

# 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**

**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

**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

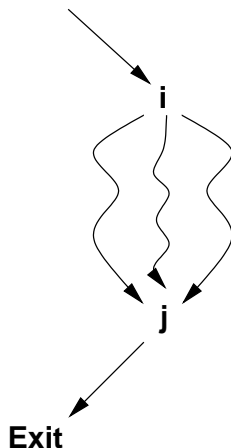
Diskussion

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!

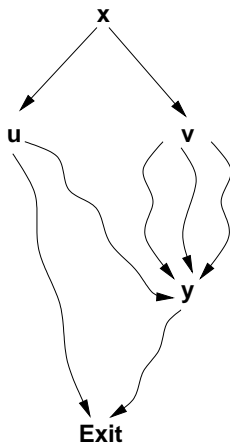
Ein Knoten  $j$  **postdominiert** den Knoten  $i$  in einem CFG, wenn alle Pfade von  $i$  zum Endknoten des CFG durch den Knoten  $j$  führen.



$y$  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.

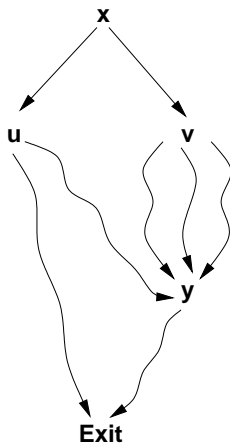
- $y$  postdominiert  $v$  und alle Knoten dazwischen
- $y$  postdominiert nicht  $x$
- $y$  ist von  $x$  **kontrollabhängig**



$y$  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

## 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?

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?

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  $w \in DF(x)$ .

C2

A. Koch

Dead Code  
Elimination

Bereinigen  
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung



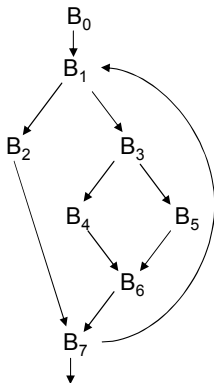
Analoge Betrachtung bei Dominatoren:  
Welche Knoten  $w$  liegen **gerade außerhalb** der Dominanz eines Knotens  $x$ ?

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

## Dominatorgrenze $DF(x)$

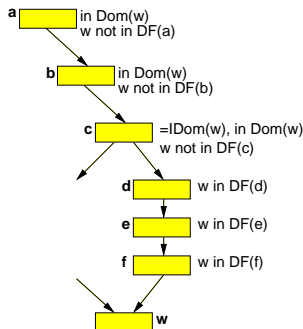
Knoten  $w$ , bei denen ein Vorgänger  $q$  durch  $x$  dominiert wird ( $q \in \text{preds}(w) \wedge x \in \text{DOM}(q)$ ), aber  $w$  selbst nicht von  $x$  strikt dominiert ist ( $x \notin \text{DOM}(w) - \{w\}$ ), heissen die **Dominatorgrenze** von  $x$ , mit  $w \in DF(x)$ .

# Beispiel Dominatorgrenze



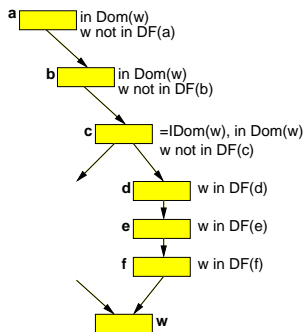
	0	1	2	3	4	5	6	7
DOM	0	0,1	0,1,2	0,1,3	0,1,3,4	0,1,3,5	0,1,3,6	0,1,7
DF	-	-	7	7	6	6	7	1

- 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  $z \notin \text{DOM}(w)$



# Berechnung von Dominatorgrenzen - Vorgehensweise

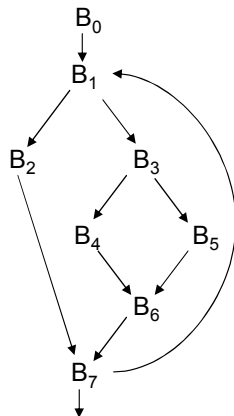
- 1 Finde Merge-Points als  $w$
- 2 Beginne Untersuchung bei direkten Vorgängern  $x$  des Merge-Points  $w$
- 3 Klettere rückwärts weiter via IDOM des aktuellen Knotens  $x$ 
  - Setze  $DF(x) = DF(x) \cup \{w\}$ , bis  $x = \text{IDOM}(w)$



# Berechnung von Dominatorgrenzen - Algorithmus

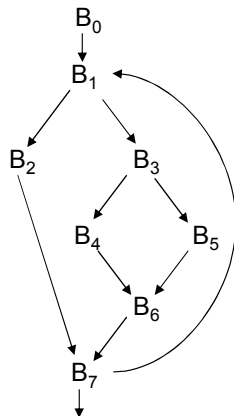
```
foreach node n in CFG do  
    DF(n) :=  $\emptyset$   
foreach node n in CFG do  
    if |preds(n)| > 1 then  
        foreach p in preds(n) do  
            runner := p  
            while runner  $\neq$  IDOM(n)  $\wedge$  runner  $\neq$  n do  
                DF(runner) := DF(runner)  $\cup$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



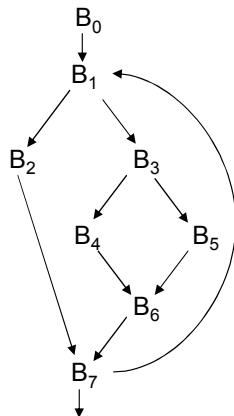
	0	1	2	3	4	5	6	7
DOM	0	0,1	0,1,2	0,1,3	0,1,3,4	0,1,3,5	0,1,3,6	0,1,7
DF	-	-	7	7	6	6	7	1

- 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.

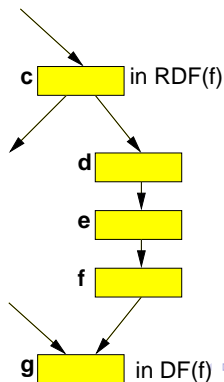


	0	1	2	3	4	5	6	7
DOM	0	0,1	0,1,2	0,1,3	0,1,3,4	0,1,3,5	0,1,3,6	0,1,7
DF	-	-	7	7	6	6	7	1



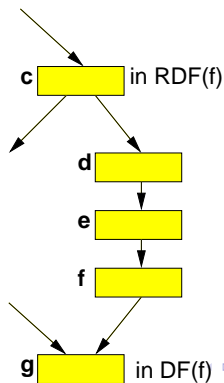
Gesucht: Verzweigungen, von denen benötigte Anweisung  $i$  **kontrollabhängig** ist

➡ 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 → 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

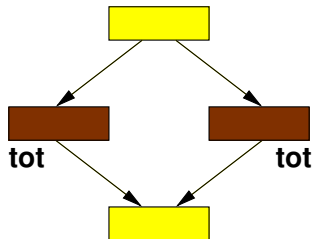
Transformationen

Diskussion

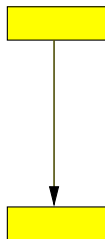
Zusammenfassung

```
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



**Vorher**



**Nachher**

C2

A. Koch

Dead Code  
Elimination

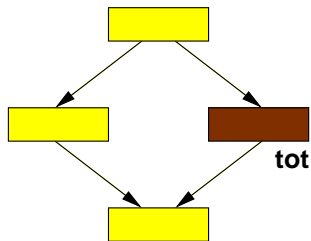
Bereinigen  
des CFG

Spezialisierung

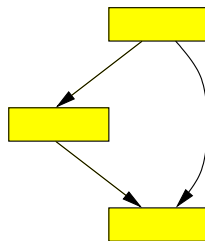
Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung



**Vorher**



**Nachher**

C2

A. Koch

Dead Code  
Elimination

Bereinigen  
des CFG

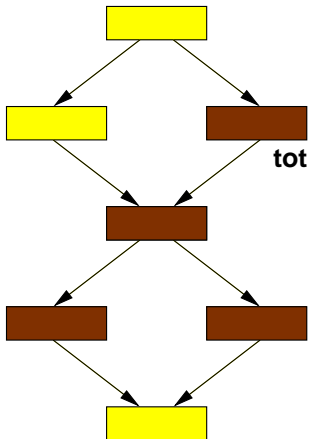
Spezialisierung

Transformationen

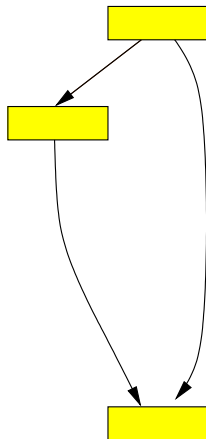
Diskussion

Zusammenfassung

# Beispiel Verbiegen von Verzweigungen 3



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

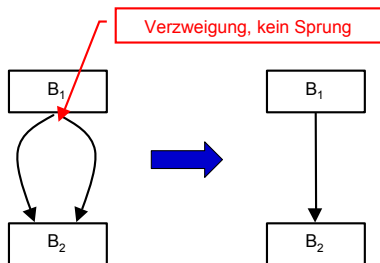
Spezialisierung

Transformationen

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

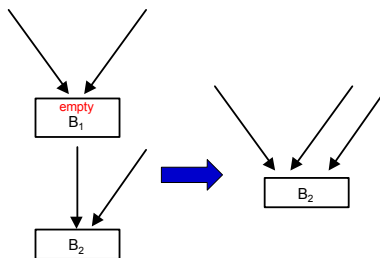
Spezialisierung

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

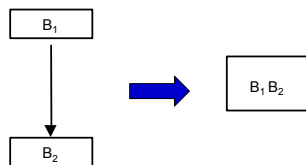
Spezialisierung

Transformationen

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

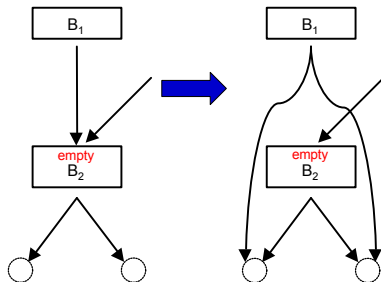
Spezialisierung

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

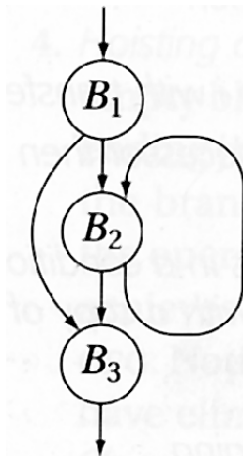
Diskussion

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**

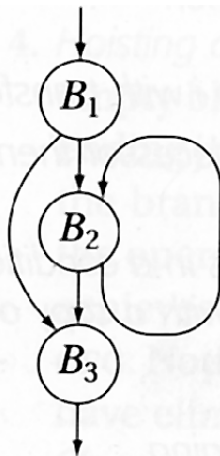


➔ Geht aber in Kooperation mit DEAD!

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

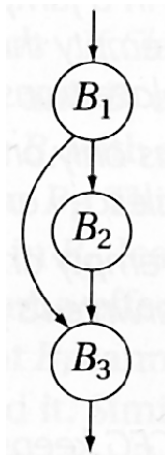
CLEAN alleine kann **B2** nicht beseitigen

- 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**

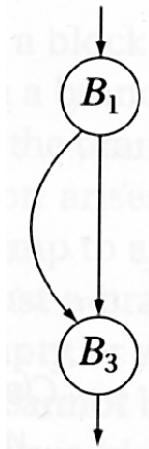


➡ Geht aber in Kooperation mit DEAD!

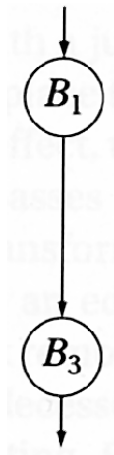
- Ergebnis von DEAD:
- **B1**, **B3** enthalten nützliche Operationen
- **B2** nicht: Verzweigung (**B2**, **B2**) nutzlos
  - $B2 \notin RDF(B3)$
- Bedingungs-berechnung für Verzweigung nutzlos
- Verzweigung (**B2**, **B2**) in Sprung zu nützlichem Postdominator von **B2** umwandeln



- **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 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 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

```
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

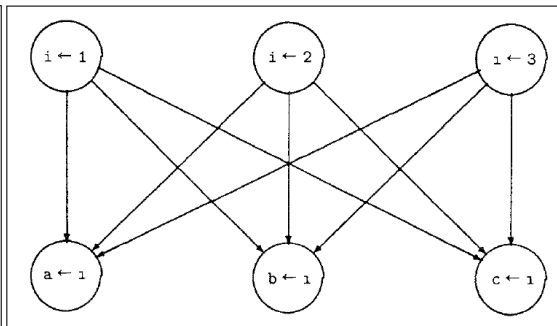
Zusammenfassung

- 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

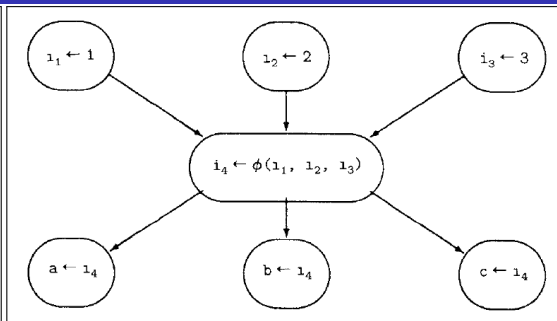
Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

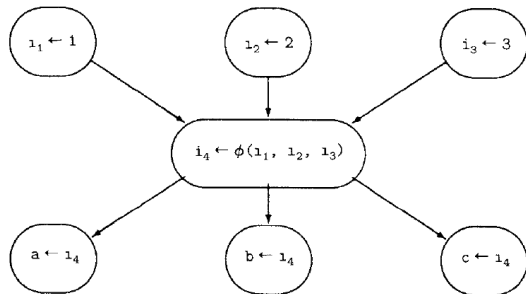
Zusammenfassung

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



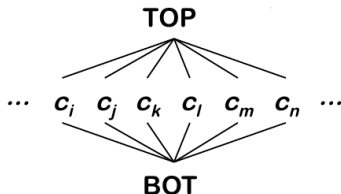
- Weniger Kanten (dünner oder spärlich besetzt, *sparse*)
- Vorsicht: Verschiedene Arten von SSA-Graphen
  - Unterscheiden sich in Richtung der Kanten
  - Hier: Def→Use

```
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.  $c_1 \text{ op } c_2 = \text{Auswertung von } \text{op}$  , 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

# Sparse Simple Constant Propagation 4

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

$\forall$  SSA edge s =  $\langle u, v \rangle$   
if Value(u)  $\neq$  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 Value(o)  $\neq$  BOT then  
t  $\leftarrow$  result of evaluating o  
if t  $\neq$  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 op v" oder "a  $\leftarrow$  v op b"  
oder "a  $\leftarrow$  v 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

- $\top \rightarrow c$
- $c \rightarrow \perp$

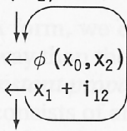
- Variablen in Worklist aufgenommen nur bei Änderungen (also max. zweimal)
- Operation wird evaluiert, wenn einer der beiden Operanden Worklist entnommen wird

➔ 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

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

// 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

# 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

C2

A. Koch

Dead Code  
Elimination

Bereinigen  
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

**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  $\cup \{l\}$

# 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

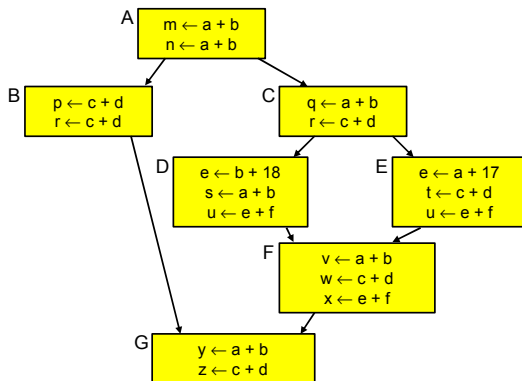
Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

# Vervielfältigen von Blöcken 1

## Cloning – Vorher



C2

A. Koch

Dead Code  
Elimination

Bereinigen  
des CFG

Spezialisierung

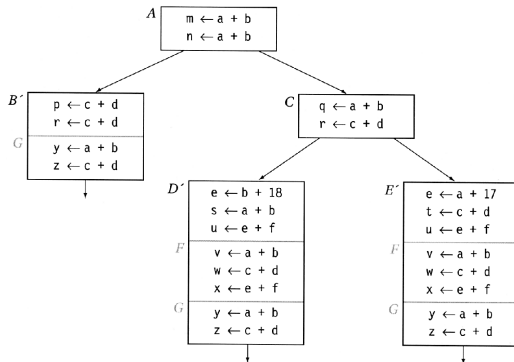
Transformationen

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

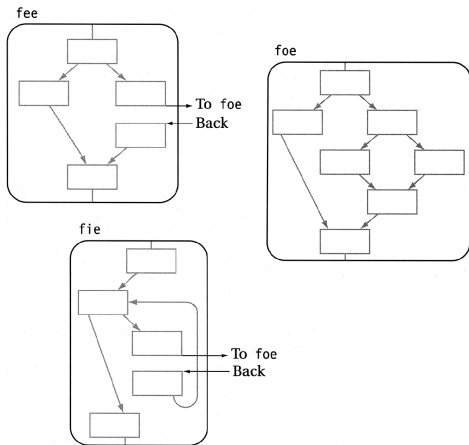
Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

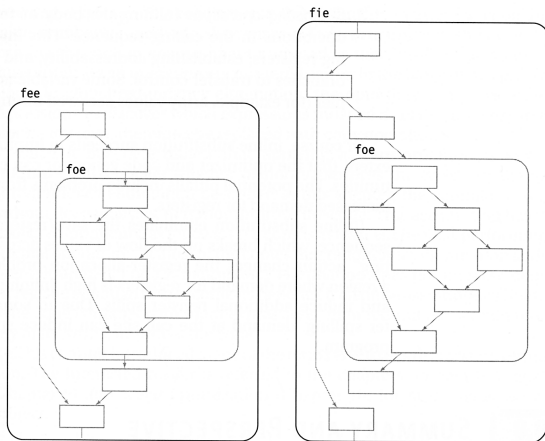
# Inlining von Unterprogrammen 1

Vorher



# Inlining von Unterprogrammen 2

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
```

### ● 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

### ● 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

C2

A. Koch

Dead Code  
Elimination

Bereinigen  
des CFG

Spezialisierung

Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung

**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

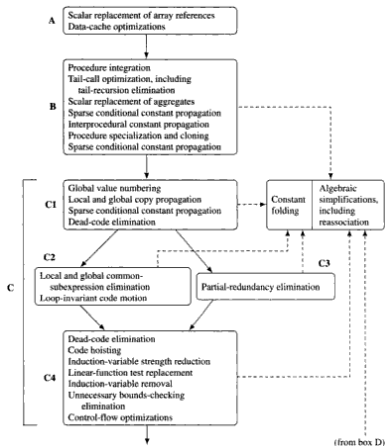
Transformationen

Diskussion

Zusammenfassung



# Vorschlag einer Optimierungsreihenfolge 1



C2

A. Koch

Dead Code  
Elimination

Bereinigen  
des CFG

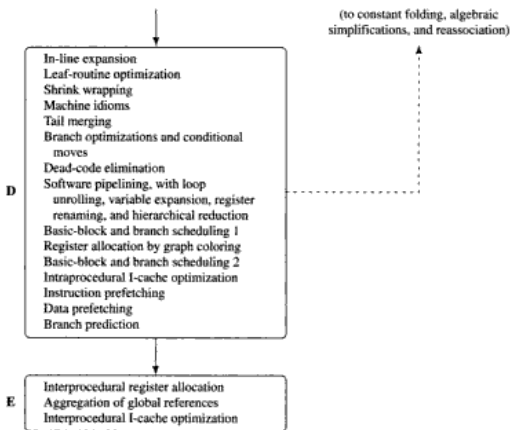
Spezialisierung

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