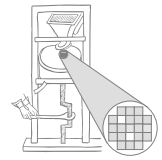


Eingebettete Prozessorarchitekturen

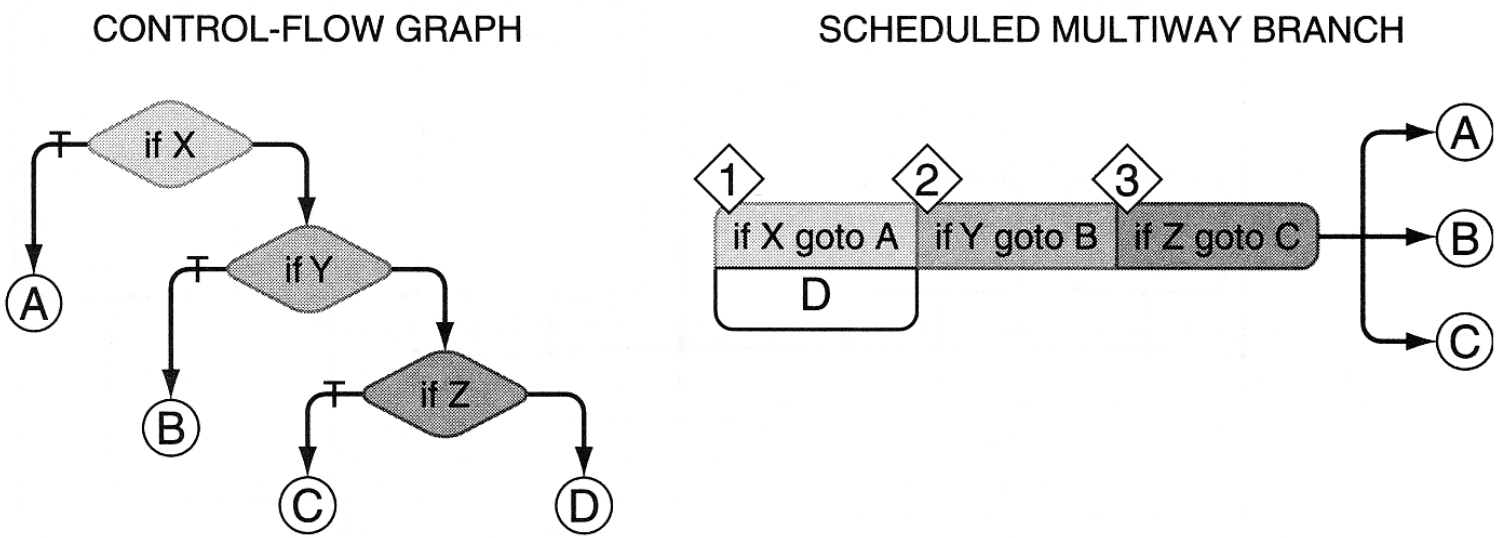
3. Compilierung für VLIW-Prozessoren

Andreas Koch

FG Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen
Informatik, TU Darmstadt

Wintersemester 2006/2007

Mehrwege-Sprünge

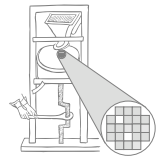


A. Koch

- Auch bedingte Sprünge parallel ausführbar
- Anforderung: Priorisierte Abarbeitungsfolge in Instruktionswort
  - Entsprechend der ursprünglichen sequentiellen Abarbeitungsfolge
- Sinnvoll?
  - Durchschnittlich alle 5-7 Instruktionen ein Sprung
  - Maximaler ILP also nur 5-7 ohne Mehrwege-Sprünge

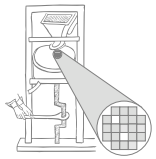
Quelle: Embedded Computing, Fig. 4.9.

Kontrollspekulation



- Führe Operationen aus, bevor sie gebraucht werden
- Realisierung: Verschiebe Operationen vor Sprungbedingung
- Dürfen bei Fehlspekulation keinen Effekt haben, z.B.
  - Dürfen keine Register überschreiben, deren Daten später noch benötigt werden
  - STOREs in der Regel nicht spekulativ ausführbar
- Problem: Ausnahmebehandlung (Exceptions)
  - Zugriff auf ungültige Speicheradresse, Division durch 0, etc.
  - Ein Ansatz: Korrekte Programme dürfen kein anderes Verhalten zeigen
    - Bei spekulativer Ausführung Ausnahmen unterdrücken
    - Wären in korrektem Programm ja nicht aufgetreten
    - Ansatz von Multiflow, auch in Lx vorhanden

Kontrollspekulation
Beispiel



Ohne Spekulation

```
br $b0, L1
;;
add $r5, $r10, $r11
add $r6, $r7, $r8
;;
stw 0[$r5], $r6
;;
L1:
```

3 Takte, 1.33 Operationen pro Takt

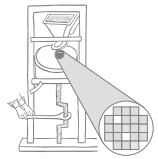
Mit Spekulation

```
add $r5, $r10, $r11
add $r6, $r7, $r8
br $b0, L1
;;
stw 0[$r5], $r6
;;

L1:
```

2 Takte, 2.0 Operationen pro Takt

Kontrollspekulation
Beispiel für Auftreten von Ausnahmen



Annahme: 2 Takte zwischen CMP und BR, 2 Takte für LD

A. Koch

```
# if (p != 0) *p += 2
cmpeq $b0 = $r5, 0
xnop 1
;;
br    $b0, L1
;;
ldw   $r1, 0[$r5]
xnop 1
;;
add   $r1, $r1, 2
;;
stw   0[$r5], $r1
;;
L1:
```

Ohne Spekulation

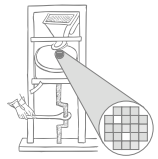
- LOAD kann nicht vorgezogen werden
- Sonst bei Zugriff auf Adresse 0: Segmentation Violation

➥Programmabbruch

7 Takte, 0.7 Operationen pro Takt

Kontrollspekulation

Beispiel für Unterdrücken von Ausnahmen mit *Silent Instructions*



Annahme: 2 Takte zwischen CMP und BR, 2 Takte für LD

A. Koch

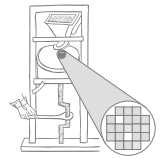
```
# if (p != 0) *p += 2
cmpeq $b0, $r5, 0
ldw.d $r1 = 0[$r5]
xnop  1
;;
add   $r1, $r1, 2
br    $b0, L1
;;
stw   0[$r5], $r1
;;
L1:
```

4 Takte, 1.25 Operationen pro Takt

Mit Spekulation

- ldw.d: *dismissible load*
- Löst bei illegaler Adresse keine Ausnahme aus
- Liefert aber unbestimmte Daten
- Damit vorziehbar

Datenspekulation



- Operation auch dann ausführen, wenn sie möglicherweise inkorrekt abläuft
- Fehler muss erkannt und korrigiert werden (hoffentlich nur selten!)
- Betrifft im wesentlichen Reihenfolge von LOADs und STOREs

Ohne Datenspekulation

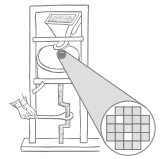
```
mpy $r1, $r2, $r3
stw 8[$r7] = $r1
ldw $r4 = 16[$r5]
add $r6 = $r4, 1
```

Mit Datenspekulation

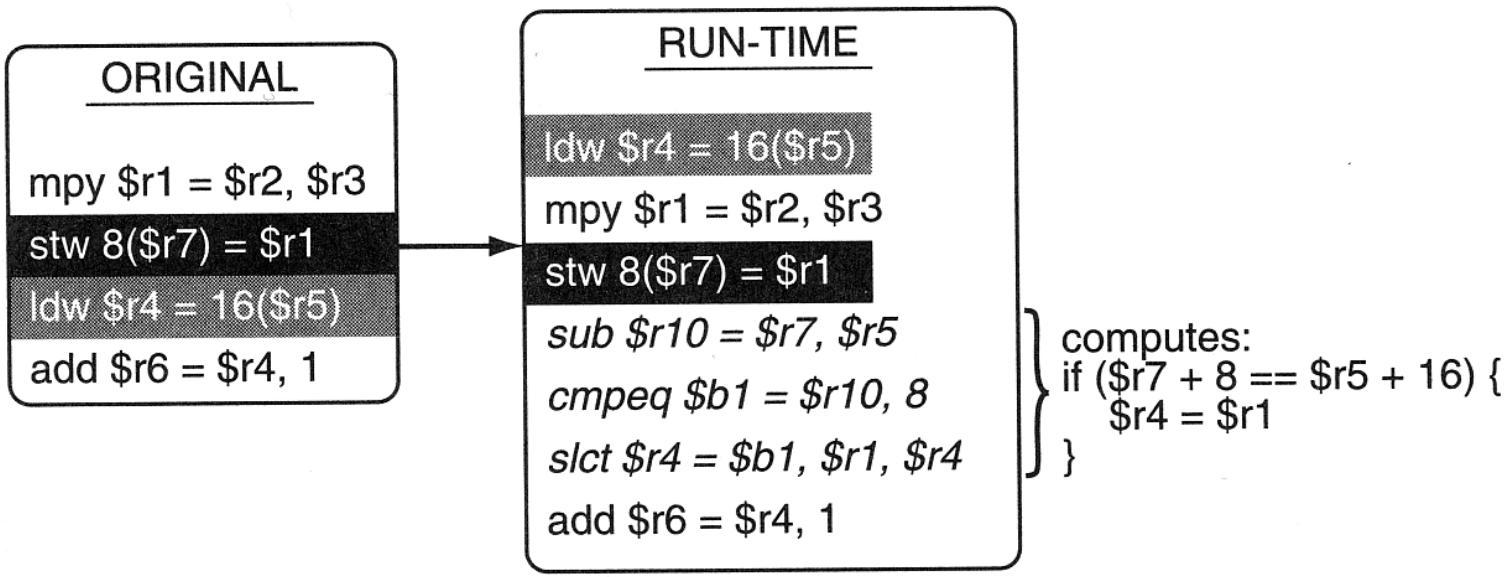
```
ldw $r4 = 16[$r5]
mpy $r1, $r2, $r3
xnop 1;;
stw 8[$r7] = $r1
add $r6 = $r4, 1
```

- Was bei `8[$r7] = 15[$r5]` ?
- Liest veralteten Wert!

Datenspekulation
Umgehung mit Software



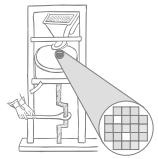
A. Koch



- Sehr zeitaufwendig
- Datenspekulation nur sinnvoll mit Hardware-Unterstützung
- Intel Itanium *Advanced Load Table* (ALAT)
- Teilweise auch zur Compile-Zeit möglich
  - *memory disambiguation*

Quelle: Embedded Computing, Fig. 4.12

Basisblock



Basisblock (BB)

Längste Folge von Anweisungen ohne Kontrollfluß.

Beispiel:

```
a := b + 42;
if (a > 23) then
  c := a - 46;
  d := b * 15;
else
  c := a + 46;
  d := 0
  q := false;
endif
```

Basisblöcke:

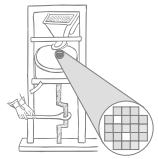
```
a := b + 42;
```

```
c := a - 46;
d := b * 15;
```

```
c := a + 46;
d := 0
q := false;
```

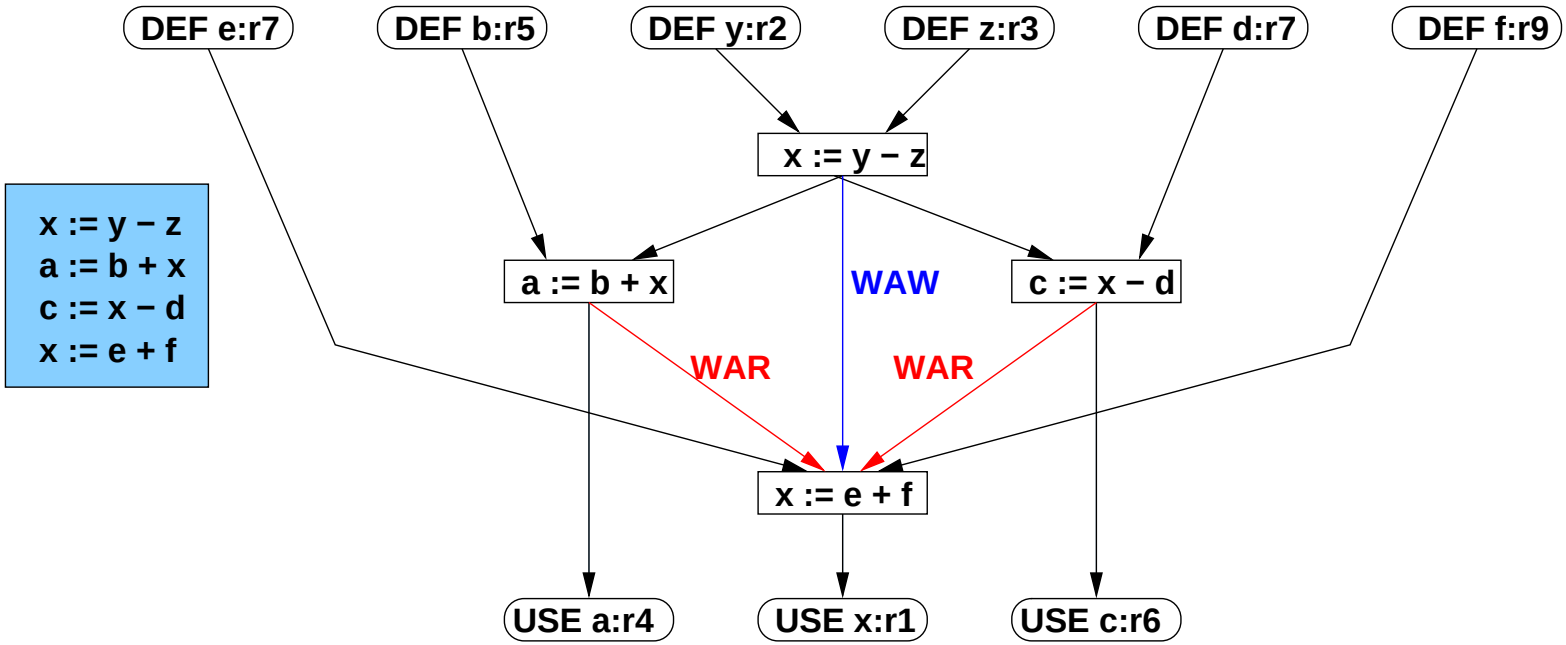
Datenabhängigkeitsgraph

(*data dependence graph*) Ablaufplanung innerhalb von Basisblöcken



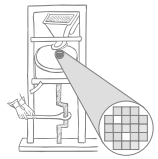
- Betrachte jeden Basisblock einzeln
- Knoten sind primitive Operationen (Assembler-Ebene)
- Kanten für die drei Arten von Datenabhängigkeiten (RAW, WAR, WAW)
- Kantengewichte größer 1 können längere Rechenzeiten darstellen (mehr als einen Takt)

A. Koch

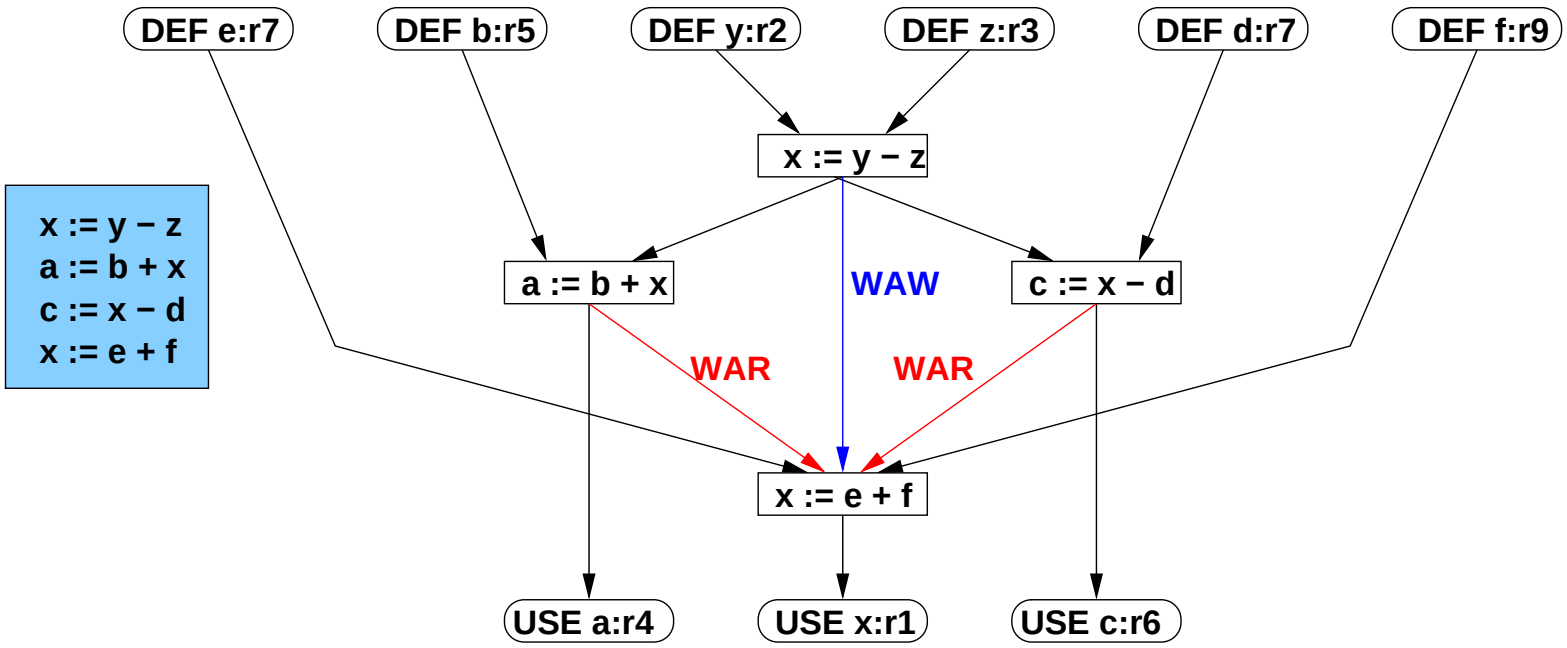


Datenabhängigkeitsgraph

Kanten geben zeitliche Reihenfolge vor



A. Koch

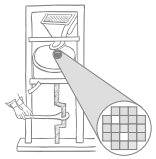


Möglicher Ablaufplan des Assembler-Codes (unoptimiert)

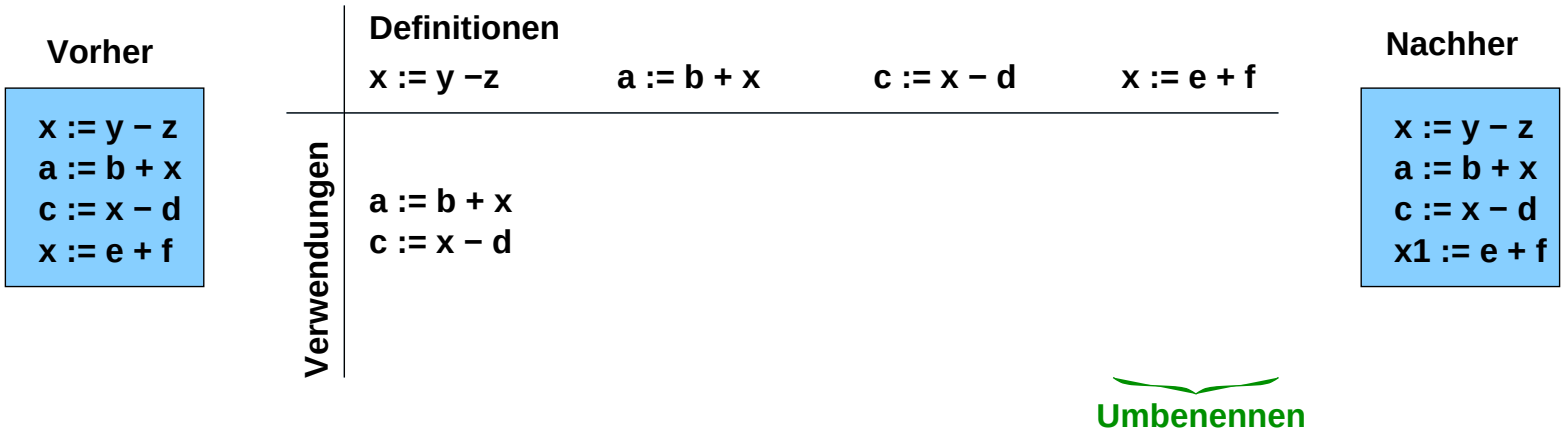
```
sub $r1 = $r2, $r3
;;
add $r4 = $r5, $r1
sub $r6 = $r1, $r8
;;
add $r1 = $r7, $r9
# 3 Takte
```

Transformationen auf Datenabhängigkeitsgraph

Umbenennung zum Auflösen von WAW und WAR-Abhängigkeiten



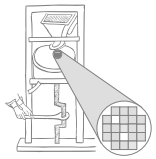
A. Koch



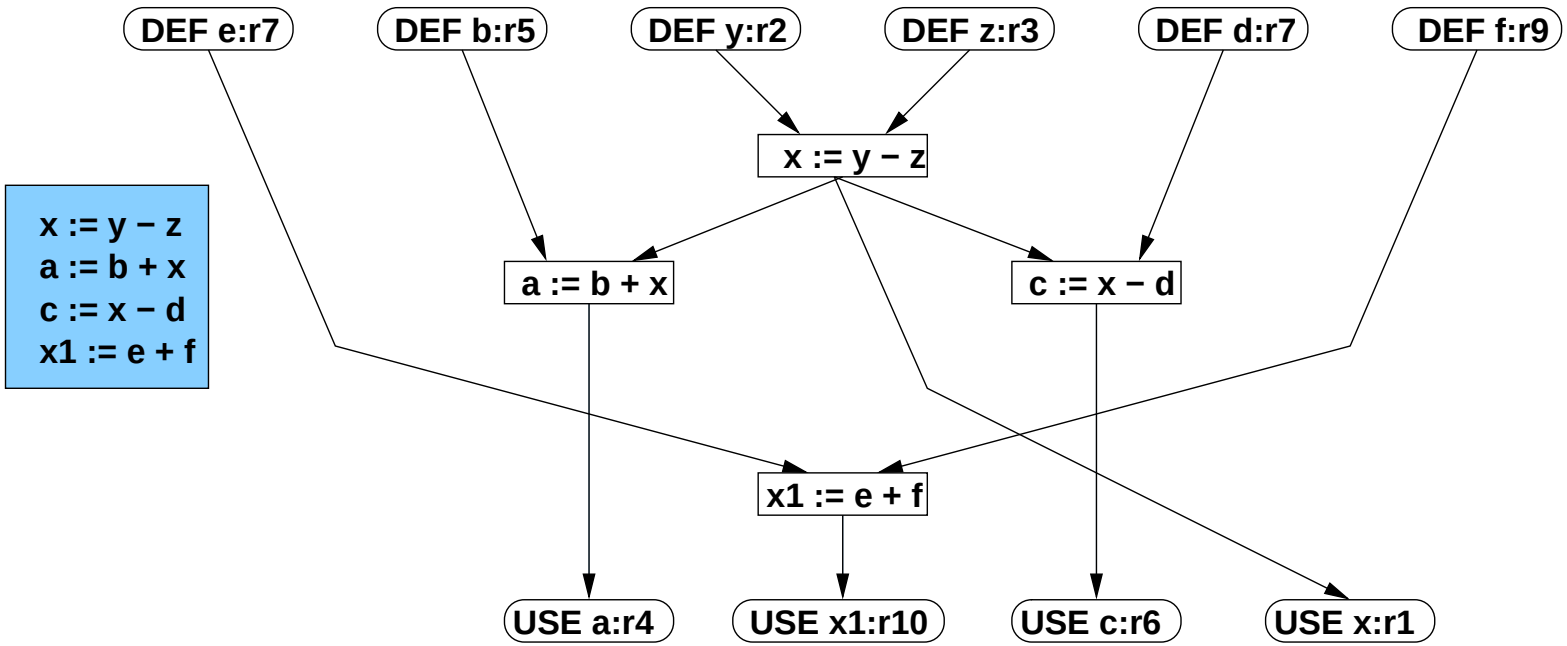
- Zuordnung von Definitionen einer Variable/Register zu deren Lesern
- Innerhalb einer Spalte kann eine Variable umbenannt werden
- Hier: Ein `x` zu `x1` umbenennen

Datenabhängigkeitsgraph

Neue Ablaufplanung



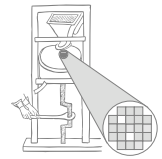
A. Koch



Nun möglicher Ablaufplan des Assembler-Codes

```
sub $r1  = $r2, $r3
add $r10 = $r7, $r9
;;
add $r4  = $r5, $r1
sub $r6  = $r1, $r8
;; # 2 Takte
```

Einschränkungen

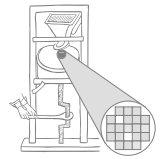


- Problem: I.d.R. nur 5-7 Anweisungen in Basisblock
- Wenig Spielraum für Parallelisierung
- Auch bei Auflösung von WAR und WAW-Abhängigkeiten

➥Idee: Größere Bereiche bearbeiten

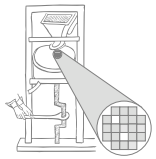
Darstellung von ganzen Prozeduren

Zunächst: Durch Kontrollflußgraphen (*control flow graph, CFG*)



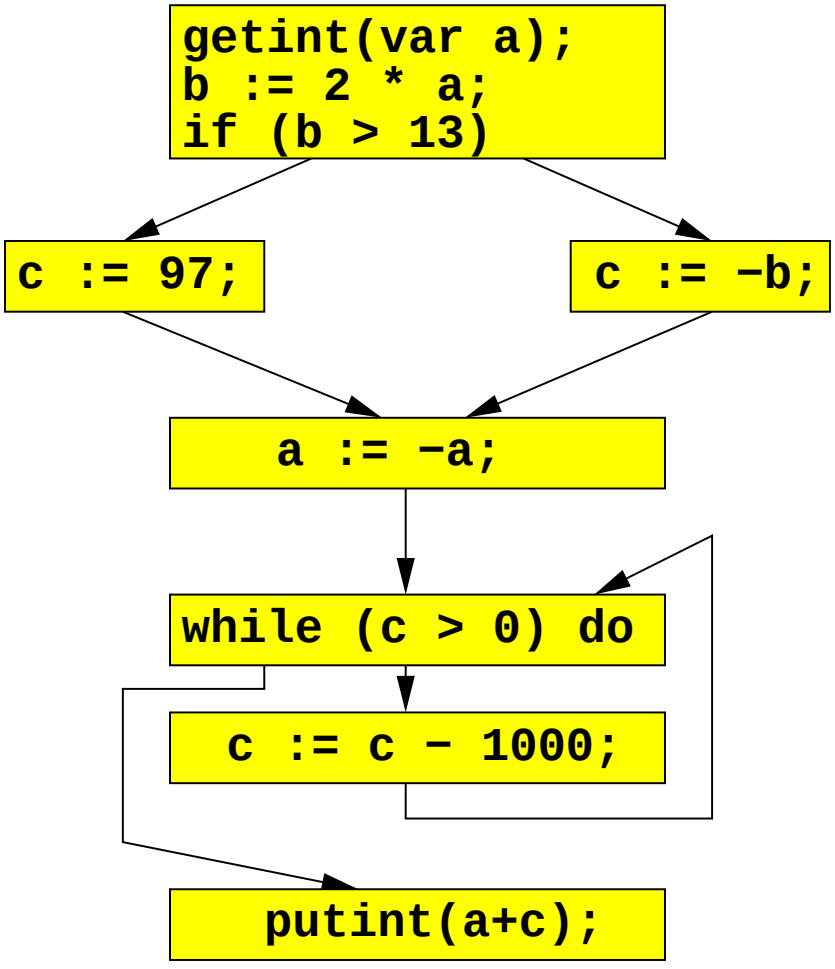
- Beschreibt Kontrollfluß (Verzweigungen) zwischen Basisblöcken
  - Knoten sind Basisblöcke
  - Kanten sind Sprünge zwischen Blöcken
- Am Ende jedes Basisblocks steht nun genau eine Verzweigung
  - Unbedingter Sprung
  - Bedingter Sprung mit einem oder mehreren Sprungzielen
  - Sprungziel ist immer ein Blockanfang

Beispiel Kontrollflußgraph 1

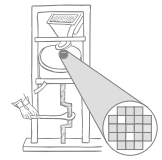


A. Koch

```
getint(var a);
b := 2 * a;
if (b > 13) then
  c := 97;
else
  c := -b;
a := -a;
while (c > 0) do
  c := c - 1000;
putint(a+c);
```

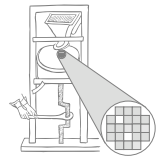


Idee: Finde Regionen von Basisblöcken



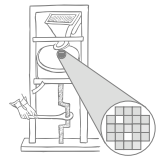
- Bearbeite diese dann zusammen
- Chance auf mehr parallele Operationen
- Welche Basisblöcke nehmen?
- Gängiger Ansatz: Wahrscheinlich aufeinanderfolgende
- Motivation: Konzentriere Optimierung/Parallelisierung auf wahrscheinlichsten Weg durch Prozedur/Programm

Profiling
Ohne Programmausführung



- Woher Daten über Ausführungswahrscheinlichkeiten bekommen?
- Manuelle Annotation
  - Programmierer charakterisiert jede Verzweigung manuell
- Schätzungen anhand Programmtext
  - “Jede Schleife wird 100x durchlaufen”
  - Bulldog (1985, Prä-Multiflow Compiler)
  - Geht heute etwas genauer (statisches Profiling)

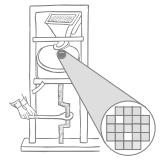
Profiling
Messungen am laufenden Programm



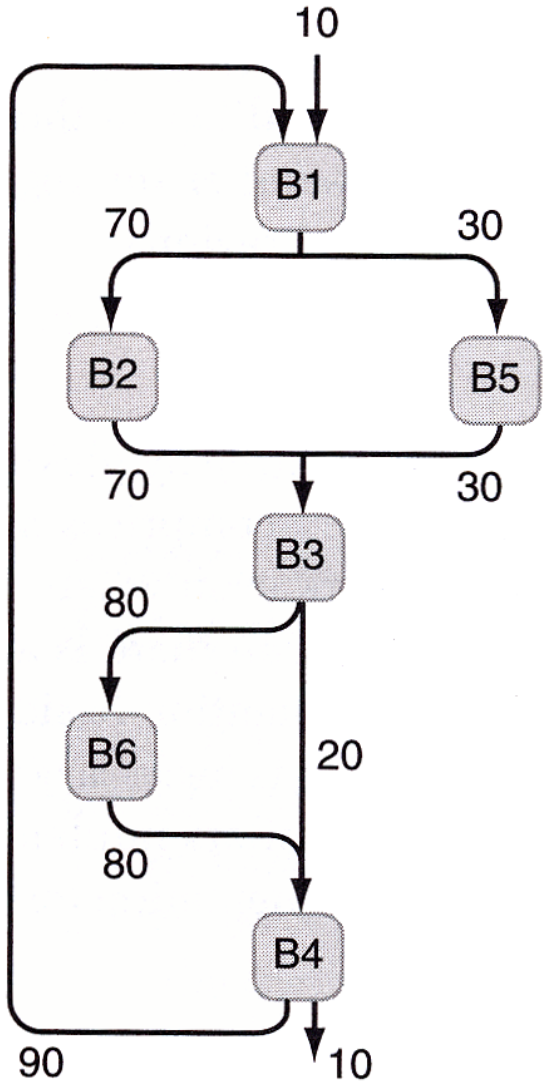
- Instrumentierung: Programm wird automatisch um Meßpunkte erweitert
- Dann Ausführen des instrumentierten Programms
- Schreibt bei Erreichen eines Meßpunktes Profiling-Daten in Datei
- Anschliessend Daten auswerten
- Problem: Auswahl der Eingabedaten beeinflußt Aussagekraft
  - Bei eingebetteten Systemen nicht so kritisch
  - Eng begrenztes Aufgabengebiet, repräsentative Eingabedaten

Annotierter CFG

Ausführungszahlen count((v, w)) an Kanten: *point profile*

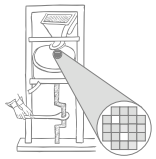


A. Koch



Quelle: Embedded Computing, Fig 8.3

Spuren (Traces)
Weg durch annotierten CFG finden

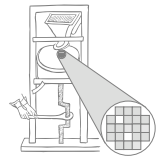


Spur (engl. *trace*)

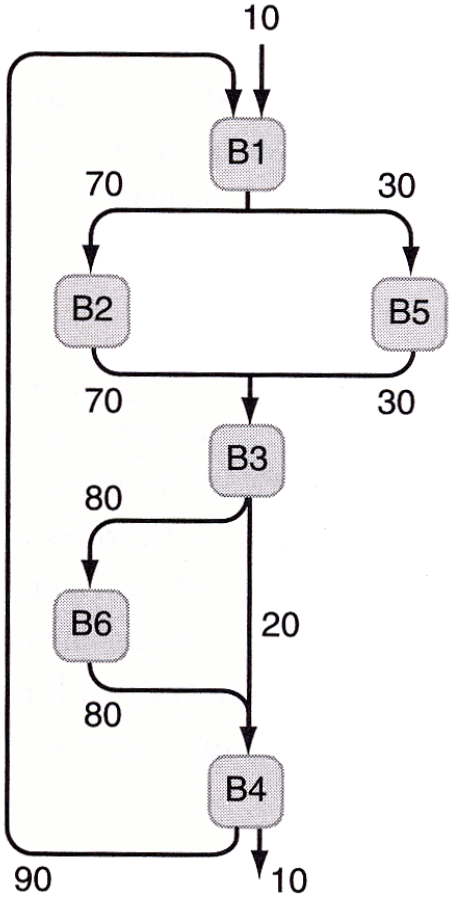
- Zusammenhängende Abfolge von Basisblöcken im CFG
- Kann mehrere Eingangs- und Ausgangskanten haben
- Innerhalb der Spur dürfen keine Zyklen existieren

- Vorwärtssprünge innerhalb der Spur sind erlaubt
- Die gesamte Spur darf Teil eines Zyklus sein
  - Z.B. wenn sie selbst der Schleifenkörper ist

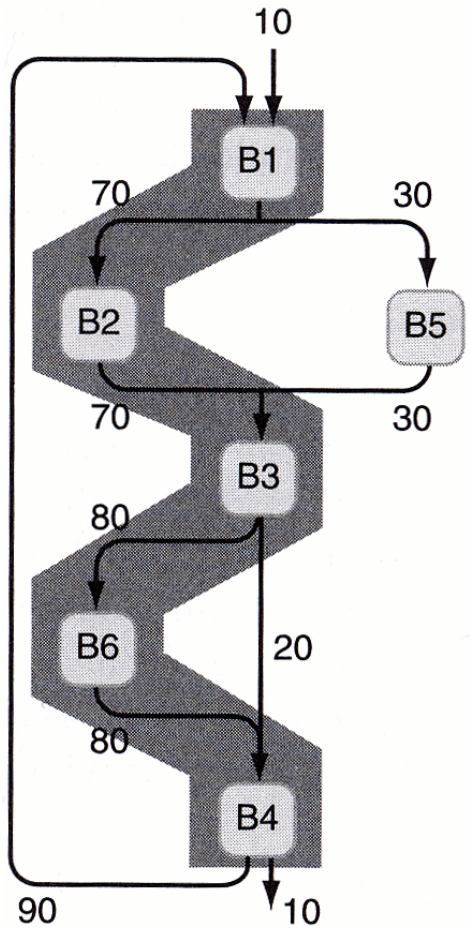
Beispielspur



Annotierter CFG



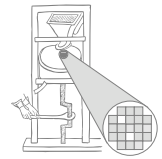
Eine Spur



A. Koch

Quelle: Embedded Computing, Fig 8.3

Literatur



Ab hier auch Material aus

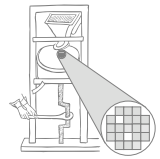
Bulldog: A Compiler for VLIW Architectures

von

John R. Ellis

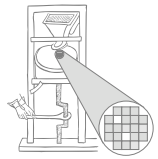
Konstruktion von Spuren

Wahrscheinlichste Wege durch annotierten CFG finden



1. Finde einen Startknoten mit größter Ausführungsanzahl (Summe der eingehenden Kanten)
2. Suche vom Ende v der Spur nach Kante (v, w) mit
   - w ist noch nicht Teil einer Spur und
   - count$((v, w))$ ist maximal für alle Kanten (v, x) und
   - count$((v, w))$ ist maximal für alle Kanten (x, w)
3. Wenn solche Kante gefunden, nimm Block w als neues Ende zur Spur hinzu
4. Wenn nicht, suche vom Anfang der Spur rückwärts

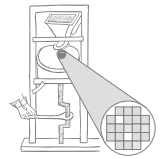
Konstruktion von Spuren
Diskussion



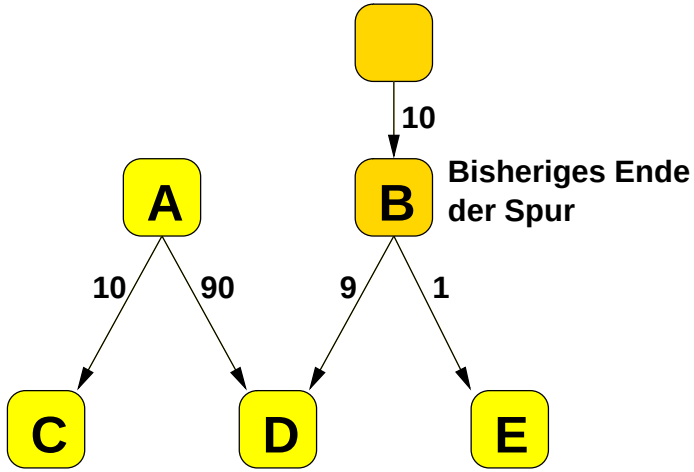
- Wenn keine Kanten mehr dazukommen (weder vorwärts noch rückwärts) . . .
- . . . diese Spur schliessen
- Nach Startknoten für nächste Spur suchen
- Effekt: Ganzer CFG wird mit (immer kleiner werdenden) Spuren überdeckt

Beispiel für Kantenauswahl

Idee: Gegenseitige größte Wahrscheinlichkeit von Knoten

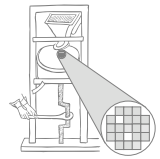


A. Koch



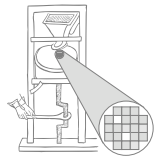
- Annahme: Ende der Spur ist **B**, es wird vorwärts gesucht
- Aus Sicht von **B** ist (**B**,**D**) eine lohnende Kante
- Aus Sicht von **D** wäre allerdings (**A**,**D**) lohnender
- Es gibt also keine Kante mit gegenseitiger größter Wahrscheinlichkeit
- Die Spur endet mit **B**
- Nun rückwärts vom Anfang der Spur suchen

Trace Scheduling
Ablaufplanung auf Spuren-Ebene



- Nun jede Spur einzeln ablaufplanen und binden
- Beginnend bei erster (=wichtigster) Spur
- Erinnerung Ablaufplanung (Kanonik CMS)
  - Zeitliche Zuordnung jeder Operation an konkreten Zeitschritt
  - Unter Berücksichtigung
    - aller Abhängigkeiten
    - verfügbarer Ressourcen (Recheneinheiten)
- Erinnerung Bindung (Kanonik CMS)
  - Zuordnung jeder Operation an konkrete Ausführungseinheit
  - Wichtig insbesondere dann, wenn es unterschiedliche Einheiten gibt

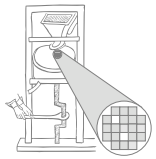
Darstellung einer Spur



- Als Prozedurabhängigkeitsgraph (PDG)
  - *procedure dependence graph*
  - Manchmal auch *program dependence graph* genannt
- Erweiterung des Datenabhängigkeitsgraphen
- Nun zusätzliche Knoten für bedingte Sprünge
  - Haben Datenabhängigkeit zu ihrer Bedingung
- Zusätzliche Kanten für Kontrollabhängigkeiten
  - Von bedingten Sprüngen zu davon abhängigen Operationen
  - Bei fehlender Kontrollkante: spekulative Ausführung möglich
  - Beachte: Bei uns nicht erlaubt bei STOREs

Beispiel Trace-Scheduling

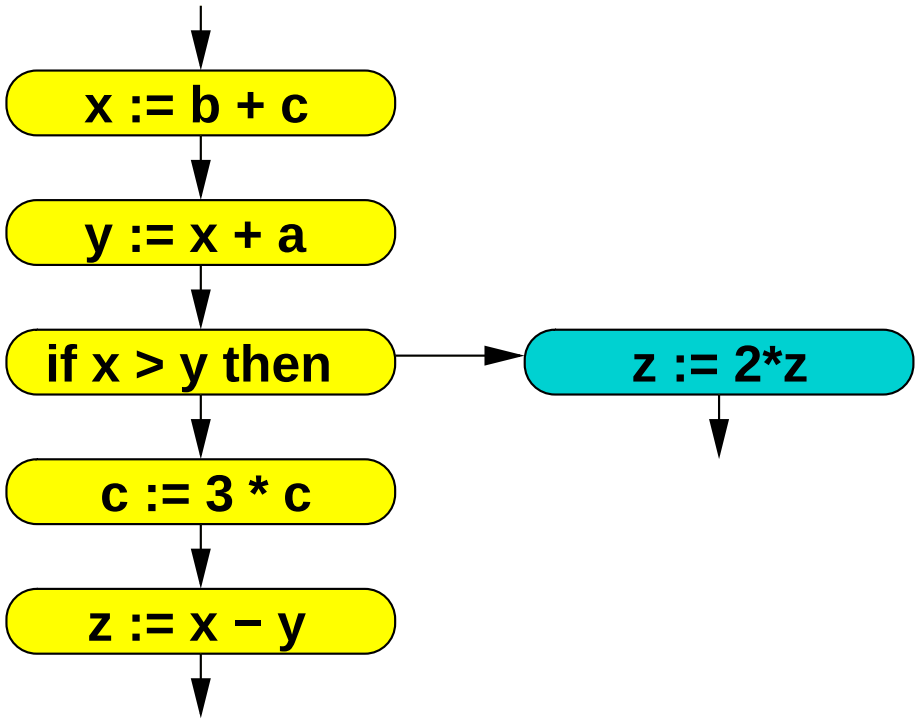
Vom Programm zur Spur



Programm

```
x := b + c
y := x + a
if x > y then
  c := 3 * c
  z := x − y
else
  z := 2 * z
  ...
endif
... := z
```

On−Trace **Off−Trace**

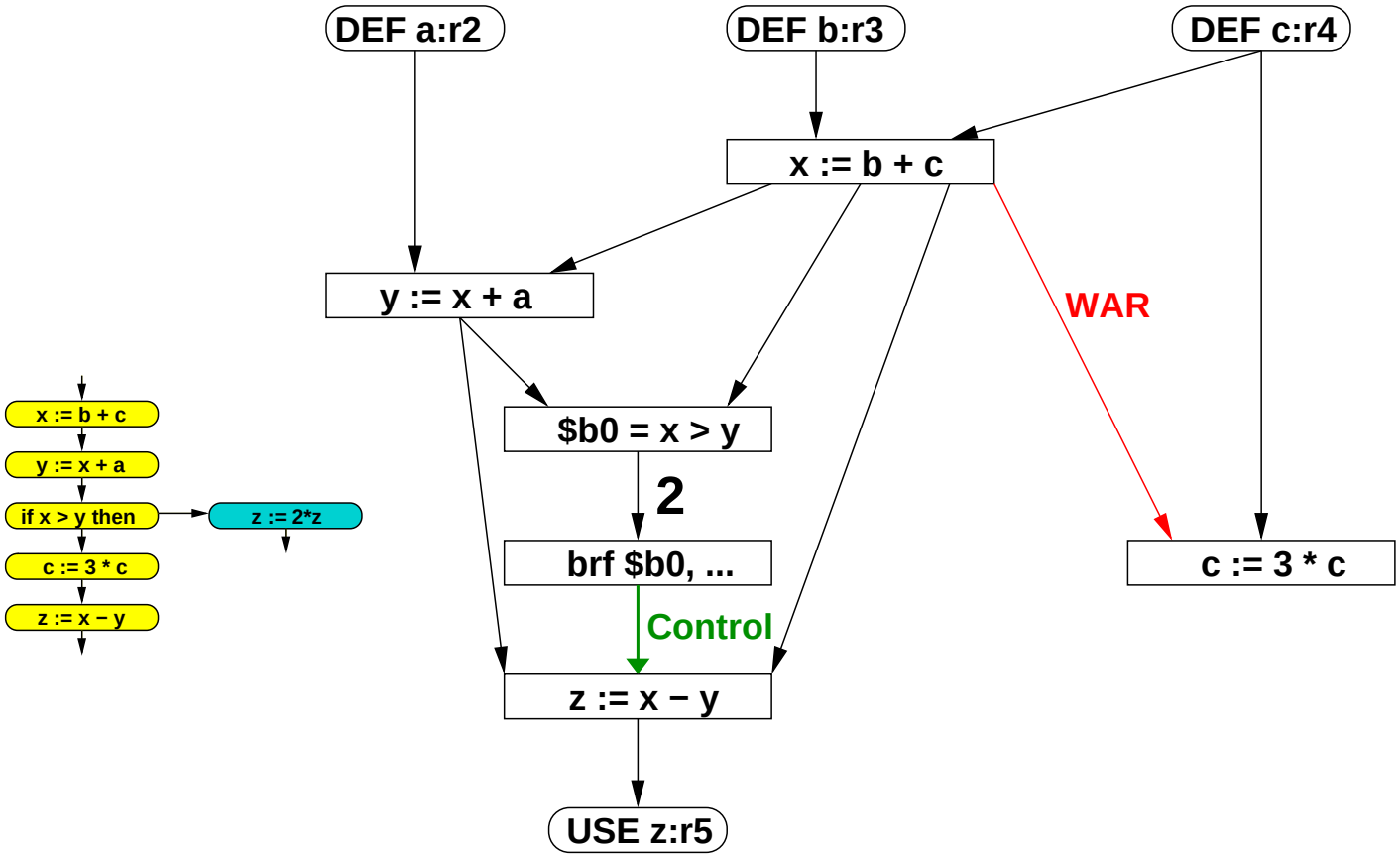


A. Koch

- Am Ende der Spur ist hier nur noch `z` relevant
- Andere Variablen können vernachlässigt werden
- Der Zweig `z := 2 * z` ist unwahrscheinlicher
- . . . und damit nicht auf der Spur

Beispiel Trace-Scheduling

Von der Spur zum PDG

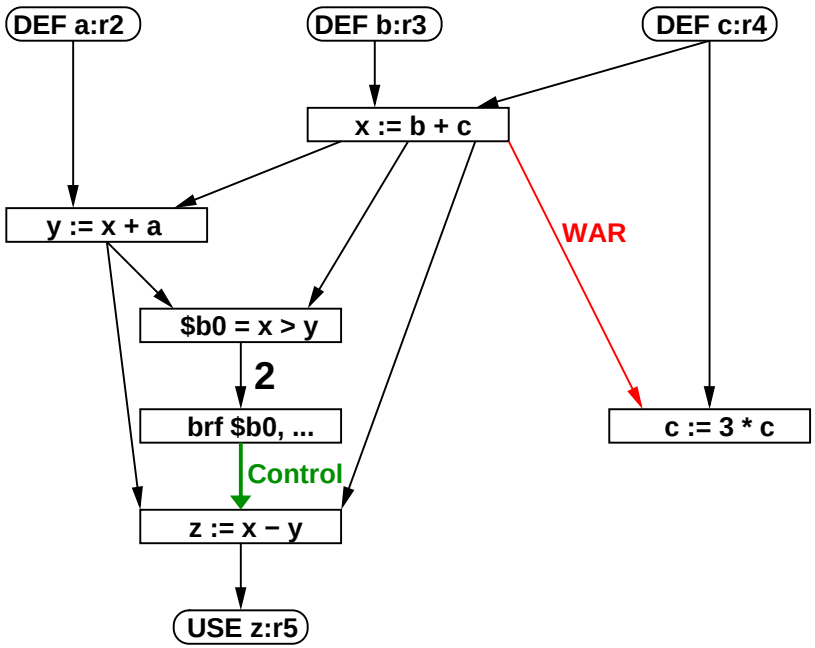


A. Koch

- `if/then/else` spalten in Vergleich/bedingten Sprung
- `z := x-y` darf nicht vor Verzweigung gezogen werden
- Ist aber nicht datenabhängig: Kontrollkante einziehen!

Beispiel Trace-Scheduling

Vom PDG zum Ablaufplan (=VEX Programm)

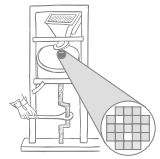



```
add $r10 = $r3, $r4
mpy $r4 = $r4, 3
;;
add $r11 = $r10, $r2
;;
cmpgt $b0 = $r10, $r11
xnop 1
;;
brf $b0, ...
;;
sub $r5 = $r10, $r11
```

A. Koch

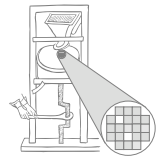
- Multiplikation spekulativ vorgezogen
- 2 Takte von Berechnung der Bedingung bis Sprung
- Kontrollkante verhindert Vorziehen von `z:=x-y`
- Aufwendige Bindung bei VEX nicht erforderlich
  - Jeweils gleiche Recheneinheiten (ALU, MULT)

Diskussion Kontrollkanten



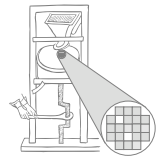
- w sei Operation im Programm hinter Verzweigung v
- w ist von v kontrollabhängig, wenn ...
  - ... die Zielvariable d von w auf dem anderen Zweig von v gelesen wird
  - ... ohne dass d dort vor dem Lesen redefiniert wird
  - Dann sicherstellen: w wird erst nach v ausgeführt
- Andere Terminologie
  - Manchmal auch Write-after-Conditional-Read genannt (WACR)
  - Compiler: d ist live auf anderem Ast der Verzweigung v

Diskussion spekulative Ausführung



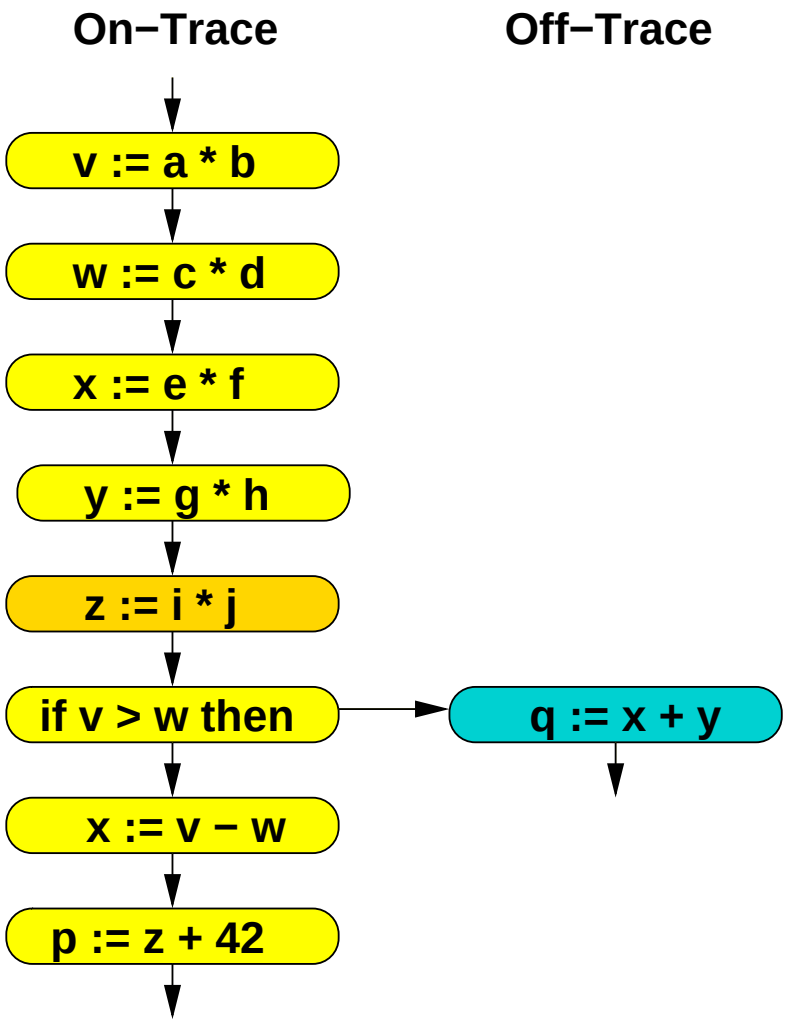
- Multiplikation hatte WAR-Abhängigkeit
- Wurde aber trotzdem parallel ausgeführt!
- Warum?
- VEX-Ausführungsmodell
  - Alle Operationen einer Instruktionen lesen zuerst Werte
  - Schreiben von Ergebnissen findet erst danach statt
- WAR auch bei paralleler Ausführung eingehalten!

Diskussion Verschiebung von Operationen



Annahme: Nur 1 schneller Multiplizierer mit 1 Takt Laufzeit

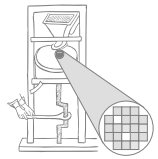
A. Koch




```
mpy    $r11 = $r1, $r2 #v
;;
mpy    $r12 = $r3, $r4 #w
;;
cmpgt $b0 = $r11, $r12
mpy    $r13 = $r5, $r6 #x
;;
brf    $b0, ...
mpy    $r14, $r7, $r8  #y
;;
mpy    $r15, $r9, $r10 #z
sub    $r13, $r11, $r12#x
;;
add    $r17, $r15, 42  #p
```

Hier Verschiebung auch hinter Verzweigung!

Stand der Dinge
Reicht das bisherige Vorgehen aus?

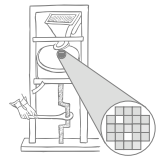


A. Koch

- Erreicht bisher
  - Jede Spur intern ablaufgeplant
  - Ggf. Operationen an Recheneinheiten gebunden
- Ablaufplanung kann Reihenfolge der Operationen ändern
  - Verschiebung relativ zum ursprünglichen Programm
  - Kann Einfluss auf andere Spuren haben
    - Hatten wir bisher vernachlässigt
    - Ausrede: Die Variablen werden dort nicht mehr gelesen
    - Ist aber in Realität komplizierter

➥Schaden reparieren durch Kompensationscode

Zusammenfassung



- Mehrwegesprünge und Spekulation
- Darstellung von Programmen durch
  - Datenabhängigkeitsgraph
  - Kontrollflußgraph
  - Prozedurabhängigkeitsgraph
- Profiling
- Spuren
- Trace-Scheduling
- Kompensationscode fehlt aber noch!