

# Eingebettete Prozessorarchitekturen

## 1. Einleitung

Andreas Koch

FG Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen  
Informatik, TU Darmstadt

Wintersemester 2009/2010

- Eingebettete Systeme (ES)
- Prozessor
  - ... aber nicht zwangsläufig programmierbarer Mikroprozessor
  - Hier allgemeiner: datenverarbeitende Einheit
- Viele unterschiedliche Realisierungsmöglichkeiten
- Übersicht über vier Ansätze
  - Sicht aus dem Orbit
  - Viele Details weggelassen
- Trotzdem mit praktischem Anteil
  - Experimente am Rechner

- Lehrform: Integrierte Veranstaltung mit 2 SWS
- Vorlesungen und Übungen nach Bedarf gemischt
- Prüfung
  - Zwei vorlesungsbegleitende Teilprüfungen
    - Art wird noch festgelegt und rechtzeitig bekanntgegeben
  - **Freiwillige** Hausaufgaben
    - Ein Aufgabenblatt je Technologie
    - Abgabemodalitäten auf Aufgabenblättern
    - Können zur Notenverbesserung eingebracht werden
    - Genaueres wird noch bekanntgegeben

- Für Lösung der Hausaufgaben Zugang zu Software-Werkzeugen erforderlich
- Nicht auf RBG Pool-Rechnern verfügbar
- Nur auf Rechnern der FG ESA installiert
  - Ausnahme: Tools für erste Phase sind frei verfügbar
- Arbeit unter Linux
  - Gegebenenfalls vorher einarbeiten!
- Zugang von ausserhalb möglich (via SSH/VNC)
- Nach Absprache Arbeit auch im Praktikumsraum der FG ESA
- In jedem Fall für letzte Phase (echte Hardware)

- Unbetreute Übungen
- Allgemeine Fragen: Im **Forum** der Fachschaft stellen
  - Dann haben alle etwas von Antworten und Diskussionen
- Spezielle Fragen: Via E-Mail
- Wenn es hakt: In Sprechstunde kommen

- 1 Very Long Instruction Word-Prozessoren
  - Technologie von Hewlett-Packard und ST Microelectronics
  - Vier Wochen
- 2 Konfigurierbare Prozessoren
  - Technologie von Tensilica
  - Drei Wochen
- 3 Rekonfigurierbare Prozessoren
  - Technologie von Stretch
  - Drei Wochen
- 4 Adaptive Computer
  - Technologie von Xilinx und der FG ESA
  - Hier auch Experimente mit echter Hardware möglich
  - Fünf Wochen

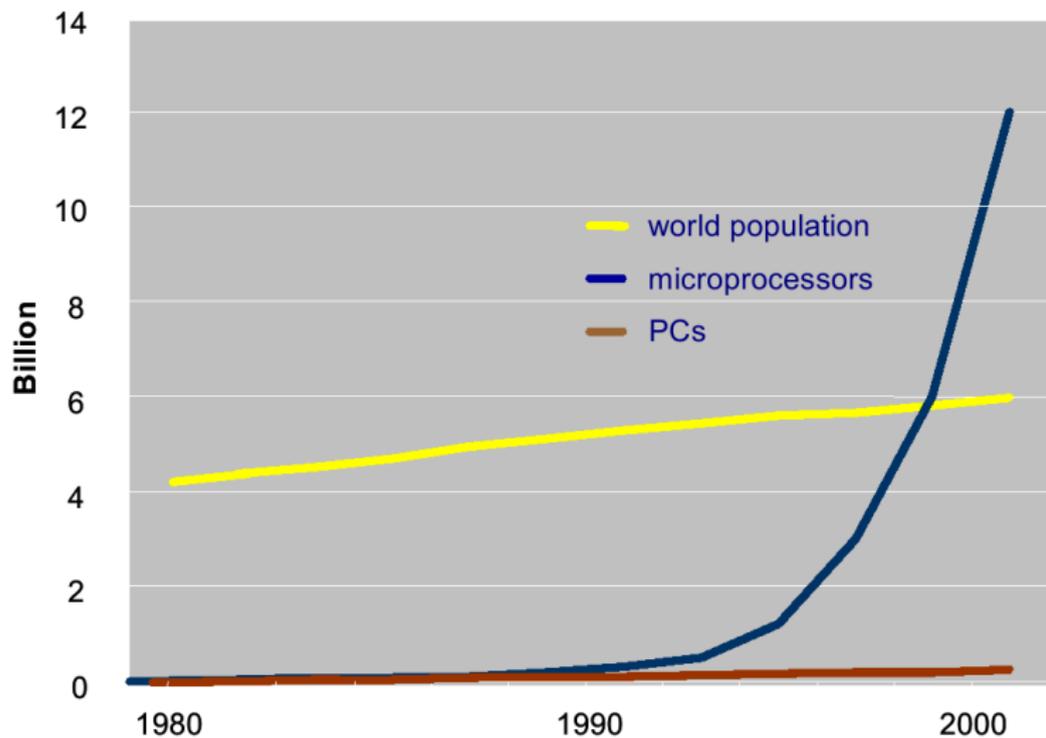
## ... wenn alles glatt geht: Änderung

- Nur **Kurzüberblick** über Stretch
- Stattdessen Behandlung von **PICO**
- Einer der modernsten C-nach-Hardware Compiler
  - Erzeugt aus C-Programmen angepasste Hardware-Beschleuniger
  - Bisher reines Forschungsgebiet, nun erster kommerzieller Einsatz
  - Verspricht extreme Steigerung der Produktivität
  - Nicht ganz billig (sonst USD 500K pro Lizenz)
- Tool ist aber auch am Fachgebiet neu
  - ... daher noch keine Garantien für Einbau in Vorlesung dieses Jahr

- Brandaktuelle
  - Hardware-Architekturen
  - CAD-Werkzeuge
- Vorträge und Lehrmaterial noch nicht perfekt ausgereift
  
- Selber Dokumentation lesen
  - Steht komplett zur Verfügung
- In Experimenten Sachen ausprobieren
  - Auf Fehler und Probleme hinweisen
- Auch der Vortragende ist nicht allwissend!

# Eingebettete Systeme

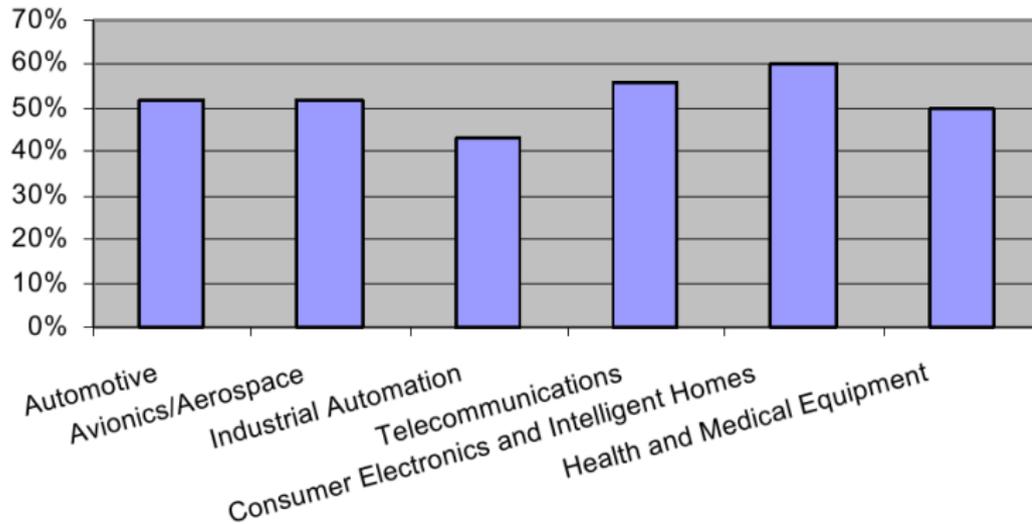
# Anzahl Mikroprozessoren



A. Koch

# Anteil von ES an Produktkosten

A. Koch

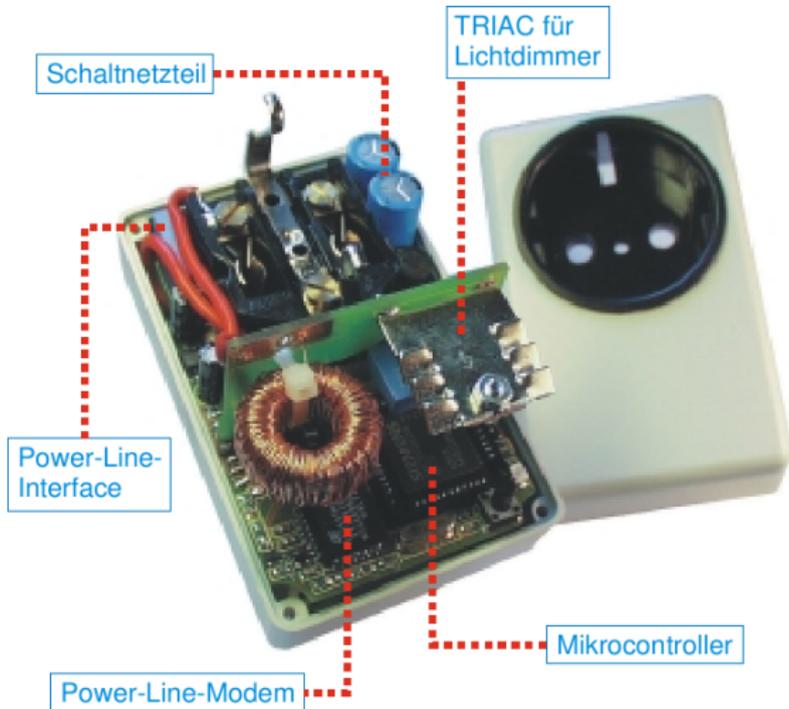


- Spezialisiert für bestimmte Aufgaben
  - Im allgemeinen nicht vom Benutzer veränderbar
- Oft harte externe Anforderungen
  - Rechenleistung
  - Energieverbrauch
  - Platzbedarf
  - Zuverlässigkeit
  - Umgebungsbedingungen
  - Kosten
- Häufig nicht mit Standardlösungen erfüllbar

# ES: Fernschaltbare Steckdose

Von sehr klein und preiswert . . .

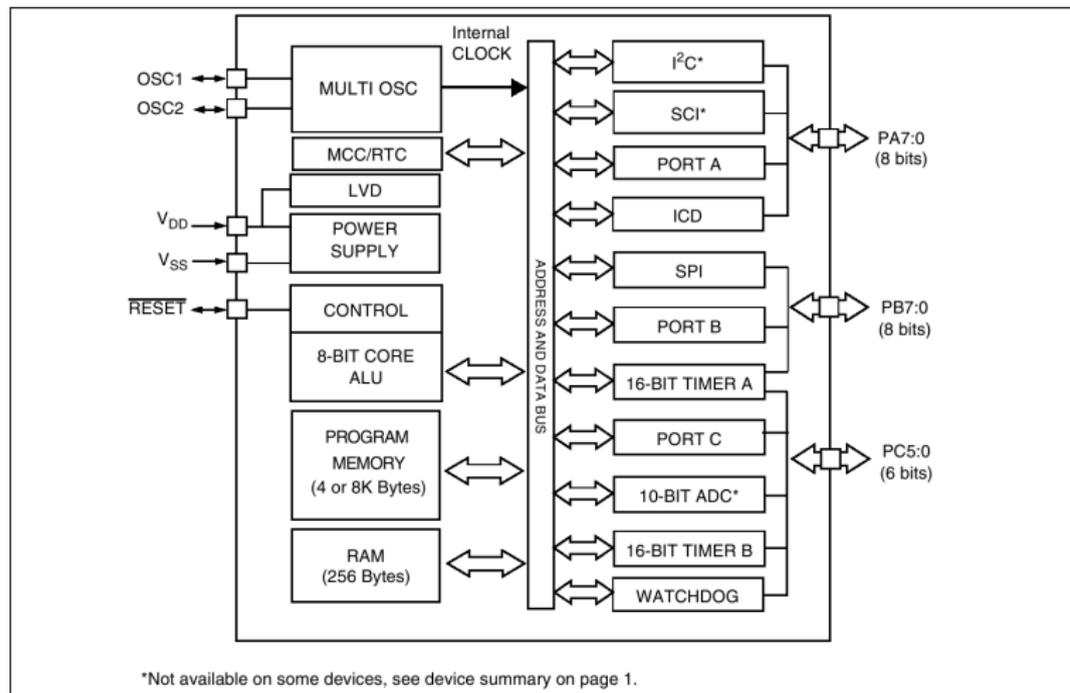
A. Koch



# STMicroelectronics ST7 Microcontroller

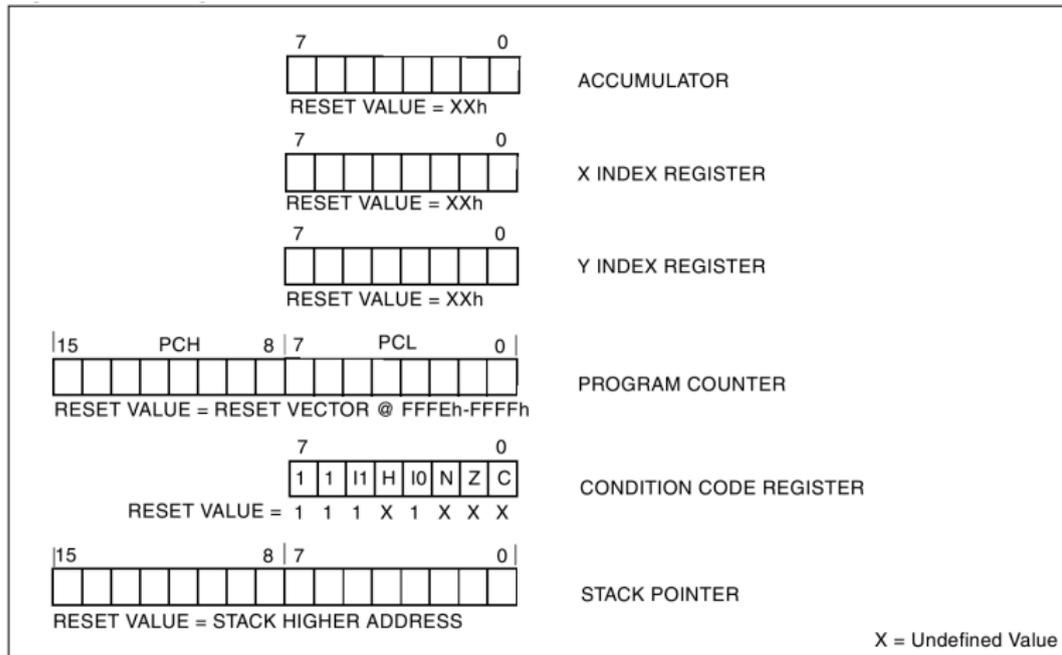
## On-Chip Komponenten

A. Koch



# STMicroelectronics ST7 Microcontroller

## Instruction Set Architecture (ISA)



# Eingebettetes System: Internet Router

... bis extrem leistungsfähig

A. Koch

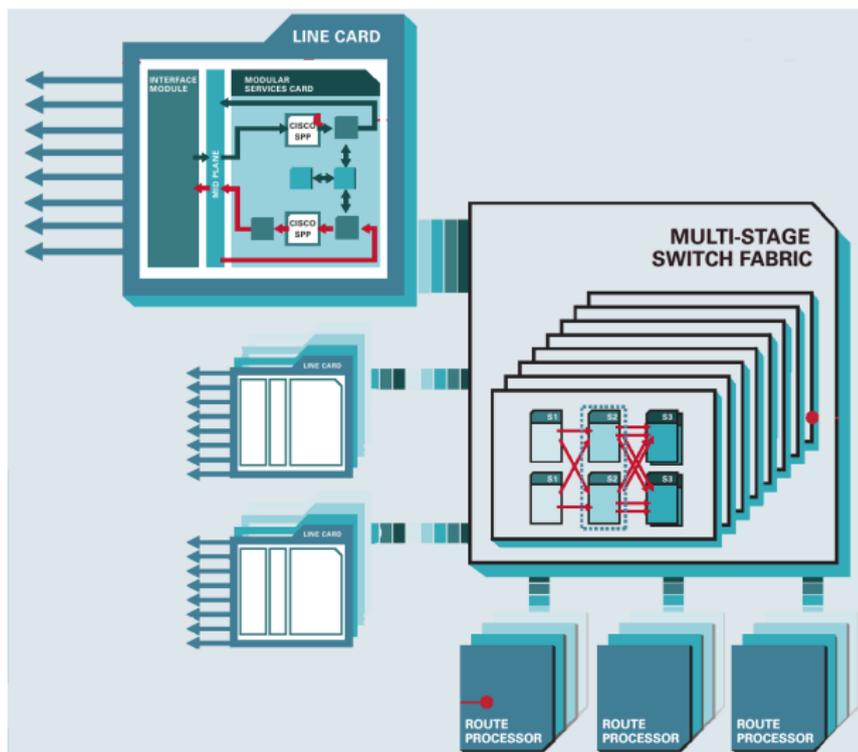


92 Tb/s Vermittlungskapazität

# Cisco CRS-1

## Systemarchitektur

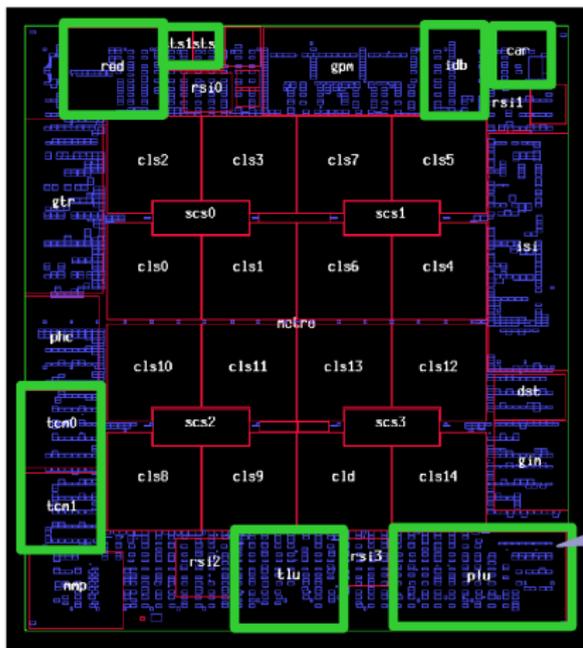
A. Koch



# Cisco CRS-1

## On-Chip Komponenten im Silicon Packet Processor (SPP)

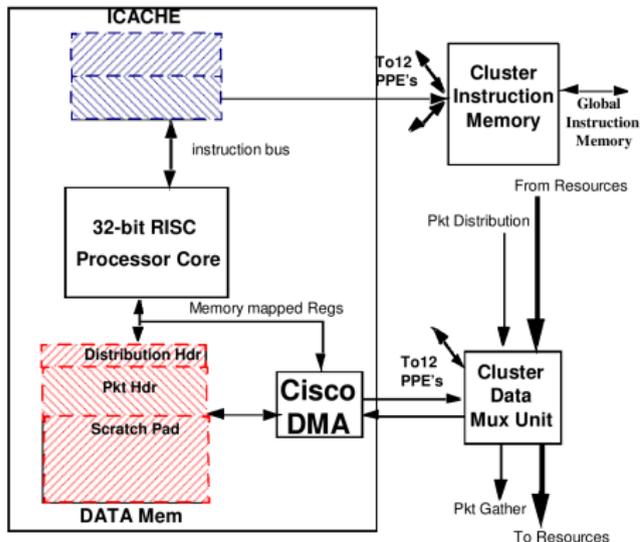
A. Koch



16 Cluster mit je 12 Packet Processing Elements (PPEs)

# Cisco CRS-1

## Packet Processing Element



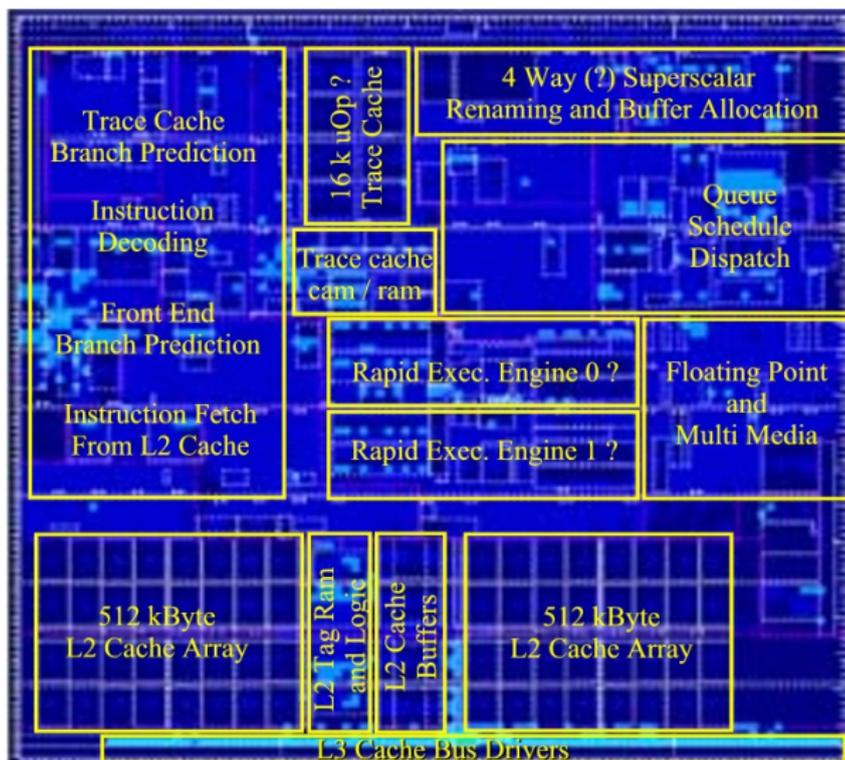
- Je PPE: 32b RISC-Prozessor → 188 PPEs/Chip
  - Mit eigenem Speicher und Spezialhardware
- 2 Chips je Line Card
- Bis zu 40 Line Cards → Bis zu 15.040 PPEs pro System

- Effiziente Bereitstellung von Rechenleistung
- Spezielle Architekturen
  - Systemebene
  - Prozessorebene

➡ Nicht mehr “one size fits all”!

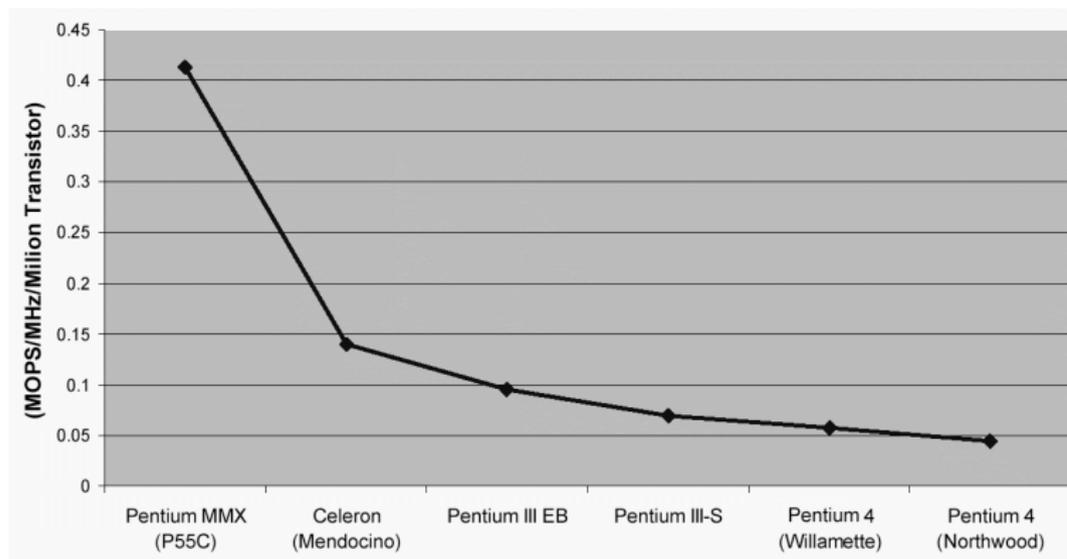
# Standardprozessor: Intel P4 Prescott

A. Koch



# Effizienz von Standardprozessoren

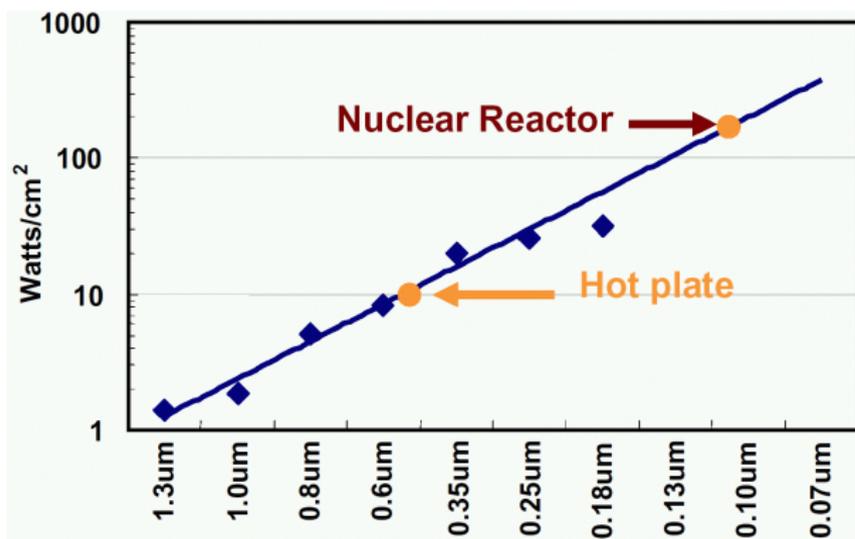
A. Koch



# Energieverbrauch Leistungsdichte

- Beim Umschalten von Transistoren
  - Immer höhere Taktfrequenzen also problematisch
- Leckströme
  - Extrem feine Chip-Strukturen verhindern vollständiges Abschalten von Transistoren

A. Koch



- 1 Anderer Ansatz für Universalprozessoren
  - Weniger Fläche für Verwaltungsaufgaben
- 2 Spezialisieren Universalprozessoren
  - **Feste** anwendungsspezifische Instruktionen
  - **Variable** anwendungsspezifische Instruktionen
- 3 Veränderbare Prozessor- und System**architektur**

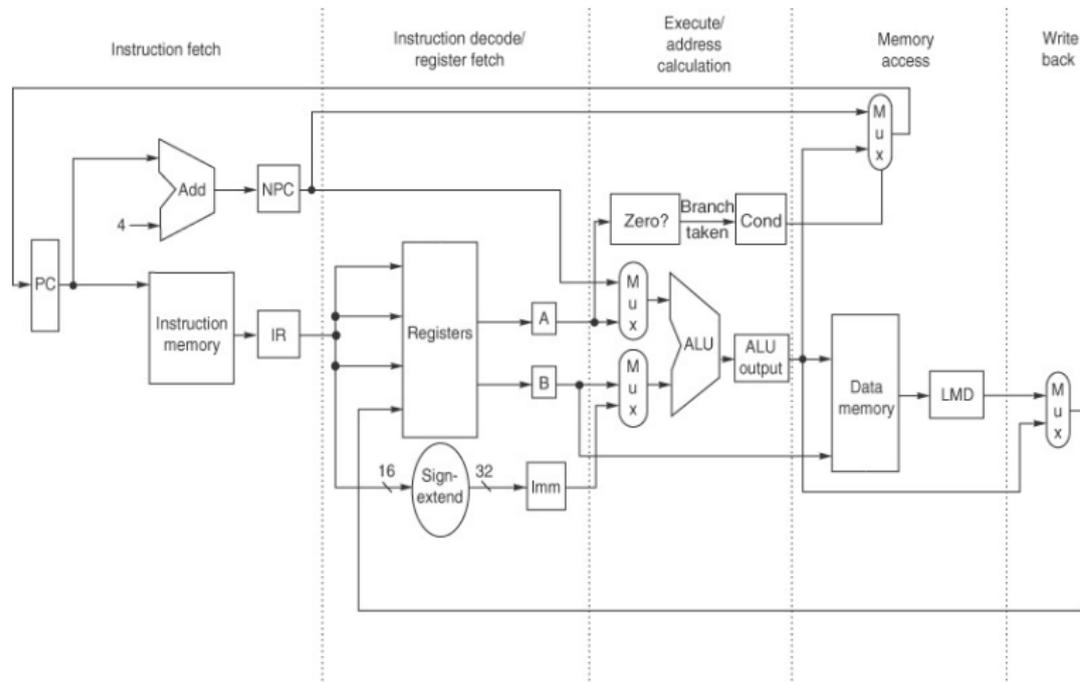
# Instruction-level Parallelism

# Höhere Rechenleistung durch parallele Ausführung von Operationen

# Wiederholung: Einfache Prozessor-Pipeline

GDI3 / TGD12

A. Koch



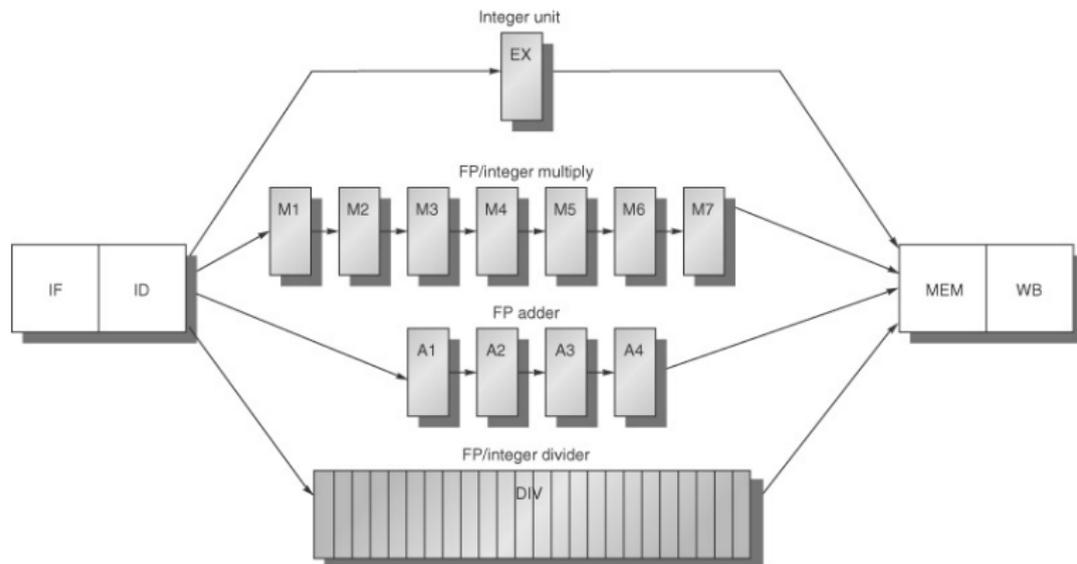
© 2007 Elsevier, Inc. All rights reserved.

# Ausnutzung von Pipeline-Parallelität

Instruction number	Clock number								
	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Instruction $i$	IF	ID	EX	MEM	WB				
Instruction $i + 1$		IF	ID	EX	MEM	WB			
Instruction $i + 2$			IF	ID	EX	MEM	WB		
Instruction $i + 3$				IF	ID	EX	MEM	WB	
Instruction $i + 4$					IF	ID	EX	MEM	WB

# Idee: Nicht nur eine ALU in EX-Stufe

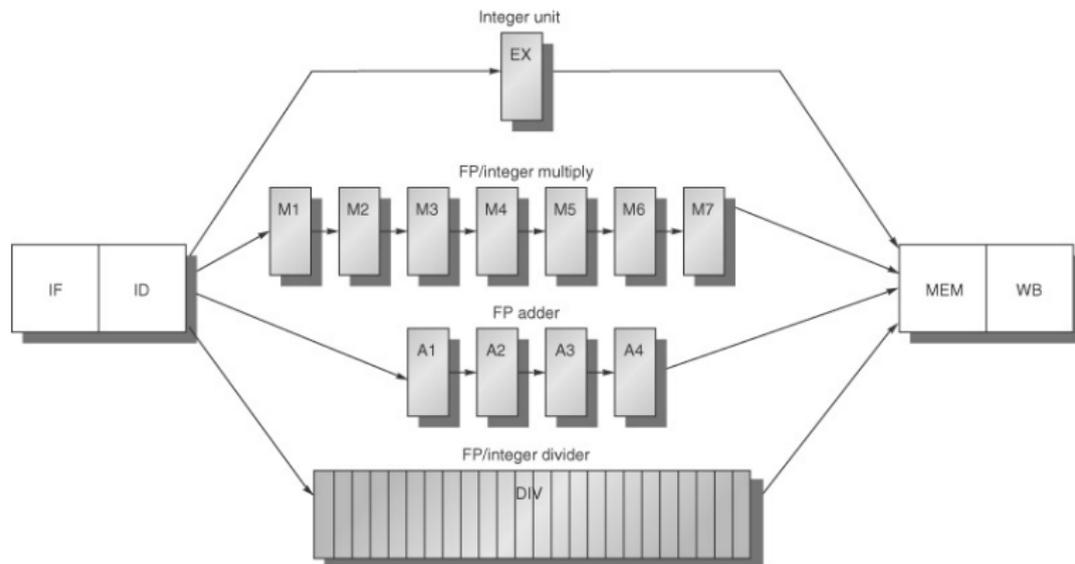
Mehrere spezialisierte Recheneinheiten



© 2007 Elsevier, Inc. All rights reserved.

Aber nicht alle pipelined (z.B. Div zu groß ...)

# Jetzt mehrere Instruktionen parallel ausführen



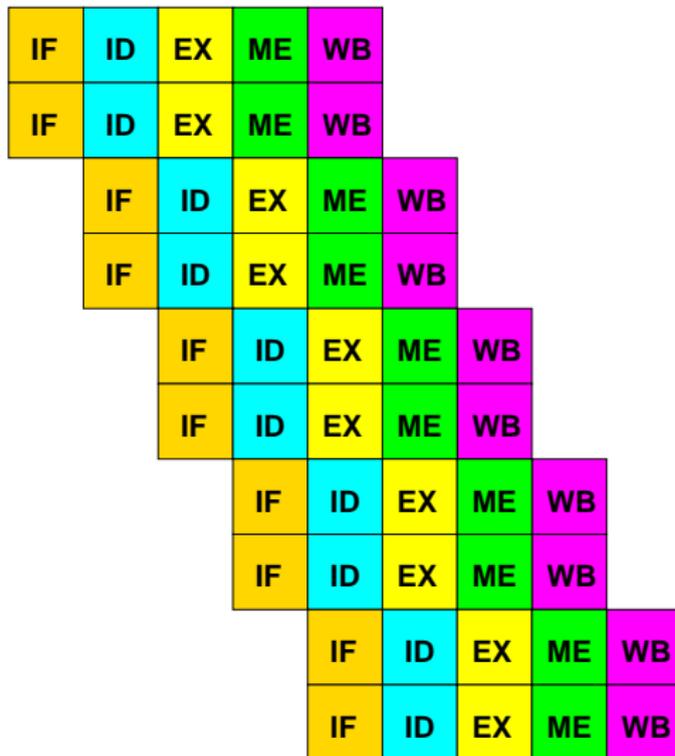
© 2007 Elsevier, Inc. All rights reserved.

MUL.D	IF	ID	M1	M2	M3	M4	M5	M6	M7	MEM	WB
ADD.D		IF	A1	A2	A3	A4	MEM	WB			
L.D		IF	ID	EX	MEM	WB					
S.D			IF	ID	EX	MEM	WB				

# Superskalare Architektur

Hier mit zwei parallelen Pipelines

A. Koch



```
addi $t0, $t4, 1 ; L1  
addi $t1, $t5, 2 ; L2  
addi $t2, $t6, 3 ; L3  
addi $t3, $t7, 4 ; L4
```

- Hier parallel ausführbar auf Beispielarchitektur
- Je zwei beliebige Anweisungen
- Keine **Abhängigkeiten** zwischen Einzelinstruktionen
- Wenn ausreichend viele Recheneinheiten vorhanden
  - Alles parallel
  - Würde im Beispiel aber nicht klappen
  - Nur zwei ALUs in Pipelines
  - Auch bezeichnet als *structural hazard*

```
addi $t0, $t3, 1  
addi $t1, $t0, 2  
addi $t2, $t1, 3
```

- Nicht mehr parallel ausführbar
- Zwischenergebnisse müssen berechnet werden
  - Via t0 und t1

➔ Datenabhängigkeiten verhindern parallele Ausführung

# Arten von Datenabhängigkeiten

```
addi $t0, $t3, 1  
addi $t1, $t0, 2
```

 Echte Abhängigkeit (read-after-write)

```
addi $t0, $t3, 1  
addi $t0, $t1, 2
```

 Ausgabeabhängigkeit (write-after-write)

```
addi $t0, $t3, 1  
addi $t3, $t1, 2
```

 Antiabhängigkeit (write-after-read)

# Auflösen von Datenabhängigkeiten

Teilweise durch Umbenennen von Registern möglich

Vorher

```
addi  $t0, $t3, 1   ; L1
sw    $t0, 4($t1)   ; L2
addi  $t0, $t2, 2   ; L3
sw    $t0, 8($t1)   ; L4
```

Nachher

```
addi  $t7, $t3, 1   ; L1
sw    $t7, 4($t1)   ; L2
addi  $t0, $t2, 2   ; L3
sw    $t0, 8($t1)   ; L4
```

A. Koch

- Ausgabeabhängigkeit (WAW) L1,L3
- t0 teilweise in t7 umbenannt
- Ausgabeabhängigkeit aufgelöst
- Aber noch Datenabhängigkeit (RAW) L1,L2 und L3,L4
  - **addi** muss t7,t0 schreiben, bevor es in **sw** gelesen wird

# Mehr Parallelität durch Umstellen

Verschieben von datenunabhängigen Anweisungen

Vorher

```
addi    $t7, $t3, 1    ; L1
sw      $t7, 4($t1)    ; L2
addi    $t0, $t2, 2    ; L3
sw      $t0, 8($t1)    ; L4
```

Nachher

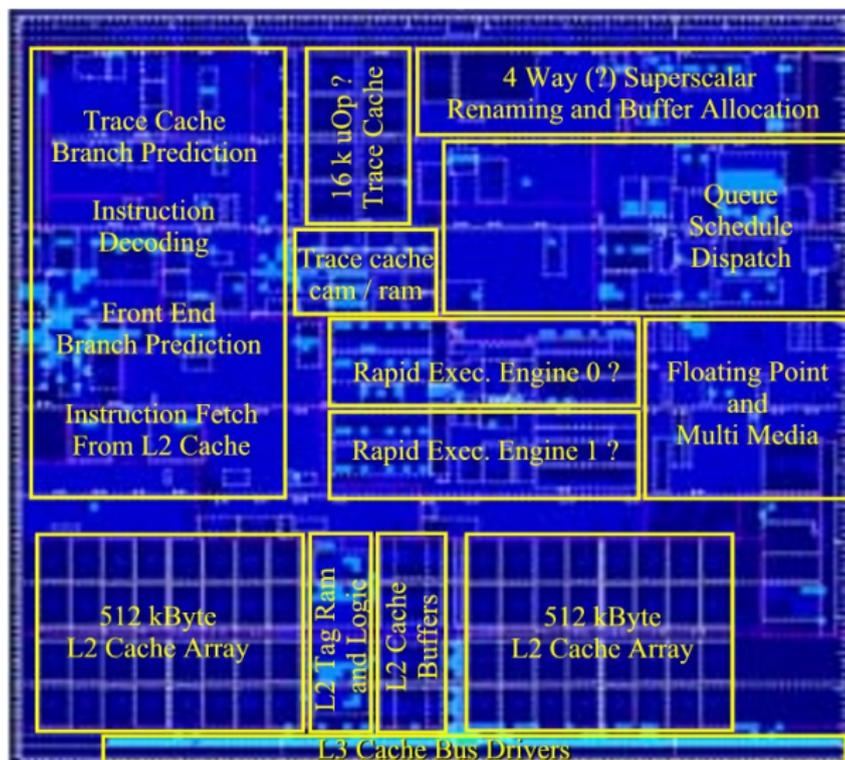
```
addi    $t7, $t3, 1    ; L1
addi    $t0, $t2, 2    ; L3
sw      $t7, 4($t1)    ; L2
sw      $t0, 8($t1)    ; L4
```

- RAW L1,L2 und L3,L4
- Nicht parallel ausführbar
  - Auf superskalärer Beispielerarchitektur

- L3 und L2 **umsortiert**
- Nicht datenabhängig
- Nun parallel ausführen:  
L1,L3 und L2,L4

# Standardprozessor: Intel P4 Prescott

A. Koch

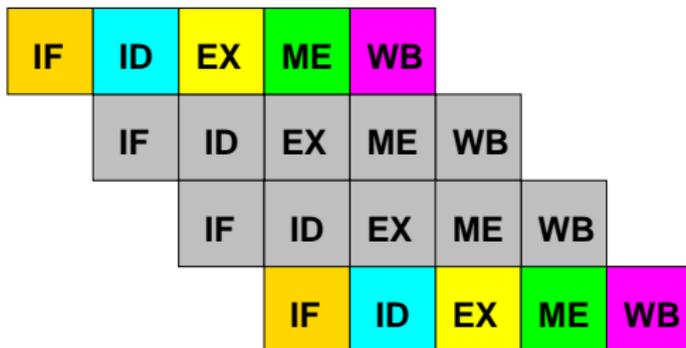


Fenster zum Umsortieren: Teilweise über 100 Instruktionen

# Kontrollabhängigkeiten

Durch bedingte Sprünge

L1: `bgt $t1, $t2, L2`



L1+1: `xxx`

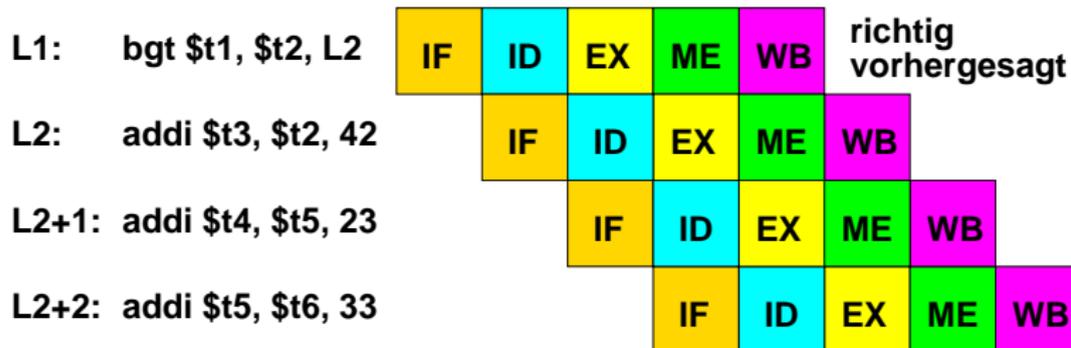
L1+2: `xxx`

L2: `addi $t3, $t2, 42`

A. Koch

- Annahme: Sprungentscheidung wird am Ende von EX bestimmt
- Zwei verschwendete Instruktionen
- Verschwendete Zeit wächst mit Pipeline-Länge
- Intel P4 Cedar Mill: 31 Stufen

# Abhilfemöglichkeit: Sprungvorhersage

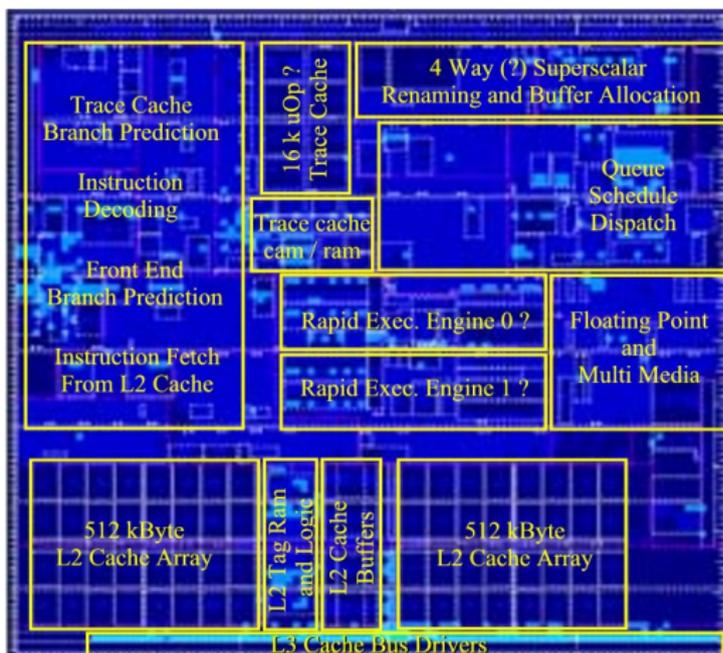


A. Koch

- Für jede Sprunginstruktion Historie führen
  - Genommen oder nicht genommen?
- Bessere Verfahren
  - Berücksichtigen global **Folgen** von **vorhergehenden** Sprunginstruktionen
  - Speichern Adresse des Sprungziels
    - *branch target buffer*, besser: *branch target cache*
- Erreichen  $< 3\%$  falsch vorhergesagte Sprünge

# Standardprozessor: Intel P4 Prescott

A. Koch



- Branch-Target-Buffer mit 4096 Einträgen
- Kombinierte globale/lokale Sprungvorhersage
  - Turnierverfahren

- Soweit erledigt
  - Auflösen von unechten Abhängigkeiten durch Umbenennen von Registern
  - Umsortieren von Anweisungen für mehr Parallelität
  - Reduzieren der Kosten von bedingten Sprüngen
- Aber Einschränkung:
  - Anweisungen können nicht über bedingte Sprünge **hinweg** verschoben werden
  - Compiler: Keine Optimierung über Basisblöcke hinweg

```
addi    $t0, $t3, 1    ; L1
bgt     $t0, $t2, L4   ; L2
addi    $t1, $t2, 42   ; L3
sw      $t0, 0($t5)    ; L4
sw      $t1, 4($t5)    ; L5
```

- L1 und L2 nicht gleichzeitig (RAW)
- L1 und L3 wären gleichzeitig möglich
- Wird vereitelt durch dazwischenliegende Sprunginstruktion

```
addi    $t0, $t3, 1    ; L1
bgt     $t0, $t2, L4   ; L2
addi    $t1, $t2, 42   ; L3
sw      $t0, 0($t5)    ; L4
sw      $t1, 4($t5)    ; L5
```

- L1 und L3 **doch** gleichzeitig ausführen
- L3 wird dabei **spekulativ** ausgeführt
- Falls anschliessender Sprung über L3 hinweg
  - Alten Wert von t1 wiederherstellen
  - Spätestens bei L5 (kein spekulatives Schreiben!)

- Organisatorisches
- Spektrum eingebetteter Systeme
- Spezialisierte ./ Standardprozessoren
- Parallele Ausführung von Operationen
  - Auf Instruktionsebene
  - Abhängigkeiten
  - Techniken zum Auflösen
  - Aufwand in Hardware