



A. Koch

Optimierende Compiler

9. Skalare Optimierung

Andreas Koch

FG Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen
Informatik, TU Darmstadt

Sommersemester 2006



- Keine weitere Aufgabe mehr
- Stattdessen Nacharbeiten zu bestehenden Abgaben
 - Auch Schreiben von angemessener Dokumentation
- Abschlusskolloquien: Jetzt je 30 Minuten lang
 - Di, 18.7., von 16:15-17:55 Uhr (3 Termine)
 - Mi, 19.7., von 15:00-16:00 Uhr (2 Termine)
 - Terminabsprache für Gruppe 1,3,4,5,6?

Überflüssiger Code



A. Koch

- Nutzloser Code
 - Keine weitere Operation verwendet Ergebnis
 - Genauer: Eine weitere Verwendung des Ergebnisses ist von aussen nicht sichtbar
- Unerreichbarer Code
 - Kann auf keinem Pfad im CFG erreicht werden
 - Einfacher Fall: `elimconstcond`

Hier: Konzentration auf Entfernung nutzlosen Codes

Dead Code Elimination



Kritische Operationen haben nach aussen sichtbare Effekte

- Müssen immer ausgeführt werden
- Return-Anweisungen
- Zuweisungen an var-Parameter, globale und nicht-lokale Variablen
- Unterprogrammaufrufe (wenn keine IPO vorhanden)
- Ein-Ausgabe-Anweisungen

Bei uns vereinfacht: Nur Ausgabeoperationen relevant

Dead Code Elimination - Ideen



A. Koch

- Markieren benötigter Operationen
 - Markiere kritische Operationen
 - Untersucht deren Operanden und markiert die zugehörigen Definitionen als benötigt
 - Solange noch weitere benötigte Operationen dazu kommen: Wiederholen
- Entfernen toter Operationen
 - Alle nicht markierten Operationen entfernen

➔ Klassisches *Mark-and-Sweep* Vorgehen

Dead Code Elimination - Details



A. Koch

- Für die meisten Operationen einfach
- Was bei Kontrollfluß (Kanten) zwischen Blöcken?
- Gleiche Grundidee wie bei anderen Anweisungen
 - Unbedingte Sprünge werden immer benötigt
 - Ausführung muß ja weitergehen
 - Bedingte Sprunganweisung: genauer ansehen
 - Ein Zweig wird **nur** benötigt, wenn er mindestens zu einer benötigten Anweisung führt
- Vorgehensweise
 - Bei markieren einer Anweisung auch gleich **entscheidende** Verzweigung mitmarkieren
 - Leicht gesagt, aber wie genau diese Verzweigung finden?

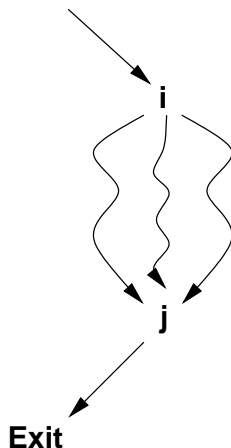
Neue Konzepte erforderlich!

Postdominanz



A. Koch

Ein Knoten j **postdominiert** den Knoten i in einem CFG, wenn alle Pfade von i zum Endknoten des CFG durch den Knoten j führen.



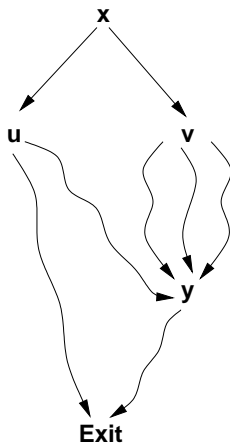
Kontrollabhängigkeit 1



y ist von x **kontrollabhängig** genau dann, wenn

- 1 es einen nicht-leeren Pfad von x zu y gibt und jeder auf diesem Pfad liegende Knoten von y postdominiert wird,
- 2 x aber nicht strikt von y postdominiert wird.

- y postdominiert v und alle Knoten dazwischen
- y postdominiert nicht x
- y ist von x **kontrollabhängig**



A. Koch

Kontrollabhängigkeit 2



A. Koch

Andere Deutung

- Zwei oder mehr Kanten verlassen Block x
- Nach Eintritt in ein der Kanten wird y in jeden Fall ausgeführt
- Über die andere(n) Kante(n) kann der Endknoten ohne y erreicht werden

Damit entscheidet Bedingung am Ende von x , ob y ausgeführt wird.

➡ Wenn Anweisung in y benötigt wird, wird damit auch die Entscheidung in x benötigt

Wie Kontrollabhängigkeit berechnen?



Hat etwas mit **Postdominanz** zu tun.

A. Koch

Zusammenhang:

- Postdominanz im CFG
- \leftrightarrow Dominanz im umgekehrten CFG
 - Richtung der Kanten vertauscht
 - *reversed CFG* (rCFG)

➔ Dominanzberechnung bekannt (Brandis & Mössenböck)

Reicht aber noch nicht ganz: Wo genau ist der y **nahegelegenste** Punkt, an dem die Entscheidung fällt?

➔ Wo ist der y nahegelegenste Knoten, bei dem auch eine Abzweigung an y vorbei genommen werden kann?

Dominatorgrenze



Analoge Betrachtung bei Dominatoren:

Welche Knoten w liegen gerade außerhalb der Dominanz eines Knotens x ?

A. Koch

Anders: An welchem Knoten w kann aus dessen Ausführung nicht mehr sicher auf die Ausführung von x geschlossen werden?

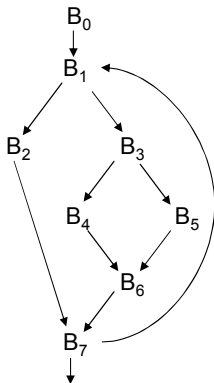
Dominatorgrenze $DF(x)$

Knoten w , bei denen ein Vorgänger q durch x dominiert wird ($q \in \text{preds}(w) \wedge x \in \text{DOM}(q)$), aber w selbst nicht von x strikt dominiert ist ($x \notin \text{DOM}(w) - \{w\}$), heissen die **Dominatorgrenze** von x , mit $w \in DF(x)$.

Beispiel Dominatorgrenze



A. Koch



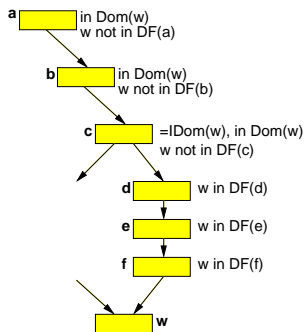
	0	1	2	3	4	5	6	7
DOM	0	0,1	0,1,2	0,1,3	0,1,3,4	0,1,3,5	0,1,3,6	0,1,7
DF	-	-	7	7	6	6	7	1

Berechnung der Dominatorgrenzen - Beobachtung



A. Koch

- Knoten auf Dominatorgrenze sind immer Merge-Knoten
- Vorgänger x eines Merge-Knotens w haben $w \in DF(x)$, wenn nicht gilt $x \in \text{DOM}(w)$
- Dominatoren z der Vorgänger von w haben auch $w \in DF(z)$, wenn nicht gilt $z \in \text{DOM}(w)$

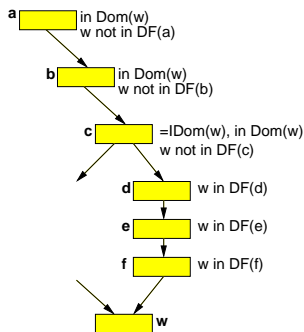


Berechnung von Dominatororgrenzen - Vorgehensweise



A. Koch

- 1 Finde Merge-Points als w
- 2 Beginne Untersuchung bei direkten Vorgängern des Merge-Points w
- 3 Klettere rückwärts weiter via IDOM des aktuellen Knotens x
 - Setze $w \in DF(x)$, bis $x = \text{IDOM}(w)$



Berechnung von Dominatororgrenzen - Algorithmus



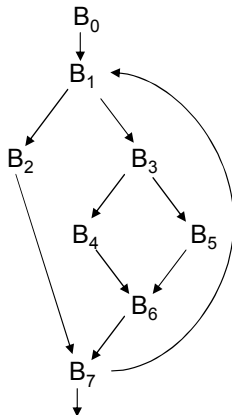
A. Koch

```
foreach node n in CFG do  
    DF(n) :=  $\emptyset$   
foreach node n in CFG do  
    if |preds(n)| > 1 then  
        foreach p in preds(n) do  
            runner := p  
            while runner  $\neq$  IDOM(n)  $\wedge$  runner  $\neq$  n do  
                DF(runner) := DF(runner)  $\cup$  { n }  
                runner := IDOM(runner)
```

Berechnung von Dominatorgrenzen - Beispiel



- Bearbeite B6: Zu B5, dort B6 in $DF(B5)$, Ende bei B3. Zu B4, dort B6 in $DF(B4)$, Ende bei B3.
- Bearbeite B7: Zu B2, dort B7 in $DF(B2)$, Ende bei B1. Zu B6, dort B7 in $DF(B6)$, zu B3, dort B7 in $DF(B3)$, Ende bei B1.
- Bearbeite B1: Zu B0, dort Ende. Zu B7, dort B1 in $DF(B7)$, dort Ende.



A. Koch

	0	1	2	3	4	5	6	7
DOM	0	0,1	0,1,2	0,1,3	0,1,3,4	0,1,3,5	0,1,3,6	0,1,7
DF	-	-	7	7	6	6	7	1

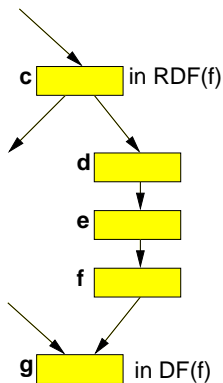
... zurück zu Dead Code Elimination



Gesucht: Verzweigungen, von denen benötigte Anweisung i
kontrollabhängig ist

A. Koch

➡ Sind Dominatorgrenzen von $\text{block}(i)$ im reversen CFG:
RDF(block(i))



Markiere benötigte Operationen



A. Koch

MarkPass

```
foreach op i
  clear i's mark
  if i is critical then
    mark i
    add i to WorkList
while (Worklist  $\neq$   $\emptyset$ )
  remove i from WorkList
    (i has form "x  $\rightarrow$  y op z")
  if def(y) is not marked then
    mark def(y)
    add def(y) to WorkList
  if def(z) is not marked then
    mark def(z)
    add def(z) to WorkList
  foreach b  $\in$  RDF(block(i))
    mark the block-ending
      branch j in b
    add j to WorkList
```

Lösche unnötige Operationen



A. Koch

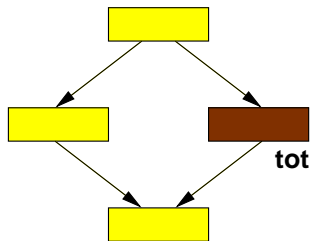
```
Sweep
  foreach op i
    if i is not marked then
      if i is a branch then
        rewrite with a jump to i's nearest useful post-dominator
      if i is not a jump then
        delete i
```

- Lösche unmarkierte Operationen
- “Verbiege” unmarkierte Verzweigung
 - Setze Ausführung bei nächstgelegenen Postdominator mit nützlichen Operationen fort

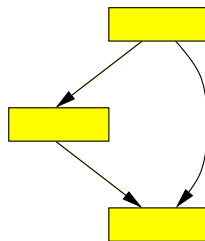
Beispiel Verbiegen 1



A. Koch



Vorher

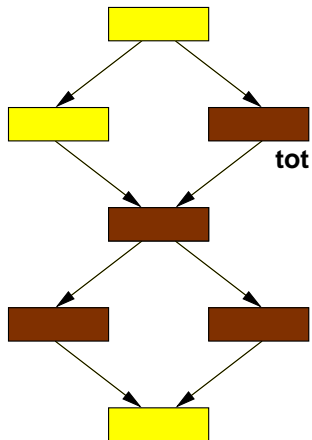


Nachher

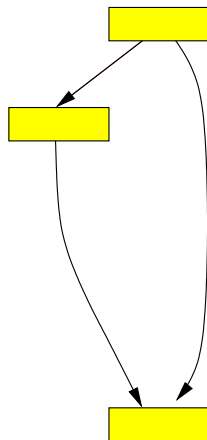
Beispiel Verbiegen 2



A. Koch



Vorher



Nachher

Dead Code Elimination



A. Koch

- Gesamter Ablauf von Dead():
 - 1 MarkPass()
 - 2 SweepPass()
- Kann leere Blöcke hinterlassen
- Aufräumen mit nächstem Algorithmus

Beseitigen unnötigen Kontrollflusses



A. Koch

- Nach Optimierung kann CFG leere Blöcke enthalten
- Leere Blöcke enden mit Übergang zum nächsten Block
 - Unbedingter Sprung (ein Nachfolger)
 - Bedingte Sprünge für Verzweigungen
- Kann zu Sprung-zu-Sprung führen (langsam & platzverschwendend)
- Beseitigen!

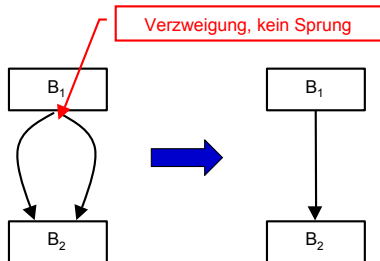
➡ Algorithmus CLEAN: Vier Schritte

Entferne redundante Verzweigung



A. Koch

- Entsteht durch:
Verbiegen von
Verzweigungen
- Vorgehen: Ersetze
Verzweigung durch
Sprung

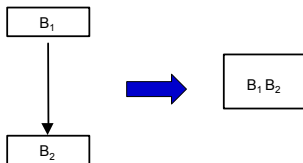


Verschmelze Blöcke



A. Koch

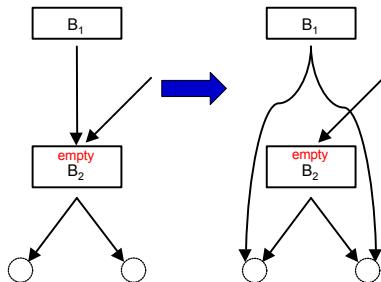
- Entsteht durch: Vereinfachte Kanten aus B1
- Voraussetzungen
 - B1 endet mit einem unbedingten Sprung
 - B2 hat genau einen Vorgänger
- Vorgehen:
 - Verschmelze beide Blöcke
 - Entferne damit den Sprung



Herausziehen von Verzweigung



- Entsteht durch:
Gelöschte Operationen
in B2
- Voraussetzungen
 - B1 endet mit Sprung
 - B2 ist leer und endet
mit Verzweigung
- Vorgehen:
 - Kopiere Verzweigung
von B2 ans Ende von
B1
 - Kann B2 unerreichbar
machen



Ablauf des gesamten CLEAN-Passes



A. Koch

- Bearbeite Blöcke in **postorder**
 - Vorgänger eines Blockes b vor b selber bearbeiten
- An jedem Block feste Abarbeitungsreihenfolge
 - 1 Entferne redundante Verzweigungen
 - Entfernt Kante, erzeugt neuen Sprung
 - 2 Beseitige leere Blöcke
 - Entfernt Knoten
 - 3 Verschmelze Blöcke
 - Entfernt Knoten und Kante
 - 4 Ziehe Verzweigungen heraus
 - Fügt neue Kante hinzu
- Mehrere Durchgänge erforderlich
 - Postorder-Reihenfolge nach jedem Durchgang neu berechnen

CLEAN-Algorithmus



A. Koch

```
CleanPass()
  foreach block i, in postorder
    if i ends in a branch then
      if both targets are identical then
        rewrite with a jump
    if i ends in a jump to j then
      if i is empty then
        merge i with j
      else if j has only one predecessor
        merge i with j
      else if j is empty & j has a branch then
        rewrite i's jump with j's branch

Clean()
  until CFG stops changing
  compute postorder
  CleanPass()
```



- Erster Einblick in skalare Optimierung
- Modifikation des CFG
- Neue und alte Konzepte
 - Dominanz, Postdominanz, Dominanzgrenzen
- Dead Code Elimination: DEAD
- Bereinigen des CFG: CLEAN