

Compiler II: Skalare Optimierung

Andreas Koch

FG Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen
Informatik, TU Darmstadt

Sommersemester 2012

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Dead Code Elimination

- 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

Hier: Konzentration auf Entfernung nutzlosen Codes
Dead Code Elimination

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- 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

Hier: Konzentration auf Entfernung nutzlosen Codes
Dead Code Elimination

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- 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

Hier: Konzentration auf Entfernung nutzlosen Codes
Dead Code Elimination

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

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

Für VL vereinfacht: Nur Ausgabeoperationen relevant

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

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

Für VL vereinfacht: Nur Ausgabeoperationen relevant

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

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

Für VL vereinfacht: Nur Ausgabeoperationen relevant

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- Markieren benötigter Operationen
 - Markiere **kritische** Operationen
 - Untersuche deren Operanden und markiere 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

- Markieren benötigter Operationen
 - Markiere **kritische** Operationen
 - Untersuche deren Operanden und markiere 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

- 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?

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

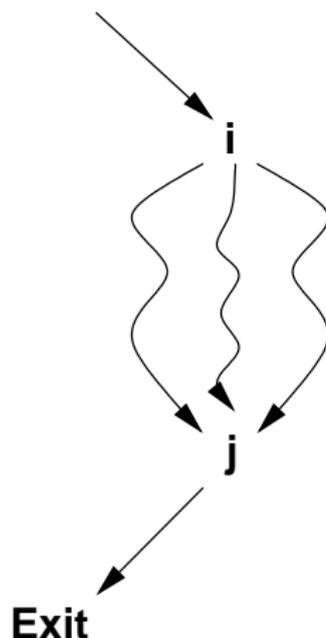
Diskussion

Zusammenfassung

- 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!

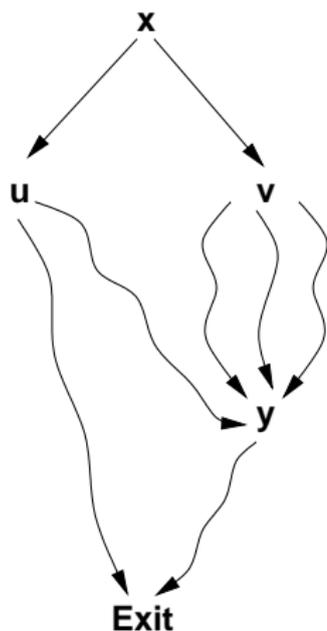
Ein Knoten j **postdominiert** den Knoten i in einem CFG, wenn alle Pfade von i zum Endknoten des CFG durch den Knoten j führen.



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**



C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

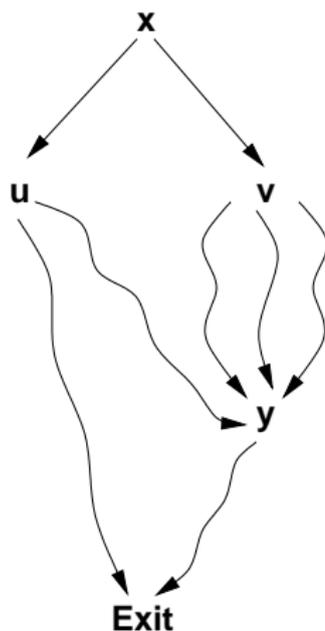
Diskussion

Zusammenfassung

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**



Andere Deutung

- Zwei oder mehr Kanten verlassen Block x
- Nach Eintritt in eine 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

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Andere Deutung

- Zwei oder mehr Kanten verlassen Block x
- Nach Eintritt in eine 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

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Andere Deutung

- Zwei oder mehr Kanten verlassen Block x
- Nach Eintritt in eine 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

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Hat etwas mit **Postdominanz** zu tun.

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?

Hat etwas mit **Postdominanz** zu tun.

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?

Hat etwas mit **Postdominanz** zu tun.

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?

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Hat etwas mit **Postdominanz** zu tun.

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?

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Analoge Betrachtung bei Dominatoren:
Welche Knoten w liegen **gerade außerhalb** der Dominanz eines Knotens x ?

Anders: An welchem Knoten w kann aus dessen Ausführung nicht mehr sicher auf die vorherige 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 $w \in DF(x)$.

C2

A. Koch

Dead Code Elimination

Bereinigen des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Analoge Betrachtung bei Dominatoren:
Welche Knoten w liegen **gerade außerhalb** der Dominanz eines Knotens x ?

Anders: An welchem Knoten w kann aus dessen Ausführung nicht mehr sicher auf die vorherige 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 $w \in DF(x)$.

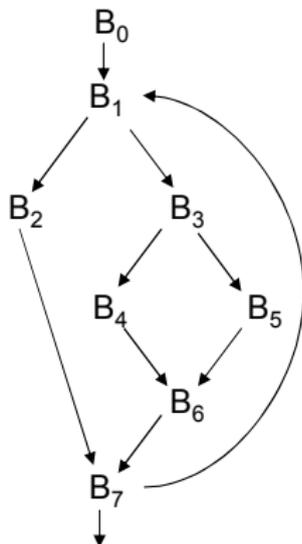
Analoge Betrachtung bei Dominatoren:
Welche Knoten w liegen **gerade außerhalb** der Dominanz eines Knotens x ?

Anders: An welchem Knoten w kann aus dessen Ausführung nicht mehr sicher auf die vorherige 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 $w \in DF(x)$.

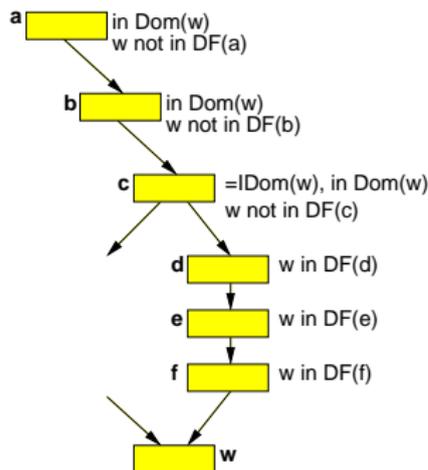
Beispiel Dominatorgrenze



	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

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



C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

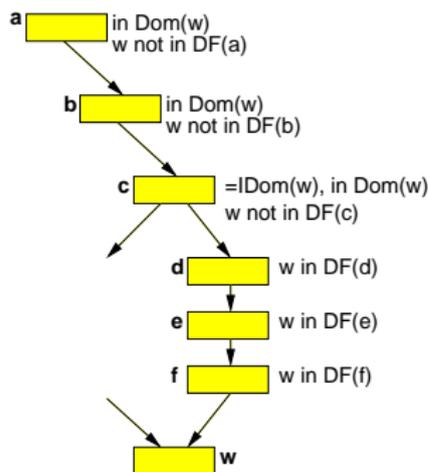
Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Berechnung von Dominatorgrenzen - Vorgehensweise

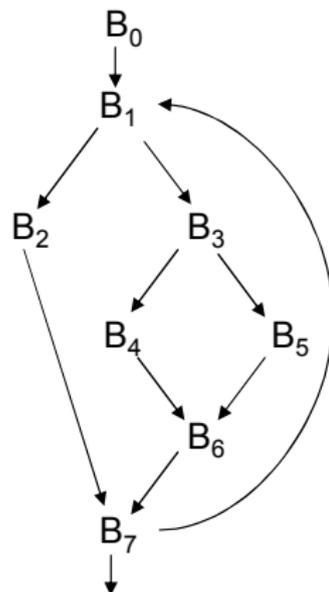
- 1 Finde Merge-Points als w
- 2 Beginne Untersuchung bei direkten Vorgängern x des Merge-Points w
- 3 Klettere rückwärts weiter via IDOM des aktuellen Knotens x
 - Setze $DF(x) = DF(x) \cup \{w\}$, bis $x = \text{IDOM}(w)$



Berechnung von Dominatorgrenzen - Algorithmus

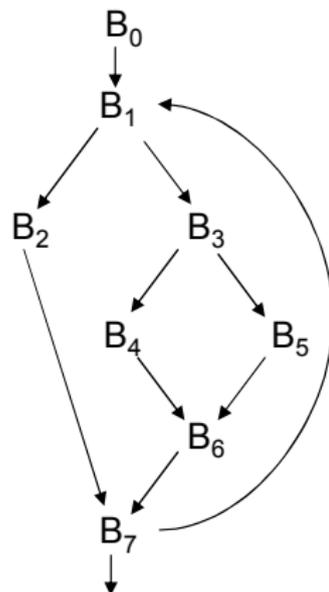
```
foreach node n in CFG do  
  DF(n) :=  $\emptyset$   
foreach node n in CFG do  
  if |preds(n)| > 1 then  
    foreach p in preds(n) do  
      runner := p  
      while runner  $\neq$  IDOM(n)  $\wedge$  runner  $\neq$  n do  
        DF(runner) := DF(runner)  $\cup$  { n }  
        runner :=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

- 1 Bearbeite B6: Zu B5, dort B6 in DF(B5), Ende bei B3. Zu B4, dort B6 in DF(B4), Ende bei B3.
- 2 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.
- 3 Bearbeite B1: Zu B0, dort Ende. Zu B7, dort B1 in DF(B7), dort Ende.



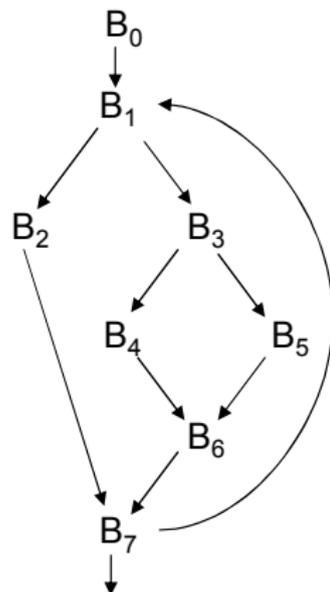
	0	1	2	3	4	5	6	7
DOM	0	0,1	0,1,2	0,1,3	0,1,3,4	0,1,3,5	0,1,3,6	0,1,7
DF	-	-	7	7	6	6	7	1

- 1 Bearbeite B6: Zu B5, dort B6 in DF(B5), Ende bei B3. Zu B4, dort B6 in DF(B4), Ende bei B3.
- 2 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.
- 3 Bearbeite B1: Zu B0, dort Ende. Zu B7, dort B1 in DF(B7), dort Ende.



	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

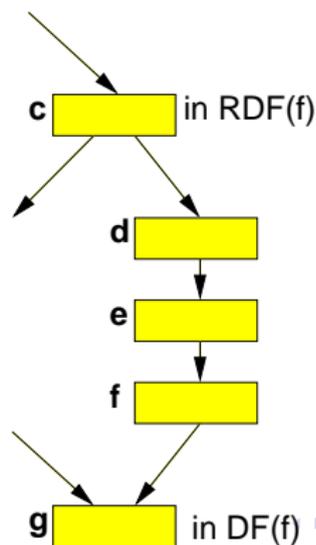
- 1 Bearbeite B6: Zu B5, dort B6 in DF(B5), Ende bei B3. Zu B4, dort B6 in DF(B4), Ende bei B3.
- 2 Bearbeite B7: Zu B2, dort B7 in DF(B2), Ende bei B1. Zu B6, dort B7 in DF(B6), zu B3, dort B7 in DF(B3), Ende bei B1.
- 3 Bearbeite B1: Zu B0, dort Ende. Zu B7, dort B1 in DF(B7), dort Ende.



	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

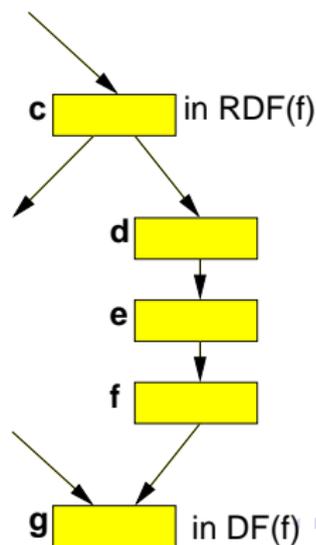
Gesucht: Verzweigungen, von denen benötigte Anweisung i **kontrollabhängig** ist

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



Gesucht: Verzweigungen, von denen benötigte Anweisung i **kontrollabhängig** ist

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



MarkPass

```
foreach op i
  clear i's mark
  if i is critical then
    mark i
    add i to WorkList
while (Worklist !=  $\emptyset$ )
  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
```

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

```
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

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

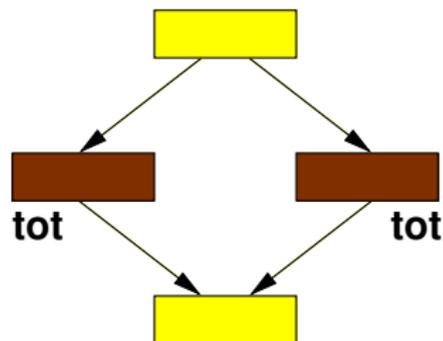
Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

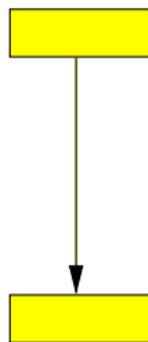
Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung



Vorher



Nachher

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

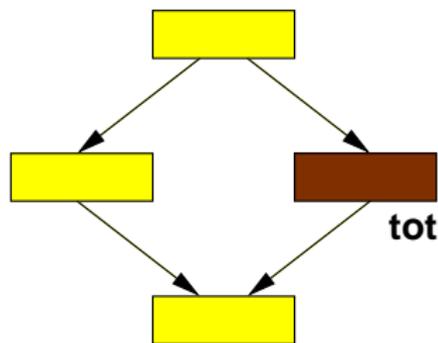
Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

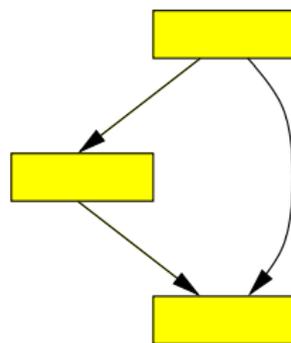
Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung



Vorher



Nachher

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

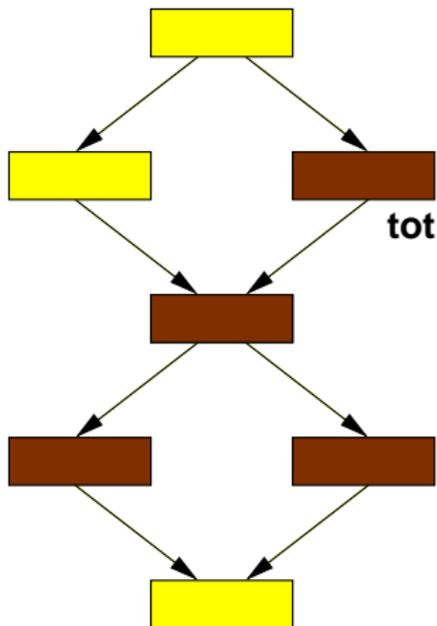
Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

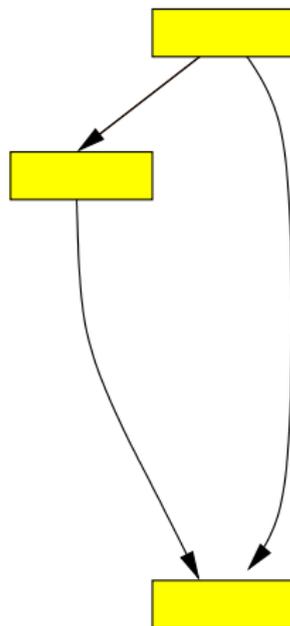
Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung



Vorher



Nachher

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

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Bereinigen des CFG

- 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

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformation

Diskussion

Zusammenfassung

- 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

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

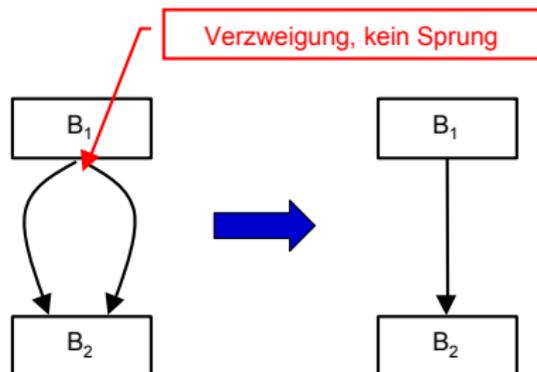
Spezialisierung

Transformation

Diskussion

Zusammenfassung

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



Quelle: C&T Fig. 10.4

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

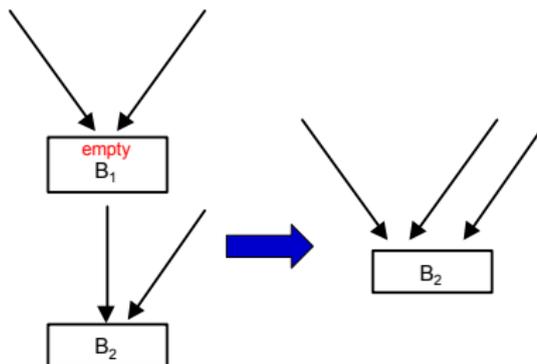
Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- Entsteht durch:
Gelöschte Operationen
in B1
- Voraussetzungen:
Leerer Block B1 endet
mit Sprung
- Vorgehen:
 - Verbiege eingehende
Kanten von B1 zu B2
 - Entferne B1



Quelle: C&T Fig. 10.4

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

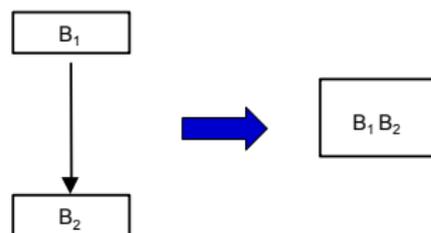
Spezialisierung

Transformation

Diskussion

Zusammenfassung

- 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



Quelle: C&T Fig. 10.4

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

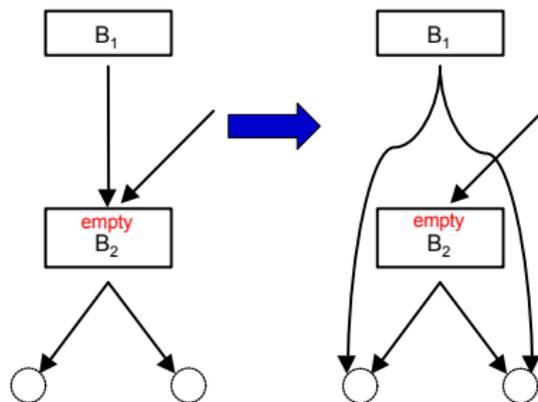
Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- 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



- ① Bearbeite Blöcke in **postorder**
 - Nachfolger eines Blockes b vor b selber bearbeiten
- ② 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
- ③ Mehrere Durchgänge erforderlich
 - Postorder-Reihenfolge nach jedem Durchgang neu berechnen

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

```
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()
```

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

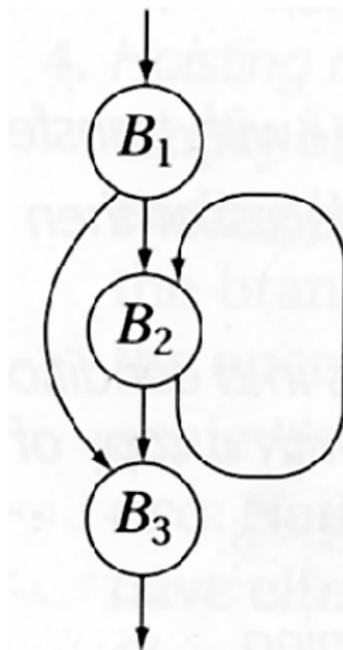
Diskussion

Zusammenfassung

Beispiel: Leere Schleife (**B2** leer)

CLEAN alleine kann **B2** nicht beseitigen

- Verzweigung am Ende von **B2** hat verschiedene Ziele
 - Ist nicht redundant, kann nicht in Sprung konvertiert werden
- **B2** endet nicht mit einem Sprung
 - Kein Zusammenfassen mit **B3**
- Vorgänger **B1** von **B2** endet mit Verzweigung
 - Kein Zusammenfassen von **B1** mit **B2**

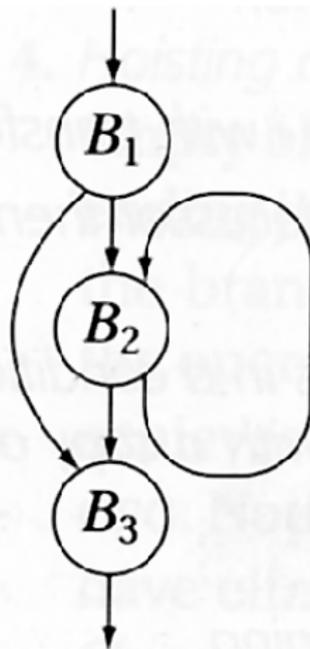


➔ Geht aber in Kooperation mit DEAD!

Beispiel: Leere Schleife (**B2** leer)

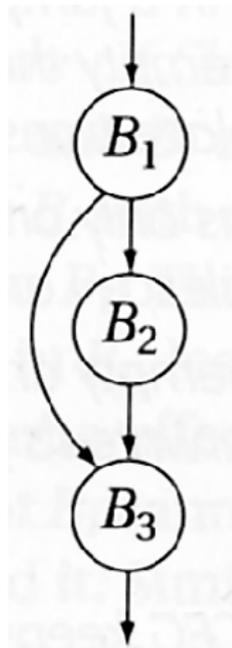
CLEAN alleine kann **B2** nicht beseitigen

- Verzweigung am Ende von **B2** hat verschiedene Ziele
 - Ist nicht redundant, kann nicht in Sprung konvertiert werden
- **B2** endet nicht mit einem Sprung
 - Kein Zusammenfassen mit **B3**
- Vorgänger **B1** von **B2** endet mit Verzweigung
 - Kein Zusammenfassen von **B1** mit **B2**

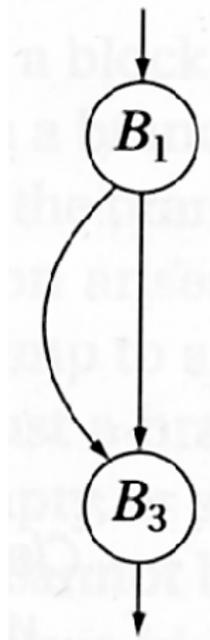


➡ Geht aber in Kooperation mit DEAD!

- Ergebnis von DEAD:
- **B1**, **B3** enthalten nützliche Operationen
- **B2** nicht: Verzweigung (**B2**, **B2**) nutzlos
 - $B2 \notin RDF(B3)$
- Bedingungs-berechnung für Verzweigung nutzlos
- Verzweigung (**B2**, **B2**) in Sprung zu nützlichem Postdominator von **B2** umwandeln



- **B2** endet mit Sprung zu **B3** und ist selbst leer
- Ändere Sprung (**B1,B2**) zu (**B1,B3**)
 - Entfernt **B2**



- Verzweigung in **B1** redundant:
Umschreiben zu Sprung
- Abschliessend: **B3** mit einzigem
Vorgänger verschmelzen



Spezialisierung

- Üblicherweise: Erzeuge Code, der im Allgemeinfall funktioniert
- Wenn beweisbar, dass nicht alle Fälle auftreten
- ... besser angepasster Code erzeugbar
- Beispiele: Konstante Operanden
 - $x := y * 4 \rightarrow x := y \ll 2$
 - $x := 17 * 4 \rightarrow x := 68$
- Weitere Beispiele
 - Schlüsselloch-Optimierung (*peephole optimization*)
 - `ST r1, (0x400); LD r2, (0x400); ADD r3, r2`
→
 - `ST r1, (0x400); ADD r3, r1`
 - Ersetze Tail-Recursion durch Sprung
 - Verwendet (modifizierten) alten Stack Frame wieder

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- Üblicherweise: Erzeuge Code, der im Allgemeinfall funktioniert
- Wenn beweisbar, dass nicht alle Fälle auftreten
- ... besser angepasster Code erzeugbar
- Beispiele: Konstante Operanden
 - $x := y * 4 \rightarrow x := y \ll 2$
 - $x := 17 * 4 \rightarrow x := 68$
- Weitere Beispiele
 - Schlüsselloch-Optimierung (*peephole optimization*)
 - `ST r1, (0x400); LD r2, (0x400); ADD r3, r2`
→
 - `ST r1, (0x400); ADD r3, r1`
 - Ersetze Tail-Recursion durch Sprung
 - Verwendet (modifizierten) alten Stack Frame wieder

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- Üblicherweise: Erzeuge Code, der im Allgemeinfall funktioniert
- Wenn beweisbar, dass nicht alle Fälle auftreten
- ... besser angepasster Code erzeugbar
- Beispiele: Konstante Operanden
 - $x := y * 4 \rightarrow x := y \ll 2$
 - $x := 17 * 4 \rightarrow x := 68$
- Weitere Beispiele
 - Schlüsselloch-Optimierung (*peephole optimization*)
 - `ST r1, (0x400); LD r2, (0x400); ADD r3, r2`
→
 - `ST r1, (0x400); ADD r3, r1`
 - Ersetze Tail-Recursion durch Sprung
 - Verwendet (modifizierten) alten Stack Frame wieder

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

1. Versuch (aus Block 4: Datenfluss)

$\text{CONSTANTS}(b)$ sind alle bisher gesammelten Aussagen zu Beginn des Blocks b

- Keine Aussage über v machbar: $(v, x) \notin \text{CONSTANTS}(b)$
- v ist konstant mit Wert c : $(v, c) \in \text{CONSTANTS}(b)$
- v hat unbekanntes (potentiell variables) Wert: $(v, \perp) \in \text{CONSTANTS}(b)$

Definition Meets-Operator

$$(v, c_1) \wedge (v, c_2) = \begin{cases} (v, c_1) & : \text{wenn } c_1 = c_2 \\ (v, \perp) & : \text{sonst} \end{cases}$$

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

1. Versuch (aus Block 4: Datenfluss)

$\text{CONSTANTS}(b)$ sind alle bisher gesammelten Aussagen zu Beginn des Blocks b

- Keine Aussage über v machbar: $(v, x) \notin \text{CONSTANTS}(b)$
- v ist konstant mit Wert c : $(v, c) \in \text{CONSTANTS}(b)$
- v hat unbekanntem (potentiell variablen) Wert: $(v, \perp) \in \text{CONSTANTS}(b)$

Definition Meets-Operator

$$(v, c_1) \wedge (v, c_2) = \begin{cases} (v, c_1) & : \text{wenn } c_1 = c_2 \\ (v, \perp) & : \text{sonst} \end{cases}$$

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

1. Versuch (aus Block 4: Datenfluss)

$\text{CONSTANTS}(b)$ sind alle bisher gesammelten Aussagen zu Beginn des Blocks b

- Keine Aussage über v machbar: $(v, x) \notin \text{CONSTANTS}(b)$
- v ist konstant mit Wert c : $(v, c) \in \text{CONSTANTS}(b)$
- v hat unbekanntem (potentiell variablen) Wert: $(v, \perp) \in \text{CONSTANTS}(b)$

Definition Meets-Operator

$$(v, c_1) \wedge (v, c_2) = \begin{cases} (v, c_1) & : \text{wenn } c_1 = c_2 \\ (v, \perp) & : \text{sonst} \end{cases}$$

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

```
i0 := 12;
while ( ... ) {
    i1 := phi (i0, i3);
    x1 := i1 * 17;
    j1 := i1;
    i2 := ...;
    i3 := j1;
}
```

1. Version rechnet bei Join-Knoten: $i_0 \wedge i_3 = 12 \wedge \perp = \perp$

Programmausführung liefert aber anderes Ergebnis!

1. Version ist **pessimistisch**: Verknüpfung mit unbekanntem Wert liefert immer \perp

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

```
i0 := 12;
while ( ... ) {
    i1 := phi (i0, i3);
    x1 := i1 * 17;
    j1 := i1;
    i2 := ...;
    i3 := j1;
}
```

1. Version rechnet bei Join-Knoten: $i_0 \wedge i_3 = 12 \wedge \perp = \perp$

Programmausführung liefert aber anderes Ergebnis!

1. Version ist **pessimistisch**: Verknüpfung mit unbekanntem Wert liefert immer \perp

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

```
i0 := 12;
while ( ... ) {
    i1 := phi (i0, i3);
    x1 := i1 * 17;
    j1 := i1;
    i2 := ...;
    i3 := j1;
}
```

1. Version rechnet bei Join-Knoten: $i_0 \wedge i_3 = 12 \wedge \perp = \perp$

Programmausführung liefert aber anderes Ergebnis!

1. Version ist **pessimistisch**: Verknüpfung mit unbekanntem Wert liefert immer \perp

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

```
i0 := 12;
while ( ... ) {
    i1 := phi (i0, i3);
    x1 := i1 * 17;
    j1 := i1;
    i2 := ...;
    i3 := j1;
}
```

1. Version rechnet bei Join-Knoten: $i_0 \wedge i_3 = 12 \wedge \perp = \perp$

Programmausführung liefert aber anderes Ergebnis!

1. Version ist **pessimistisch**: Verknüpfung mit unbekanntem Wert liefert immer \perp

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

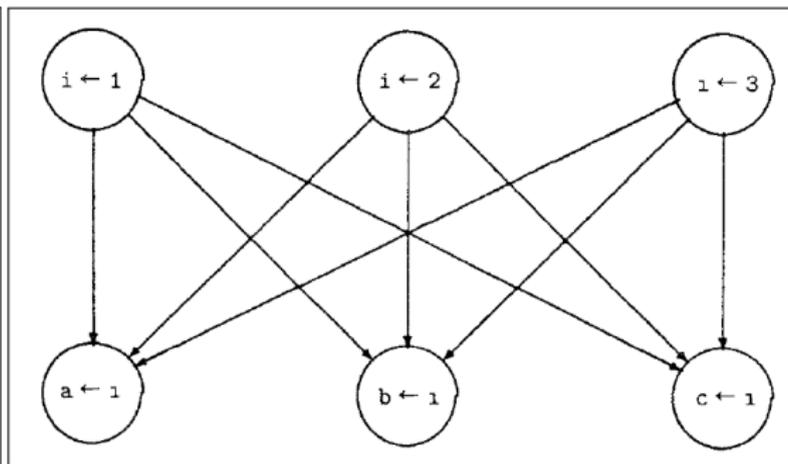
Zusammenfassung

- In SSA-Form: *Sparse*
 - Jeder Wert hat genau **eine** Quelle
- Ohne Berücksichtigung von Kontrollfluss: *Simple*

➔ *Sparse Simple Constant Propagation (SSC, SSCP)*

Programmbeispiel Def-Use-Graph

```
select j
  when x {i ← 1}
  when y {i ← 2}
  when z {i ← 3}
end
select k
  when x {a ← i}
  when y {b ← i}
  when z {c ← 1}
end
```



Quelle: Wegman & Zadeck, Constant Propagation with Conditional Branches, ACM TOPLAS 1991

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

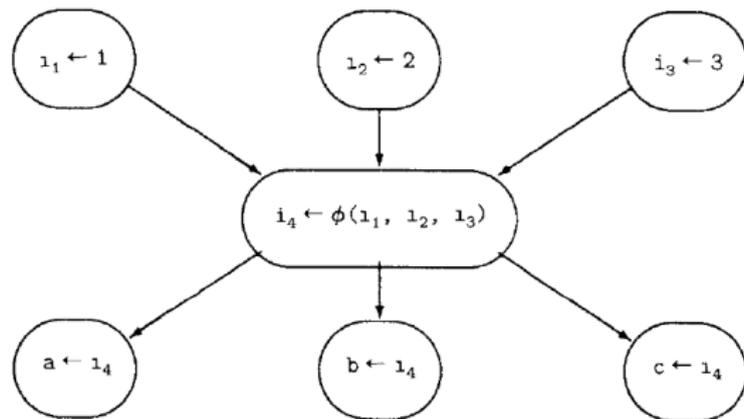
Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

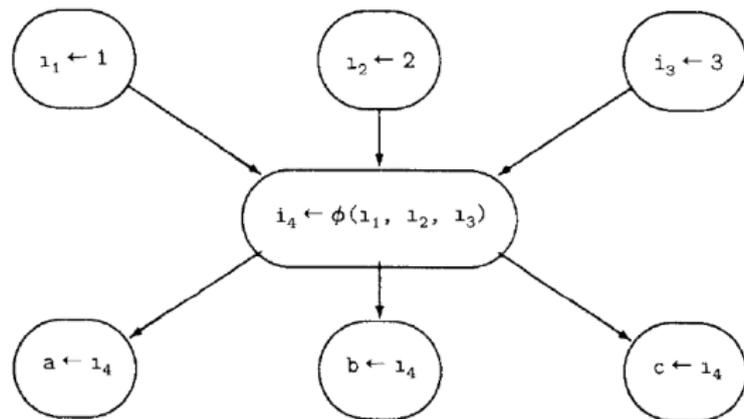
Zusammenfassung

```
select j
  when x {i ← 1}
  when y {i ← 2}
  when z {i ← 3}
end
select k
  when x {a ← i}
  when y {b ← i}
  when z {c ← i}
end
```



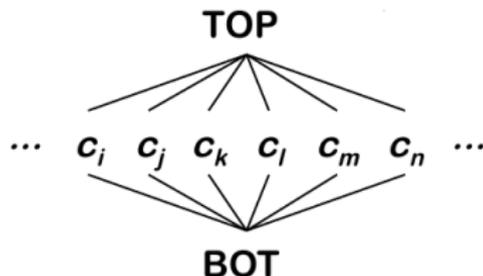
- Weniger Kanten (dünner oder spärlich besetzt, *sparse*)
- Vorsicht: Verschiedene Arten von SSA-Graphen
 - Unterscheiden sich in Richtung der Kanten
 - Hier: Def→Use

```
select j
  when x {i ← 1}
  when y {i ← 2}
  when z {i ← 3}
end
select k
  when x {a ← i}
  when y {b ← i}
  when z {c ← i}
end
```



- Weniger Kanten (dünner oder spärlich besetzt, *sparse*)
- Vorsicht: Verschiedene Arten von SSA-Graphen
 - Unterscheiden sich in Richtung der Kanten
 - Hier: Def→Use

- **Optimistischer** Ansatz
- Variablen werden als potentiell konstant angenommen, solange nicht das Gegenteil bewiesen ist
- Darstellung der Fakten als Verband
 - \top (TOP, UNDEF): Noch nichts bekannt, Variable ist potentiell konstant
 - c : Variable hat den konstanten Wert c
 - \perp (BOT, NAC, not-a-constant): Variable ändert sich



Transferregeln für Fakten bei Anweisungen $\mathbf{x} := \mathbf{y} \text{ op } \mathbf{z}$

Grundsätzlich: $\text{Value}(\mathbf{x}) = \dots$

1. $c_1 \text{ op } c_2 =$ Auswertung von **op**, falls $\text{Value}(\mathbf{y}) = c_1$,
 $\text{Value}(\mathbf{z}) = c_2$
2. \perp , falls $\text{Value}(\mathbf{y}) = \perp$ oder $\text{Value}(\mathbf{z}) = \perp$
3. \top , sonst

Erweiterung: Rechnen mit Null-Elementen bei $y \in \{\perp, \top\}$

$$y \cdot 0 = 0 \cdot y = 0$$

$$y \text{ AND false} = \text{false AND } z = \text{false}$$

$$y \text{ OR true} = \text{true OR } z = \text{true}$$

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Transferregeln für Fakten bei Anweisungen $\mathbf{x} := \mathbf{y} \text{ op } \mathbf{z}$

Grundsätzlich: $\text{Value}(\mathbf{x}) = \dots$

1. $c_1 \text{ op } c_2 =$ Auswertung von **op**, falls $\text{Value}(\mathbf{y}) = c_1$,
 $\text{Value}(\mathbf{z}) = c_2$
2. \perp , falls $\text{Value}(\mathbf{y}) = \perp$ oder $\text{Value}(\mathbf{z}) = \perp$
3. \top , sonst

Erweiterung: Rechnen mit Null-Elementen bei $y \in \{\perp, \top\}$

$$y \cdot 0 = 0 \cdot y = 0$$

$$y \text{ AND false} = \text{false AND } z = \text{false}$$

$$y \text{ OR true} = \text{true OR } z = \text{true}$$

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Aufeinandertreffen von Fakten an Join-Knoten:

$$\text{Value}(\Phi(v_1, v_2, \dots, v_n)) = \text{Value}(v_1) \wedge \text{Value}(v_2) \wedge \dots \wedge \text{Value}(v_n)$$

Optimistischer Meets-Operator

\wedge	\top	c_1	\perp
\top	\top	c_1	\perp
c_2	c_2	$(c_1 = c_2) ? c_1 : \perp$	\perp
\perp	\perp	\perp	\perp

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

\forall expression, e $\left\{ \begin{array}{l} \text{TOP} \text{ falls Wert unbekannt ist} \\ \text{Value}(e) \leftarrow c_i \text{ falls Wert bekannt ist} \\ \text{WorkList} \leftarrow \emptyset \text{ falls Wert variiert} \end{array} \right.$

\forall SSA edge $s = \langle u, v \rangle$
if $\text{Value}(u) \neq \text{TOP}$ then
add s to WorkList

while (WorkList $\neq \emptyset$)
remove $s = \langle u, v \rangle$ from WorkList
let o be the operation that uses v
if $\text{Value}(o) \neq \text{BOT}$ then
t \leftarrow result of evaluating o
if $t \neq \text{Value}(o)$ then
Value(o) \leftarrow t
 \forall SSA edge $\langle o, x \rangle$
add $\langle o, x \rangle$ to WorkList

o ist " $a \leftarrow b \text{ op } v$ " oder " $a \leftarrow v \text{ op } b$ "
oder " $a \leftarrow v \text{ op } v$ "

SSA-Graph Kanten: Def \rightarrow Use

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Ausführungszeit

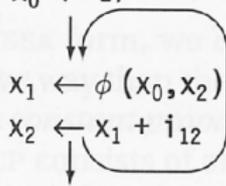
- Maximal zwei Value-Änderungen je Variable
 - $\top \rightarrow c$
 - $c \rightarrow \perp$
- Variablen in Worklist aufgenommen nur bei Änderungen (also max. zweimal)
- Operation wird evaluiert, wenn einer der beiden Operanden Worklist entnommen wird

➔ Max. Evaluationen: 4x Anzahl der Operatoren

$x_0 \leftarrow 17$

$x_1 \leftarrow \phi(x_0, x_2)$

$x_2 \leftarrow x_1 + i_{12}$



Time Step	Lattice Values					
	Pessimistic			Optimistic		
	x_0	x_1	x_2	x_0	x_1	x_2
0	17	\perp	\perp	17	\top	\top
1	17	\perp	\perp	17	17	$17 + i_{12}$
2	17	\perp	\perp	$17 \wedge (17 + i_{12}) \dots$		

Beispiele: $i_{12} = 0$ und $i_{12} = 2$

Was passiert, wenn wir Fakten in eine Sprungbedingung propagieren?

\top : Wir wissen noch nichts

\perp : Beide Pfade können auftreten

TRUE/FALSE : Nur ein Pfad wird ausgeführt

➔ Nur ein Pfad hat einen **Effekt** auf die Programmausführung

➔ Potentielle Effekte anderer Pfade **ignorieren**

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Was passiert, wenn wir Fakten in eine Sprungbedingung propagieren?

\top : Wir wissen noch nichts

\perp : Beide Pfade können auftreten

TRUE/FALSE : Nur ein Pfad wird ausgeführt

➡ Nur ein Pfad hat einen **Effekt** auf die Programmausführung

➡ Potentielle Effekte anderer Pfade **ignorieren**

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Was passiert, wenn wir Fakten in eine Sprungbedingung propagieren?

\top : Wir wissen noch nichts

\perp : Beide Pfade können auftreten

TRUE/FALSE : Nur ein Pfad wird ausgeführt

➡ Nur ein Pfad hat einen **Effekt** auf die Programmausführung

➡ Potentielle Effekte anderer Pfade **ignorieren**

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Was passiert, wenn wir Fakten in eine Sprungbedingung propagieren?

\top : Wir wissen noch nichts

\perp : Beide Pfade können auftreten

TRUE/FALSE : Nur ein Pfad wird ausgeführt

➔ Nur ein Pfad hat einen **Effekt** auf die Programmausführung

➔ Potentielle Effekte anderer Pfade **ignorieren**

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- Werte: Von Definition zu Benutzung
 - **SSAWorkList**
- Kontrollfluß: Entlang von Kanten zu **erreichbaren** Blöcken
 - **CFGWorkList**
- Verbreite Werte nur in **erreichbare** Blöcke

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Initialisierung

SSAWorkList := \emptyset

CFGWorkList := $\{b_0\}$

\forall Block b

setze b als unerreichbar

\forall Operation o in b

Value(o) := \top

Unterschied zu SCP: Nimm zunächst Ergebnisse **aller** Operationen als \top (UNDEF) an

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Sparse Conditional Constant Propagation 2

Ausbreitungsregeln: Daten

$x \leftarrow c, c \text{ const.}$

$\text{Value}(x) := c$

$x \leftarrow \phi(y, z)$

$\text{Value}(x) := \text{Value}(y) \wedge \text{Value}(z)$

wie bei SSCP

$x \leftarrow y \text{ op } z$

if $\text{Value}(y) \neq \perp$ **and** $\text{Value}(z) \neq \perp$ **then**

$\text{Value}(x) := \text{Value}("y \text{ op } z")$

wie bei SSCP

Immer:

Falls $\text{Value}(x)$ geändert

$\forall (x, o) \in \text{SSA-Graph}$

falls $\text{block}(o)$ erreichbar

$\text{SSAWorkList} := \text{SSAWorkList} \cup \{(x, o)\}$

// Kanten: Def \rightarrow Use

Sparse Conditional Constant Propagation 2

Ausbreitungsregeln: Daten

$x \leftarrow c, c \text{ const.}$

$\text{Value}(x) := c$

$x \leftarrow \phi(y, z)$

$\text{Value}(x) := \text{Value}(y) \wedge \text{Value}(z)$

wie bei SSCP

$x \leftarrow y \text{ op } z$

if $\text{Value}(y) \neq \perp$ **and** $\text{Value}(z) \neq \perp$ **then**

$\text{Value}(x) := \text{Value}("y \text{ op } z")$

wie bei SSCP

Immer:

Falls $\text{Value}(x)$ geändert

$\forall (x, o) \in \text{SSA-Graph}$

falls $\text{block}(o)$ erreichbar

// Kanten: Def \rightarrow Use

$\text{SSAWorkList} := \text{SSAWorkList} \cup \{(x, o)\}$

Sparse Conditional Constant Propagation 2

Ausbreitungsregeln: Daten

$x \leftarrow c, c \text{ const.}$

$\text{Value}(x) := c$

$x \leftarrow \phi(y, z)$

$\text{Value}(x) := \text{Value}(y) \wedge \text{Value}(z)$

wie bei SSCP

$x \leftarrow y \text{ op } z$

if $\text{Value}(y) \neq \perp$ **and** $\text{Value}(z) \neq \perp$ **then**

$\text{Value}(x) := \text{Value}(\text{"}y \text{ op } z\text{"})$

wie bei SSCP

Immer:

Falls $\text{Value}(x)$ geändert

$\forall (x, o) \in \text{SSA-Graph}$

falls $\text{block}(o)$ erreichbar

$\text{SSAWorkList} := \text{SSAWorkList} \cup \{(x, o)\}$

// Kanten: Def \rightarrow Use

Sparse Conditional Constant Propagation 2

Ausbreitungsregeln: Daten

$x \leftarrow c, c \text{ const.}$

$\text{Value}(x) := c$

$x \leftarrow \phi(y, z)$

$\text{Value}(x) := \text{Value}(y) \wedge \text{Value}(z)$

wie bei SSCP

$x \leftarrow y \text{ op } z$

if $\text{Value}(y) \neq \perp$ **and** $\text{Value}(z) \neq \perp$ **then**

$\text{Value}(x) := \text{Value}(\text{"}y \text{ op } z\text{"})$

wie bei SSCP

Immer:

Falls $\text{Value}(x)$ geändert

$\forall (x, o) \in \text{SSA-Graph}$

falls $\text{block}(o)$ erreichbar

$\text{SSAWorkList} := \text{SSAWorkList} \cup \{(x, o)\}$

// Kanten: Def \rightarrow Use

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Sparse Conditional Constant Propagation 3

Ausbreitungsregeln: Kontrollfluß

branch $cond, l_t, l_f$

if $cond \in \{\perp, TRUE\}$ and Block l_t unerreichbar then
CFGWorkList := CFGWorkList $\cup \{l_t\}$

if $cond \in \{\perp, FALSE\}$ and Block l_f unerreichbar then
CFGWorkList := CFGWorkList $\cup \{l_f\}$

jump l

if Block l unerreichbar then
CFGWorkList := CFGWorkList $\cup \{l\}$

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Sparse Conditional Constant Propagation 3

Ausbreitungsregeln: Kontrollfluß

branch $cond, l_t, l_f$

if $cond \in \{\perp, TRUE\}$ **and** Block l_t unerreichbar **then**
CFGWorkList := CFGWorkList $\cup \{l_t\}$

if $cond \in \{\perp, FALSE\}$ **and** Block l_f unerreichbar **then**
CFGWorkList := CFGWorkList $\cup \{l_f\}$

jump l

if Block l unerreichbar **then**
CFGWorkList := CFGWorkList $\cup \{l\}$

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

while ((CFGWorkList \cup SSAWorkList) $\neq \emptyset$)

while (CFGWorkList $\neq \emptyset$)

nimm einen Block b aus CFGWorkList

markiere b als erreichbar

// *benutze Rechenregeln*

evaluiere \emptyset -Funktionen in b , parallel

evaluiere Operationen in b , in Programmreihenfolge

while (SSAWorkList $\neq \emptyset$)

nimm eine Kante $s = \langle u, v \rangle$ aus SSAWorkList

es sei o die Operation, die die Verwendung v enthält

// *benutze Rechenregeln*

evaluiere Operation o

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- Sprungbedingungen auf \top sollten nicht auftreten
 - Compiler-Fehler?
- Alle Operationen auf \top initialisieren
 - Kontrollfluß läßt Werte $\neq \top$ zu
 - Unerreichbare Pfade tragen \top zu **optimistischen** Phi-Funktionen bei
- Hier Vorschlag: Erst CFG-Kanten, dann SSA-Kanten
 - Könnte aber in beliebiger Reihenfolge geschehen
 - CFG-Kanten zuerst kann aber etwas schneller sein

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- Sprungbedingungen auf \top sollten nicht auftreten
 - Compiler-Fehler?
- Alle Operationen auf \top initialisieren
 - Kontrollfluß läßt Werte $\neq \top$ zu
 - Unerreichbare Pfade tragen \top zu **optimistischen** Phi-Funktionen bei
- Hier Vorschlag: Erst CFG-Kanten, dann SSA-Kanten
 - Könnte aber in beliebiger Reihenfolge geschehen
 - CFG-Kanten zuerst kann aber etwas schneller sein

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- Sprungbedingungen auf \top sollten nicht auftreten
 - Compiler-Fehler?
- Alle Operationen auf \top initialisieren
 - Kontrollfluß läßt Werte $\neq \top$ zu
 - Unerreichbare Pfade tragen \top zu **optimistischen** Phi-Funktionen bei
- Hier Vorschlag: Erst CFG-Kanten, dann SSA-Kanten
 - Könnte aber in beliebiger Reihenfolge geschehen
 - CFG-Kanten zuerst kann aber etwas schneller sein

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- Auch hier: Null-Elemente in Rechnungen berücksichtigen
 - $T * \perp \rightarrow T$
 - Grund: Falls $T \rightarrow 0$, ist $0 * \perp \rightarrow 0$
 - Analog: AND, OR, etc.
- Auch variable Werte können zu Vereinfachungen führen
 - $\perp * c \rightarrow \perp$, nicht konstant
 - Kann bei z.B. $c = 2$ zu Vereinfachung führen (Shift)
 - Aber Nebeneffekt: Dann nicht mehr kommutativ!
- Hier nicht gezeigt: Umschreiben von Verzweigungen zu Sprüngen
 - `branch TRUE, L1, L2` \rightarrow `jump L1`

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- Auch hier: Null-Elemente in Rechnungen berücksichtigen
 - $\top * \perp \rightarrow \top$
 - Grund: Falls $\top \rightarrow 0$, ist $0 * \perp \rightarrow 0$
 - Analog: AND, OR, etc.
- Auch variable Werte können zu Vereinfachungen führen
 - $\perp * c \rightarrow \perp$, nicht konstant
 - Kann bei z.B. $c = 2$ zu Vereinfachung führen (Shift)
 - Aber Nebeneffekt: Dann nicht mehr kommutativ!
- Hier nicht gezeigt: Umschreiben von Verzweigungen zu Sprüngen
 - `branch TRUE, L1, L2` \rightarrow `jump L1`

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- Auch hier: Null-Elemente in Rechnungen berücksichtigen
 - $\top * \perp \rightarrow \top$
 - Grund: Falls $\top \rightarrow 0$, ist $0 * \perp \rightarrow 0$
 - Analog: AND, OR, etc.
- Auch variable Werte können zu Vereinfachungen führen
 - $\perp * c \rightarrow \perp$, nicht konstant
 - Kann bei z.B. $c = 2$ zu Vereinfachung führen (Shift)
 - Aber Nebeneffekt: Dann nicht mehr kommutativ!
- Hier nicht gezeigt: Umschreiben von Verzweigungen zu Sprüngen
 - `branch TRUE, L1, L2` \rightarrow `jump L1`

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

```
i ← 17
if (i > 0) then
  j1 ← 10
else
  j2 ← 20
j3 ← Ø(j1, j2)
k ← j3 * 17
```

Quelle: Rice U, COMP 512, F2003

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

```
17  i ← 17
    if (i > 0) then
10   j1 ← 10
    else
20   j2 ← 20
⊥   j3 ← ∅(j1, j2)
⊥   k ← j3 * 17
```

All paths
execute

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

```
17  i ← 17
    if (i > 0) then
10  j1 ← 10
    else
TOP  j2 ← 20
10  j3 ← Ø(j1, j2)
170 k ← j3 * 17
```

With SCC
marking
blocks

Effekt kann durch DEAD nicht erreicht werden

- DEAD kann nicht $i > 0$ evaluieren
- Damit ist $j_2 \leftarrow 20$ eine nützliche Anweisung

➔ Kombination von Optimierungen kann sinnvoll sein

Grundlagen, Ausdehnung auf Inter-Prozedur-Bereich

M.N. Wegman & F.K. Zadeck

Constant propagation with conditional branches

ACM TOPLAS, 13(2), April 1991, Seiten 181...210

Vertiefung, andere Notation

C. Click & K. D. Cooper

Combining Analyses, Combining Optimizations

ACM TOPLAS, 17(2), März 1995, Seiten 181...196

Beide Papers auf OC Web-Seite.

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Optimierungsermöglichende Transformationen

- Führen selbst noch keine Optimierung aus
- Können Code sogar größer/komplizierter machen
- Bieten dann aber mehr Angriffspunkte für andere Optimierungen

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

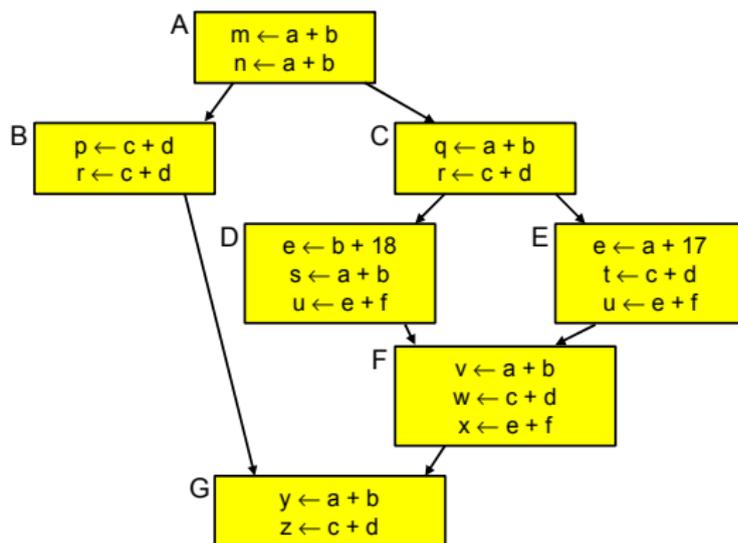
Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Vervielfältigen von Blöcken 1

Cloning – Vorher



C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

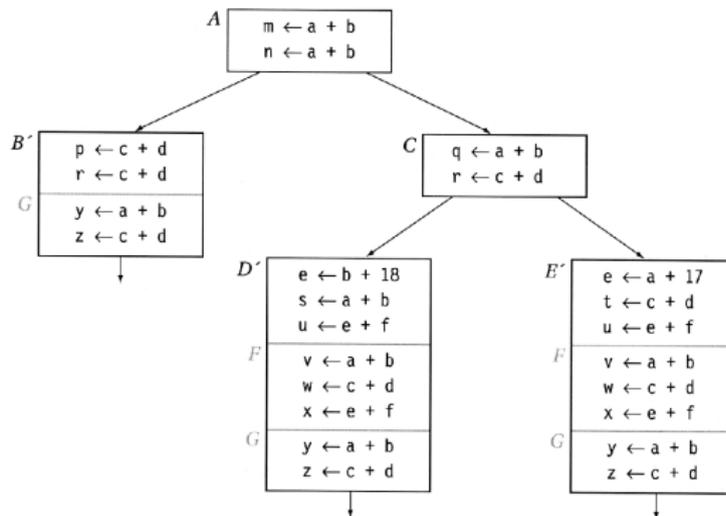
Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Vervielfältigen von Blöcken 2

Cloning – Nachher



Quelle: C&T, Fig 8.11, p. 426

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- Eliminieren von Merge-Points
- ... durch Kopieren und Zusammenfügen von Blöcken
- Vorteile
 - Längere Blöcke, mehr Kontext für lokale Verfahren
 - Beseitigen von Verzweigungen
 - Mehr Ansatzpunkte für Optimierungen
- Nachteile
 - Mehr Code, potentiell mehr I\$-Misses

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- Eliminieren von Merge-Points
- ... durch Kopieren und Zusammenfügen von Blöcken
- Vorteile
 - Längere Blöcke, mehr Kontext für lokale Verfahren
 - Beseitigen von Verzweigungen
 - Mehr Ansatzpunkte für Optimierungen
- Nachteile
 - Mehr Code, potentiell mehr I\$-Misses

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

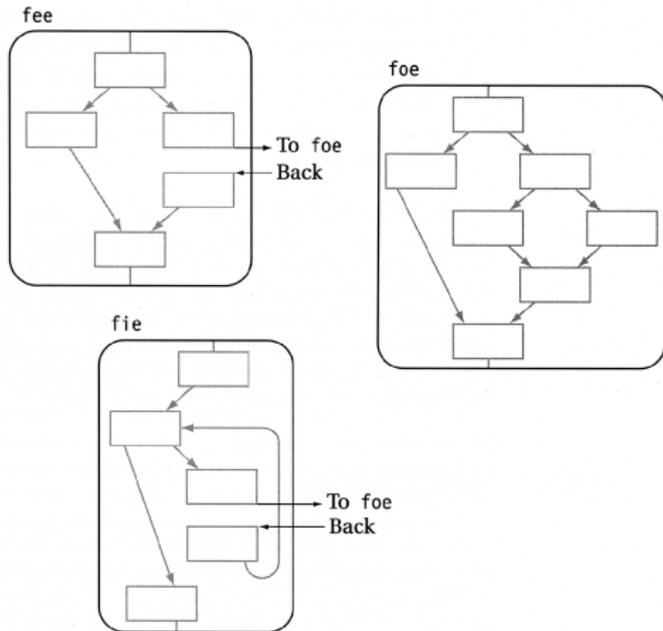
Transformationen

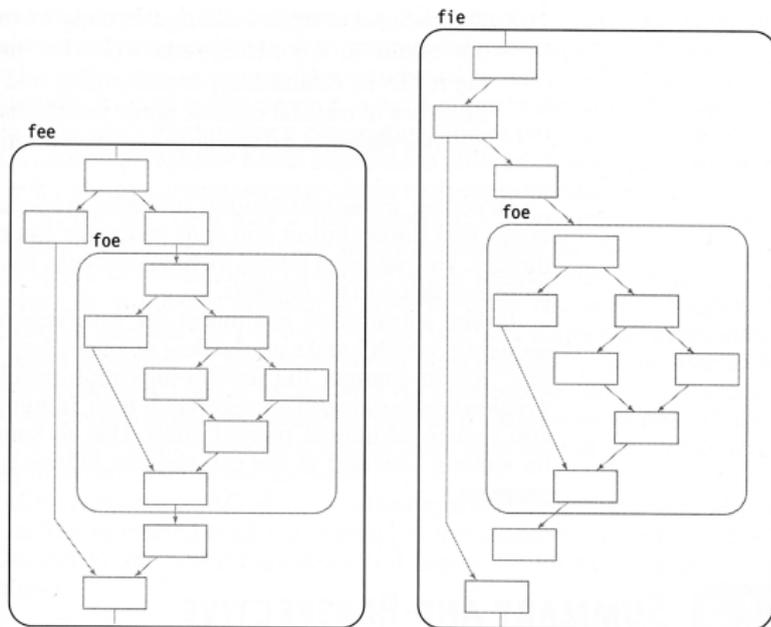
Diskussion

Zusammenfassung

Inlining von Unterprogrammen 1

Vorher





C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- Vorteile
 - Code des Unterprogrammes nun im Kontext des Aufrufers → Mehr Ansatzpunkte für Optimierung
 - Aufrufsequenz (Parameterübergabe, Stack Frame, Sprung, etc.) entfällt
- Nachteile
 - Mehr Code, potentiell mehr I\$-Misses und höhere Registernachfrage

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

- Vorteile
 - Code des Unterprogrammes nun im Kontext des Aufrufers → Mehr Ansatzpunkte für Optimierung
 - Aufrufsequenz (Parameterübergabe, Stack Frame, Sprung, etc.) entfällt
- Nachteile
 - Mehr Code, potentiell mehr I\$-Misses und höhere Registernachfrage

Vorher

```
do i = 1 to n by 1
  a(i) = a(i) + b(i)
end
```

Quelle: C&T, Fig. 10.12, p. 519

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Vorher

```
do i = 1 to n by 1
  a(i) = a(i) + b(i)
end
```

Nachher

Annahme: n bekannt

```
do i = 1 to 100 by 4
  a(i)   = a(i) + b(i)
  a(i+1) = a(i+1) + b(i+1)
  a(i+2) = a(i+2) + b(i+2)
  a(i+3) = a(i+3) + b(i+3)
end
```

Quelle: C&T, Fig. 10.12, p. 519

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Nachher

Annahme: n unbekannt

```
i = 1
```

```
do while (i+3 ≤ n)
```

```
    a(i) = a(i) + b(i)
```

```
    a(i+1) = a(i+1) + b(i+1)
```

```
    a(i+2) = a(i+2) + b(i+2)
```

```
    a(i+3) = a(i+3) + b(i+3)
```

```
    i = i + 4
```

```
end
```

```
do while (i ≤ n)
```

```
    a(i) = a(i) + b(i)
```

```
    i = i + 1
```

```
end
```

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Nachher

Annahme: n unbekannt

```
i = 1
do while (i+3 ≤ n)
  a(i) = a(i) + b(i)
  a(i+1) = a(i+1) + b(i+1)
  a(i+2) = a(i+2) + b(i+2)
  a(i+3) = a(i+3) + b(i+3)
  i = i + 4
end
do while (i ≤ n)
  a(i) = a(i) + b(i)
  i = i + 1
end
```

Nachher

Annahme: n unbekannt

```
i = 1
if (mod(n,2) > 0) then
  a(i) = a(i) + b(i)
  i = i + 1
if (mod(n,4) > 1) then
  a(i) = a(i) + b(i)
  a(i+1) = a(i+1) + b(i+1)
  i = i + 2
do j = i to n by 4
  a(j) = a(j) + b(j)
  a(j+1) = a(j+1) + b(j+1)
  a(j+2) = a(j+2) + b(j+2)
  a(j+3) = a(j+3) + b(j+3)
end
```

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

● Vorteile

- Reduzierte Zahl ausgeführter Anweisungen
- Erhöht Anzahl von Anweisungen im Schleifenrumpf
- Mehr Möglichkeiten, unabhängige Anweisungen parallel auszuführen
- Mehr Anweisungen, um Branch Delay Slots zu füllen
- Mehr aufeinanderfolgende Speicherzugriffe zusammen in Schleife
 - Potential für Vektorisierung (SIMD-Ausführung)

● Nachteile

- Mehr Code, potentiell mehr I\$-Misses

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

● Vorteile

- Reduzierte Zahl ausgeführter Anweisungen
- Erhöht Anzahl von Anweisungen im Schleifenrumpf
- Mehr Möglichkeiten, unabhängige Anweisungen parallel auszuführen
- Mehr Anweisungen, um Branch Delay Slots zu füllen
- Mehr aufeinanderfolgende Speicherzugriffe zusammen in Schleife
 - Potential für Vektorisierung (SIMD-Ausführung)

● Nachteile

- Mehr Code, potentiell mehr I\$-Misses

```
do i = 1 to n
  if (x > y)
    then a(i) = b(i) * x
    else a(i) = b(i) * y
```

Original Loop

```
if (x > y) then
  do i = 1 to n
    a(i) = b(i) * x
else
  do i = 1 to n
    a(i) = b(i) * y
```

Unswitched Version

Weniger Kontrollfluss innerhalb der Schleife

- Weniger ausgeführte Instruktionen
 - Insbesondere potentiell langsame Verzweigungen
- Mehr einfacher zu optimierender “straight-line-code”

Übergreifende Diskussion

Code Hoisting Berechnet VERYBUSY-**Ausdrücke** einmal

- Verlangsamt Programm nicht

Sinking Verschiebt wiederkehrende **Anweisungsfolgen** im CFG nach vorne

- Code wird nur einmal erzeugt,
- ... aber von mehreren Ästen benutzt

Cross Jumping Prüft Anweisungen **vor** Sprung an ein Label

- Identische Folgen werden hinter Label geschoben

Procedure Abstraction Klammere wiederkehrende

Anweisungsfolgen in neue Prozedur aus

- Falls ausgeklammerter Code größer als Aufrufsequenz
- ... Platz gespart
- Verlangsamt Programmausführung

Code Hoisting Berechnet **VERYBUSY-Ausdrücke** einmal

- Verlangsamt Programm nicht

Sinking Verschiebt wiederkehrende **Anweisungsfolgen** im CFG nach vorne

- Code wird nur einmal erzeugt,
- ... aber von mehreren Ästen benutzt

Cross Jumping Prüft Anweisungen **vor** Sprung an ein Label

- Identische Folgen werden hinter Label geschoben

Procedure Abstraction Klammere wiederkehrende Anweisungsfolgen in neue Prozedur aus

- Falls ausgeklammerter Code größer als Aufrufsequenz
- ... Platz gespart
- Verlangsamt Programmausführung

Code Hoisting Berechnet VERYBUSY-**Ausdrücke** einmal

- Verlangsamt Programm nicht

Sinking Verschiebt wiederkehrende **Anweisungsfolgen** im CFG nach vorne

- Code wird nur einmal erzeugt,
- ... aber von mehreren Ästen benutzt

Cross Jumping Prüft Anweisungen **vor** Sprung an ein Label

- Identische Folgen werden hinter Label geschoben

Procedure Abstraction Klammere wiederkehrende Anweisungsfolgen in neue Prozedur aus

- Falls ausgeklammerter Code größer als Aufrufsequenz
- ... Platz gespart
- Verlangsamt Programmausführung

Code Hoisting Berechnet **VERYBUSY-Ausdrücke** einmal

- Verlangsamt Programm nicht

Sinking Verschiebt wiederkehrende **Anweisungsfolgen** im CFG nach vorne

- Code wird nur einmal erzeugt,
- ... aber von mehreren Ästen benutzt

Cross Jumping Prüft Anweisungen **vor** Sprung an ein Label

- Identische Folgen werden hinter Label geschoben

Procedure Abstraction Klammere wiederkehrende Anweisungsfolgen in neue Prozedur aus

- Falls ausgeklammerter Code größer als Aufrufsequenz
- ... Platz gespart
- Verlangsamt Programmausführung

Procedure Placement Häufig aufgerufene Prozeduren in der Nähe des Aufrufers plazieren

- Idealerweise gleicher Speicherseite

Block Placement Häufig genommene Verzweigungen als Fall-Through realisieren

- Vermeidet langsamen Sprung
- Nutzt I\$-Prefetching besser aus
- Beispiel für Profile-basierte Optimierung

Fluff Removal Bewege selten benutzten Code an den Rand des Programmes

- Steigert die I\$-Cache Effizienz (gecachte Anweisungen werden i.d.R. benutzt)

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Procedure Placement Häufig aufgerufene Prozeduren in der Nähe des Aufrufers plazieren

- Idealerweise gleicher Speicherseite

Block Placement Häufig genommene Verzweigungen als Fall-Through realisieren

- Vermeidet langsamen Sprung
- Nutzt I\$-Prefetching besser aus
- Beispiel für Profile-basierte Optimierung

Fluff Removal Bewege selten benutzten Code an den Rand des Programmes

- Steigert die I\$-Cache Effizienz (gecachte Anweisungen werden i.d.R. benutzt)

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Procedure Placement Häufig aufgerufene Prozeduren in der Nähe des Aufrufers plazieren

- Idealerweise gleicher Speicherseite

Block Placement Häufig genommene Verzweigungen als Fall-Through realisieren

- Vermeidet langsamen Sprung
- Nutzt I\$-Prefetching besser aus
- Beispiel für Profile-basierte Optimierung

Fluff Removal Bewege selten benutzten Code an den Rand des Programmes

- Steigert die I\$-Cache Effizienz (gecachte Anweisungen werden i.d.R. benutzt)

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Schwieriges Problem!

- **Alternative Ansätze**
 - GCSE oder LCM oder PRE?
- Interaktionen zwischen Optimierungen
 - Verstärkend
 - Constant Propagation / LCM / PRE verbessern Operator Strength Reduction
 - Verschlechternd
 - Redundanzeliminierung verlängert Lebenszeiten
 - ...damit Registervergabe schwieriger
 - Überlappend
 - Constant Folding in Wertnumerierung
 - SCCP

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Schwieriges Problem!

- Alternative Ansätze
 - GCSE oder LCM oder PRE?
- Interaktionen zwischen Optimierungen
 - Verstärkend
 - Constant Propagation / LCM / PRE verbessern Operator Strength Reduction
 - Verschlechternd
 - Redundanzeliminierung verlängert Lebenszeiten
 - ...damit Registervergabe schwieriger
 - Überlappend
 - Constant Folding in Wertnumerierung
 - SCCP

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Schwieriges Problem!

- Alternative Ansätze
 - GCSE oder LCM oder PRE?
- Interaktionen zwischen Optimierungen
 - Verstärkend
 - Constant Propagation / LCM / PRE verbessern Operator Strength Reduction
 - Verschlechternd
 - Redundanzeliminierung verlängert Lebenszeiten
 - ... damit Registervergabe schwieriger
 - Überlappend
 - Constant Folding in Wertnumerierung
 - SCCP

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Schwieriges Problem!

- Alternative Ansätze
 - GCSE oder LCM oder PRE?
- Interaktionen zwischen Optimierungen
 - Verstärkend
 - Constant Propagation / LCM / PRE verbessern Operator Strength Reduction
 - Verschlechternd
 - Redundanzeliminierung verlängert Lebenszeiten
 - ... damit Registervergabe schwieriger
 - Überlappend
 - Constant Folding in Wertnumerierung
 - SCCP

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

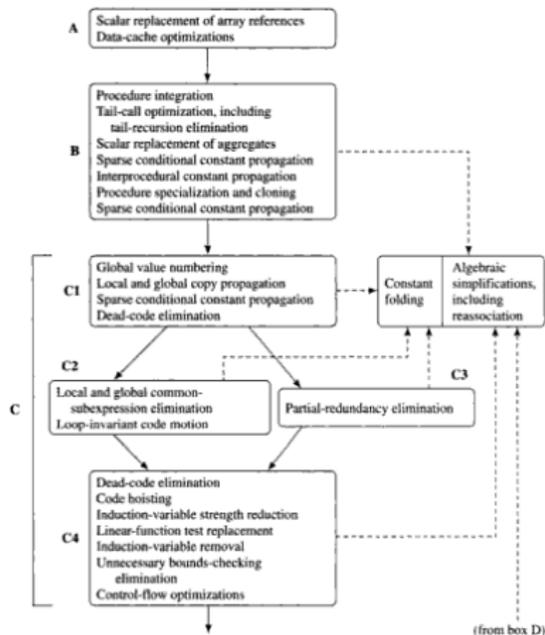
Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Vorschlag einer Optimierungsreihenfolge 1



C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

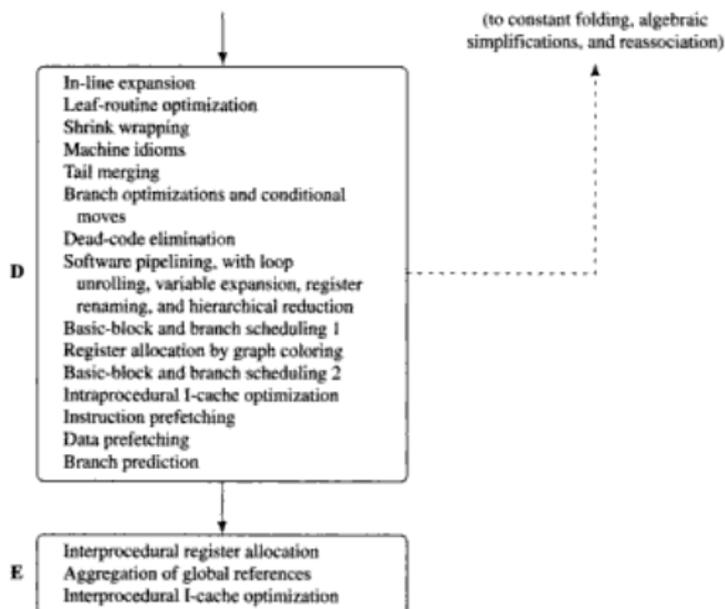
Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Vorschlag einer Optimierungsreihenfolge 2



C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

Zusammenfassung

- Erster Einblick in skalare Optimierung
- Modifikation des CFG
- Neue und alte Konzepte
 - Dominanz, Postdominanz, Dominanzgrenzen
- Dead Code Elimination: DEAD
- Bereinigen des CFG: CLEAN
- Spezialisierung: SSCP, SCCP
- Ermöglichende Transformationen
- Übergreifende Diskussion

C2

A. Koch

Dead Code
Elimination

Bereinigen
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung