Kap.3
Mikroarchitektur

Prozessoren,
interne Sicht

3.1 Elementare Datentypen, Operationen und ihre Realisierung (siehe 2.1)
3.2 Mikroprogrammierung
3.3 Einfache Implementierung von MIPS
3.4 Pipelining
3.5 Superskalare Befehlsausführung

Übersicht

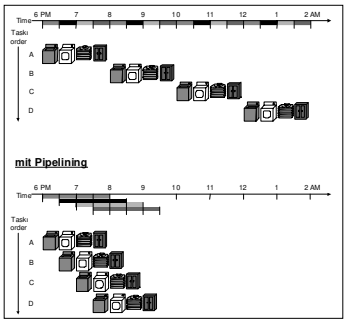
Performanz von Rechnern läßt sich durch Pipelining steigern

- Prinzip der Fließbandverarbeitung
- Hardware-Realisierung des MIPS-Datenpfades mit Fließband
- Probleme bei Fließbandverarbeitung

Das Prinzip an einem alltäglichen Beispiel

- Sie kommen aus dem Urlaub und es ist viel schmutzige Wäsche zu waschen!
- Zur Verfügung stehen:
  - eine Waschmaschine (1/2 Stunde Laufzeit)
  - ein Trockner (1/2 Stunde Laufzeit)
  - eine Bügelmaschine (1/2 Stunde Arbeit zum Bügeln)
  - ein Wäscheschrank (1/2 Stunde Arbeit zum Einräumen)
- jeder der Personen A, B, C, D aus dem Haushalt wäscht seine Wäsche selbst
- Es gibt zwei Möglichkeiten die vier Waschvorgänge auszuführen!

Das Prinzip an einem Beispiel



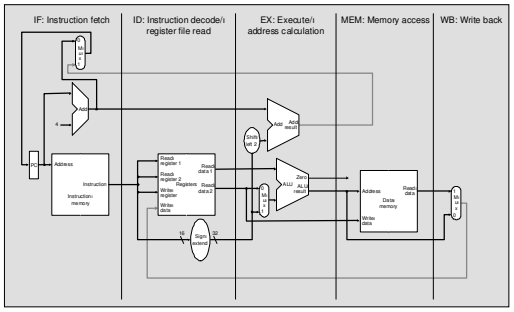
Dauer der Arbeiten: 8 Stunden

Dauer der Arbeiten: 3 1/2 Stunden

Aufteilung der Befehlsabarbeitung in Phasen

- Um Pipelining im Datenpfad ausnutzen zu können, muß die Abarbeitung eines Maschinenbefehls in mehrere Phasen mit möglichst gleicher Dauer aufgeteilt werden.
- Eine sinnvolle Aufteilung ist abhängig vom Befehlssatz und der verwendeten Hardware.
- Beispiel: Abarbeitung in 5 Schritten:
  - Befehls-Holphase (instruction fetch)
  - Dekodierphase / Lesen von Operanden aus Registern
  - Ausführung / Adressberechnung
  - Speicherzugriff (memory access)
  - Abspeicherphase (result write back phase)
- Bei CISC ist Pipelining schwer möglich, da die Dauer der Dekodier- und Ausführungsphase (evtl. mehrere Mikroprogrammbefehle) bei den verschiedenen Maschinenbefehlen sehr unterschiedlich ist.

Aufteilung des Datenpfades in 5 Phasen



Pipelining: Illustration

- Annahme: Aufteilung der Befehlsabarbeitung in 5 gleichlange Phasen

Befehl 1:	P1	P2	P3	P4	P5					
Befehl 2:		P1	P2	P3	P4	P5				
Befehl 3:			P1	P2	P3	P4	P5			
Befehl 4:				P1	P2	P3	P4	P5		
Befehl 5:					P1	P2	P3	P4	P5	
Befehl 6:						P1	P2	P3	P4	P5
Befehl 7:							P1	P2	P3	P4	P5
Zeitschritt:	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11

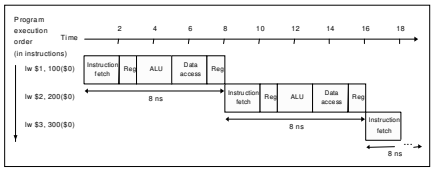
Pipelining: Speedup (1)

- Annahmen:
  - Abarbeitungszeit eines Befehls ohne Pipelining: t
  - k Pipelinestufen, gleiche Laufzeit der Stufen
  - Laufzeit einer Stufe der Pipeline: t/k
- Beschleunigung bei m auszuführenden Instruktionen:
  - m = 1: Laufzeit mit Pipeline = k * t/k = t
    ⇒ keine Beschleunigung
  - m = 2: Laufzeit mit Pipeline = t + t/k = (k+1)t / k
    ⇒ Beschleunigung um Faktor 2 k / (k+1)
  - m ≥ 1: Laufzeit mit Pipeline = t + (m-1)t / k,
    Laufzeit ohne Pipeline = m t
  - ⇒ Beschleunigung um $\frac{mt}{t+(m-1)\cdot\frac{t}{k}} = \frac{mk}{m+k-1} = k - \frac{k(k-1)}{m+k-1}$

Pipelining: Speedup (2)

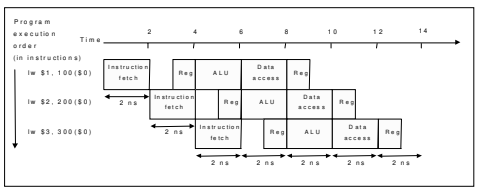
- Beschleunigung bei m auszuführenden Instruktionen:
  - m ≥ 1: Laufzeit mit Pipeline = t + (m-1)t / k,
  - Laufzeit ohne Pipeline = m t
  - ⇒ Beschleunigung um $\frac{mt}{t+(m-1)\cdot\frac{t}{k}} = \frac{mk}{m+k-1} = k - \frac{k(k-1)}{m+k-1}$
- Ergebnis: Für m >> k nähert sich der Speedup also der Anzahl k der Pipelinestufen.
- Es wurde vorausgesetzt, daß sich die Ausführung der Befehle ohne weiteres „verzahnen“ läßt. Dies ist in der Praxis nicht ohne weiteres der Fall !

Programmablauf ohne Pipelining



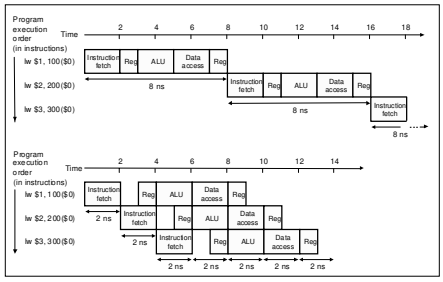
Instruction (class)	Instruction fetch	Register read	ALU operation	Data access	Register write	Total time
lw	2ns	1ns	2ns	2ns	1ns	8ns
sw	2ns	1ns	2ns	2ns		7ns
R-type	2ns	1ns	2ns		1ns	6ns
branch	2ns	1ns	2ns			5ns

Programmablauf mit Pipelining



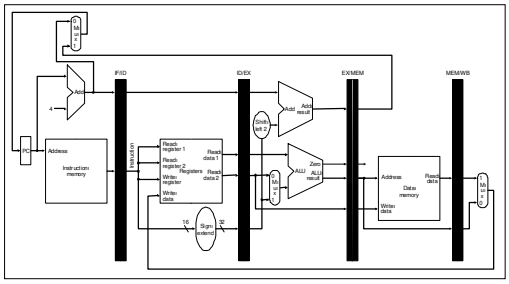
Instruction (class)	Instruction fetch	Register read	ALU operation	Data access	Register write	Total time
lw	2ns	1ns	2ns	2ns	1ns	8ns
sw	2ns	1ns	2ns	2ns		7ns
R-type	2ns	1ns	2ns		1ns	6ns
branch	2ns	1ns	2ns			5ns

Pipelining versus Non-Pipelining

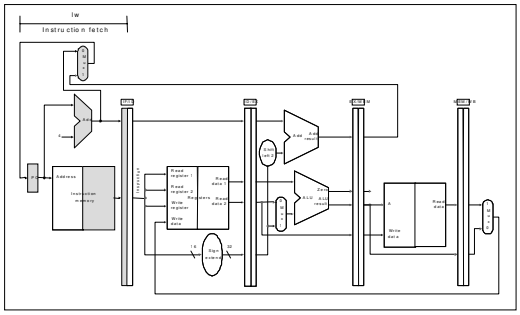


Hardwarerealisierung der Unterteilung

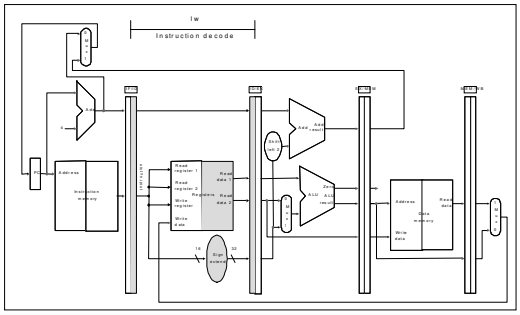
- Füge Registerbänke ein, um die Phasen hardwaremässig zu trennen



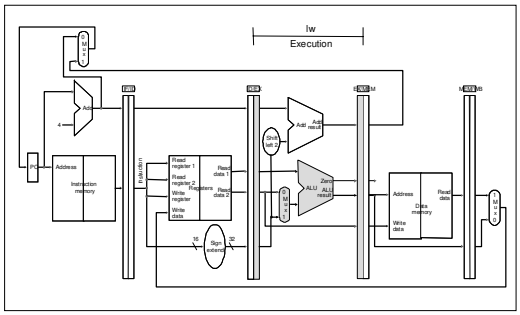
Abarbeitung einer Instruktion:
Instruction fetch



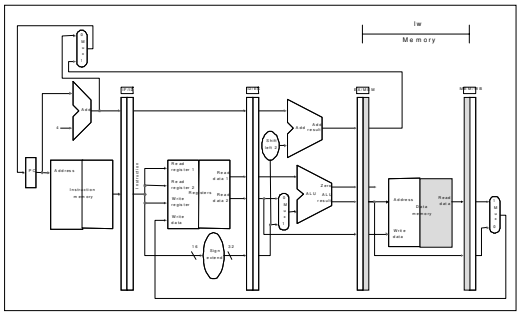
Abarbeitung einer Instruktion:
Instruction decode and Register file read



Abarbeitung einer Instruktion:
Execution

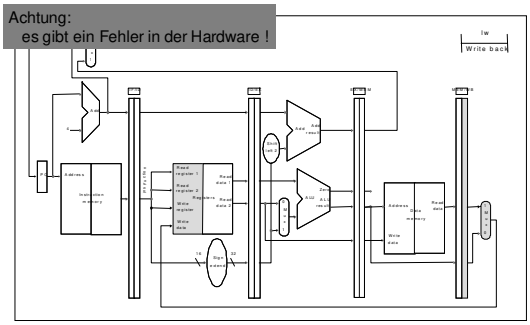


Abarbeitung einer Instruktion:
Memory Access



Abarbeitung einer Instruktion:
Write back

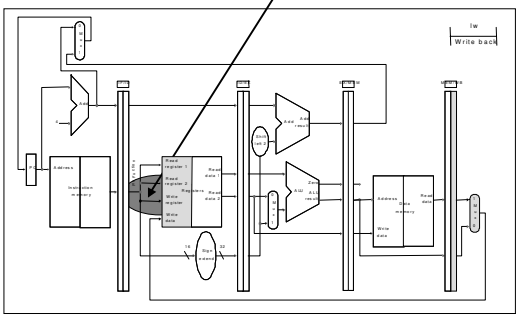
Achtung:
es gibt ein Fehler in der Hardware !



Fehler in der Hardware

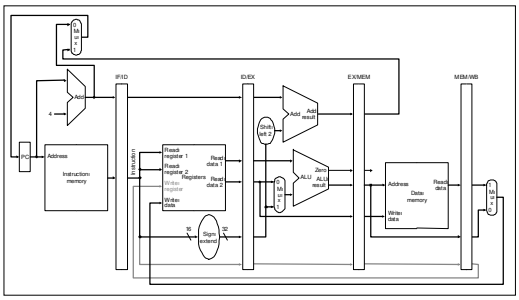
Der LOAD-Befehl schreibt das Ergebnis in das falsche Register!

Die angelegte Registernummer gehört zu der Instruktion, die gerade erst in die Pipeline geschoben wurde!

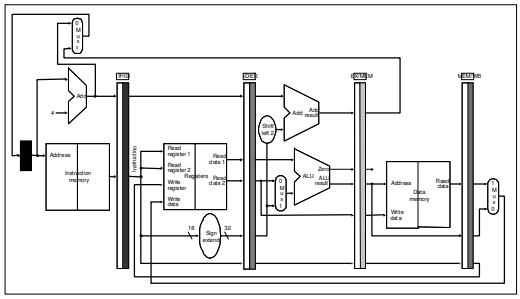


Korrigierte Hardware

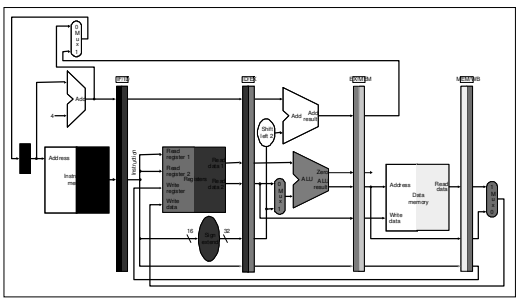
Die Registernummer muss über die ganzen Phasen in den entsprechenden Pipeline-Registern gerettet werden



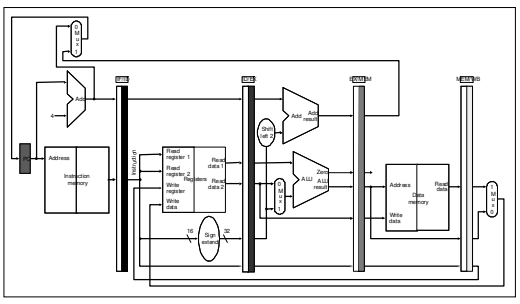
Das Pipelining-Prinzip (1)



Das Pipelining-Prinzip (2)

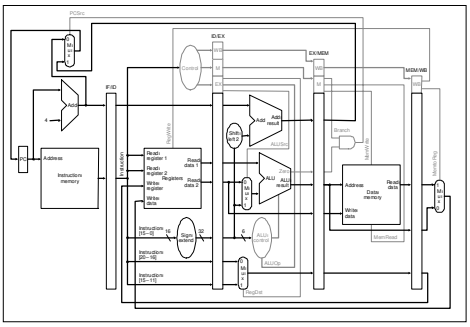


Das Pipelining-Prinzip (3)



Hardware mit Kontrolllogik

Die Kontrollsignale zu einer Instruktion müssen ebenfalls in den Pipeline-registern gerettet werden, bis sie benutzt werden können.



Probleme beim Pipelining: Datenabhängigkeit

- Betrachte folgendes Maschinenprogramm:

das erwartete Resultat

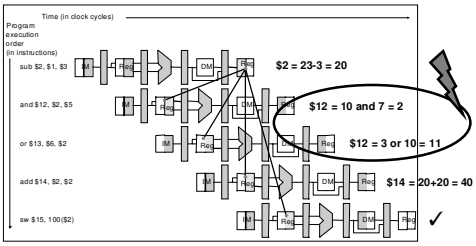
```
sub  $2 , $1, $3      # $2  = 23-3 = 20
and  $12, $2, $5      # $12 = 20 and 7 = 4
or   $13, $6, $2      # $13 = 3 or 20 = 23
add  $14, $2, $2      # $14 = 20+20= 40
sw   $15, 100($2)     # save $15 to 100(20)
```

- Nehme an, am Anfang ist Register $1 mit 23,
  $2 mit 10,
  $3 mit 3,
  $5 mit 7,
  $6 mit 3

  belegt.

Berechnung durch die Pipeline

Anfangsbelegung
$1 mit 23
$2 mit 10
$3 mit 3
$5 mit 7
$6 mit 3



Datenabhängigkeiten

- Definition:
  Gegeben zwei Anweisungen S_1, S_2.
  DEF_i sei die Menge der Variablen auf die S_i schreibend zugreift, USE_i sei die Menge der Variablen auf die S_i lesend zugreift.

  S_1, S_2 heißen datenunabhängig, wenn
  $(DEF_1 \cap USE_2) \cup (DEF_2 \cap USE_1) \cup (DEF_1 \cap DEF_2) = \emptyset$

Datenabhängigkeiten

Wird S_1 vor S_2 ausgeführt dann besteht eine

- **True Dependence** (RAW) von S_1 nach S_2 wenn
  $DEF_1 \cap USE_2 \neq \emptyset$ gilt (geschrieben: $S_1 \xrightarrow[\delta^t]{} S_2$)
- **Anti Dependence** (WAR) von S_1 nach S_2 wenn
  $USE_1 \cap DEF_2 \neq \emptyset$ gilt (geschrieben: $S_1 \xrightarrow[\delta^a]{} S_2$)
- **Output Dependence** (WAW) von S_1 nach S_2 wenn
  $DEF_1 \cap DEF_2 \neq \emptyset$ gilt (geschrieben: $S_1 \xrightarrow[\delta^o]{} S_2$)

Datenabhängigkeiten: Beispiel

```
S1: ADD  R1, R1, 2     ; R1 = R1 + 2
        δt
S2: ADD  R4, R1, R3    ; R4 = R1 + R3
        δa
S3: MULT R3, R5, 3     ; R3 = R5 * 3
        δo
S4: MULT R3, R6, 3     ; R3 = R6 * 3
```

Datenabhängigkeiten

Datenabhängigkeiten führen zu Hazards (Hemmnissen) die ohne Behandlung zu fehlerhaften Ergebnissen führen

Output- und **Anti Dependencies**

- bereiten bei einfachen Pipelines keine Probleme
- machen erst bei Techniken wie superskalarer Ausführung oder *out-of-order execution* Schwierigkeiten
- können zum Teil vom Compiler durch Variablenumbenennungen und Variablenkopien aufgelöst werden

  → **Pseudo Dependencies**

Software-Lösung

Compiler müssen folgende Aufgaben übernehmen

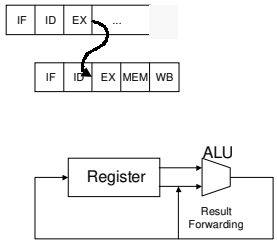
- Entdecken von Daten Hazards im generierten Maschinenprogramm
- Einfügen von **N**(o)-**OP**(eration)-Instruktion

In unserem Beispiel:

```
sub   $2, $1, $3
nop
nop
and   $12, $2, $5
or    $13, $6, $2
add   $14, $2, $2
sw    $15, 100($2)
```

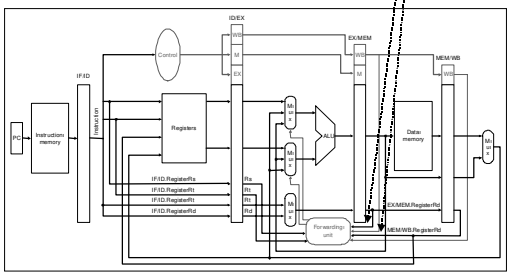
→ Hardwarelösung

Result Forwarding/Register Bypassing



Hardware-Lösung

Die Kontrolllogik benötigt die in den aktuellen Instruktionen benutzten Registernummern, um die Existenz und Art eines Daten Hazards zu erkennen.



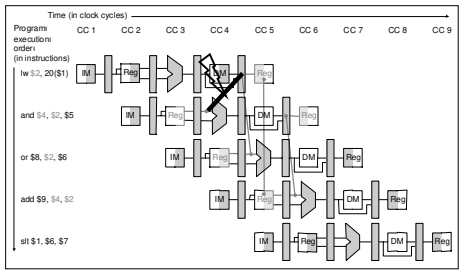
Vollständig ohne Stoppen der Pipeline geht es jedoch nicht !

Betrachte folgendes Programm

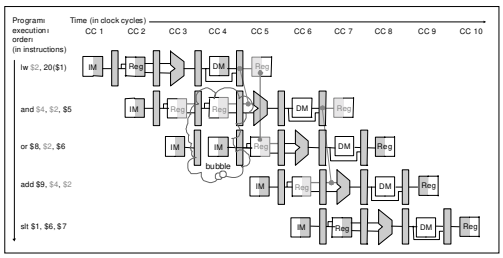
```
lw    $2, 20($1)
and   $4, $2, $5
or    $8, $2, $6
add   $9, $4, $2
alt   $1, $6, $7
```

Daten Hazard kann nicht hardwaremässig repariert werden, da zu dem Zeitpunkt, an dem $2 von der AND-Instruktion gelesen werden soll, der neue Wert von $2 nicht geladen ist !

Illustration



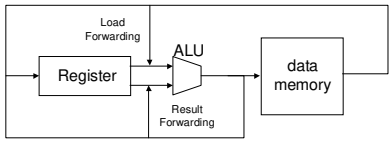
Einfügen eines Wartezyklus



Forwarding/Bypasstechniken (2)

lw $2, 20($1)
and $4, $2, $5

- man kann diesen Hazard nicht beseitigen aber
- man kann seine Folgen abkürzen



Probleme beim Pipelining: Control Hazards

Betrachte folgendes Maschinenprogramm:

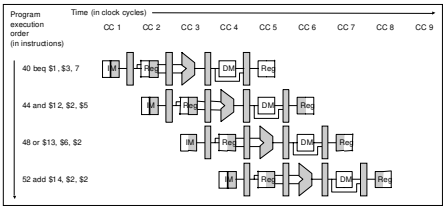
```
40   beq    $1 , $3, 72
44   and    $12, $2, $5
48   or     $13, $6, $2
52   add    $14, $2, $2
...
72   lw     $4, 50($14)
```

Frage
Welche Instruktion wird nach Instruktion 40 ausgeführt ?

Assume Branch not taken

In den einfachen Implementierungen wird angenommen, dass der Sprung nicht ausgeführt werden braucht !

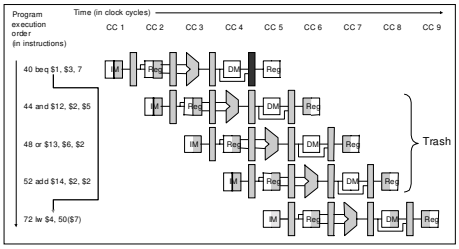
Die Folgeinstruktionen $pc+4, $pc+8 und $pc+12 werden "auf Verdacht" (spekulativ) in die Pipeline geschoben !



Assume Branch not taken ff

Wird die Abzweigung doch genommen,

so muss die Pipeline geleert werden !



Vermeidung von Kontrollhazards

- Software
  - Einfügen von NOPs durch den Compiler
  - Delayed Branch Technik
- Hardware
  - „einfrieren“ der Pipeline (stalling)
  - spekulative Ausführung
    - mit fester Vorhersage (asume branch taken/ not taken)
    - mit Sprungvorhersage
      - statisch (vom Compiler)
      - dynamisch

Delayed Branch

- Externe Rechnerarchitektur definiert, daß der Befehl nach einem Sprungbefehl immer ausgeführt wird
  (unabhängig von der Sprungbedingung)
- Der Compiler muß durch Umordnung der Befehlssequenz einen datenunabhängigen Befehl finden und diesen hinter die Sprunganweisung setzen
  - Im schlimmsten Fall eine NOP-Anweisung
  - Untersuchungen zeigen, daß ein Befehl gut gefunden werden kann, zwei sind schon schwierig, drei fast unmöglich
- Beispiel: SPARC-Architektur: 1 delay slot

```
CLR R3
CMP R1, R2
BEQ 5000
NEXT
```

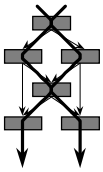
```
CMP R1, R2
BEQ 5000
CLR R3
NEXT
```


Sprungrichtungsvorhersage

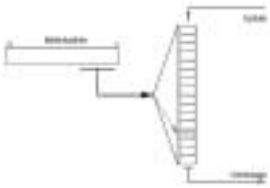
- Statische Sprungvorhersage
  - ein Bit im Opcode des Sprungbefehls definiert, ob der Sprung spekulativ ausgeführt werden soll oder nicht
  - Schleifen: Wahrscheinlichkeit hoch, dass gesprungen wird
  - if-then-else: 2/3 der Ausführungen gehen in den ELSE-Teil
  - Vorhersagegenauigkeit: 55%-80%
- Dynamisch
  - Eine oder mehrere prozessorinterne Tabellen werden ständig aktualisiert und zur Erzeugung einer Vorhersage ausgewertet.
  - Tabellen mit Hilfe der Befehlsadresse des Sprungbefehls adressiert
  - Vorhersagegenauigkeit bis zu 97% (Literatur).

Informationsquellen für Sprungrichtungsvorhersage

- Per-Adress Vorgeschichte
  - Das Sprungverhalten jedes einzelnen Sprungs wird protokolliert und zur Vorhersage herangezogen.
  - Der Sprung wird im wesentlichen wieder so vorhergesagt, wie er bei letzten n Ausführungen am häufigsten ausgeführt wurde.
- Globale Vorgeschichte
  - Pfad, den Programm durch die letzten m Kontrollblöcke beschritten hat, kann zusätzliche Information liefern.
  - Wenn sich zwei Sprünge ähnlich verhalten (d.h. sie sind korrelliert), kann dies erkannt und ausgenutzt werden.



Sprungrichtungsvorhersage durch eine branch history table



- Einfaches dynamisches Verfahren
- Ein Teil der Befehlsadresse wird als Hash-Index verwendet
- Kollisionen sind möglich
  (Verschiedene Sprünge mit dem selben niederwertigen Adressanteil.)
- Kollisionsbehandlung wäre nur durch Tags möglich
- Die gespeicherte Information wird nach jeder Sprungausführung erneuert
- Aus dieser Information wird bei Bedarf eine Vorhersage abgeleitet

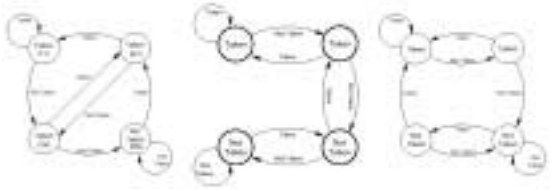
Vorhersageinformation

- Letzte Sprungausführung - 1 Bit
  - Vorhersage: Wie bei der letzten Ausführung
  - Update: Ausgang der letzten Ausführung speichern
- Muster der letzten n Sprungausführungen - n Bit
  - Vorhersage:
    Aufgrund einer Heuristik, die aus Sprunghäufigkeiten gewonnen wird
  - Update nach der Sprungausführung:
    Mit einem Schieberegister

...Vorhersageinformation

- Endlicher Automat (Finite State Machine) - 2 oder 3 Bit
  - Vorhersage:
    Vom Zustand abhängig, in dem sich der Automat befindet.
  - Update nach der Sprungausführung:
    Gemäß einer Zustandsübergangsfunktion

Endliche Automaten für die Sprungvorhersage



2-Bit History | 2-Bit sättigender Zähler | 2-Bit träger Automat

- Zähler und träge Automaten erzielen in der Regel die besten Vorhersagen bei geringstem Platzbedarf
- Genauigkeit hängt auch vom Initialzustand der Automaten ab

Sprungziel Speicher

- Berechnung der Sprungzieladresse kostet Zeit
  - Umsetzung der virtuellen in eine physikalische Adresse (Kap. 4)
  - Addition/Subtraktion der Sprungdistanz

→ schneller Zugriff auf

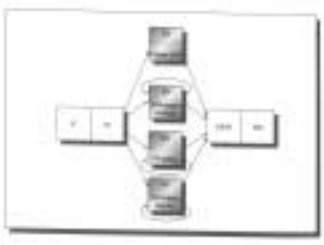
- die Zieladresse des Sprungs durch einen assoziativ Speicher BTAC (branch target address cache)
  - Adresse des Sprungbefehls → Adresse des Sprungziels
  - 1. Sprung löst Cachemiss aus, d.h. Speicher wird geladen
  - ab dem 2. Sprung: Sprungzieladresse steht zur Verfügung
- die Befehle am Sprungziel durch einen assoziativ Speicher BTC (branch target cache):
  - Adresse des Sprungbefehls → k Befehle am Sprungziel
  - 1. Sprung löst Cachemiss aus, d.h. Speicher wird geladen
  - ab dem 2. Sprung: Befehle am Sprungziel stehen zur Verfügung

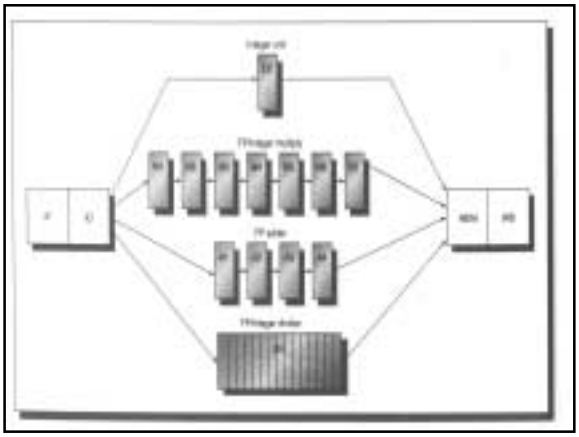
Zusammenfassung

- Beschleunigung um bis zu Faktor k durch Einsatz einer Pipeline (k = Anzahl der Pipeline-Stufen).
- Data- und control-Hazards verringern die Beschleunigung.
- Viele Möglichkeiten (z.T. in Hardware), Hazards zu vermeiden
  - Forwarding, Bypassing
  - Branch Prediction, BTC, ...
- Möglichkeiten für Code-optimierende Compiler, Hazards zu vermeiden:
  - Umstellen der Instruktionen eines Maschinenprogramms

Pipelining: Weiterentwicklungen

- Einführen mehrerer funktionaler Einheiten (FE) mit unterschiedlichen (gleichen) Aufgaben





Befehlszuordnung, -Ausführung, -Beendigung

- Werden die Befehle in ihrer Programmreihenfolge den Funktionalen Einheiten zugeordnet?
  - in-order issue
  - out-of-order issue
- Werden die Befehle in ihrer Reihenfolge ausgeführt?
  - in-order execution
  - out-of-order execution
- Wird die Befehlsausführung in der Reihenfolge beendet?
  - in-order completion
  - out-of-order completion
- Wird genau ein Befehl zu einem Zeitpunkt zugewiesen?
  - single-issue
  - multiple-issue (superskalare Ausführung)

Pipeline mit unterschiedlich langen EX-Phasen

- Befehle werden zu unterschiedlichen Zeitpunkten fertig
  - Datenabhängigkeiten werden in die Länge gezogen
  - trotz in-order-issue folgt out-of-order execution und out-of-order completion

Wer regelt, wann Befehle zugeordnet, gestartet und zurückgeschrieben werden?

Scheduling

Scheduling: ein Verfahren das entscheidet, wann eine Instruktion gestartet wird, seine Operanden liest und das Ergebnis zurückschreibt

Ziel: Umordnung von Instruktionen bei Daten- oder Kontrollabhängigkeiten

- **Static scheduling**: Aufgabe des Kompilers
- **Dynamic scheduling**: Aufgabe der Hardware
- Kernidee: Instruktionen hinter *stalls* ausführen

```
DIVD  F0,F2,F4
ADDD  F10,F0,F8
SUBD  F12,F8,F14
```

  - `SUBD` hat keine Datenabhängigkeiten zu anderen Instruktionen
  - zulassen von out-of-order execution ⇒ out-of-order completion
  - ID-Phase prüft auf Struktur- und Datenabhängigkeiten

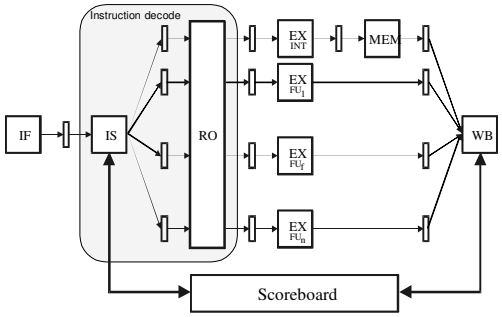
Dynamic Scheduling

- Dynamic scheduling arbeitet auch wenn *stalls* erscheinen, die zur Compilezeit nicht vorhersehbar sind, z.B. Cache Misses
- **Dynamic scheduling**:
  - **Control flow scheduling**, wird zentral bei der Dekodierung vorgenommen
    z.B. scoreboarding in CDC 6600
  - **Dataflow scheduling**, wird verteilt in den funktionalen Einheiten zur Laufzeit ausgeführt. Befehle werden dekodiert und *reservation stations* zugeteilt, bis ihre Operanden verfügbar sind.
    Tomasulo Algorithmus im IBM System/360 Model 91 Prozessor

Scoreboarding

- 1963 von Thornton für den CDC6600 eingeführt
- Ziel: Ausführung einer Instruktion pro Takt. Befehle so früh wie möglich ausführen
- Befehle werden out-of-order ausgeführt, wenn alle nötigen Resourcen zur Verfügung stehen und keine Datenabhängigkeiten existieren
- Das Scoreboard ist eine HW-Einheit die registriert
  - welche Befehle sich in der Ausführung befinden
  - welche Funktionalen Einheiten aktuell benutzt werden
  - welche Register die Ergebnisse speichern werden
- Das Scoreboard führt zentral Konflikterkennung durch und kontrolliert dadurch den Programmfortschritt

Scoreboard Pipeline



Scoreboarding

- Die Dekodierphase wird aufgeteilt in,
  - **issue (IS) Phase (Zuordnungsphase)**:
    Dekodieren, prüfen auf Struktur- und WAW-Hazards
    (Strukturhazards: eine Funktionale Einheit wird zu einem Zeitpunkt mehrfach benötigt)
  - **read operands (RO) Phase**:
    Warten bis keine Datenhazards existieren
    ⇒ Lesen der Operanden aus den Registern
- EX (Ausführung) und WB (Rückreiben) Phase sind um zusätzliche Registrierungs- und Überwachungs-aufgaben erweitert

Scoreboarding (im Detail)

- **IS Phase**: wenn kein **struktureller** und kein **WAW Hazard** vorliegt,
  - das Scoreboard weist den Befehl der FE zu und aktualisiert seine internen Datenstrukturen
  - ansonsten wird die Zuordnung gestoppt, bis sich die Hazards aufgelöst haben (⇒ single issue and in-order issue!).
- **RO Phase**:
  - das Scoreboard überwacht die Verfügbarkeit der benötigten Operanden
  - wenn diese zur Verfügung stehen wird die FE aktiviert, um die Register zu lesen (⇒ kein Forwarding!!) und in der EX-Phase auszuführen **RAW Hazards** werden dynamisch aufgelöst

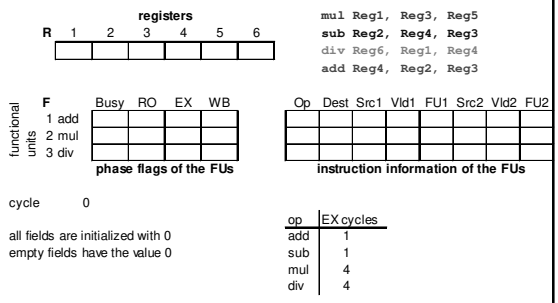
Scoreboarding (im Detail)

- **EX Phase**:
  Die FE startet die Ausführung (kann mehrere Zyklen dauern) und benachrichtigt das Scoreboard wenn die Ergebnisse zur Verfügung stehen (result ready flag).
- **WB Phase**:
  Wenn das Scoreboard weiß, dass die FE die Ausführung beendet hat, prüft es auf **WAR Hazards** und stoppt die Registeraktualisierung falls nötig.
  Andernfalls wird die FE aufgefordert, ihr Ergebnis in das Zielregister zu schreiben.

Scoreboard Implementierung

- **Register result status table** (R):
  speichert, welche FE ein Ergebnis in welches Register schreibt, d.h. die Anzahl der Einträge in R ist gleich der Anzahl der Register
- **Functional unit status table** (F):
  speichert die Bearbeitungsphase jeder Instruktion:
  Phase: *Busy*, *RO*, *EX*, und *WB* für jede FE.
- **Instruction status table** (auch F): ein Eintrag pro FE:
  - Opcode der bearbeiteten Instruktion
  - Zielregister
  - Quellenregister
  - Verfügbarkeit der Quellenregister
  - sind Operanden nicht verfügbar, dann speichert die Tabelle die FE, die den Operanden gerade erzeugt
- Initial sind alle Einträge Null (leer).

Scoreboarding Beispiel

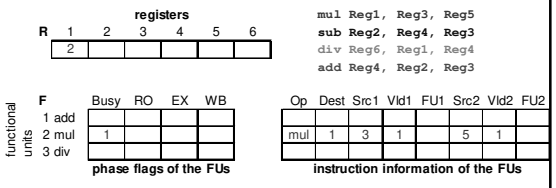


cycle 0

all fields are initialized with 0
empty fields have the value 0

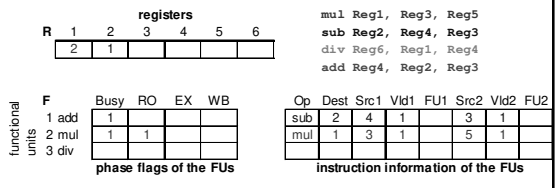
op	EX cycles
add	1
sub	1
mul	4
div	4

Scoreboarding Beispiel



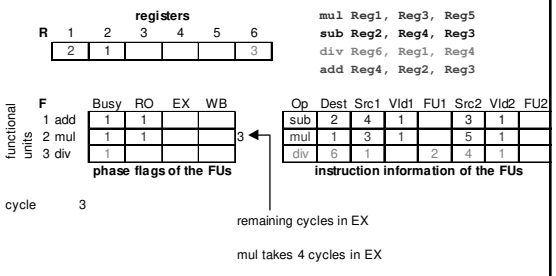
cycle 1

Scoreboarding Beispiel

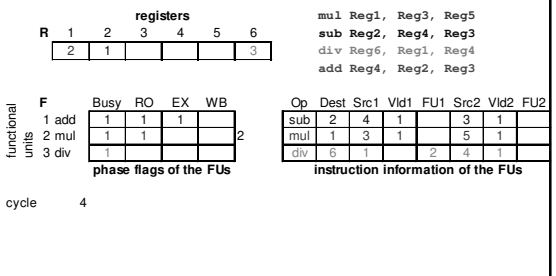


cycle 2

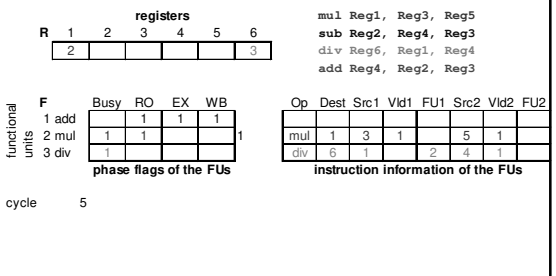
Scoreboarding Beispiel



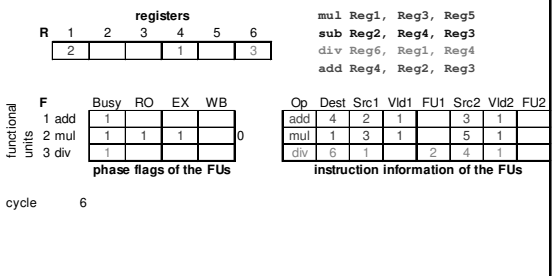
Scoreboarding Beispiel



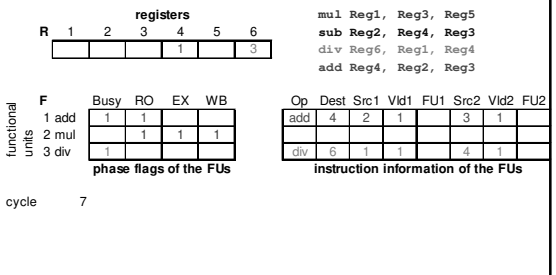
Scoreboarding Beispiel



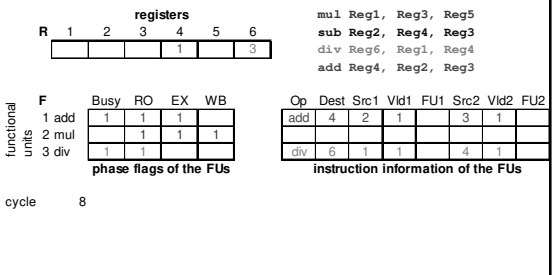
Scoreboarding Beispiel



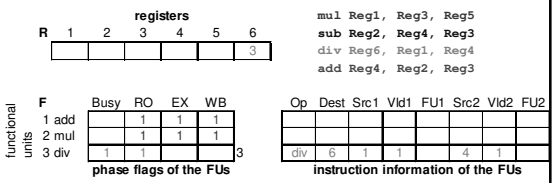
Scoreboarding Beispiel



Scoreboarding Beispiel

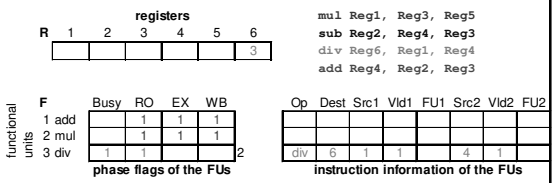


Scoreboarding Beispiel



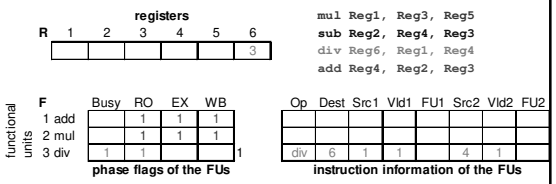
cycle 9

Scoreboarding Beispiel



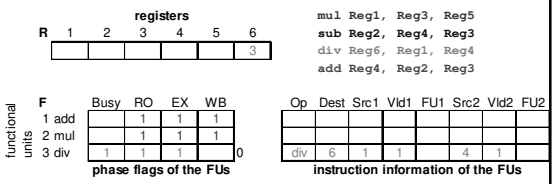
cycle 10

Scoreboarding Beispiel



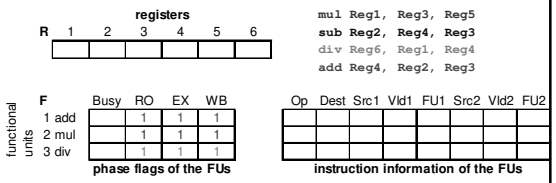
cycle 11

Scoreboarding Beispiel



cycle 12

Scoreboarding Beispiel



cycle 13

Scoreboard Zusammenfassung

- **Vorteil**:
  - verwaltet meherer FEs
  - out-of-order Ausführung von Mehrtaktoperationen
  - erkennen aller Datenabhängigkeiten (RAW, WAW, WAR)
- **Scoreboard Beschränkungen**:
  - single issue Ausführung (läßt sich auf multiple-issue erweitern)
  - in-order issue
  - kein Registerumbenennen ⇒ Pseudoabhängigkeiten können zu Blokierungen führen
  - keine Forwardinghardware ⇒ alle Ergebnisse durch Register
- **generelle Beschränkungen**
  - Beschränkung der FEs führt zu strukturellen Hazards
  - Grad der Parallelität im Programm (auf Instruktionsebene)

Zur Erinnerung

Mehrzykleninstruktionen führen zu out-of-order Ausführung

- **Control flow scheduling**,
  zentral während des Dekodierens ausgeführt:
  ⇒ Scoreboarding Technik implementiert im CDC 6600 Prozessor
- **Dataflow scheduling**,
  wird verteilt in den FEs ausgeführt. Befehle werden dekodiert und anschließend den *reservation stations* zugeordnet, wo sie auf ihre Operanden warten.
  ⇒ Tomasulo Algorithmus
  - benutzt Forwarding und Registerrenaming
  - ist single and in-order issue
  - Basis aller modernern Superskalarprozessoren

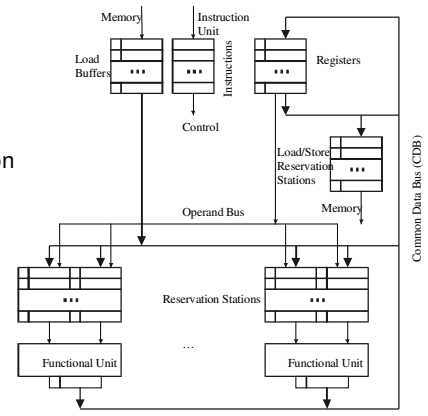
Register Renaming

- Eine Namensabhängigkeit entsteht, wenn zwei Instruktionen $Inst_1$ und $Inst_2$ die selben Register benutzen, aber keine Daten zwischen den Instruktionen ausgetauscht werden
- Wird ein Registeroperand umbenannt, so dass $Inst_1$ und $Inst_2$ keine Abhängigkeit mehr haben, dann können beide Instruktionen simultan ausgeführt oder umgeordnet werden
- Die Technik die Namensabhängigkeiten eliminieren um WAR und WAW Hazards zu vermeiden, heißt **register renaming**
- Register renaming kann statisch (vom Compiler) oder dnamisch (von der Hardware) ausgeführt werden
- Tomasulos Algorithmus führt register renaming durch die Hardware aus

Tomasulo Algorithm

- Entwickelt für IBM 360/91 (1967 ca. 3 years nach CDC 6600)
- Hazard Erkennung und Ausführungskontrolle sind verteilt in den FEs
- **Reservation stations** (RS) vor jeder FE kontrollieren den Beginn der Instruktionsausführung
- **Common Data Bus** verteilt alle Ergebnisse an alle reservation stations und an die Register
- Speicherzugriffe werden von speziellen FEs durchgeführt
- Jedes Register hat zusätzliche Kontrollflags

Tomasulo Oranisation



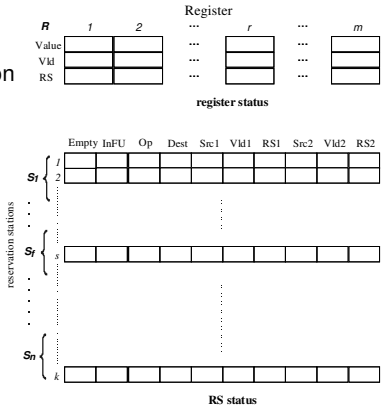
Reservation Stations

- Jede FE hat eine oder meherere reservation stations
- Die reservation station beinhalten:
  - Befehle, die bereits zugewiesen wurden und auf ihre Ausführung in der FE warten
  - die Operanden des Befehls, soweit bereits berechnet (andernfalls wird die Quelle/FE des Operanden gespeichert)
  - ➪ WAR Hazards werden umgangen, da die Werte des Registers bereits in der reservation station liegen auch wenn eine andere Operation (out-of-order) dieses Register überschreibt
  - ➪ WAW Hazards werden umgangen, da Referenzen auf reservation stations als Tags auf dem CDB benutzt werden, anstatt Referenzen auf konkrete Register

Reservation Station Einträge

Empty: zeigt an, ob die reservation station leer ist
InFU: zeigt an, ob die FE die gespeicherte Instruktion gerade ausführt
Op: Operation, die von der FE auszuführen ist
Dest: Tag des reservierten Registers
Src1, *Src2*: Werte der Quelloperanden
RS1, *RS2*: Tag der reservation station, die den Operanden erzeugt
Vld1, *Vld2*: Valid Flags zeigen an, ob die Operanden gültig sind

Tomasulo Oraganisation



CDB und Reservation Stations

- Nach der Ausführung eines Befehls einer RS wird ein Ergebnistoken generiert und über den *common data bus* (CDB) an die Register und direkt an alle RS geschickt (forwarding)
- Alle RS überwachen ständig die Daten auf dem CDB (snooping)
- Ein Ergebnis auf dem CDB wird in alle RS kopiert, die darauf warten
- CDB ermöglicht simultanes Laden von Ergebnissen sobald diese zur Verfügung stehen (Datenflußprinzip)

Drei Phasen des Tomasulo Algorithmus

1. Issue: Instruktion laden (von der instruction queue)

Wenn RS frei, dann wird die Instruktion zugewiesen und Operanden aus den Registern geladen (falls möglich)
→ In-order issue!

2. Execution: Ausführen des Befehls (EX)

Wenn beide Operanden bereit stehen, dann wird die Operation an die FE geleitet und dort ausgeführt (dispatch),
wenn nicht, dann wird der CDB abgehört um Operanden abzufangen
→ Out-of-order dispatch und out-of-order execution!

3. Write result: Beendigung der Ausführung (WB)

Lege Ergebnis auf den CDB
Freigabe der RS.

Tomasulo Scheduling

```
mul Reg1, Reg3, Reg5
sub Reg2, Reg4, Reg3
div Reg6, Reg1, Reg4
add Reg4, Reg2, Reg3
```

registers

R	1	2	3	4	5	6
Value	-	-	(R3)	(R4)	(R5)	-
Vld	1	1	1	1	1	1
RS	0	0	0	0	0	0

register status

reservation stations		Empty	InFU	Op	Dest	Src1	Vld1	RS1	Src2	Vld2	RS2
S_{add}	1	1									
	2	1									
S_{mul}	3	1									
S_{div}	4	1									

RS status

cycle 0

CDB token.tag, token.data

We assume:
mul and **div** need 4 EX cycles,
sub and **add** need 1 EX cycle.

Tomasulo Scheduling

```
mul Reg1, Reg3, Reg5
sub Reg2, Reg4, Reg3
div Reg6, Reg1, Reg4
add Reg4, Reg2, Reg3
```

registers

R	1	2	3	4	5	6
Value	-	-	(R3)	(R4)	(R5)	-
Vld	0	1	1	1	1	1
RS	3	0	0	0	0	0

register status

reservation stations		Empty	InFU	Op	Dest	Src1	Vld1	RS1	Src2	Vld2	RS2
S_{add}	1	1									
	2	1									
S_{mul}	3	0	0	mul	1	(R3)	1	0	(R5)	1	0
S_{div}	4	1									

RS status

cycle 1

CDB token.tag, token.data

Tomasulo Scheduling

```
mul Reg1, Reg3, Reg5
sub Reg2, Reg4, Reg3
div Reg6, Reg1, Reg4
add Reg4, Reg2, Reg3
```

registers

R	1	2	3	4	5	6
Value	-	-	(R3)	(R4)	(R5)	-
Vld	0	0	1	1	1	1
RS	3	1	0	0	0	0

register status

reservation stations		Empty	InFU	Op	Dest	Src1	Vld1	RS1	Src2	Vld2	RS2
S_{add}	1	0	0	sub	2	(R4)	1	0	(R3)	1	0
	2	1									
S_{mul}	3	0	1	mul	1	(R3)	1	0	(R5)	1	0
S_{div}	4	1									

RS status

cycle 2

CDB token.tag, token.data

Tomasulo Scheduling

registers

R	1	2	3	4	5	6
Value	-	-	(R3)	(R4)	(R5)	-
Vld	0	0	1	1	1	0
RS	3	1	0	0	0	4

register status

```
mul Reg1, Reg3, Reg5
sub Reg2, Reg4, Reg3
div Reg6, Reg1, Reg4
add Reg4, Reg2, Reg3
```

reservation stations

		Empty	InFU	Op	Dest	Src1	Vld1	RS1	Src2	Vld2	RS2	
S_{add}	1	0	1	sub	2	(R4)	1	0	(R3)	1	0	
	2	1										
S_{mul}	3	0	1	mul	1	(R3)	1	0	(R5)	1	0	3
S_{div}	4	0	0	div	6		0	3	(R4)	1	0	

RS status

cycle 3

CDB

token.tag	
token.data	

remaining cycles in FU

Tomasulo Scheduling

registers

R	1	2	3	4	5	6
Value	-	(R4)-(R3)	(R3)	-	(R5)	-
Vld	0	1	1	0	1	0
RS	3	0	0	2	0	4

register status

```
mul Reg1, Reg3, Reg5
sub Reg2, Reg4, Reg3
div Reg6, Reg1, Reg4
add Reg4, Reg2, Reg3
```

reservation stations

		Empty	InFU	Op	Dest	Src1	Vld1	RS1	Src2	Vld2	RS2	
S_{add}	1	1	1	sub	2	(R4)	1	0	(R3)	1	0	
	2	0	0	add	4	(R4)-(R3)	1	0	(R3)	1	0	
S_{mul}	3	0	1	mul	1	(R3)	1	0	(R5)	1	0	2
S_{div}	4	0	0	div	6		0	3	(R4)	1	0	

RS status

cycle 4

CDB

token.tag	1
token.data	(R4)-(R3)

sub schreibt auf CDB und gibt RS1 frei;
add wird RS2 zugewiesen und lädt den ersten Operanden im gleichen Zyklus vom CDB

Tomasulo Scheduling

registers

R	1	2	3	4	5	6
Value	-	(R4)-(R3)	(R3)	-	(R5)	-
Vld	0	1	1	0	1	0
RS	3	0	0	2	0	4

register status

```
mul Reg1, Reg3, Reg5
sub Reg2, Reg4, Reg3
div Reg6, Reg1, Reg4
add Reg4, Reg2, Reg3
```

reservation stations

		Empty	InFU	Op	Dest	Src1	Vld1	RS1	Src2	Vld2	RS2	
S_{add}	1	1	1	sub	2	(R4)	1	0	(R3)	1	0	
	2	0	1	add	4	(R4)-(R3)	1	0	(R3)	1	0	
S_{mul}	3	0	1	mul	1	(R3)	1	0	(R5)	1	0	1
S_{div}	4	0	0	div	6		0	3	(R4)	1	0	

RS status

cycle 5

CDB

token.tag	
token.data	

Tomasulo Scheduling

registers

R	1	2	3	4	5	6
Value	.	(R4)-(R3)	(R3)	(R4)-(R3)+(R3)	(R5)	-
Vld	0	1	1	1	1	0
RS	3	0	0	0	0	4

register status

```
mul Reg1, Reg3, Reg5
sub Reg2, Reg4, Reg3
div Reg6, Reg1, Reg4
add Reg4, Reg2, Reg3
```

reservation stations

		Empty	InFU	Op	Dest	Src1	Vld1	RS1	Src2	Vld2	RS2	
S_{add}	1	1	1	sub	2	(R4)	1	0	(R3)	1	0	
	2	1	1	add	4	(R4)-(R3)	1	0	(R3)	1	0	
S_{mul}	3	0	1	mul	1	(R3)	1	0	(R5)	1	0	0
S_{div}	4	0	0	div	6		0	3	(R4)	1	0	

RS status

cycle 6

CDB

token.tag	2
token.data	(R4)-(R3)+(R3)

add and **mul** gleichzeitig fertig und konkurieren um den CDB;
add schreibt auf CDB, **mul** muß warten

WAR-Hazard wird automatisch aufgelöst: **add** schreibt Reg4 bevor **div** die Ausführung beginnt, allerdings hat **div** bereits den alten Registerwert in der RS gesichert

Tomasulo Scheduling

registers

R	1	2	3	4	5	6
Value	(R3)*(R5)	(R4)-(R3)	(R3)	(R4)-(R3)+(R3)	(R5)	.
Vld	1	1	1	1	1	0
RS	0	0	0	0	0	4

register status

```
mul Reg1, Reg3, Reg5
sub Reg2, Reg4, Reg3
div Reg6, Reg1, Reg4
add Reg4, Reg2, Reg3
```

reservation stations

		Empty	InFU	Op	Dest	Src1	Vld1	RS1	Src2	Vld2	RS2
S_{add}	1	1	1	sub	2	(R4)	1	0	(R3)	1	0
	2	1	1	add	4	(R4)-(R3)	1	0	(R3)	1	0
S_{mul}	3	1	1	mul	1	(R3)	1	0	(R5)	1	0
S_{div}	4	0	0	div	6	(R3)*(R5	1	0	(R4)	1	0

RS status

cycle 7

CDB

token.tag	3
token.data	(R3)*(R5)

Tomasulo Scheduling

registers

R	1	2	3	4	5	6
Value	(R3)*(R5)	(R4)-(R3)	(R3)	(R4)-(R3)+(R3)	(R5)	.
Vld	1	1	1	1	1	0
RS	0	0	0	0	0	4

register status

```
mul Reg1, Reg3, Reg5
sub Reg2, Reg4, Reg3
div Reg6, Reg1, Reg4
add Reg4, Reg2, Reg3
```

reservation stations

		Empty	InFU	Op	Dest	Src1	Vld1	RS1	Src2	Vld2	RS2
S_{add}	1	1	1	sub	2	(R4)	1	0	(R3)	1	0
	2	1	1	add	4	(R4)-(R3)	1	0	(R3)	1	0
S_{mul}	3	1	1	mul	1	(R3)	1	0	(R5)	1	0
S_{div}	4	0	1	div	6	(R3)*(R5	1	0	(R4)	1	0

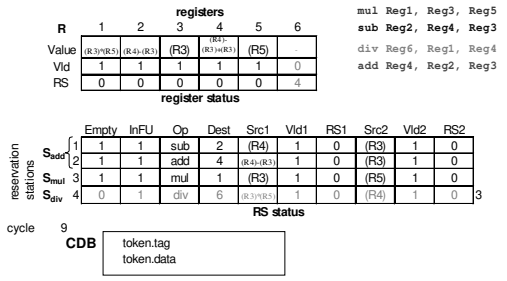
RS status

cycle 8

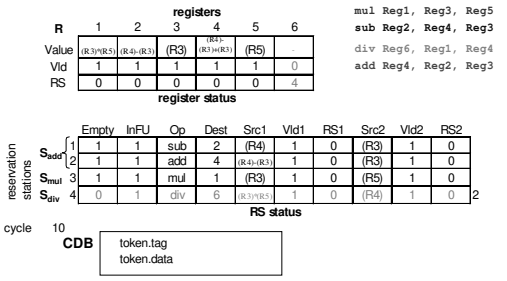
CDB

token.tag	
token.data	

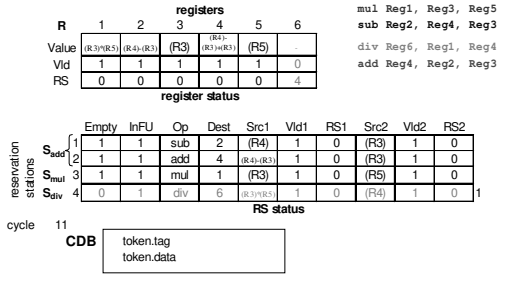
Tomasulo Scheduling



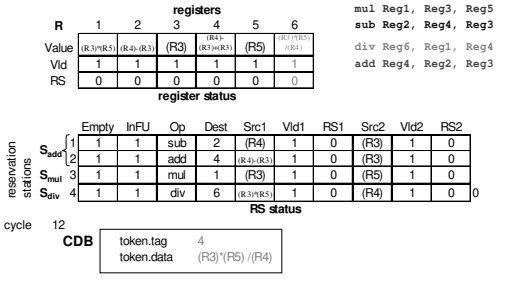
Tomasulo Scheduling



Tomasulo Scheduling



Tomasulo Scheduling



Tomasulo Zusammenfassung

- Verhindert WAR und WAW Hazards
- RAW werden durch CDB (forwarding) beschleunigt
- dynamisches scheduling
- Register renaming
- Jedoch: single-issue, in-order issue!
- Register sind nicht der Flaschenhals (forwarding vom CDB an die RS)
- aber CDB ist der Flaschenhals

- Implementierung in der IBM 360/91

3.1 Elementare Datentypen, Operationen und ihre Realisierung (siehe 2.1)
3.2 Mikroprogrammierung
3.3 Einfache Implementierung von MIPS
3.4 Pipelining
3.5 Superskalare Befehlsausführung

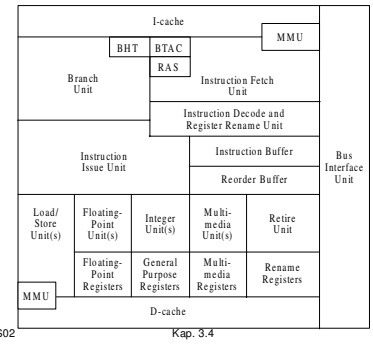
Superskalarprozessoren

Erinnerung:

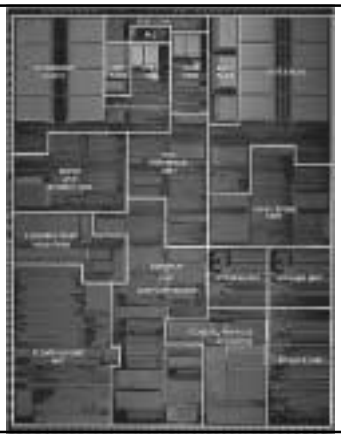
- Scoreboarding und Tomasulo sind die beiden single-issue Techniken, die out-of-order Ausführung ermöglichen
- Tomasulo ist ausgereifter, da es WAW und WAR Hazards auflöst und nicht nur behandelt (scoreboarding)

- Bisher: single-issue Prozessoren
- Jetzt: multiple-issue Prozessoren, d.h. Superscalar- und VLIW-Prozessoren
  - Die meisten heutigen Mikroprozessoren ordnen 2 bis 6 Befehle gleichzeitig an die FEs zu, mit erweitertem Tomasulo Algorithmus
  - VLIW wird häufig in Signalprozessoren eingesetzt.
  - VLIW wird von Intel als EPIC (explicitly parallel instruction computing) by Architektur (IA-64 ISA) in Itanium Prozessoren eingesetzt.

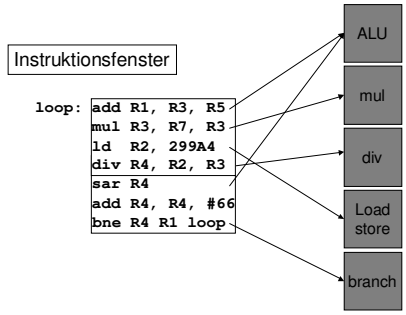
Komponenten eines Superskalarprozessors



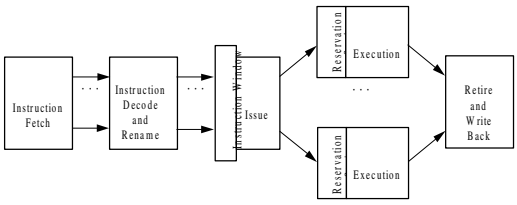
Floorplan des PowerPC 604



Superskalare Befehlszuordnung

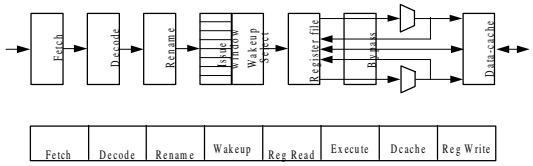


Superskalare Pipeline (PowerPC- und erweiterter Tomasulo Algorithmus)



- Instruktionen im Instruktionsfenster sind frei von Kontrollabhängigkeiten (branch prediction), und frei von Namensabhängigkeiten (register renaming)
- Nur (echte) Datenabhängigkeiten uns Strukturkonflikte müssen behandelt werden

Superskalare Pipeline ohne Reservation Stations



Issue (Zuweisung)

- Die **Zuweisungslogik** untersucht die wartenden Befehle im Befehlsfenster und weist sie simultan den FEs zu
  (Zuordnungsbandbreite = Zahl der zugewiesenen Instruktionen pro Zyklus)
- Die Programmreihenfolge der zugewiesenen Instruktionen wird im reorder buffer gespeichert
- die Instruktionszuweisung :
  - kann **in-order** oder **out-of-order** sein
  - berücksichtigt Datenabhängigkeiten und Resourcenbeschränkungen
  - kann in mehrere Stufen eingeteilt werden
    - prüfen der Strukturkonflikte / prüfen der Datenabhängigkeiten
    - evl. Werden Datenabhängigkeiten in reservation stations (RS) vor den funktionalen Einheiten (FE) behandelt

Reservation Station(s)

- Verschiedene Definitionen in der Literatur:
  - A **reservation station** is a buffer for a **single** instruction with its operands (original Tomasulo paper, Flynn's book, Hennessy/Patterson book).
  - A **reservation station** is a buffer (in front of one or more FUs) with **one or more entries** and each entry can buffer an instruction with its operands (e.g. PowerPC literature).
- Abhängig vom Prozessor sind RS Puffer für mehrere FEs bzw. jede FE hat ihre eigene RS
- Befehele warten auf ihre Operanden in den RS wie im Tomasulos Algorithmus

Dispatch (PowerPC- and enhanced Tomasulo-Scheme)

- Eine Instruktion wird „**dispatched**“ von einer RS in die FE wenn alle Operanden zur Verfügung stehen und die Ausführung beginnt
- Sind alle Operanden verfügbar und die FE ist nicht aktiv, dann startet die Ausführung direkt im Zyklus nach der Zuordnung
- ..., d.h. „dispatch“ ist normalerweise keine Pipelinestufe
- Ein Befehl wartet in einer RS keinen bis mehrere Zyklen
- Dispatch und Ausführung werden nicht zwingend in der Programmreihenfolge durchgeführt
- Es gibt auch andere Definitionen von „dispatch“

Completion

- Wenn die FE die Ausführung beendet hat und das Ergebnis bereit steht zum Zurückschreiben (evl. Forwarding), dann heißt sie „**complete**“.
- Befehlsbeendigung findet nicht in der Programmreihenfolge statt.
- Während der Beendigung wird die RS freigegeben und der Zustand der Ausführung wird im **reorder buffer** abgelegt

Commitment ("Verbindlichkeit")

- Nach der Beendigung werden die Befehle in ihre Programmreihenfolge zurücksortiert (**committed**)
- Ein Befehl kann zurücksortiert werden:
  - wenn alle vorherigen Instruktionen bereits zurücksortiert wurden oder im aktuellen Zyklus zurücksortiert werden können
  - wenn kein Interrupt vor der Instruktion stattgefunden hat
  - wenn sich der Befehl nicht mehr auf einem spekulativen Pfad befindet (branch prediction)
- Durch das Zurücksortieren wird das Ergebnis endgültig in das Zielregister geschrieben,
  - üblicherweise durch das Rückschreiben des Wertes aus einem Renameregister in ein Architekturregister

Retirement ("Ruhestand")

- Ein Befehl „geht in den Ruhestand“ (**retires**) wenn der entsprechende Eintrag im reorder buffer freigegeben wird
  - weil die Instruktion comitted wird (Ergebnisse werden permanent gemacht)
  - weil die Instruktion entfernt wird (Ergebnisse werden verworfen)

Definition "Superscalar"

- **Definition**:

  Superscalar machines are distinguished by their ability to (dynamically) issue multiple instructions each clock cycle from a conventional linear instruction stream.

- Im Gegensatz zu VLIW Prozessoren; diese benutzen ein langes Befehlswort das eine feste Anzahl von Befehlen enthält, die gleichzeitig geladen, dekodiert, zugewiesen und ausgeführt werden

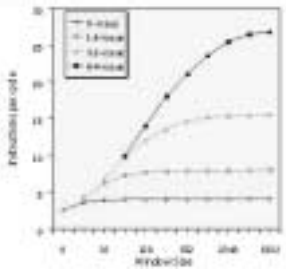
Zusammenfassung

- Befehle werden aus einem sequentiellen Befehlsstrom entnommen und dynamisch von der Hardware an FEs zugewiesen
- Es kann mehr als ein Befehl zugeordnet werden (deshalb superskalar im Gegensatz zu skalar)
- Die Zahl der Befehle, die gleichzeitig zugewiesen wird, ist von der Hardware bestimmt und definiert die maximale Zuordnungsbandbreite
- Die Zuordnung kann in oder außerhalb der Programmreihenfolge stattfinden
- Eine Voraussetzung ist die Existenz mehrerer funktionaler Einheiten
- Die superskalar Technik ist eine Mikroarchitekturtechnik, kein externes Architekturmerkmal

Zuordnungsbandbreite und Fenstergröße

- Wie viel Befehlsebenenparallelität steckt in Programmen (Spec95)?

• optimale Fetch-Einheit
• perfekte Zuordnungseinheit
• perfekte Sprungvorhersage
• jede FE mit eigener Pipeline
• realistische Latenzzeiten



[Gupta et. al]