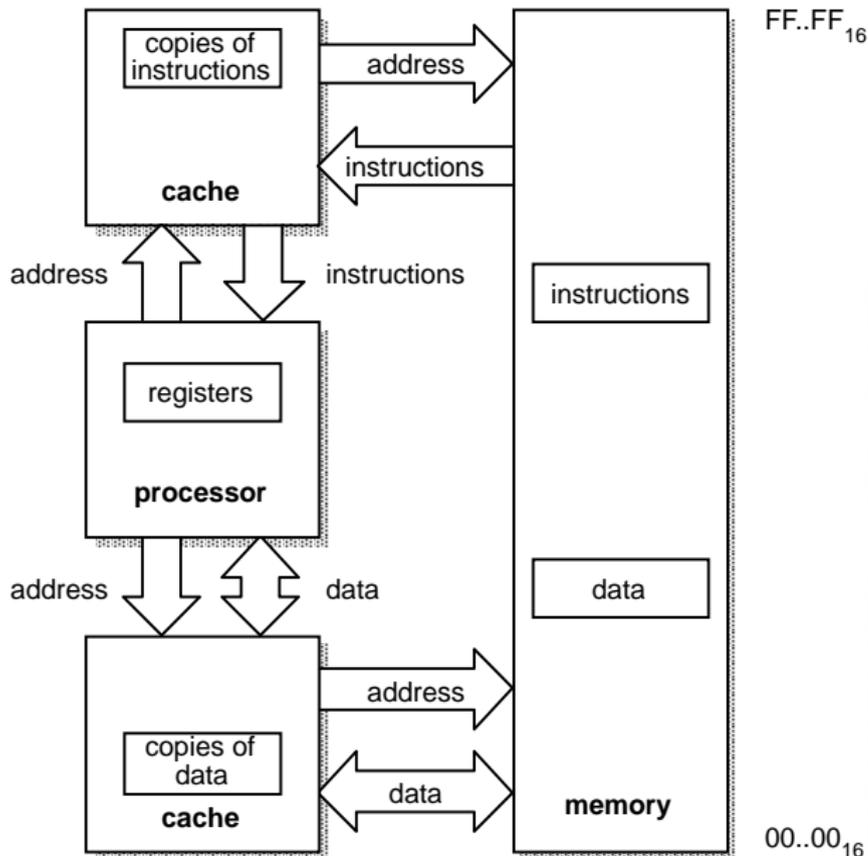


[BO15]

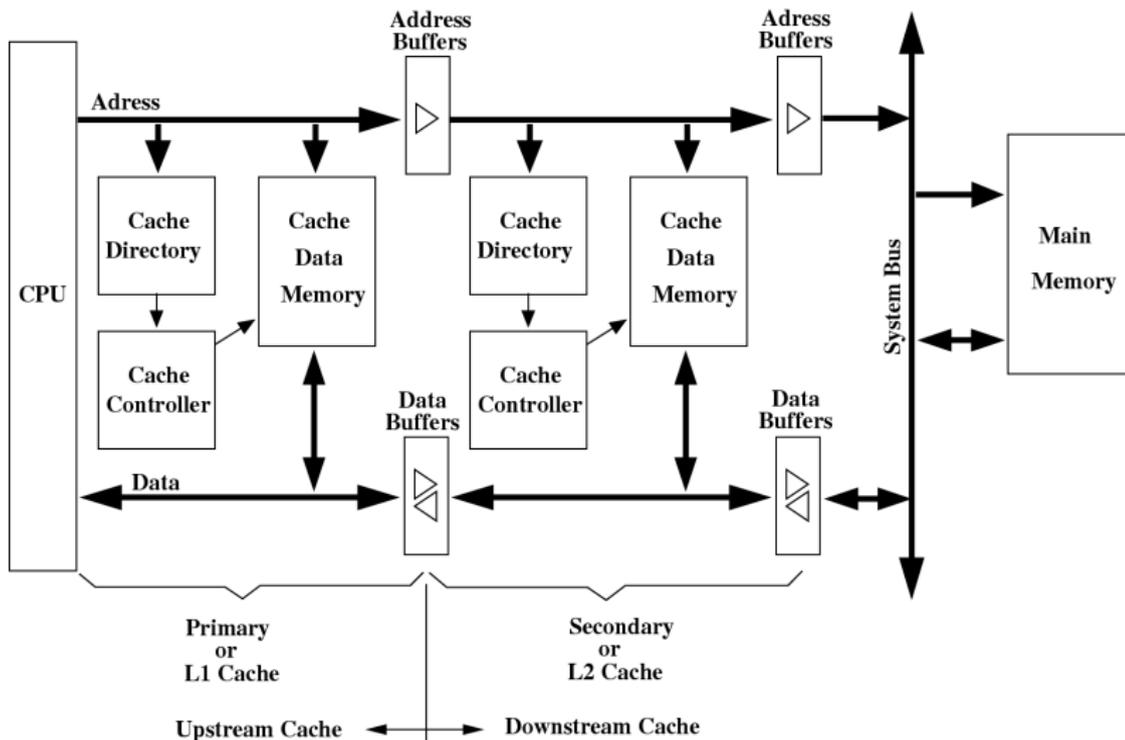
# gemeinsamer Cache / „unified Cache“



# separate Instruction-/Data Caches

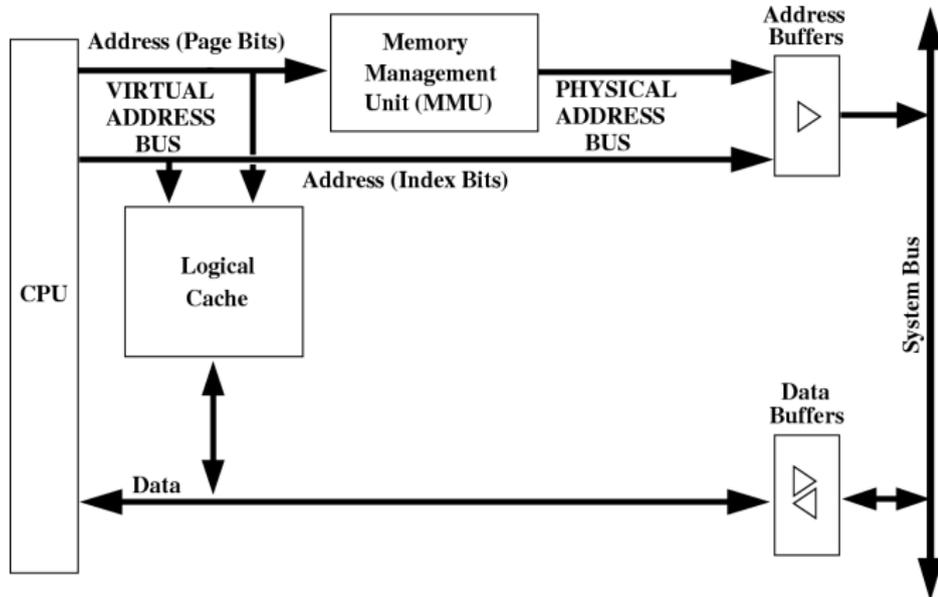


## ► First- und Second-Level Cache



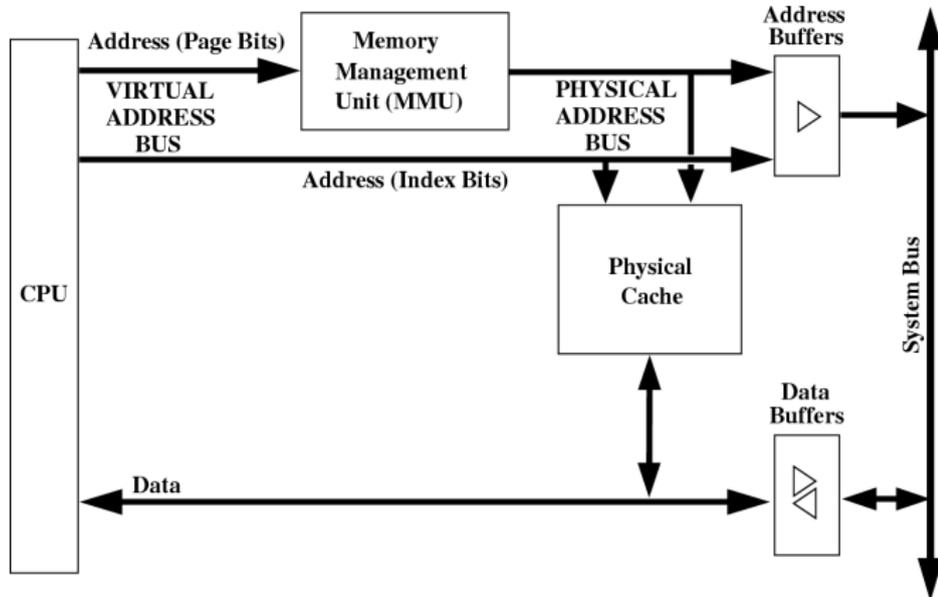
## ► Virtueller Cache

- + Adressumrechnung durch MMU oft nicht nötig
- Cache leeren bei Kontextwechseln



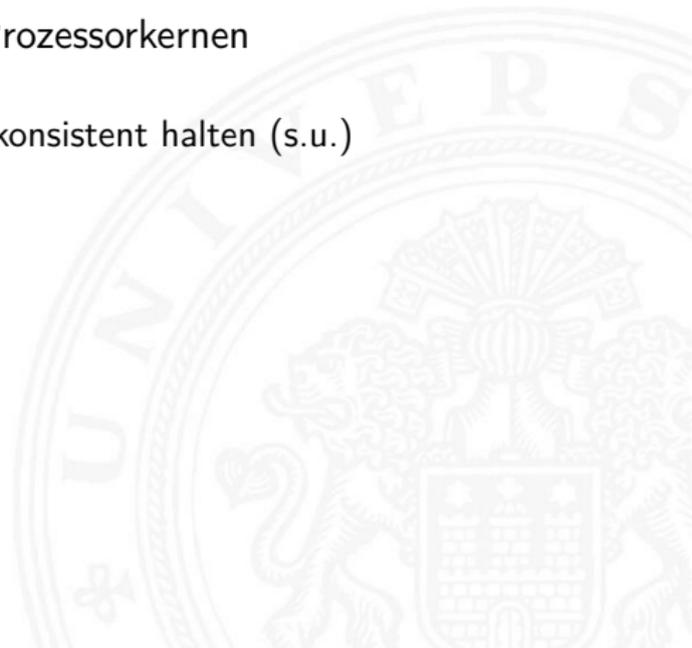
## ► Physikalischer Cache

- + Cache muss nie geleert werden
- Adressumrechnung durch MMU immer nötig





- ▶ typische Cache Organisation
  - ▶ First-Level Cache: getrennte Instruktions- und Daten-Caches
  - ▶ Second-Level Cache: gemeinsamer Cache je Prozessorkern
  - ▶ Third-Level Cache: gemeinsamer Cache für alle Prozessorkerne
- ▶ bei mehreren Prozessoren / Prozessorkernen
  - ⇒ Cache-Kohärenz wichtig
    - ▶ gemeinsam genutzte Daten konsistent halten (s.u.)

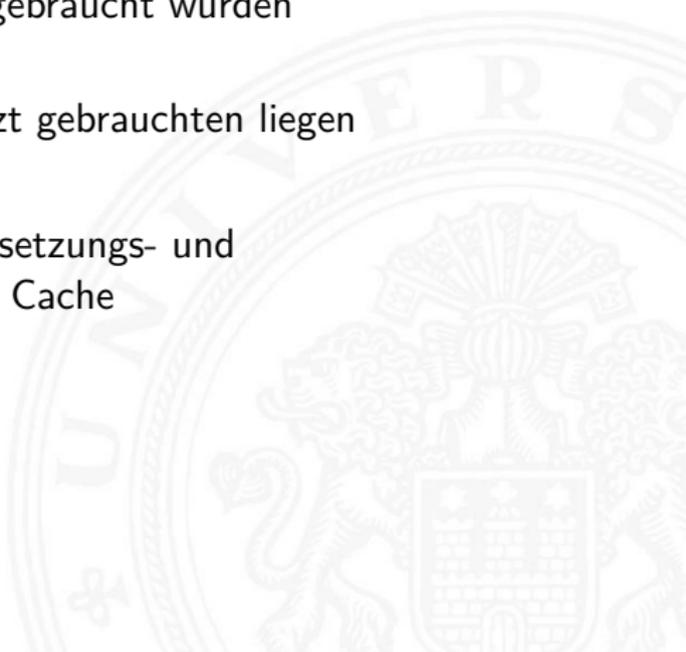




Cachestrategie: *Welche Daten sollen in den Cache?*

Diejenigen, die bald wieder benötigt werden!

- ▶ *temporale Lokalität:*  
die Daten, die zuletzt häufig gebraucht wurden
- ▶ *räumliche Lokalität:*  
die Daten, die nahe den zuletzt gebrauchten liegen
- ▶ verschiedene Platzierungs-, Ersetzungs- und  
Rückschreibestrategien für den Cache



## Cacheperformanz

### ► Begriffe

Treffer (Hit)		Zugriff auf Datum, ist bereits im Cache
Fehler (Miss)		–"– ist nicht –"–
Treffer-Rate	$R_{Hit}$	Wahrscheinlichkeit, Datum ist im Cache
Fehler-Rate	$R_{Miss}$	$1 - R_{Hit}$
Hit-Time	$T_{Hit}$	Zeit, bis Datum bei Treffer geliefert wird
Miss-Penalty	$T_{Miss}$	zusätzlich benötigte Zeit bei Fehler

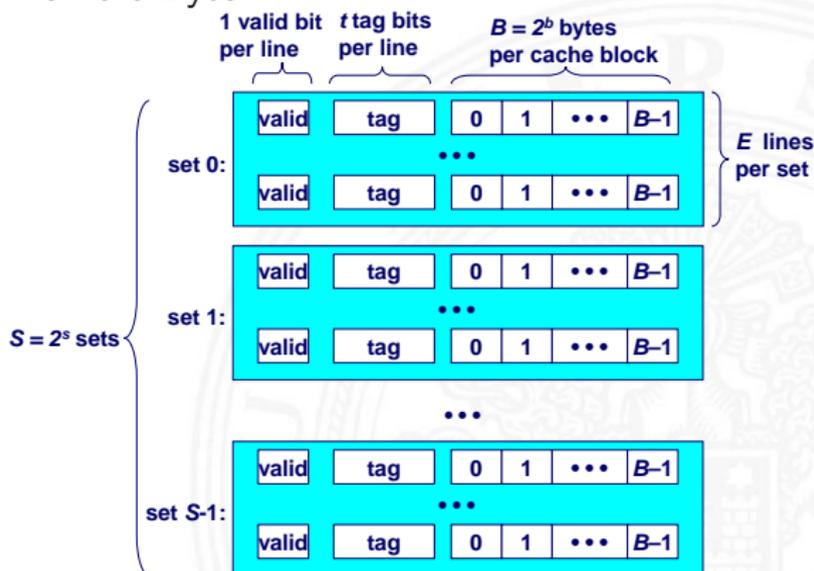
### ► Mittlere Speicherzugriffszeit = $T_{Hit} + R_{Miss} \cdot T_{Miss}$

### ► Beispiel

$$T_{Hit} = 1 \text{ Takt}, T_{Miss} = 20 \text{ Takte}, R_{Miss} = 5 \%$$

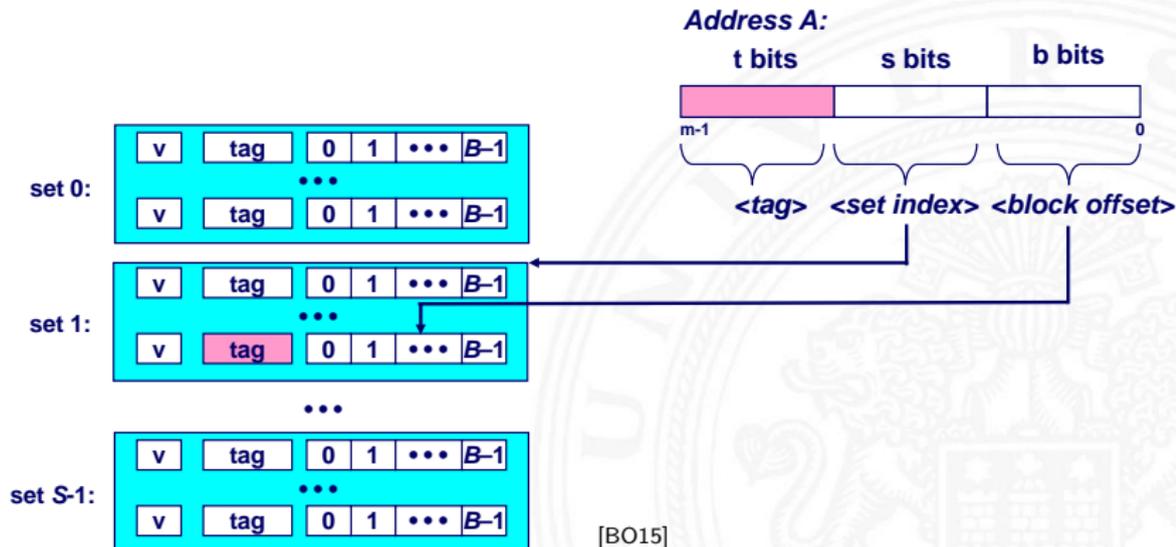
$$\Rightarrow \text{Mittlere Speicherzugriffszeit} = 2 \text{ Takte}$$

- ▶ Cache ist ein Array von Speicher-Bereichen („sets“)
- ▶ jeder Bereich enthält eine oder mehrere Zeilen
- ▶ jede Zeile enthält einen Datenblock
- ▶ jeder Block enthält mehrere Byte

Cache size:  $C = B \times E \times S$  data bytes

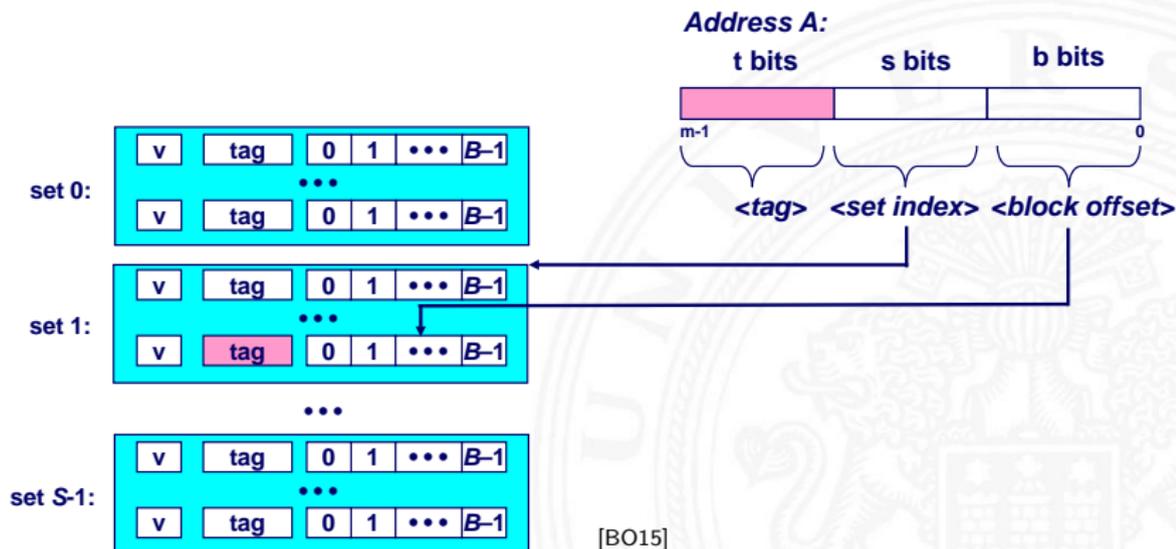
[BO15]

- ▶ Adressteil  $\langle set\ index \rangle$  von  $A$  bestimmt Bereich („set“)
- ▶ Adresse  $A$  ist im Cache, wenn
  1. Cache-Zeile ist als gültig markiert („valid“)
  2. Adressteil  $\langle tag \rangle$  von  $A =$  „tag“ Bits des Bereichs



# Adressierung von Caches (cont.)

- ▶ Cache-Zeile („cache line“) enthält Datenbereich von  $2^b$  Byte
- ▶ gesuchtes Wort mit Offset  $\langle block\ offset \rangle$





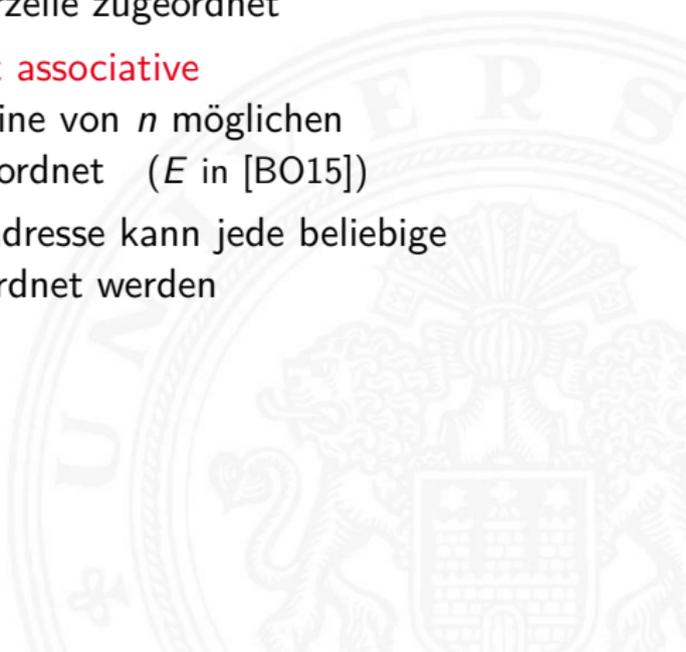
- ▶ *Welchen Platz im Cache belegt ein Datum des Hauptspeichers?*
- ▶ drei Verfahren

**direkt abgebildet / direct mapped** jeder Speicheradresse ist genau eine Cache-Speicherzelle zugeordnet

**n-fach bereichsassoziativ / set associative**

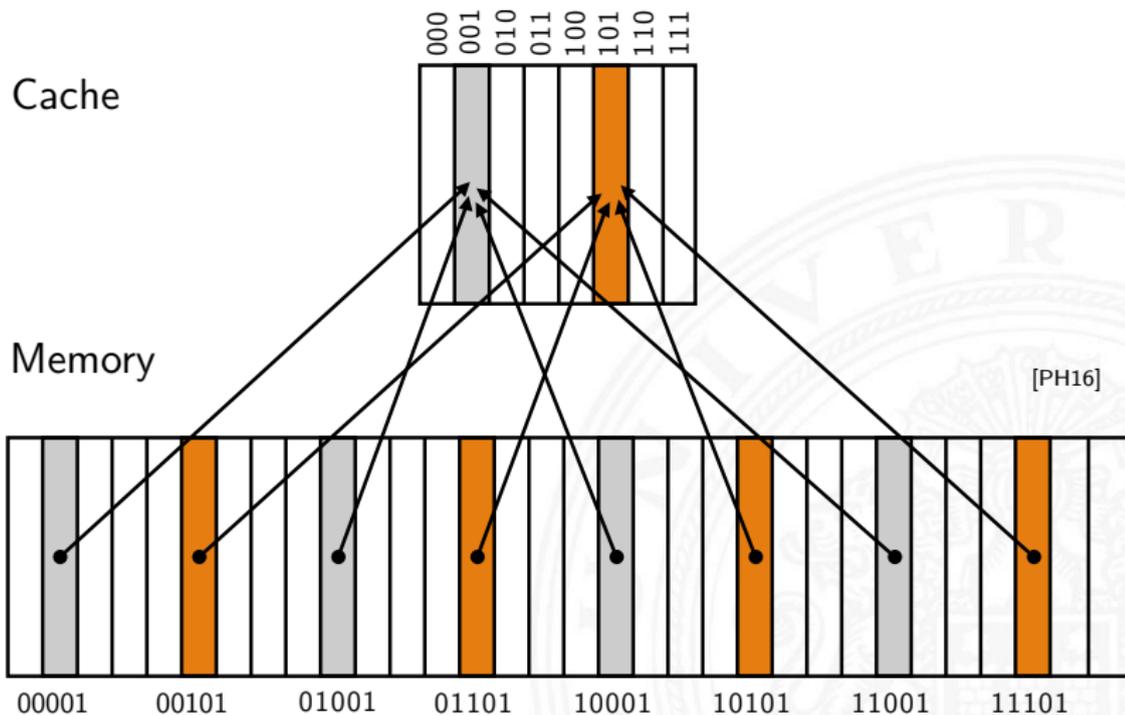
jeder Speicheradresse ist eine von  $n$  möglichen Cache-Speicherzellen zugeordnet ( $E$  in [BO15])

**voll-assoziativ** jeder Speicheradresse kann jede beliebige Cache-Speicherzelle zugeordnet werden



# Cache: direkt abgebildet / „direct mapped“

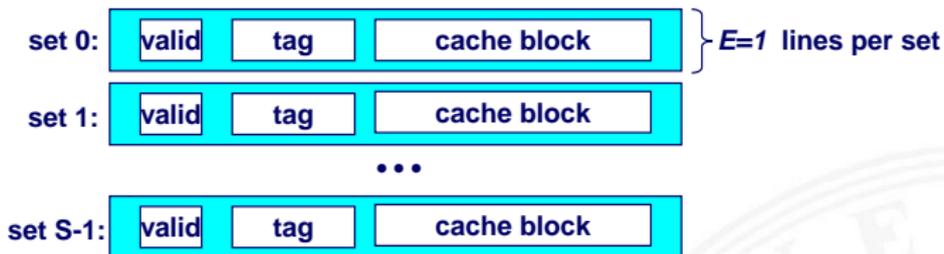
- ▶ jeder Adresse ist genau eine Speicherzelle im Cache zugeordnet



# Cache: direkt abgebildet / „direct mapped“ (cont.)

- ▶ verfügt über genau 1 Zeile pro Bereich

S Bereiche (**S**ets)



[BO15]

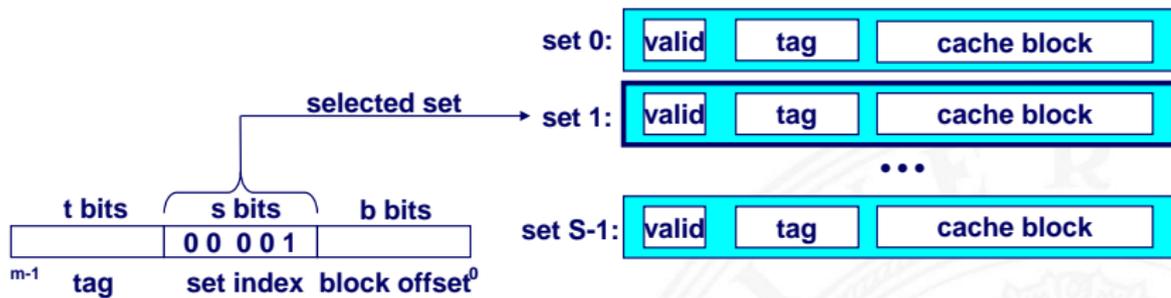
- + einfachste Cache-Art
- + große Caches möglich
- Effizienz, z.B. Zugriffe auf  $A, A + n \cdot S \dots$   
⇒ „Cache Thrashing“

Beispiel (s.o.): Zugriff auf „00101“, „01101“, „10101“, „11101“

# Cache: direkt abgebildet / „direct mapped“ (cont.)

## Zugriff auf direkt abgebildete Caches

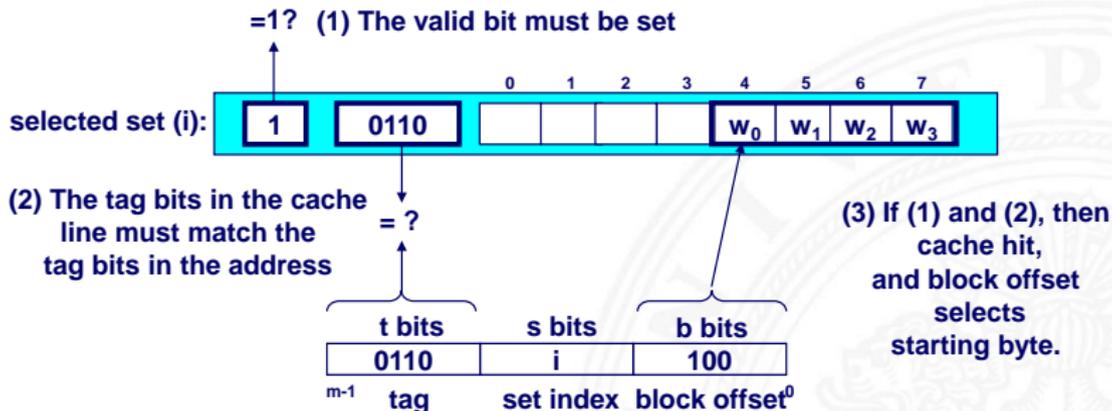
### 1. Bereichsauswahl durch Bits $\langle set\ index \rangle$



[BO15]

# Cache: direkt abgebildet / „direct mapped“ (cont.)

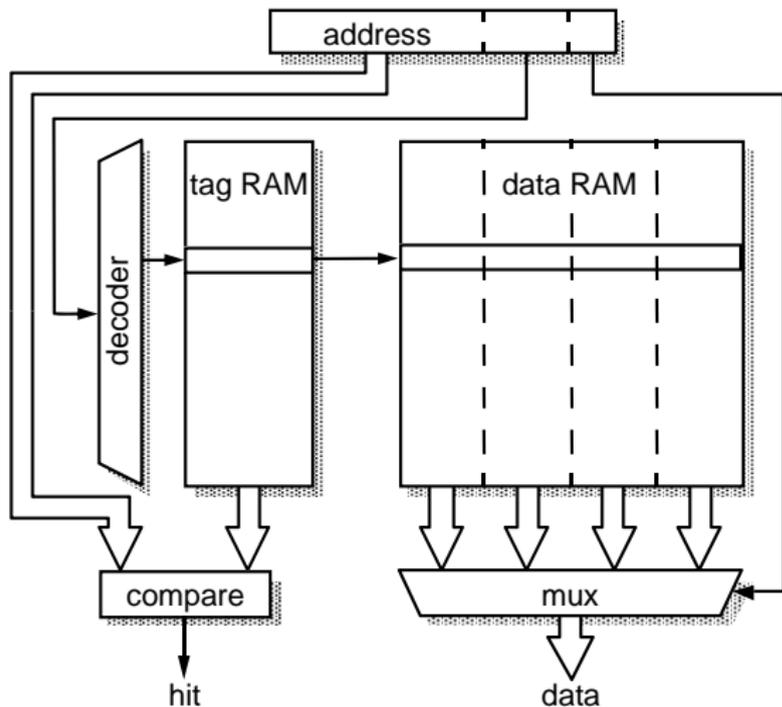
2.  $\langle valid \rangle$ : sind die Daten gültig?
3. „Line matching“: stimmt  $\langle tag \rangle$  überein?
4. Wortselektion extrahiert Wort unter Offset  $\langle block\ offset \rangle$



[BO15]

# Cache: direkt abgebildet / „direct mapped“ (cont.)

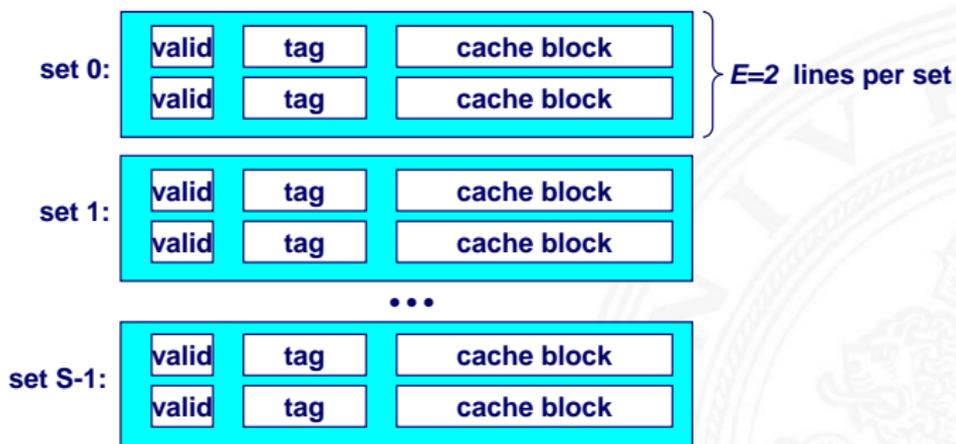
Prinzip



[Fur00]

# Cache: bereichsassoziativ / „set associative“

- ▶ jeder Speicheradresse ist ein Bereich  $S$  mit mehreren ( $E$ ) Cachezeilen zugeordnet
- ▶  $n$ -fach assoziative Caches:  $E=2, 4 \dots$   
„2-way set associative cache“, „4-way ...“

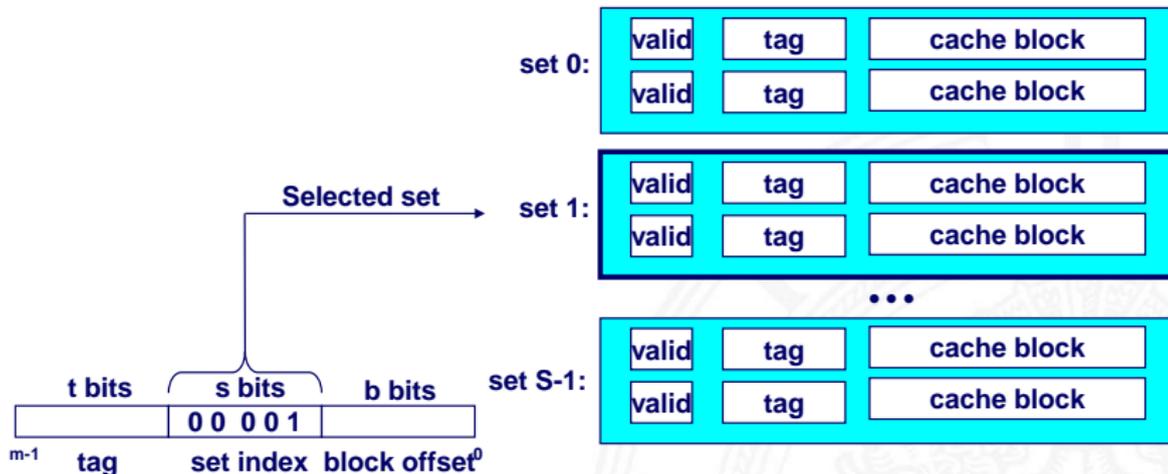


[BO15]

# Cache: bereichsassoziativ / „set associative“ (cont.)

## Zugriff auf n-fach assoziative Caches

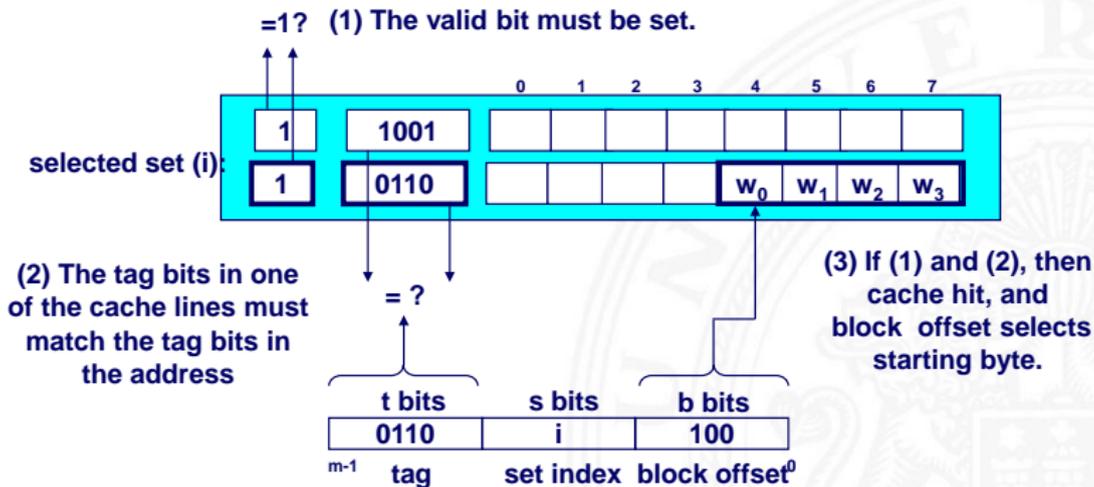
### 1. Bereichsauswahl durch Bits $\langle set\ index \rangle$



[BO15]

# Cache: bereichsassoziativ / „set assoziativ“ (cont.)

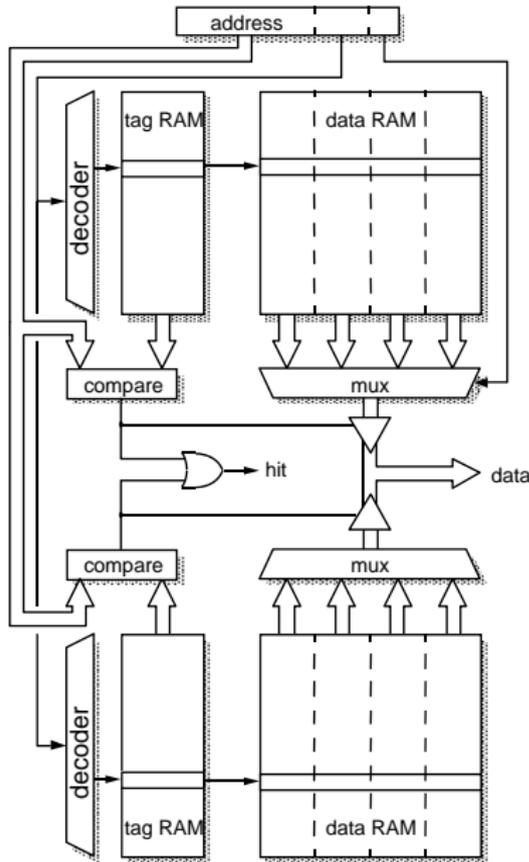
2.  $\langle \text{valid} \rangle$ : sind die Daten gültig?
3. „Line matching“: Cache-Zeile mit passendem  $\langle \text{tag} \rangle$  finden?  
dazu Vergleich aller „tags“ des Bereichs  $\langle \text{set index} \rangle$
4. Wortselektion extrahiert Wort unter Offset  $\langle \text{block offset} \rangle$



[BO15]

# Cache: bereichsassoziativ / „set associative“ (cont.)

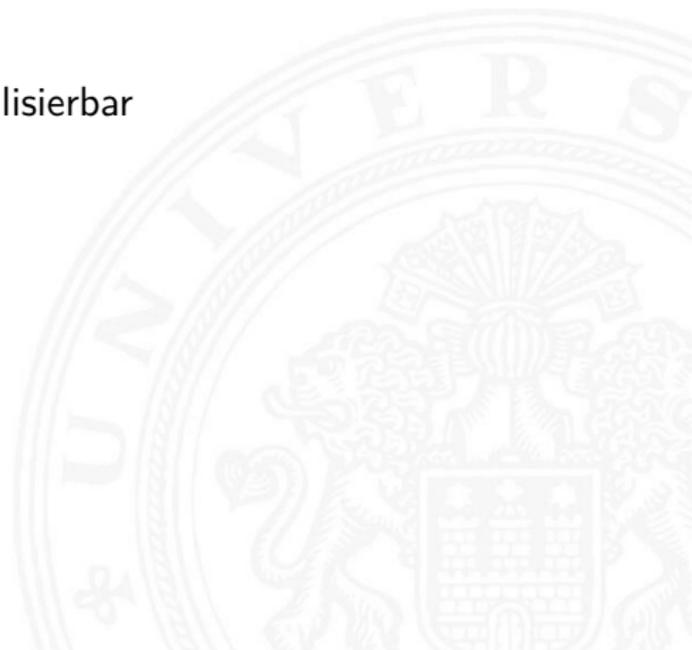
Prinzip



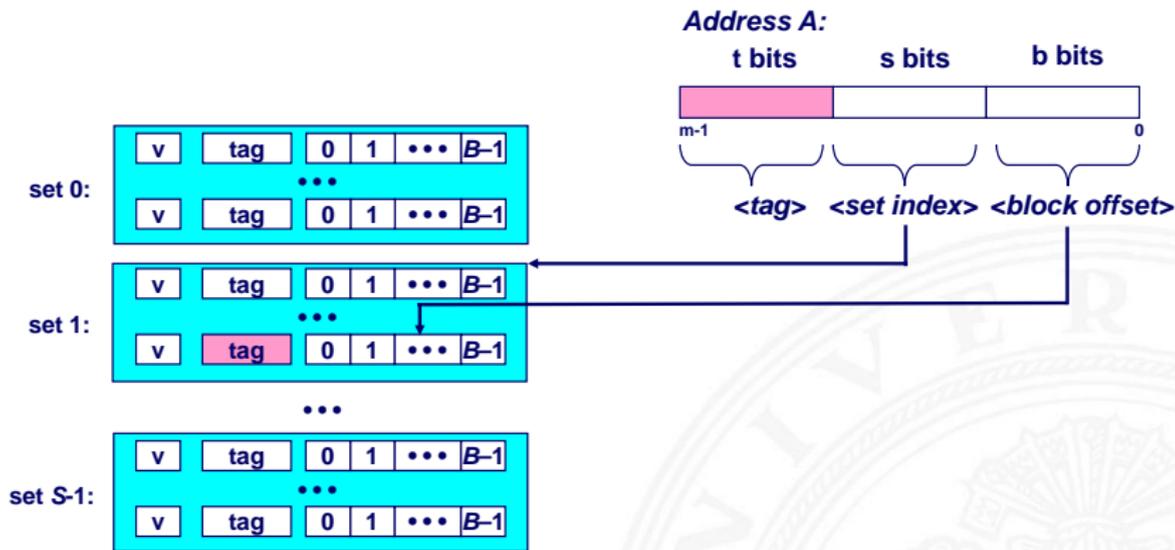
[Fur00]



- ▶ jeder Adresse des Speichers kann jede beliebige Cachezeile zugeordnet werden
- ▶ Spezialfall: nur ein Cachebereich  $S$
- benötigt  $E$ -Vergleicher
- nur für sehr kleine Caches realisierbar



# Cache – Dimensionierung



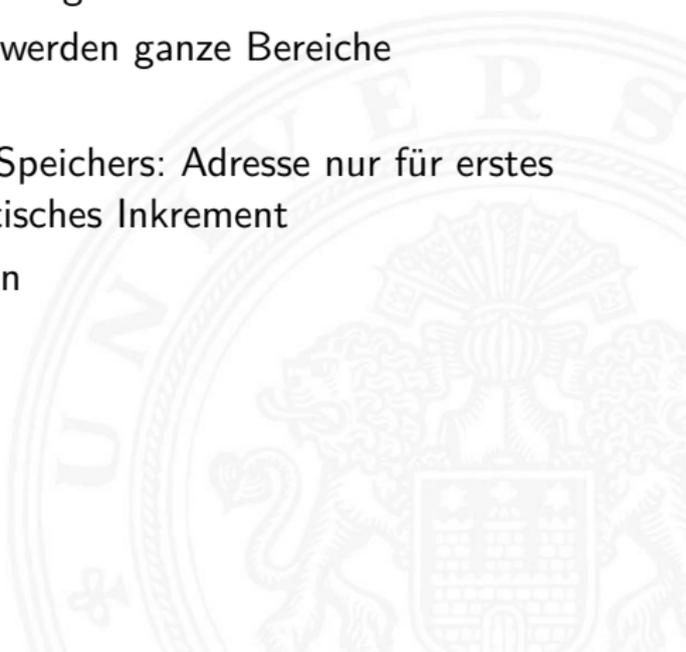
[BO15]

- ▶ Parameter:  $S$ ,  $B$ ,  $E$
- ▶ Cache speichert immer größere Blöcke / „Cache-Line“
- ▶ Wortauswahl durch  $\langle block\ offset \rangle$  in Adresse

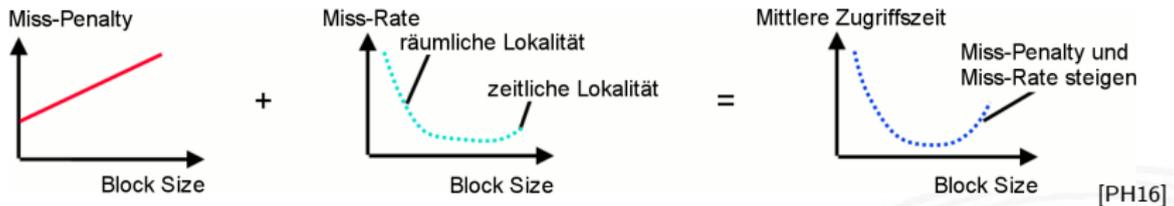


## Vor- und Nachteile des Cache

- + nutzt räumliche Lokalität aus Speicherzugriffe von Programmen (Daten und Instruktionen) liegen in ähnlichen/aufeinanderfolgenden Adressbereichen
- + breite externe Datenbusse, es werden ganze Bereiche übertragen
- + nutzt Burst-Adressierung des Speichers: Adresse nur für erstes Wort vorgeben, dann automatisches Inkrement
- + kürzere interne Cache-Adressen
- Hardwareaufwand und Kosten

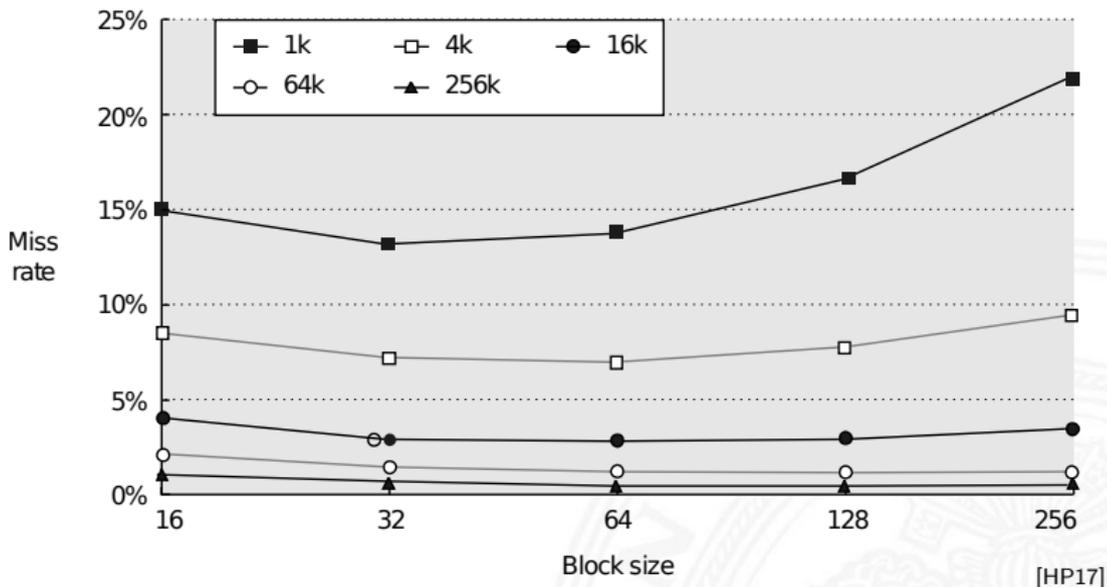


## Cache- und Block-Dimensionierung



- ▶ Blockgröße klein, viele Blöcke
  - + kleinere Miss-Penalty
  - + temporale Lokalität
  - räumliche Lokalität
- ▶ Blockgröße groß, wenig Blöcke
  - größere Miss-Penalty
  - temporale Lokalität
  - + räumliche Lokalität

# Cache – Dimensionierung (cont.)



- ▶ Block-Size: 32... 128 Byte
- L1-Cache: 4... 256 KiByte
- L2-Cache: 256... 4 096 KiByte

[HP17]

- ▶ **cold miss**
  - ▶ Cache ist (noch) leer
- ▶ **conflict miss**
  - ▶ wenn die Kapazität des Cache eigentlich ausreicht, aber unterschiedliche Daten in den selben Block abgebildet werden
  - ▶ Beispiel für „Trashing“ beim direct-mapped Cache mit  $S=8$ :  
abwechselnder Zugriff auf Blöcke 0, 8, 0, 8, 0, 8 ...  
ist jedesmal ein Miss
- ▶ **capacity miss**
  - ▶ wenn die Menge der aktiven Blöcke („working set“) größer ist als die Kapazität des Cache



*Wenn der Cache gefüllt ist, welches Datum wird entfernt?*

- ▶ zufällige Auswahl
- ▶ **LRU** (**L**east **R**ecently **U**sed):  
der „älteste“ nicht benutzte Cache Eintrag
  - ▶ echtes LRU als Warteschlange realisiert
  - ▶ Pseudo LRU mit baumartiger Verwaltungsstruktur:  
Zugriff wird paarweise mit einem Bit markiert,  
die Paare wieder zusammengefasst usw.
- ▶ **LFU** (**L**east **F**requently **U**sed):  
der am seltensten benutzte Cache Eintrag
  - ▶ durch Zugriffszähler implementiert





*Wann werden modifizierte Daten des Cache zurückgeschrieben?*

- ▶ **Write-Through:** beim Schreiben werden Daten sofort im Cache und im Hauptspeicher modifiziert
  - + andere Bus-Master sehen immer den „richtigen“ Speicherinhalt:  
*Cache-Kohärenz*
  - Werte werden unnötig oft in Speicher zurückgeschrieben
  
- ▶ **Write-Back:** erst in den Speicher schreiben, wenn Datum des Cache ersetzt werden würde
  - + häufig genutzte Werte (z.B. lokale Variablen) werden nur im Cache modifiziert
  - Cache-Kohärenz ist nicht gegeben
  - ⇒ spezielle Befehle für „Cache-Flush“
  - ⇒ „non-cacheable“ Speicherbereiche

- ▶ Daten zwischen Cache und Speicher konsistent halten
- ▶ notwendig wenn mehrere Einheiten (Bus-Master: Prozessor, DMA-Controller) auf Speicher zugreifen können:  
wichtig für „*Symmetric Multiprocessing*“
- ▶ Harvard-Architektur hat getrennte Daten- und Instruktions-Speicher
  - ▶ Instruktionen sind read-only
  - ⇒ einfacherer Instruktions-Cache
  - ⇒ Cache-Kohärenz Problem betrifft D-Cache
- ▶ Cache-Kohärenz Protokolle und „*Snooping*“
  - ▶ alle Prozessoren ( $P_1, P_2 \dots$ ) überwachen alle Bus-Transaktionen  
Cache „schnüffelt“ am Speicherbus
  - ▶ Prozessor  $P_2$  greift auf Daten zu, die im Cache von  $P_1$  liegen  
 $P_2$  Schreibzugriff  $\Rightarrow P_1$  Cache aktualisieren / ungültig machen  
 $P_2$  Lesezugriff  $\Rightarrow P_1$  Cache liefert Daten
  - ▶ Was ist mit gleichzeitige Zugriffen von  $P_1, P_2$ ?

- ▶ viele verschiedene Protokolle: Hersteller- / Prozessor-spezifisch
  - ▶ SI („*Write Through*“)
  - ▶ MSI, MOSI,
  - ▶ MESI: *Modified, Exclusive, Shared, Invalid*
  - ▶ MOESI: *Modified (exclusive), Owned (Modified shared), Exclusive, Shared, Invalid*
  - ▶ ...

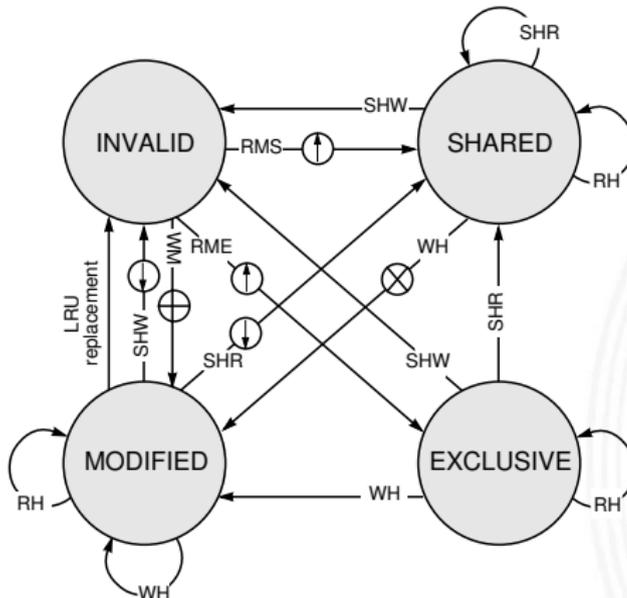
siehe z.B.: [en.wikipedia.org/wiki/Cache\\_coherence](https://en.wikipedia.org/wiki/Cache_coherence)



- ▶ Caches enthalten Wert, Tag und zwei Statusbits für die vier Protokollzustände
  - ▶ **Modified:** gültiger Wert, nur in diesem Cache, gegenüber Hauptspeicher-Wert verändert
  - ▶ **Exclusive:** gültiger Wert, nur in diesem Cache nicht verändert (unmodified)
  - ▶ **Shared:** gültiger Wert, in mehreren Caches vorhanden nicht verändert (unmodified)
  - ▶ **Invalid:** ungültiger Inhalt, Initialzustand
- ▶ alle Prozessoren überwachen alle Bus-Transaktionen
- ▶ bei Speicherzugriffen Aktualisierung des Status'
- ▶ Zugriffe auf „modified“-Werte werden erkannt:
  1. fremde Bus-Transaktion unterbrechen
  2. eigenen (=modified) Wert zurückschreiben
  3. Status auf shared ändern
  4. unterbrochene Bus-Transaktion neu starten

# MESI Protokoll (cont.)

- ▶ erfordert spezielle Snoop-Logik im Prozessor
- ▶ garantiert Cache-Kohärenz
- ▶ gute Performanz, aber schlechte Skalierbarkeit
- ▶ Zustandsübergänge: MESI Protokoll

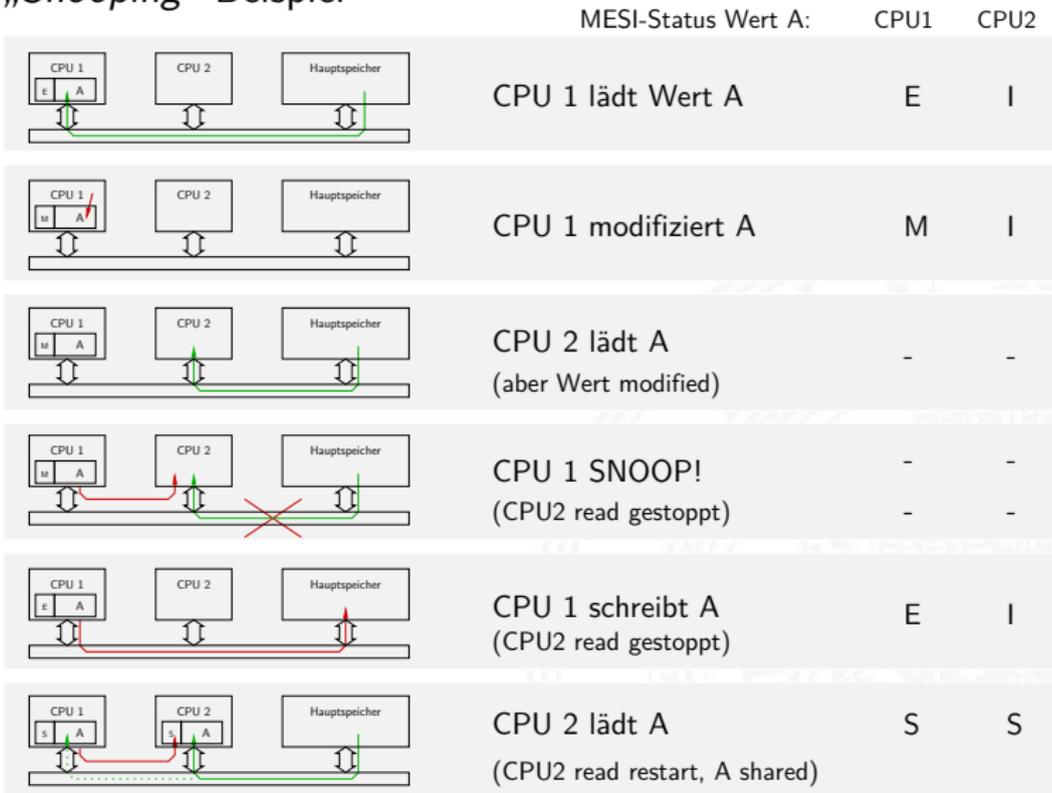


PowerPC 604 RISC Microprocessor  
User's Manual [Motorola / IBM]

## Bus Transactions

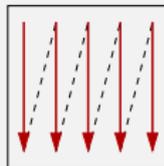
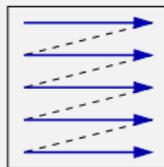
- RH = Read hit
- RMS = Read miss, shared
- RME = Read miss, exclusive
- WH = Write hit
- WM = Write miss
- SHR = Snoop hit on a read
- SHW = Snoop hit on a write or read-with-intent-to-modify
- = Snoop push
- = Invalidate transaction
- = Read-with-intent-to-modify
- = Read

## ► „Snooping“ Beispiel



# Cache Effekte bei Matrixzugriffen

```
public static double sumRowCol( double[][] matrix ) {  
    int rows = matrix.length;  
    int cols = matrix[0].length;  
    double sum = 0.0;  
    for( int r = 0; r < rows; r++ ) {  
        for( int c = 0; c < cols; c++ ) {  
            sum += matrix[r][c];  
        }  
    }  
    return sum;  
}
```



Matrix creation (5000×5000)

2105 msec.

Matrix row-col summation

75 msec.

Matrix col-row summation

383 msec.

⇒ 5 × langsamer

Sum = 600,8473695346258 / 600,8473695342268

⇒ andere Werte

Programmierer kann für maximale Cacheleistung optimieren

- ▷ Datenstrukturen werden fortlaufend alloziert
- 1. durch entsprechende Organisation der Datenstrukturen
- 2. durch Steuerung des Zugriffs auf die Daten
  - ▶ Geschachtelte Schleifenstruktur
  - ▶ Blockbildung ist eine übliche Technik

Systeme bevorzugen einen *Cache-freundlichen* Code

- ▶ Erreichen der optimalen Leistung ist plattformspezifisch
  - ▶ Cachegrößen, Zeilengrößen, Assoziativität etc.
- ▶ generelle Empfehlungen
  - ▶ „working set“ klein ⇒ zeitliche Lokalität
  - ▶ kleine Adressfortschaltungen („strides“) ⇒ räumliche Lokalität

- [PH20] D.A. Patterson, J.L. Hennessy: *Computer Organization and Design – The Hardware Software Interface – MIPS Edition*. 6th edition, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2020. ISBN 978-0-12-820109-1
- [PH16] D.A. Patterson, J.L. Hennessy: *Rechnerorganisation und Rechnerentwurf – Die Hardware/Software-Schnittstelle*. 5. Auflage, Oldenbourg, 2016. ISBN 978-3-11-044605-0
- [HP17] J.L. Hennessy, D.A. Patterson: *Computer architecture – A quantitative approach*. 6th edition, Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2017. ISBN 978-0-12-811905-1

- [BO15] R.E. Bryant, D.R. O'Hallaron:  
*Computer systems – A programmers perspective.*  
3rd global ed., Pearson Education Ltd., 2015.  
ISBN 978-1-292-10176-7. [csapp.cs.cmu.edu](http://csapp.cs.cmu.edu)
- [TA14] A.S. Tanenbaum, T. Austin: *Rechnerarchitektur – Von der digitalen Logik zum Parallelrechner.*  
6. Auflage, Pearson Deutschland GmbH, 2014.  
ISBN 978-3-8689-4238-5
- [Tan06] A.S. Tanenbaum:  
*Computerarchitektur – Strukturen, Konzepte, Grundlagen.*  
5. Auflage, Pearson Studium, 2006. ISBN 3-8273-7151-1

[Intel] Intel Corp.; Santa Clara, CA.

[www.intel.com](http://www.intel.com) [ark.intel.com](http://ark.intel.com)

[Br<sup>+</sup>08] M.J. Bridges [u. a.]: *Revisiting the Sequential Programming Model for the Multicore Era.*

in: *IEEE Micro* 1 Vol. 28 (2008), S. 12–20.

[Fur00] S. Furber: *ARM System-on-Chip Architecture.*

2nd edition, Pearson Education Limited, 2000.

ISBN 978-0-201-67519-1