

Optimierende Compiler

Kontrollflussgraphen und Static Single Assignment-Form

Andreas Koch

FG Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen
Informatik, TU Darmstadt

Sommersemester 2010

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- **Unterbrechung des normalen Compile-Flusses**
- Einführung einer neuen Zwischendarstellung
- Stoff der 2. Aufgabe

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Unterbrechung des normalen Compile-Flusses
- Einführung einer neuen Zwischendarstellung
- Stoff der 2. Aufgabe

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Unterbrechung des normalen Compile-Flusses
- Einführung einer neuen Zwischendarstellung
- Stoff der 2. Aufgabe

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Ab jetzt Auszüge aus:

Single-Pass Generation of Static Single Assignment Form for Structured Languages

MARC M. BRANDIS and HANSPETER MÖSSENBÖCK

ACM Transactions on Programming Languages and
Systems 16(6): 1684-1698, Nov.1994

- Erzeugung von SSA-Form aus strukturierten Programmierprachen
- Sehr gut zu lesen

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Practical Improvements to the Construction and Destruction of Static Single Assignment Form

BRIGGS, COOPER, HARVEY, SIMPSON

SOFTWARE: PRACTICE AND EXPERIENCE, VOL. 28(8),
128 (July 1998)

- Umwandeln aus der SSA-Form (→ nächste Woche)
- Recht gut zu lesen

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Efficiently Computing Static Single Assignment Form and the Control Dependence Graph

CYTRON, FERRANTE, ROSEN, WEGMAN, ZADECK

ACM Transactions on Programming Languages and Systems (TOPLAS), Volume 13 , Issue 4 (October 1991)

- Das SSA-Paper schlechthin
- Keine ganz einfache Lektüre mehr
- Aber viele Details nur hier behandelt
 - Z.B. Behandlung von Arrays etc.

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Kontrollflussgraphen als IR

Basisblock (BB)

Längste Folge von Anweisungen **ohne** Kontrollfluß.

Beispiel:

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

Basisblöcke:

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

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

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

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Basisblock (BB)

Längste Folge von Anweisungen **ohne** Kontrollfluß.

Beispiel:

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

Basisblöcke:

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

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

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

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Basisblock (BB)

Längste Folge von Anweisungen **ohne** Kontrollfluß.

Beispiel:

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

Basisblöcke:

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

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

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

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Basisblöcke alleine **nicht** ausreichend als allgemeine Zwischendarstellung
 - Kontrollfluss fehlt völlig
- Erweiterung auf **Graph** von Basisblöcken
 - Am Ende jedes Basisblockes (bedingter) Sprung zum nächsten Block
 - Kanten symbolisieren **Kontrollfluß**
- Sehr gut für viele Optimierungen brauchbar
- Häufig verwendete Zwischendarstellung im Optimierer

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Basisblöcke alleine **nicht** ausreichend als allgemeine Zwischendarstellung
 - Kontrollfluss fehlt völlig
- Erweiterung auf **Graph** von Basisblöcken
 - Am Ende jedes Basisblockes (bedingter) Sprung zum nächsten Block
 - Kanten symbolisieren **Kontrollfluß**
- Sehr gut für viele Optimierungen brauchbar
- Häufig verwendete Zwischendarstellung im Optimierer

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Basisblöcke alleine **nicht** ausreichend als allgemeine Zwischendarstellung
 - Kontrollfluss fehlt völlig
- Erweiterung auf **Graph** von Basisblöcken
 - Am Ende jedes Basisblockes (bedingter) Sprung zum nächsten Block
 - Kanten symbolisieren **Kontrollfluß**
- Sehr gut für viele Optimierungen brauchbar
- Häufig verwendete Zwischendarstellung im Optimierer

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Engl. *control flow graph* (CFG)

- **Knoten** sind Basisblöcke
- **Kanten** sind Sprünge zwischen den Blöcken
- Sprünge treten also nur am **Ende** eines Blocks auf!
- Sprungziel ist immer ein **Blockanfang**
 - In Triangle: if/then/else, while/do
 - Strukturierte Programmierung
 - Allgemeiner Fall deutlich komplizierter
 - goto
 - setjmp()/longjmp()

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Engl. *control flow graph* (CFG)

- **Knoten** sind Basisblöcke
- **Kanten** sind Sprünge zwischen den Blöcken
- Sprünge treten also nur am **Ende** eines Blocks auf!
- Sprungziel ist immer ein **Blockanfang**
 - In Triangle: if/then/else, while/do
 - Strukturierte Programmierung
 - Allgemeiner Fall deutlich komplizierter
 - goto
 - setjmp()/longjmp()

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Engl. *control flow graph* (CFG)

- **Knoten** sind Basisblöcke
- **Kanten** sind Sprünge zwischen den Blöcken
- Sprünge treten also nur am **Ende** eines Blocks auf!
- Sprungziel ist immer ein **Blockanfang**
 - In Triangle: if/then/else, while/do
 - Strukturierte Programmierung
 - Allgemeiner Fall deutlich komplizierter
 - goto
 - setjmp()/longjmp()

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Engl. *control flow graph* (CFG)

- **Knoten** sind Basisblöcke
- **Kanten** sind Sprünge zwischen den Blöcken
- Sprünge treten also nur am **Ende** eines Blocks auf!
- Sprungziel ist immer ein **Blockanfang**
 - In Triangle: if/then/else, while/do
 - Strukturierte Programmierung
 - Allgemeiner Fall deutlich komplizierter
 - goto
 - setjmp()/longjmp()

Engl. *control flow graph* (CFG)

- **Knoten** sind Basisblöcke
- **Kanten** sind Sprünge zwischen den Blöcken
- Sprünge treten also nur am **Ende** eines Blocks auf!
- Sprungziel ist immer ein **Blockanfang**
 - In Triangle: if/then/else, while/do
 - Strukturierte Programmierung
 - Allgemeiner Fall deutlich komplizierter
 - goto
 - setjmp()/longjmp()

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

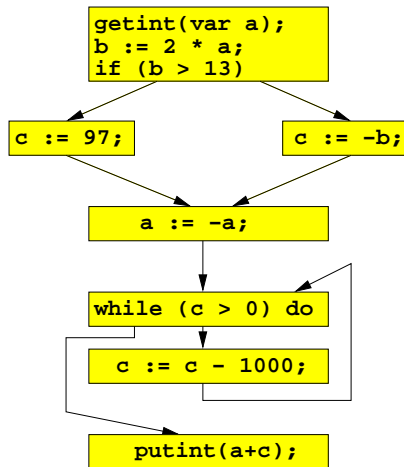
SSA
Erzeugen

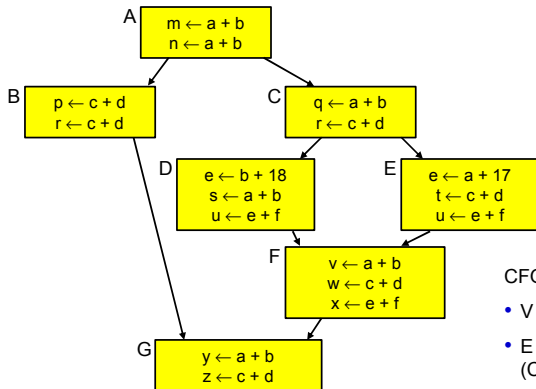
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

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

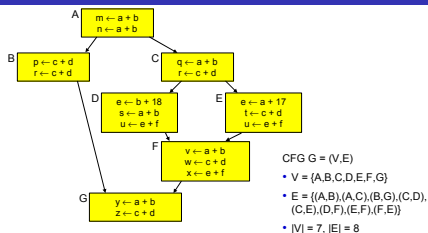




CFG $G = (V, E)$

- $V = \{A, B, C, D, E, F, G\}$
- $E = \{(A, B), (A, C), (B, G), (C, D), (C, E), (D, F), (E, F), (F, E)\}$
- $|V| = 7, |E| = 8$

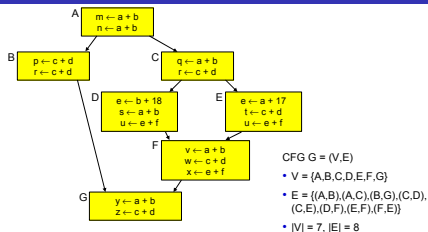
Relationen im CFG



- Anhand des CFGs lassen sich nun Aussagen über Beziehungen zwischen Blöcken treffen
- Eine sehr wichtige:

“Welche Blöcke x werden vor einem bestimmten Block y in jedem Fall ausgeführt?”

- Fachbegriff: Welche Blöcke x dominieren den Block y ?



- Anhand des CFGs lassen sich nun Aussagen über Beziehungen zwischen Blöcken treffen
- Eine sehr wichtige:

“Welche Blöcke x werden vor einem bestimmten Block y in jedem Fall ausgeführt?”

- Fachbegriff: Welche Blöcke x dominieren den Block y ?

Dominanz

x **dominiert** y genau dann, falls jeder Pfad vom Eingangsknoten des CFGs zum Knoten y den Knoten x enthält. Geschrieben als $x \gg y$.

Gilt immer: $x \gg x$

Strikte Dominanz

x **dominiert** y **strikt**, falls $x \gg y$ und $x \neq y$.
Geschrieben als $x \ggg y$.

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Dominanz

x **dominiert** y genau dann, falls jeder Pfad vom Eingangsknoten des CFGs zum Knoten y den Knoten x enthält. Geschrieben als $x \gg y$.

Gilt immer: $x \gg x$

Strikte Dominanz

x **dominiert** y **strikt**, falls $x \gg y$ und $x \neq y$.
Geschrieben als $x \ggg y$.

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
ErzeugenSSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Dominatoren

$\text{DOM}(y) = \{x \in \text{CFG} \mid x \gg y\}$ ist die Menge der
Dominatoren von y .

Unmittelbarer Dominator (*immediate dominator*)

$\text{IDOM}(y)$ ist der im CFG y am **nächsten** gelegene
Dominator aus $\text{DOM}(y)$.

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Dominatoren

$\text{DOM}(y) = \{x \in \text{CFG} \mid x \gg y\}$ ist die Menge der **Dominatoren** von y .

Unmittelbarer Dominator (*immediate dominator*)

$\text{IDOM}(y)$ ist der im CFG y am **nächsten** gelegene Dominator aus $\text{DOM}(y)$.

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

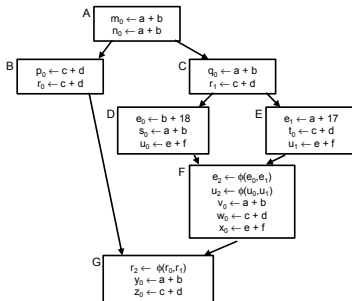
Rückwandlung

Dominatoren

- Sehr nützliche Relation
 - Finden von Schleifen
 - Zielauswahl für Code-Bewegung
 - Umwandlung in SSA-Form

Dominatormengen

Block	Dom	IDom
A	A	-
B	A,B	A
C	A,C	A
D	A,C, D	C
E	A,C, E	C
F	A,C,F	C
G	A,G	A

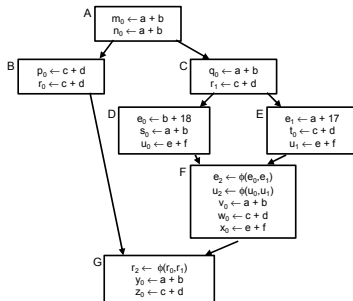


➔ Berechnung der Relation: Kommt noch ...

- Sehr nützliche Relation
 - Finden von Schleifen
 - Zielauswahl für Code-Bewegung
 - Umwandlung in SSA-Form

Dominatormengen

Block	Dom	IDom
A	A	-
B	A,B	A
C	A,C	A
D	A,C, D	C
E	A,C, E	C
F	A,C,F	C
G	A,G	A

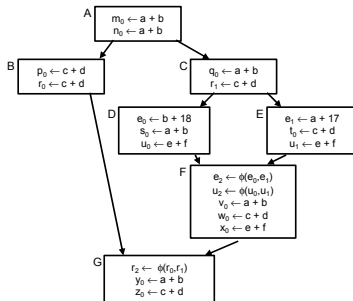


➔ Berechnung der Relation: Kommt noch ...

- Sehr nützliche Relation
 - Finden von Schleifen
 - Zielauswahl für Code-Bewegung
 - Umwandlung in SSA-Form

Dominatormengen

Block	Dom	IDom
A	A	-
B	A,B	A
C	A,C	A
D	A,C, D	C
E	A,C, E	C
F	A,C,F	C
G	A,G	A



➔ **Berechnung** der Relation: Kommt noch ...

Vorschau Redundanzeliminierung

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Eingabe-Code

Value Numbering

Umschreiben

➔ Redundante Berechnung von $a - d$ vermieden

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Eingabe-Code

```
a := b + c;
```

```
b := a - d;
```

```
c := b + c;
```

```
d := a - d;
```

Value Numbering

Umschreiben

→ Redundante Berechnung von $a - d$ vermieden

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Eingabe-Code

```
a := b + c;  
b := a - d;  
c := b + c;  
d := a - d;
```

Value Numbering

```
a3 := b1 + c2;  
b5 := a3 - d4;  
c6 := b5 + c2;  
d5 := a3 - d4;
```

Umschreiben

→ Redundante Berechnung von $a - d$ vermieden

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Eingabe-Code

```
a := b + c;  
b := a - d;  
c := b + c;  
d := a - d;
```

Value Numbering

```
a3 := b1 + c2;  
b5 := a3 - d4;  
c6 := b5 + c2;  
d5 := a3 - d4;
```

Umschreiben

```
a := b + c;  
b := a - d;  
c := b + c;  
d := b;
```

➔ Redundante Berechnung von $a - d$ vermieden

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Eingabe-Code

```
a := b + c;  
b := a - d;  
c := b + c;  
d := a - d;
```

Value Numbering

```
a3 := b1 + c2;  
b5 := a3 - d4;  
c6 := b5 + c2;  
d5 := a3 - d4;
```

Umschreiben

```
a := b + c;  
b := a - d;  
c := b + c;  
d := b;
```

↳ Redundante Berechnung von **a - d** vermieden

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Bisher: Zugriff auf Werte über Namen (von Variablen)

- Zugriff auf Wert 3 über Variablennamen a
- Nicht mehr möglich!
- Möglichkeiten
 - Führe Buch über den Wert haltende Variablen (hier b)
 - Mache Sicherheitskopien von Variablen (a^3 nach t^3)
 - **Vergebe eindeutige Namen für Zuweisungen**
 - Kein Überschreiben mehr möglich

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Bisher: Zugriff auf Werte über Namen (von Variablen)

Eingabe-Code

```
a ← x + y
* b ← x + y
a ← 17
* c ← x + y
```

- Zugriff auf Wert 3 über Variablennamen **a**
- Nicht mehr möglich!
- Möglichkeiten
 - Führe Buch über den Wert haltende Variablen (hier **b**)
 - Mache Sicherheitskopien von Variablen (**a**³ nach **t**³)
 - **Vergebe eindeutige Namen für Zuweisungen**
 - Kein Überschreiben mehr möglich

Bisher: Zugriff auf Werte über Namen (von Variablen)

Eingabe-Code

```
a ← x + y
* b ← x + y
a ← 17
* c ← x + y
```

Value Numbering

```
a3 ← x1 + y2
* b3 ← x1 + y2
a4 ← 17
* c3 ← x1 + y2
```

- Zugriff auf Wert 3 über Variablennamen **a**
- Nicht mehr möglich!
- Möglichkeiten
 - Führe Buch über den Wert haltende Variablen (hier **b**)
 - Mache Sicherheitskopien von Variablen (**a³** nach **t³**)
 - **Vergebe eindeutige Namen für Zuweisungen**
 - Kein Überschreiben mehr möglich

Bisher: Zugriff auf Werte über Namen (von Variablen)

Eingabe-Code

```
a ← x + y
* b ← x + y
a ← 17
* c ← x + y
```

Value Numbering

```
a3 ← x1 + y2
* b3 ← x1 + y2
a4 ← 17
* c3 ← x1 + y2
```

Umgeschrieben

```
a3 ← x1 + y2
* b3 ← a3
a4 ← 17
* c3 ← a3 (oops!)
```

- Zugriff auf Wert 3 über Variablennamen a
- Nicht mehr möglich!
- Möglichkeiten
 - Führe Buch über den Wert haltende Variablen (hier b)
 - Mache Sicherheitskopien von Variablen (a³ nach t³)
 - **Vergebe eindeutige Namen für Zuweisungen**
 - Kein Überschreiben mehr möglich

Bisher: Zugriff auf Werte über Namen (von Variablen)

Eingabe-Code

```
a ← x + y
* b ← x + y
a ← 17
* c ← x + y
```

Value Numbering

```
a3 ← x1 + y2
* b3 ← x1 + y2
a4 ← 17
* c3 ← x1 + y2
```

Umgeschrieben

```
a3 ← x1 + y2
* b3 ← a3
a4 ← 17
* c3 ← a3 (oops!)
```

- Zugriff auf Wert 3 über Variablennamen **a**
- Nicht mehr möglich!
- Möglichkeiten
 - Führe Buch über den Wert haltende Variablen (hier **b**)
 - Mache Sicherheitskopien von Variablen (**a³** nach **t³**)
 - **Vergebe eindeutige Namen für Zuweisungen**
 - Kein Überschreiben mehr möglich

Durchnumerieren der LHS-Variablen (→ Variablenversionen)

- Wert 3 verfügbar als a_0^3
- Hier nur etwas mehr Verwaltungsaufwand
- Aber echte Probleme kommen noch!

→ Bestimmung der Reihenfolge der Variablen

→ Die Lösung ist nicht trivial

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Durchnumerieren der LHS-Variablen
(\rightarrow Variablenversionen)

Eingabe-Code

$$a_0 \leftarrow x_0 + y_0$$

$$* b_0 \leftarrow x_0 + y_0$$

$$a_1 \leftarrow 17$$

$$* c_0 \leftarrow x_0 + y_0$$

- Wert 3 verfügbar als a_0^3
- Hier nur etwas mehr Verwaltungsaufwand
- Aber echte Probleme kommen noch!

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Durchnumerieren der LHS-Variablen
(→ Variablenversionen)

Eingabe-Code

```
a0 ← x0 + y0  
* b0 ← x0 + y0  
a1 ← 17  
* c0 ← x0 + y0
```

Value Numbering

```
a03 ← x01 + y02  
* b03 ← x01 + y02  
a14 ← 17  
* c03 ← x01 + y02
```

- Wert 3 verfügbar als a_0^3
- Hier nur etwas mehr Verwaltungsaufwand
- Aber echte Probleme kommen noch!

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Durchnumerieren der LHS-Variablen
(\rightarrow Variablenversionen)

Eingabe-Code

```
a0 ← x0 + y0
* b0 ← x0 + y0
a1 ← 17
* c0 ← x0 + y0
```

Value Numbering

```
a03 ← x01 + y02
* b03 ← x01 + y02
a14 ← 17
* c03 ← x01 + y02
```

Umgeschrieben

```
a03 ← x01 + y02
* b03 ← a03
a14 ← 17
* c03 ← a03
```

- Wert 3 verfügbar als a_0^3
- Hier nur etwas mehr Verwaltungsaufwand
- Aber echte Probleme kommen noch!
 - Beim Überschreiten von Basisblockgrenzen
 - Eine Lösung: *Static Single Assignment-Form* von CFGs

Durchnumerieren der LHS-Variablen
(\rightarrow Variablenversionen)

Eingabe-Code

```
a0 ← x0 + y0
* b0 ← x0 + y0
a1 ← 17
* c0 ← x0 + y0
```

Value Numbering

```
a03 ← x01 + y02
* b03 ← x01 + y02
a14 ← 17
* c03 ← x01 + y02
```

Umgeschrieben

```
a03 ← x01 + y02
* b03 ← a03
a14 ← 17
* c03 ← a03
```

- Wert 3 verfügbar als a_0^3
- Hier nur etwas mehr Verwaltungsaufwand
- Aber echte Probleme kommen noch!

- Beim Überschreiten von Basisblockgrenzen
- Eine Lösung: *Static Single Assignment-Form* von CFGs

Durchnumerieren der LHS-Variablen
(\rightarrow Variablenversionen)

Eingabe-Code

```
a0 ← x0 + y0
* b0 ← x0 + y0
a1 ← 17
* c0 ← x0 + y0
```

Value Numbering

```
a03 ← x01 + y02
* b03 ← x01 + y02
a14 ← 17
* c03 ← x01 + y02
```

Umgeschrieben

```
a03 ← x01 + y02
* b03 ← a03
a14 ← 17
* c03 ← a03
```

- Wert 3 verfügbar als a_0^3
- Hier nur etwas mehr Verwaltungsaufwand
- Aber echte Probleme kommen noch!
 - Beim Überschreiten von Basisblockgrenzen
 - Eine Lösung: **Static Single Assignment-Form** von CFGs

Durchnumerieren der LHS-Variablen
(\rightarrow Variablenversionen)

Eingabe-Code

```
a0 ← x0 + y0
* b0 ← x0 + y0
a1 ← 17
* c0 ← x0 + y0
```

Value Numbering

```
a03 ← x01 + y02
* b03 ← x01 + y02
a14 ← 17
* c03 ← x01 + y02
```

Umgeschrieben

```
a03 ← x01 + y02
* b03 ← a03
a14 ← 17
* c03 ← a03
```

- Wert 3 verfügbar als a_0^3
- Hier nur etwas mehr Verwaltungsaufwand
- Aber echte Probleme kommen noch!
 - Beim Überschreiten von Basisblockgrenzen
 - Eine Lösung: **Static Single Assignment-Form** von CFGs

Durchnumerieren der LHS-Variablen
(\rightarrow Variablenversionen)

Eingabe-Code

```
a0 ← x0 + y0
* b0 ← x0 + y0
a1 ← 17
* c0 ← x0 + y0
```

Value Numbering

```
a03 ← x01 + y02
* b03 ← x01 + y02
a14 ← 17
* c03 ← x01 + y02
```

Umgeschrieben

```
a03 ← x01 + y02
* b03 ← a03
a14 ← 17
* c03 ← a03
```

- Wert 3 verfügbar als a_0^3
- Hier nur etwas mehr Verwaltungsaufwand
- Aber echte Probleme kommen noch!
 - Beim Überschreiten von Basisblockgrenzen
 - Eine Lösung: **Static Single Assignment-Form** von CFGs

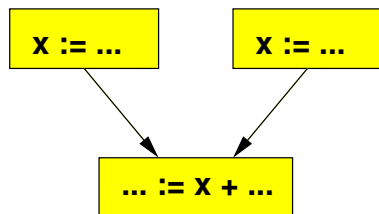
Static Single Assignment-Form

```
// Normal           // SSA-Form
v := 0;            v1 := 0;
x := v + 1;        x1 := v1 + 1;
v := 2;            v2 := 2;
y := v + 3         y1 := v2 + 3
```

- Zur Compile-Zeit (also **statisch**)
- Jeder Wert wird an genau **eine eigene** Variable zugewiesen
 - Erzeuge eindeutige Namen für gleiche Zuweisungsziele
 - Numerierte Variablen sind **Wertinstanzen** der ursprünglichen Variablen
- Jeder Operand hat somit **genau eine** Definition in BB
- Letzte Definition ist die aktuelle

- Was, wenn mehrere “letzte” Definitionen? (z.B. then/else-Zweige: mehrere BBs)
- Sogenannte *merge points*
- Zusammenführen von mehreren “letzten” Definitionen

Ursprünglicher CFG



“Letzte” Definition von x ?

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

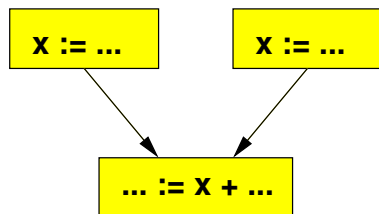
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

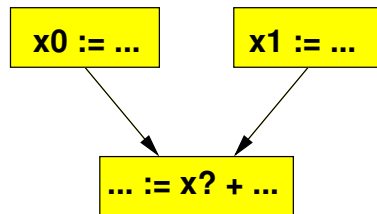
Dominatoren

- Was, wenn mehrere “letzte” Definitionen? (z.B. then/else-Zweige: mehrere BBs)
- Sogenannte *merge points*
- Zusammenführen von mehreren “letzten” Definitionen

Ursprünglicher CFG



“Letzte” Definition von x ?



Was passiert, wenn zwei Werte der gleichen Variable aufeinanderstoßen?

- An sogenanntem *merge* oder *join*-Punkten im Kontrollflußgraphen

➔ Auflösung über Phi-Funktion

- Für jeden Kontrollzweig einen Parameter
 - Den jeweiligen Wert
- Liefert als Ergebnis den Wert entsprechend der genommenen Kante
 - Von welchem Zweig kamen wir?
 - Welcher Wert ist also der richtige?

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Was passiert, wenn zwei Werte der gleichen Variable aufeinanderstoßen?

- An sogenanntem *merge* oder *join*-Punkten im Kontrollflußgraphen

➔ Auflösung über Phi-Funktion

- Für jeden Kontrollzweig einen Parameter
 - Den jeweiligen Wert
- Liefert als Ergebnis den Wert entsprechend der genommenen Kante
 - Von welchem Zweig kamen wir?
 - Welcher Wert ist also der richtige?

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

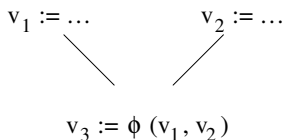
Rückwandlung

Dominatoren

Was passiert, wenn zwei Werte der gleichen Variable aufeinanderstoßen?

- An sogenanntem *merge* oder *join*-Punkten im Kontrollflußgraphen

➔ Auflösung über Phi-Funktion



- Für jeden Kontrollzweig einen Parameter
 - Den jeweiligen Wert
- Liefert als Ergebnis den Wert entsprechend der genommenen Kante
 - Von welchem Zweig kamen wir?
 - Welcher Wert ist also der richtige?

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
ErzeugenSSA für
strukturierte
Sprachen

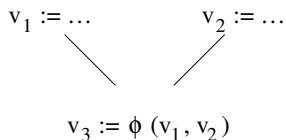
Rückwandlung

Dominatoren

Was passiert, wenn zwei Werte der gleichen Variable aufeinanderstoßen?

- An sogenanntem *merge* oder *join*-Punkten im Kontrollflußgraphen

➔ Auflösung über Phi-Funktion



- Für jeden Kontrollzweig einen Parameter
 - Den jeweiligen Wert
- Liefert als Ergebnis den Wert entsprechend der genommenen Kante
 - Von welchem Zweig kamen wir?
 - Welcher Wert ist also der richtige?

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
ErzeugenSSA für
strukturierte
Sprachen

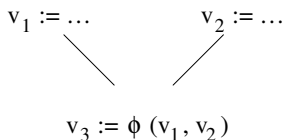
Rückwandlung

Dominatoren

Was passiert, wenn zwei Werte der gleichen Variable aufeinanderstoßen?

- An sogenanntem *merge* oder *join*-Punkten im Kontrollflußgraphen

➔ Auflösung über Phi-Funktion



- Für jeden Kontrollzweig einen Parameter
 - Den jeweiligen Wert
- Liefert als Ergebnis den Wert entsprechend der genommenen Kante
 - Von welchem Zweig kamen wir?
 - Welcher Wert ist also der richtige?

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

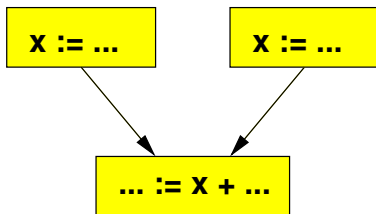
SSA

SSA
ErzeugenSSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Ursprünglicher CFG



Auflösung durch ϕ -Funktion

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

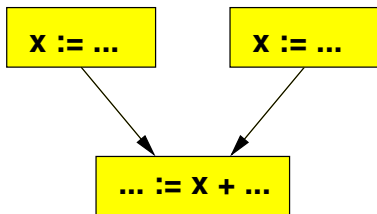
SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

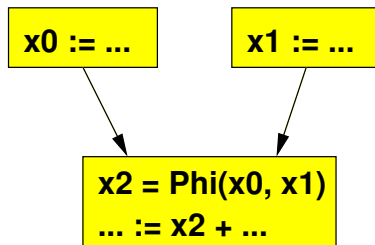
Rückwandlung

Dominatoren

Ursprünglicher CFG



Auflösung durch ϕ -Funktion



OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

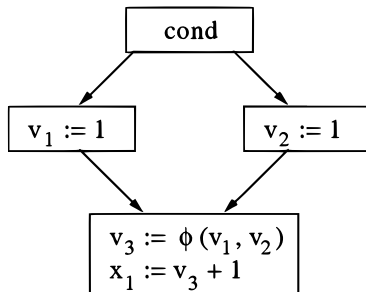
SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

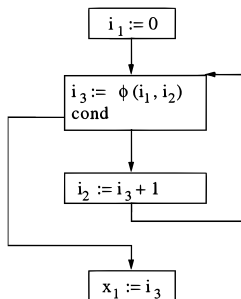
Rückwandlung

Dominatoren

```
IF cond THEN  
    v := 1  
ELSE  
    v := 2  
END;  
x := v + 1
```

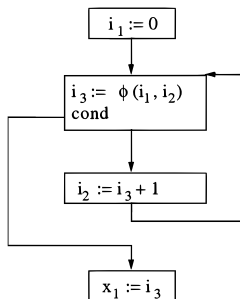


```
i := 0;  
WHILE cond DO  
  i := i + 1  
END;  
x := i
```



Beachte: Entscheidung, ob Wert von **vor** oder **nach** dem Schleifenkörper genommen wird.

```
i := 0;  
WHILE cond DO  
  i := i + 1  
END;  
x := i
```



Beachte: Entscheidung, ob Wert von **vor** oder **nach** dem Schleifenkörper genommen wird.

- Für jeden Wert genau eine Definition
- Jede Zuweisung legt neuen Wert an
- Kein Auslöschen (*kill*) von Werten möglich
- Wenn zwei Ausdrücke textuell gleich sind
- ... liefern sie das gleiche Ergebnis

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA

Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Drei Teilprobleme

1. Eindeutige Namen für Werte
 - \rightarrow GLLC-Erreichbarkeitsknoten
2. Einfügen von Phi-Funktionen
 - \rightarrow GLLC-Prüfung überfallig
 - \rightarrow Einfügen von Phi-Funktionen, die meisten von ϕ
3. Umbenennen von benutzten Variablen in passende Werte
 - \rightarrow Wieder nicht einfach
 - \rightarrow Abhängigkeit letzte Definition

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

**SSA
Erzeugen**

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Drei Teilprobleme

- 1 Eindeutige Namen für Werte
 - Z.B.: Einfach durchnummerieren
- 2 Einfügen von Phi-Funktionen
 - Z.B.: Holzhammermethode
 - Erzeugt **sehr viele** Phi-Funktionen, die meisten unnötig
- 3 Umbenennen von benutzten Variablen in passende Werte
 - Wieder recht einfach
 - Referenziert letzte Definition

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Drei Teilprobleme

- 1 Eindeutige Namen für Werte
 - Z.B.: Einfach durchnummerieren
- 2 Einfügen von Phi-Funktionen
 - Z.B.: Holzhammermethode
 - Erzeugt **sehr viele** Phi-Funktionen, die meisten unnötig
- 3 Umbenennen von benutzten Variablen in passende Werte
 - Wieder recht einfach
 - Referenziert letzte Definition

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Drei Teilprobleme

- 1 Eindeutige Namen für Werte
 - Z.B.: Einfach durchnummerieren
- 2 Einfügen von Phi-Funktionen
 - Z.B.: Holzhammermethode
 - An jedem join-Point für **alle** Variablen Phi-Funktionen einfügen
 - Erzeugt **sehr viele** Phi-Funktionen, die meisten unnötig
- 3 Umbenennen von benutzten Variablen in passende Werte
 - Wieder recht einfach
 - Referenziert letzte Definition

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Drei Teilprobleme

- 1 Eindeutige Namen für Werte
 - Z.B.: Einfach durchnummerieren
- 2 Einfügen von Phi-Funktionen
 - Z.B.: Holzhammermethode
 - An jedem join-Point für **alle** Variablen Phi-Funktionen einfügen
 - Erzeugt **sehr viele** Phi-Funktionen, die meisten unnötig
- 3 Umbenennen von benutzten Variablen in passende Werte
 - Wieder recht einfach
 - Referenziert letzte Definition

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Drei Teilprobleme

- 1 Eindeutige Namen für Werte
 - Z.B.: Einfach durchnummerieren
- 2 Einfügen von Phi-Funktionen
 - Z.B.: Holzhammermethode
 - An jedem join-Point für **alle** Variablen Phi-Funktionen einfügen
 - Erzeugt **sehr viele** Phi-Funktionen, die meisten unnötig
- 3 Umbenennen von benutzten Variablen in passende Werte
 - Wieder recht einfach
 - Referenziert letzte Definition

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Drei Teilprobleme

- 1 Eindeutige Namen für Werte
 - Z.B.: Einfach durchnummerieren
- 2 Einfügen von Phi-Funktionen
 - Z.B.: Holzhammermethode
 - An jedem join-Point für **alle** Variablen Phi-Funktionen einfügen
 - Erzeugt **sehr viele** Phi-Funktionen, die meisten unnötig
- 3 Umbenennen von benutzten Variablen in passende Werte
 - Wieder recht einfach
 - Referenziert letzte Definition

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Drei Teilprobleme

- 1 Eindeutige Namen für Werte
 - Z.B.: Einfach durchnummerieren
- 2 Einfügen von Phi-Funktionen
 - Z.B.: Holzhammermethode
 - An jedem join-Point für **alle** Variablen Phi-Funktionen einfügen
 - Erzeugt **sehr viele** Phi-Funktionen, die meisten unnötig
- 3 Umbenennen von benutzten Variablen in passende Werte
 - Wieder recht einfach
 - Referenziert letzte Definition

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Drei Teilprobleme

- 1 Eindeutige Namen für Werte
 - Z.B.: Einfach durchnummerieren
- 2 Einfügen von Phi-Funktionen
 - Z.B.: Holzhammermethode
 - An jedem join-Point für **alle** Variablen Phi-Funktionen einfügen
 - Erzeugt **sehr viele** Phi-Funktionen, die meisten unnötig
- 3 Umbenennen von benutzten Variablen in passende Werte
 - Wieder recht einfach
 - Referenziert letzte Definition

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Drei Teilprobleme

- 1 Eindeutige Namen für Werte
 - Z.B.: Einfach durchnummerieren
- 2 Einfügen von Phi-Funktionen
 - Z.B.: Holzhammermethode
 - An jedem join-Point für **alle** Variablen Phi-Funktionen einfügen
 - Erzeugt **sehr viele** Phi-Funktionen, die meisten unnötig
- 3 Umbenennen von benutzten Variablen in passende Werte
 - Wieder recht einfach
 - Referenziert letzte Definition

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Allgemeine Lösung

- Cytron et. al. 1991
- Vorgehen: Berechnen von **Dominatorgrenzen**
- “Gerade nicht mehr” von Knoten X dominierte Knoten
- Hier nicht mehr klar, ob Definitionen aus X noch gelten
- Einfügen von Phi-Knoten nur für die Variablen, bei denen tatsächlich entschieden werden muß
 - Aufeinandertreffen von verschiedenen Definitionen an Dominatorgrenzen
- Algorithmus nicht trivial ...

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Keine GOTOs
- Nur strukturierte Anweisungen
 - IF
 - CASE
 - WHILE
 - REPEAT
 - FOR

➔ Viel einfacheres und schnelleres Vorgehen möglich

➔ Brandis/Mössenböck 1994

Unser Ansatz für Triangle!

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Keine GOTOs
- Nur strukturierte Anweisungen
 - IF
 - CASE
 - WHILE
 - REPEAT
 - FOR

➔ Viel einfacheres und schnelleres Vorgehen möglich

➔ Brandis/Mössenböck 1994

Unser Ansatz für Triangle!

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Keine GOTOs
- Nur strukturierte Anweisungen
 - IF
 - CASE
 - WHILE
 - REPEAT
 - FOR

↳ Viel einfacheres und schnelleres Vorgehen möglich

↳ Brandis/Mössenböck 1994

Unser Ansatz für Triangle!

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Keine GOTOs
- Nur strukturierte Anweisungen
 - IF
 - CASE
 - WHILE
 - REPEAT
 - FOR

↳ Viel einfacheres und schnelleres Vorgehen möglich

↳ Brandis/Mössenböck 1994

Unser Ansatz für Triangle!

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Aus Zeitgründen in der Vorlesung keine **detaillierte** Behandlung von

- Arrays
- Records
- Prozeduraufrufen
- Verschachtelten Geltungsbereichen

Alles handhabbar

... aber aufwändig und lenkt von Kernideen ab.

Bei Interesse (oder Bedarf!): Cytron et al., Abschnitt 3.1

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Aus Zeitgründen in der Vorlesung keine **detaillierte** Behandlung von

- Arrays
- Records
- Prozeduraufrufen
- Verschachtelten Geltungsbereichen

Alles handhabbar

... aber aufwändig und lenkt von Kernideen ab.

Bei Interesse (oder Bedarf!): Cytron et al., Abschnitt 3.1

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Aus Zeitgründen in der Vorlesung keine **detaillierte** Behandlung von

- Arrays
- Records
- Prozeduraufrufen
- Verschachtelten Geltungsbereichen

Alles handhabbar

... aber aufwändig und lenkt von Kernideen ab.

Bei Interesse (oder Bedarf!): Cytron et al., Abschnitt 3.1

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Aus Zeitgründen in der Vorlesung keine **detaillierte** Behandlung von

- Arrays
- Records
- Prozeduraufrufen
- Verschachtelten Geltungsbereichen

Alles handhabbar

... aber aufwändig und lenkt von Kernideen ab.

Bei Interesse (oder Bedarf!): Cytron et al., Abschnitt 3.1

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

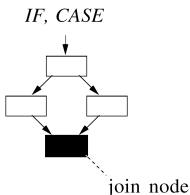
Rückwandlung

Dominatoren

<i>Assignments (original form)</i>	<i>Assignments (SSA form)</i>	<i>Current values</i>	
		<i>v</i>	<i>x</i>
		v_0	x_0
$v := 0;$	$v_1 := 0;$	v_1	x_0
$x := v + 1;$	$x_1 := v_1 + 1;$	v_1	x_1
$v := 2$	$v_2 := 2$	v_2	x_1

- Jede Zuweisung an v erzeugt neuen Wert v_i
- Nach Zuweisung ist v_i **aktueller** Wert von v
- Ersetze alle **folgenden** Verwendungen von v durch v_i
- Verwaltung z.B. in extra Tabelle während Umformung

Bei strukturierten Programmiersprachen:
Alle Join-Knoten sind durch Konstrukte bereits vorgegeben



Platzhalter
(siehe später!)

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

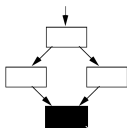
Rückwandlung

Dominatoren

Bei strukturierten Programmiersprachen:

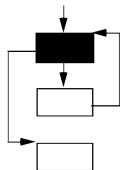
Alle Join-Knoten sind durch Konstrukte bereits vorgegeben

IF, CASE



join node

WHILE, FOR



Platzhalter
(siehe später!)

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

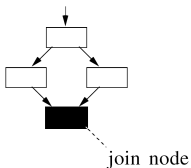
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

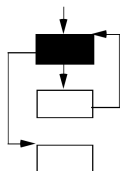
Dominatoren

Bei strukturierten Programmiersprachen:
Alle Join-Knoten sind durch Konstrukte bereits vorgegeben

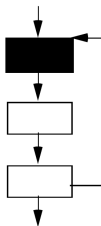
IF, CASE



WHILE, FOR



REPEAT



Platzhalter
(siehe später!)

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

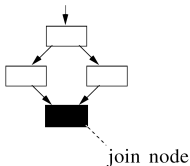
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

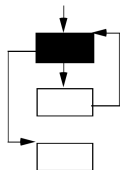
Dominatoren

Bei strukturierten Programmiersprachen:
Alle Join-Knoten sind durch Konstrukte bereits vorgegeben

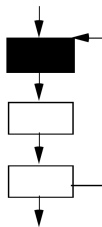
IF, CASE



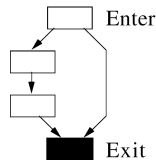
WHILE, FOR



REPEAT



procedure



Platzhalter
(siehe später!)

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

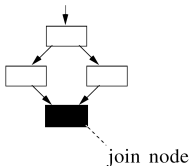
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

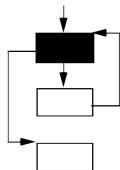
Dominatoren

Bei strukturierten Programmiersprachen:
Alle Join-Knoten sind durch Konstrukte bereits vorgegeben

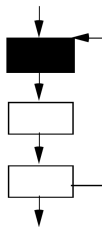
IF, CASE



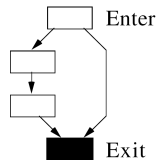
WHILE, FOR



REPEAT



procedure



Platzhalter
(siehe später!)

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

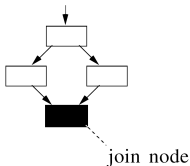
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

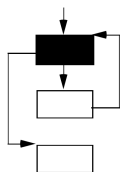
Dominatoren

Bei strukturierten Programmiersprachen:
Alle Join-Knoten sind durch Konstrukte bereits vorgegeben

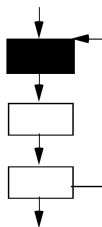
IF, CASE



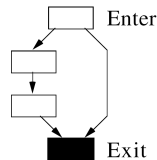
WHILE, FOR



REPEAT



procedure



Platzhalter
(siehe später!)

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Strukturen können verschachtelt sein
 - Bearbeite von **innen** nach **aussen**
 - Innerster unbearbeiteter Join-Knoten ist **aktueller** Join-Knoten
- Erzeuge keine **speziellen** Knoten für Joins
- Verwende bisherige Blöcke weiter

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA

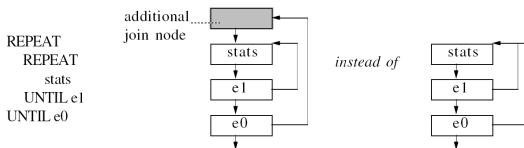
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

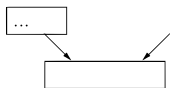
Ausnahme: Verschachtelte REPEAT-Anweisungen



- Für spätere Optimierung hilfreich
- Sonst kein Ziel für aus der inneren Schleife bewegte Berechnungen

- **Jede** Zuweisung gehört zu einem Zweig des Kontrollflußgraphen
- Jede Zuweisung erzeugt einen neuen Wert
 - Ggf. auch bei Prozeduraufruf (`var`, global, nicht-lokal)
- Irgendwann trifft der Wert auf einen **Join-Knoten**
- Dort **Unterscheidung** zwischen allen Werten für diese Variable

➔ Jede Zuweisung **erzeugt** oder **modifiziert** Phi-Funktion für Variable



OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- **Jede** Zuweisung gehört zu einem Zweig des Kontrollflußgraphen
- Jede Zuweisung erzeugt einen neuen Wert
 - Ggf. auch bei Prozeduraufruf (`var`, global, nicht-lokal)
- Irgendwann trifft der Wert auf einen **Join-Knoten**
- Dort **Unterscheidung** zwischen allen Werten für diese Variable

➡ Jede Zuweisung **erzeugt** oder **modifiziert** Phi-Funktion für Variable



- **Jede** Zuweisung gehört zu einem Zweig des Kontrollflußgraphen
- Jede Zuweisung erzeugt einen neuen Wert
 - Ggf. auch bei Prozeduraufruf (**var**, global, nicht-lokal)
- Irgendwann trifft der Wert auf einen **Join-Knoten**
- Dort **Unterscheidung** zwischen allen Werten für diese Variable

➡ Jede Zuweisung **erzeugt** oder **modifiziert** Phi-Funktion für Variable



- **Jede** Zuweisung gehört zu einem Zweig des Kontrollflußgraphen
- Jede Zuweisung erzeugt einen neuen Wert
 - Ggf. auch bei Prozeduraufruf (**var**, global, nicht-lokal)
- Irgendwann trifft der Wert auf einen **Join-Knoten**
- Dort **Unterscheidung** zwischen allen Werten für diese Variable

➡ Jede Zuweisung **erzeugt** oder **modifiziert** Phi-Funktion für Variable



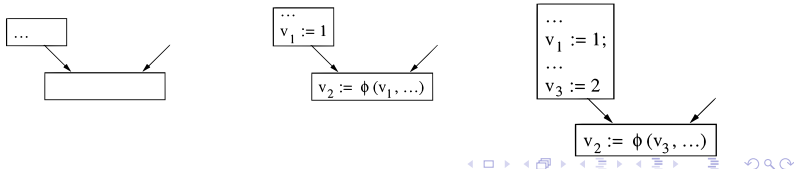
- **Jede** Zuweisung gehört zu einem Zweig des Kontrollflußgraphen
- Jede Zuweisung erzeugt einen neuen Wert
 - Ggf. auch bei Prozeduraufruf (**var**, global, nicht-lokal)
- Irgendwann trifft der Wert auf einen **Join-Knoten**
- Dort **Unterscheidung** zwischen allen Werten für diese Variable

➡ Jede Zuweisung **erzeugt** oder **modifiziert** Phi-Funktion für Variable



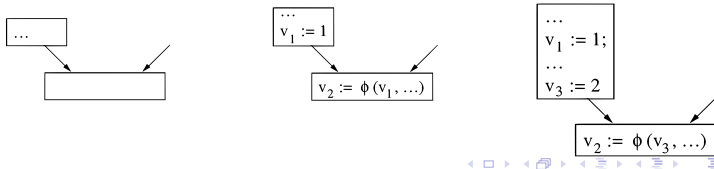
- **Jede** Zuweisung gehört zu einem Zweig des Kontrollflußgraphen
- Jede Zuweisung erzeugt einen neuen Wert
 - Ggf. auch bei Prozeduraufruf (`var`, global, nicht-lokal)
- Irgendwann trifft der Wert auf einen **Join-Knoten**
- Dort **Unterscheidung** zwischen allen Werten für diese Variable

➔ Jede Zuweisung **erzeugt** oder **modifiziert** Phi-Funktion für Variable



- Jede Zuweisung gehört zu einem Zweig des Kontrollflußgraphen
- Jede Zuweisung erzeugt einen neuen Wert
 - Ggf. auch bei Prozeduraufruf (`var`, global, nicht-lokal)
- Irgendwann trifft der Wert auf einen **Join-Knoten**
- Dort **Unterscheidung** zwischen allen Werten für diese Variable

➔ Jede Zuweisung **erzeugt** oder **modifiziert** Phi-Funktion für Variable



- Phi-Operand für den **gerade bearbeiteten** Zweig
- ... wird jeweils auf **letzten aktuellen** Wert gesetzt
- Phi-Funktionen treten **selber** in Zuweisungen auf
- Erzeugen also selber **neue** Werte
- Führen zu **weiteren** Phi-Funktionen in **nächstäußerem** Join-Knoten
- Ende bei Erreichen des Exit-Knotens

Vorgehen: Erzeugen eines CFGs in SSA-Form **je Prozedur** durch Traversieren des **ASTs**

Könnte aber auch direkt beim Parsen geschehen.

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Phi-Operand für den **gerade bearbeiteten** Zweig
- ... wird jeweils auf **letzten aktuellen** Wert gesetzt
- Phi-Funktionen treten **selber** in Zuweisungen auf
- Erzeugen also selber **neue** Werte
- Führen zu **weiteren** Phi-Funktionen in **nächstäußerem** Join-Knoten
- Ende bei Erreichen des Exit-Knotens

Vorgehen: Erzeugen eines CFGs in SSA-Form **je Prozedur** durch Traversieren des **ASTs**

Könnte aber auch direkt beim Parsen geschehen.

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Phi-Operand für den **gerade bearbeiteten** Zweig
- ... wird jeweils auf **letzten aktuellen** Wert gesetzt
- Phi-Funktionen treten **selber** in Zuweisungen auf
- Erzeugen also selber **neue** Werte
- Führen zu **weiteren** Phi-Funktionen in **nächstäußerem** Join-Knoten
- Ende bei Erreichen des Exit-Knotens

Vorgehen: Erzeugen eines CFGs in SSA-Form **je Prozedur** durch Traversieren des **ASTs**

Könnte aber auch direkt beim Parsen geschehen.

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

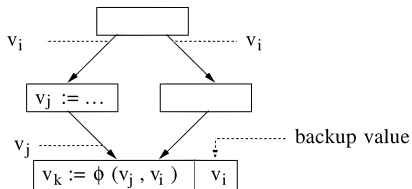
SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

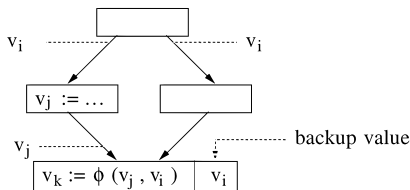
Rückwandlung

Dominatoren

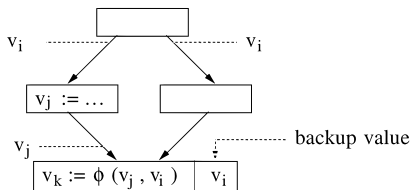
- 1 Bei Erreichen von IF: Erzeuge neuen Join-Knoten
 - Wird Phi-Funktionen aus THEN/ELSE enthalten
 - Wird später in den CFG eingehängt
- 2 Bearbeite THEN-Zweig, für eine Zuweisung an v
 - 1. Mal: Lege **leere** Phi-Funktion (Identität) für v an, sichere Wert v_j **vor** IF zusammen mit Phi-Funktion
 - Sonst: Setze Phi-Operand auf jeweils **aktuellen** Wert v_j
- 3 Bearbeite ELSE-Zweig
 - Setze **aktuelle** auf **gesicherte** Werte (pre-IF) zurück
 - Dann gleiches Vorgehen wie im THEN-Zweig



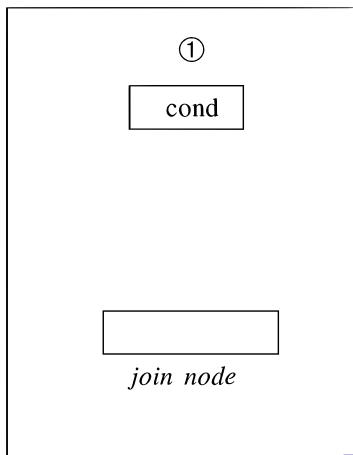
- 1 Bei Erreichen von IF: Erzeuge neuen Join-Knoten
 - Wird Phi-Funktionen aus THEN/ELSE enthalten
 - Wird später in den CFG eingehängt
- 2 Bearbeite THEN-Zweig, für eine Zuweisung an v
 - 1. Mal: Lege **leere** Phi-Funktion (Identität) für v an, sichere Wert v_i **vor** IF zusammen mit Phi-Funktion
 - Sonst: Setze Phi-Operand auf jeweils **aktuellen** Wert v_j
- 3 Bearbeite ELSE-Zweig
 - Setze **aktuelle** auf **gesicherte** Werte (pre-IF) zurück
 - Dann gleiches Vorgehen wie im THEN-Zweig



- 1 Bei Erreichen von IF: Erzeuge neuen Join-Knoten
 - Wird Phi-Funktionen aus THEN/ELSE enthalten
 - Wird später in den CFG eingehängt
- 2 Bearbeite THEN-Zweig, für eine Zuweisung an v
 - 1. Mal: Lege **leere** Phi-Funktion (Identität) für v an, sichere Wert v_i **vor** IF zusammen mit Phi-Funktion
 - Sonst: Setze Phi-Operand auf jeweils **aktuellen** Wert v_j
- 3 Bearbeite ELSE-Zweig
 - Setze **aktuelle** auf **gesicherte** Werte (pre-IF) zurück
 - Dann gleiches Vorgehen wie im THEN-Zweig

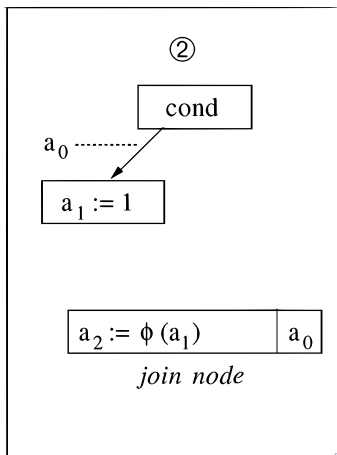


① ② ③ ④ ⑤
↓ ↓ ↓ ↓ ↓
IF cond THEN a := 1; b := a + 1 ELSE a := a + 1; c := 2 END



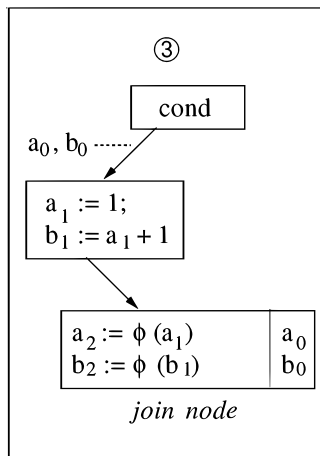
Phi-Knoten für IF-Anweisungen 2

① ② ③ ④ ⑤
IF cond THEN a := 1; b := a + 1 ELSE a := a + 1; c := 2 END



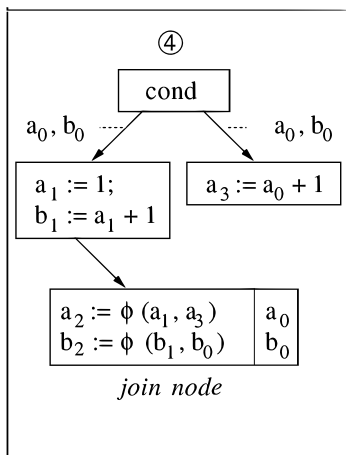
Phi-Knoten für IF-Anweisungen 2

① ② ③ ④ ⑤
IF cond THEN a := 1; b := a + 1 ELSE a := a + 1; c := 2 END



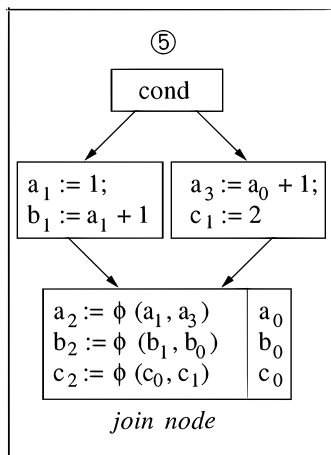
Phi-Knoten für IF-Anweisungen 2

① ② ③ ④ ⑤
IF cond THEN a := 1; b := a + 1 ELSE a := a + 1; c := 2 END



Phi-Knoten für IF-Anweisungen 2

① ② ③ ④ ⑤
IF cond THEN a := 1; b := a + 1 ELSE a := a + 1; c := 2 END



Nach Abarbeiten von THEN und ELSE-Zweigen:

Festlegen des Join-Blocks (*commit*)

- Join-Block **selber** bearbeiten
- Werte **Zuweisungen** von Phi-Funktionen aus
- Trage neue Phi-Funktionen in **nächstäußeren** Join-Block ein
 - Join-Block der umschließenden Kontrollstruktur
- Trage dort LHS der Phi-Zuweisungen als aktuelle Werte der Variablen ein
- Hänge aktuellen Join-Block in CFG ein

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Nach Abarbeiten von THEN und ELSE-Zweigen:
Festlegen des Join-Blocks (*commit*)

- Join-Block **selber** bearbeiten
- Werte **Zuweisungen** von Phi-Funktionen aus
- Trage neue Phi-Funktionen in **nächstäußeren** Join-Block ein
 - Join-Block der umschließenden Kontrollstruktur
- Trage dort LHS der Phi-Zuweisungen als aktuelle Werte der Variablen ein
- Hänge aktuellen Join-Block in CFG ein

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Join-Knoten von WHILE-Anweisung ist **Kopfknoten**
 - Zusammentreffen von Schleifeneintritt und Rückwärtskante im CFG
- Bearbeitung des Schleifenkörpers analog zur IF-Anweisung, **aber**
- Bei Eintragen einer neuen Phi-Funktion in Kopfknoten
- ... entsteht **neuer** aktueller Wert
- Alle lesenden Benutzungen der Variable **im Schleifenkörper** durch **aktuellen** Wert ersetzen
 - Verwalte Liste aller im Schleifenkörper benutzten Werte
 - Sogenannte *use chain*
 - Kann für schnelle Korrektur (Ändern der Versionsnummer) benutzt werden

- Join-Knoten von WHILE-Anweisung ist **Kopfknoten**
 - Zusammentreffen von Schleifeneintritt und Rückwärtskante im CFG
- Bearbeitung des Schleifenkörpers analog zur IF-Anweisung, **aber**
- Bei Eintragen einer neuen Phi-Funktion in Kopfknoten
- ... entsteht **neuer** aktueller Wert
- Alle lesenden Benutzungen der Variable **im Schleifenkörper** durch **aktuellen** Wert ersetzen
 - Verwalte Liste aller im Schleifenkörper benutzten Werte
 - Sogenannte *use chain*
 - Kann für schnelle Korrektur (Ändern der Versionsnummer) benutzt werden

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

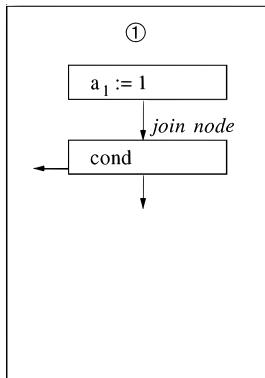
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

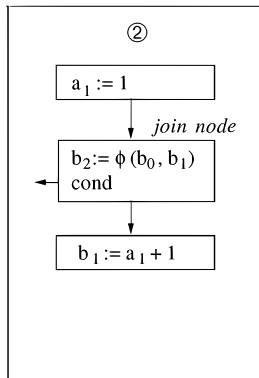
- Join-Knoten von WHILE-Anweisung ist **Kopfknoten**
 - Zusammentreffen von Schleifeneintritt und Rückwärtskante im CFG
- Bearbeitung des Schleifenkörpers analog zur IF-Anweisung, **aber**
- Bei Eintragen einer neuen Phi-Funktion in Kopfknoten
- ... entsteht **neuer** aktueller Wert
- Alle lesenden Benutzungen der Variable **im Schleifenkörper** durch **aktuellen** Wert ersetzen
 - Verwalte Liste aller im Schleifenkörper benutzten Werte
 - Sogenannte *use chain*
 - Kann für schnelle Korrektur (Ändern der Versionsnummer) benutzt werden

①
↓
a := 1; WHILE cond DO ② b := a + 1; a := a * 2 ③ END



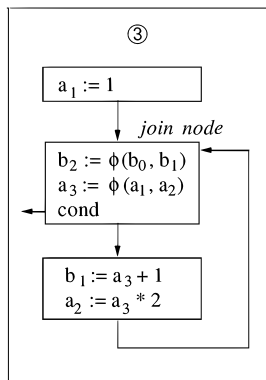
Beachte: Ersetzung von a_1 durch a_3 !

①
↓
a := 1; WHILE cond DO b := a + 1; a := a * 2 END
②
↓
③



Beachte: Ersetzung von a_1 durch a_3 !

① ② ③
↓ ↓ ↓
a := 1; WHILE cond DO b := a + 1; a := a * 2 END



Beachte: Ersetzung von a_1 durch a_3 !

- Nach der Bearbeitung des Schleifenkörpers
- ... **Festlegen** der Phi-Zuweisungen im Join-Knoten
- Erzeugt neue Phi-Funktionen in nächstäußerem Join-Knoten
- Legt neue aktuelle Werte für nachfolgende Anweisungen fest
 - Im Beispiel: a_3 und b_2

CASE und FOR würden analog zu IF und WHILE bearbeitet

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Nach der Bearbeitung des Schleifenkörpers
- ... **Festlegen** der Phi-Zuweisungen im Join-Knoten
- Erzeugt neue Phi-Funktionen in nächstäußerem Join-Knoten
- Legt neue aktuelle Werte für nachfolgende Anweisungen fest
 - Im Beispiel: a_3 und b_2

CASE und FOR würden analog zu IF und WHILE bearbeitet

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Sonderfall!
- Konstrukt wird **nicht** über Join-Knoten verlassen
- Analog zu WHILE: Join-Knoten ist Schleifenkopf
 - Hier auch Phi-Zuweisungen untergebracht
- Aber Unterschied beim **Festlegen** des Join-Blocks!
- Aktueller Wert ist **nicht** Ziel der Phi-Zuweisung im Kopf (wie bei WHILE)
- ... sondern Wert zugeordnet der **Rückwärtskante**
 - Sonst wären Änderungen nach genau einem Schleifendurchlauf nicht sichtbar
- Gleichen Wert auch für Operanden **nächstäußerer** Phi-Funktion verwenden

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Sonderfall!
- Konstrukt wird **nicht** über Join-Knoten verlassen
- Analog zu WHILE: Join-Knoten ist Schleifenkopf
 - Hier auch Phi-Zuweisungen untergebracht
- Aber Unterschied beim **Festlegen** des Join-Blocks!
- Aktueller Wert ist **nicht** Ziel der Phi-Zuweisung im Kopf (wie bei WHILE)
- ... sondern Wert zugeordnet der **Rückwärtskante**
 - Sonst wären Änderungen nach genau einem Schleifendurchlauf nicht sichtbar
- Gleichen Wert auch für Operanden **nächstäußerer** Phi-Funktion verwenden

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Sonderfall!
- Konstrukt wird **nicht** über Join-Knoten verlassen
- Analog zu WHILE: Join-Knoten ist Schleifenkopf
 - Hier auch Phi-Zuweisungen untergebracht
- Aber Unterschied beim **Festlegen** des Join-Blocks!
- Aktueller Wert ist **nicht** Ziel der Phi-Zuweisung im Kopf (wie bei WHILE)
- ... sondern Wert zugeordnet der **Rückwärtskante**
 - Sonst wären Änderungen nach genau einem Schleifendurchlauf nicht sichtbar
- Gleichen Wert auch für Operanden **nächstäußerer** Phi-Funktion verwenden

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Sonderfall!
- Konstrukt wird **nicht** über Join-Knoten verlassen
- Analog zu WHILE: Join-Knoten ist Schleifenkopf
 - Hier auch Phi-Zuweisungen untergebracht
- Aber Unterschied beim **Festlegen** des Join-Blocks!
- Aktueller Wert ist **nicht** Ziel der Phi-Zuweisung im Kopf (wie bei WHILE)
- ... sondern Wert zugeordnet der **Rückwärtskante**
 - Sonst wären Änderungen nach genau einem Schleifendurchlauf nicht sichtbar
- Gleichen Wert auch für Operanden **nächstäußerer** Phi-Funktion verwenden

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

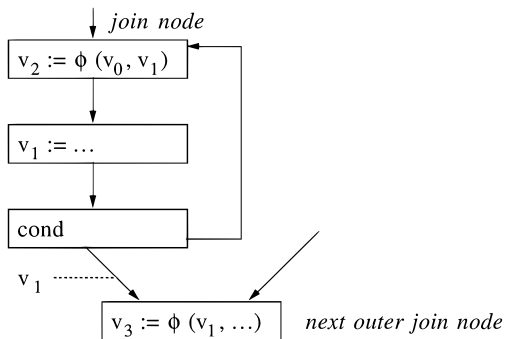
SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

REPEAT
 $v := \dots$
UNTIL cond



Beachte: Weiterverwendung von v_1 , **nicht** von v_2

● INSERTPHI

- Erzeugt neue oder modifiziert bestehende Phi-Zuweisung in Join-Knoten b
- Aufruf: $\text{INSERTPHI}(b, i, v_i, v_{old})$
 - Zur Bearbeitung von Zuweisung $v_i := \dots$
 - ...die im i -ten, zum Block b führenden Zweig steht
 - v_{old} ist aktueller Wert **vor** dieser Zuweisung
 - Wird als Sicherheitskopie abgespeichert

● COMMITPHI

- Legt die Phi-Zuweisungen in einem Join-Knoten b fest
- Bestimmt **aktuelle** Werte
- Propagiert neue Phi-Zuweisungen in nächstäußeren Join-Knoten B , über die Kante I kommend

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

● INSERTPHI

- Erzeugt neue oder modifiziert bestehende Phi-Zuweisung in Join-Knoten b
- Aufruf: $\text{INSERTPHI}(b, i, v_i, v_{old})$
 - Zur Bearbeitung von Zuweisung $v_i := \dots$
 - ...die im i -ten, zum Block b führenden Zweig steht
 - v_{old} ist aktueller Wert **vor** dieser Zuweisung
 - Wird als Sicherheitskopie abgespeichert

● COMMITPHI

- Legt die Phi-Zuweisungen in einem Join-Knoten b fest
- Bestimmt **aktuelle** Werte
- Propagiert neue Phi-Zuweisungen in nächstäußeren Join-Knoten B , über die Kante I kommend


```
PROCEDURE InsertPhi (b: Node; i: INTEGER; vi, vold: Value);
BEGIN
  IF b contains no  $\phi$ -assignment for v THEN
    Insert " $v_j := \phi(v_{old}, \dots, v_{old}) / v_{old}$ " in b;
    IF b is a join node of a loop THEN
      Rename all mentions of vold in the loop to vj
    END
  END;
  Replace i-th operand of v's  $\phi$ -assignment by vj
END InsertPhi;
```

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
ErzeugenSSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

```
PROCEDURE CommitPhi (b: Node);
BEGIN
  FOR all  $\phi$ -instructions " $v_i := \phi(v_0, \dots, v_n) / v_{old}$ " in b DO
    IF  $b$  is a join node of a repeat THEN val :=  $v_n$  ELSE val :=  $v_i$  END;
    Make val the current value of  $v$ ;
    InsertPhi(B, I, val,  $v_{old}$ )
  END
END CommitPhi;
```

Hier Annahme: Letzter Zweig n ist Rückwärtskante der REPEAT-Schleife

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
ErzeugenSSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

```
PROCEDURE CommitPhi (b: Node);  
BEGIN  
  FOR all  $\phi$ -instructions " $v_i := \phi(v_0, \dots, v_n) / v_{old}$ " in b DO  
    IF  $b$  is a join node of a repeat THEN val :=  $v_n$  ELSE val :=  $v_i$  END;  
    Make val the current value of  $v$ ;  
    InsertPhi(B, I, val,  $v_{old}$ )  
  END  
END CommitPhi;
```

Hier Annahme: Letzter Zweig n ist Rückwärtskante der REPEAT-Schleife

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
ErzeugenSSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Hier nicht gezeigt: Rücksetzen auf v_{old} bei Bearbeitung des nächsten Zweiges
- Variablen in Triangle durch Verweise auf Definitionen kennzeichnen
- Keine String-Vergleiche mehr nötig!
- Werte sind dann Tupel (Definition, Versionsnummer)
- Prozeduraufrufe wie Zuweisungen behandeln
 - LHS: **var**-Parameter, **geschriebene** nicht-lokale und globale Variablen
 - RHS: Parameter (**var** und Wert), **gelesene** nicht-lokale und globale Variablen

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

```
let
  var f : Integer;
  var g : Integer;
  var n : Integer;
  proc p() ~ begin f := 2*f; g := g+1 end
in begin
  n := 1; f := 2; g := 3;
  while n < 10 do begin
    p();
    n := n + 1
  end;
  putint(f); puteol(); putint(g)
end
```

- Sehe $p()$ an als $\{f, g\} = p \{f, g\}$
- RHS: Operator p , angewandt auf Werte f und g
- LHS: Erzeuge neue Versionen von f und g

- $\{f3, g3\} = p() \{f2, g2\}$ in Schleife
- Im Kopfknoten nun:
 $f2 = \text{Phi}(f1, f3)$
 $g2 = \text{Phi}(g1, g3)$
 $n2 = \text{Phi}(n1, n3)$
 $n2 < 10$
- Details in Cytron, Abschnitt 3.1
 - Arrays, Records, Prozeduren und Funktionen
 - Besser als nachlesen: Idee verstanden haben :-)

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Rückwandlung aus SSA-Form

- Normale Prozessoren haben keine Phi-Instruktion
- Phi-Instruktionen müssen entfernt werden

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

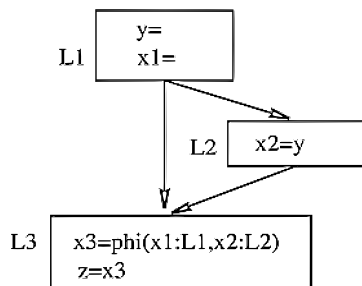
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Naive Idee: Phi einfach löschen und Wertnummern entfernen

Vorher:

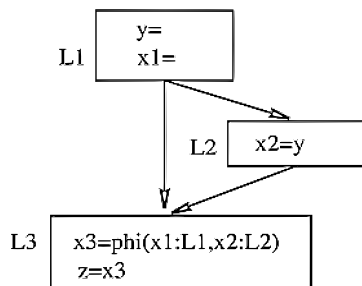


Nachher:

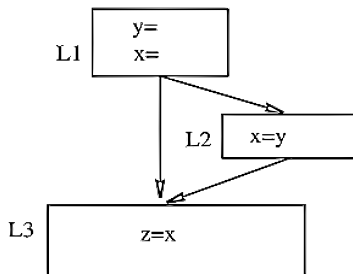
... so weit, so gut.

Naive Idee: Phi einfach löschen und Wertnummern entfernen

Vorher:



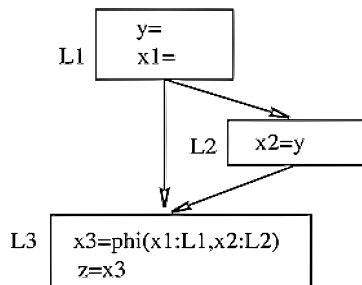
Nachher:



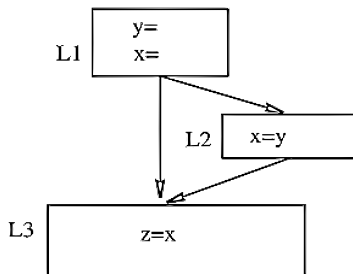
... so weit, so gut.

Naive Idee: Phi einfach löschen und Wertnummern entfernen

Vorher:



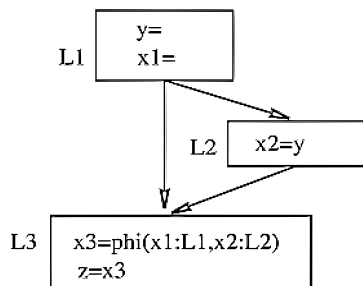
Nachher:



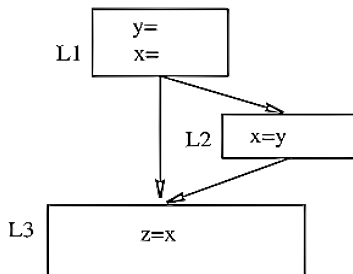
... so weit, so gut.

Naive Idee: Phi einfach löschen und Wertnummern entfernen

Vorher:



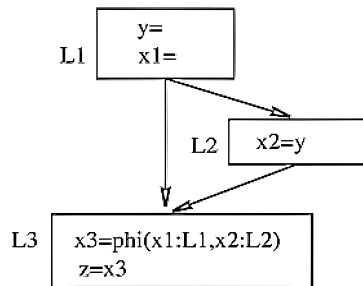
Nachher:



... so weit, so gut.

Jetzt Annahme: Einfache Optimierung hat stattgefunden

Vor Copy-Propagation



Nach Copy-Propagation

Rückwandlung durch einfaches Löschen ... geht schief:

- Phi-Funktion auflösen nach x oder y?

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

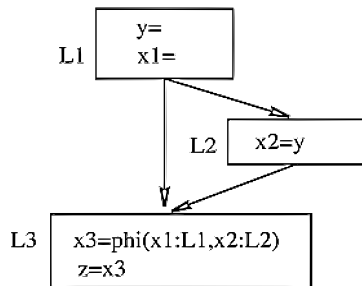
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

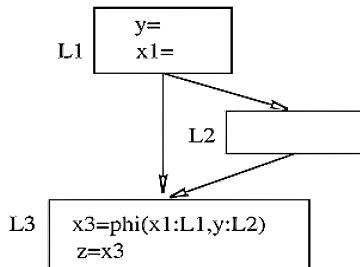
Dominatoren

Jetzt Annahme: Einfache Optimierung hat stattgefunden

Vor Copy-Propagation



Nach Copy-Propagation



Rückwandlung durch einfaches Löschen ... geht schief:

- Phi-Funktion auflösen nach x oder y?

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

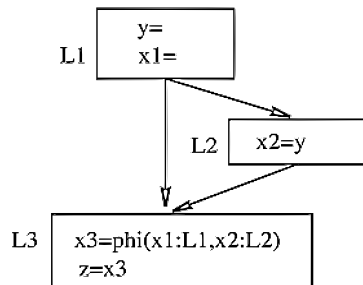
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

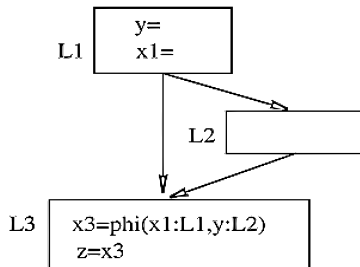
Dominatoren

Jetzt Annahme: Einfache Optimierung hat stattgefunden

Vor Copy-Propagation



Nach Copy-Propagation



Rückwandlung durch einfaches Löschen ... geht schief:

- Phi-Funktion auflösen nach x oder y ?

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

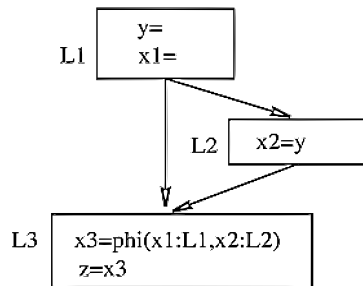
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

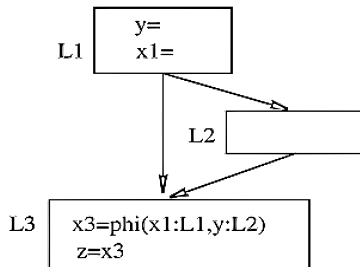
Dominatoren

Jetzt Annahme: Einfache Optimierung hat stattgefunden

Vor Copy-Propagation



Nach Copy-Propagation



Rückwandlung durch einfaches Löschen ... geht schief:

- Phi-Funktion auflösen nach x oder y?

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

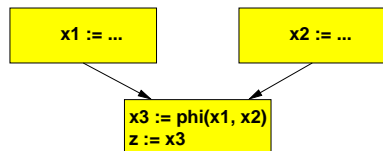
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Besserer Ansatz: Füge Kopieroperationen in Vorgängerblöcke der Phi-Funktion ein

Vorher



Nachher

Zielführender als naives Löschen!

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

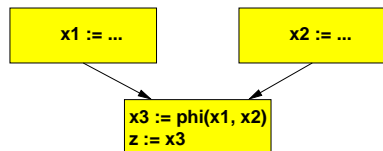
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

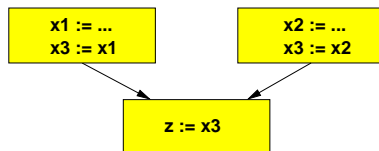
Dominatoren

Besserer Ansatz: Füge Kopieroperationen in Vorgängerblöcke der Phi-Funktion ein

Vorher



Nachher



Zielführender als naives Löschen!

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

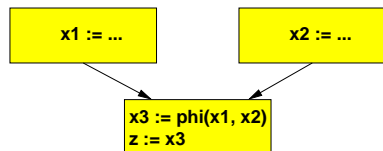
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

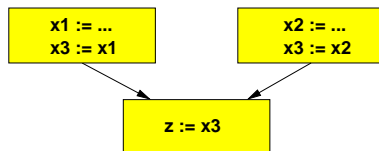
Dominatoren

Besserer Ansatz: Füge Kopieroperationen in Vorgängerblöcke der Phi-Funktion ein

Vorher



Nachher



Zielführender als naives Löschen!

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

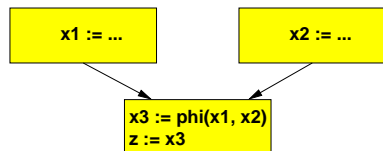
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

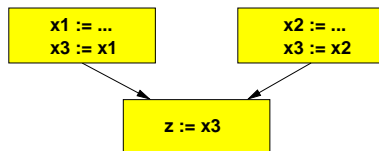
Dominatoren

Besserer Ansatz: Füge Kopieroperationen in Vorgängerblöcke der Phi-Funktion ein

Vorher



Nachher



Zielführender als naives Löschen!

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

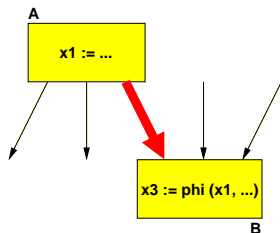
Rückwandlung

Dominatoren

Problemfall: Kritische Kanten

Kritische Kontrollflusskante

Eine kritische Kante im CFG verläuft von einem Block mit mehreren Nachfolgern zu einem Block mit mehreren Vorgängern.



Praktisch: Können kritische Kanten in strukturierten CFGs à la Triangle auftreten?

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

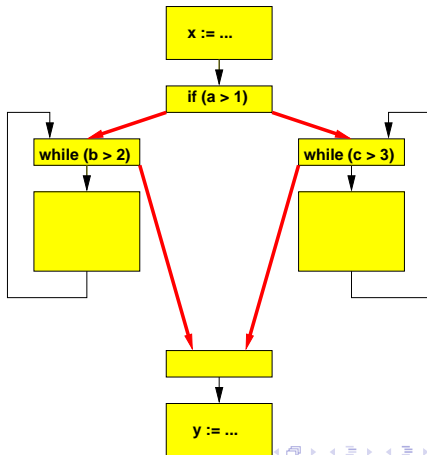
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Praktisch: Können kritische Kanten in strukturierten CFGs à la Triangle auftreten?

```
x := ...  
if (a > 1) then {  
  while (b > 2) do {  
  }  
} else {  
  while (c > 3) do {  
  }  
}  
y := ...
```



OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

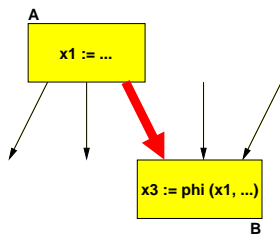
SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

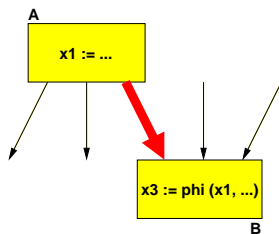
Problem bei kritischen Kanten

- Wo Kopierzuweisungen von A bei Auflösen der Phi-Funktion in B unterbringen?
- Am Ende von A?
 - Nicht effizient, da dann alle Nachfolger von A die Kopie für B bekommen!
- Am Anfang von B?
 - Geht nicht, da dann alle Vorgänger von B die Kopie von A bekommen!



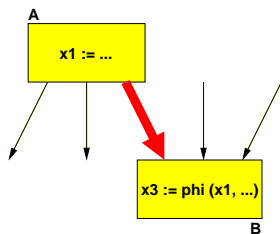
Problem bei kritischen Kanten

- Wo Kopierzuweisungen von A bei Auflösen der Phi-Funktion in B unterbringen?
- Am Ende von A?
 - Nicht effizient, da dann alle Nachfolger von A die Kopie für B bekommen!
- Am Anfang von B?
 - Geht nicht, da dann alle Vorgänger von B die Kopie von A bekommen!

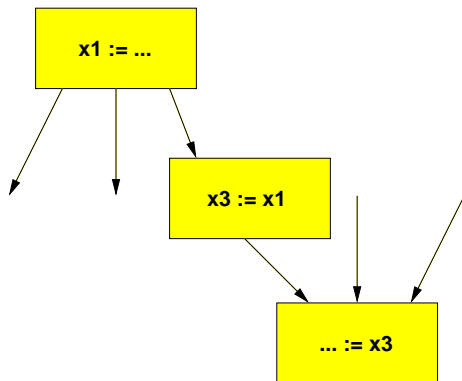


Problem bei kritischen Kanten

- Wo Kopierzuweisungen von A bei Auflösen der Phi-Funktion in B unterbringen?
- Am Ende von A?
 - Nicht effizient, da dann alle Nachfolger von A die Kopie für B bekommen!
- Am Anfang von B?
 - Geht nicht, da dann alle Vorgänger von B die Kopie von A bekommen!

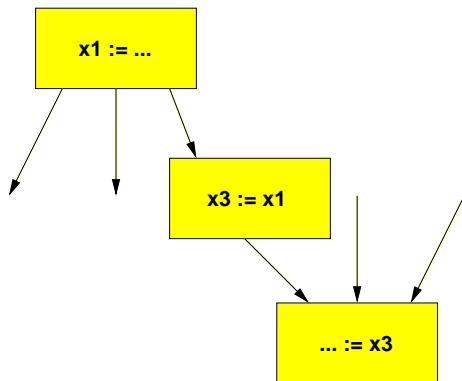


Einfache Lösung:
Kante aufspalten und neuen Block einfügen!



Funktioniert immer!

Einfache Lösung:
Kante aufspalten und neuen Block einfügen!



Funktioniert immer!

Nachteil: Verlangsamt möglicherweise Programm

- Beispiel: Zusätzliche Sprunganweisung bei REPEAT/UNTIL

Abhilfe: Gezielteres Einfügen von Kopien

- Briggs 1998 oder Sreedhar 1999

Kommt noch in eigener Vorlesung, soll in **Aufgabe 3** realisiert werden!

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Nachteil: Verlangsamt möglicherweise Programm

- Beispiel: Zusätzliche Sprunganweisung bei REPEAT/UNTIL

Abhilfe: Gezielteres Einfügen von Kopien

- Briggs 1998 oder Sreedhar 1999

Kommt noch in eigener Vorlesung, soll in **Aufgabe 3** realisiert werden!

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Nachteil: Verlangsamt möglicherweise Programm

- Beispiel: Zusätzliche Sprunganweisung bei REPEAT/UNTIL

Abhilfe: Gezielteres Einfügen von Kopien

- Briggs 1998 oder Sreedhar 1999

Kommt noch in eigener Vorlesung, soll in **Aufgabe 3** realisiert werden!

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Aber nicht alle kritischen Kanten sind relevant
- Nur solche **vor** Blöcken mit phi-Funktionen

Damit einfache Vorgehensweise zur Rückwandlung

- Teile phi-Funktion in Kopieranweisungen auf
- Lege Kopieranweisung am Ende des entsprechenden Vorgängerknotens ab
- **Es sei denn**, dass Kante zum Vorgänger kritisch ist
- **Dann** Kante aufspalten, Kopieranweisung in eingefügten Knoten legen

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Aber nicht alle kritischen Kanten sind relevant
- Nur solche **vor** Blöcken mit phi-Funktionen

Damit einfache Vorgehensweise zur Rückwandlung

- Teile phi-Funktion in Kopieranweisungen auf
- Lege Kopieranweisung am Ende des entsprechenden Vorgängerknotens ab
- **Es sei denn**, dass Kante zum Vorgänger kritisch ist
- **Dann** Kante aufspalten, Kopieranweisung in eingefügten Knoten legen

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Aber nicht alle kritischen Kanten sind relevant
- Nur solche **vor** Blöcken mit phi-Funktionen

Damit einfache Vorgehensweise zur Rückwandlung

- Teile phi-Funktion in Kopieranweisungen auf
- Lege Kopieranweisung am Ende des entsprechenden Vorgängerknotens ab
- **Es sei denn**, dass Kante zum Vorgänger kritisch ist
- **Dann** Kante aufspalten, Kopieranweisung in eingefügten Knoten legen

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Aber nicht alle kritischen Kanten sind relevant
- Nur solche **vor** Blöcken mit phi-Funktionen

Damit einfache Vorgehensweise zur Rückwandlung

- Teile phi-Funktion in Kopieranweisungen auf
- Lege Kopieranweisung am Ende des entsprechenden Vorgängerknotens ab
- **Es sei denn**, dass Kante zum Vorgänger kritisch ist
- **Dann** Kante aufspalten, Kopieranweisung in eingefügten Knoten legen

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Berechnung von Dominatoren

- Muß bei Cytron et al. bei der SSA-Umformung gemacht werden
- War hier nicht nötig
- Dominatoren sind aber nach wie vor nützlich
- Wie sind sie hier berechenbar?
- Viel einfacher als im allgemeinen Fall!

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Auch hier Berechnung in einem Pass möglich
 - Über Quelltext oder AST
- Darstellung: Dominatorbaum
 - Vater eines Blocks ist dessen unmittelbarer Dominator IDOM
- Idee hier: Sub-CFGs der Konstrukte IF/WHILE/FOR/REPEAT/CASE
- ... haben **einen** Eintrittspunkt und **einen** Austrittspunkt
- Der Eintrittspunkt dominiert **alle** Knoten des Konstrukts
- Unmittelbare Dominatoren können immer nach dem gleichen Schema bestimmt werden
- Dann Hochhangeln für weiter entfernte Dominatoren

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Auch hier Berechnung in einem Pass möglich
 - Über Quelltext oder AST
- Darstellung: Dominatorbaum
 - Vater eines Blocks ist dessen unmittelbarer Dominator
IDOM
- Idee hier: Sub-CFGs der Konstrukte
IF/WHILE/FOR/REPEAT/CASE
- ... haben **einen** Eintrittspunkt und **einen** Austrittspunkt
- Der Eintrittspunkt dominiert **alle** Knoten des Konstrukts
- Unmittelbare Dominatoren können immer nach dem gleichen Schema bestimmt werden
- Dann Hochhangeln für weiter entfernte Dominatoren

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Auch hier Berechnung in einem Pass möglich
 - Über Quelltext oder AST
- Darstellung: Dominatorbaum
 - Vater eines Blocks ist dessen unmittelbarer Dominator IDOM
- Idee hier: Sub-CFGs der Konstrukte
IF/WHILE/FOR/REPEAT/CASE
- ... haben **einen** Eintrittspunkt und **einen** Austrittspunkt
- Der Eintrittspunkt dominiert **alle** Knoten des Konstrukts
- Unmittelbare Dominatoren können immer nach dem gleichen Schema bestimmt werden
- Dann Hochhangeln für weiter entfernte Dominatoren

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

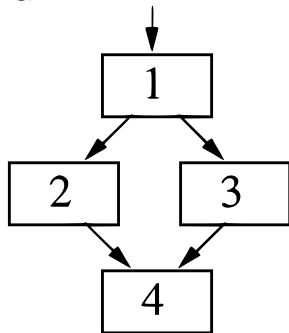
SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

CFG



Dominatorbaum

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

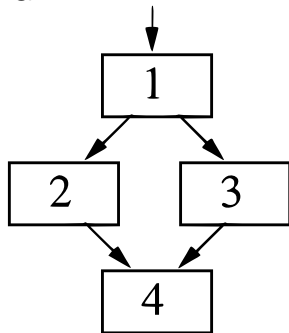
SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

CFG



Dominatorbaum

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

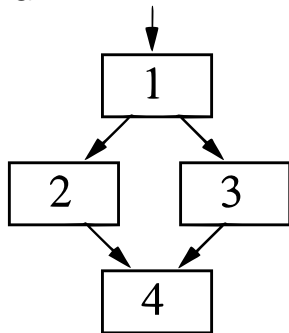
SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

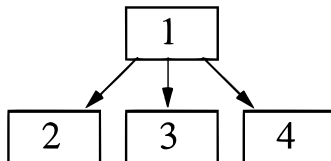
Rückwandlung

Dominatoren

CFG



Dominatorbaum



OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

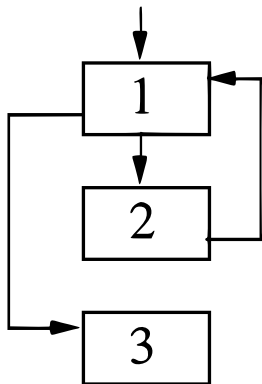
SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

CFG



Dominatorbaum

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

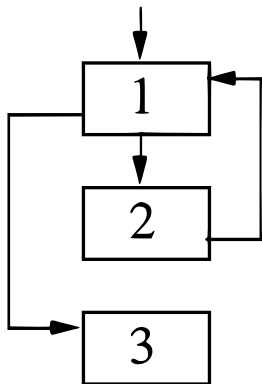
SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

CFG



Dominatorbaum

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

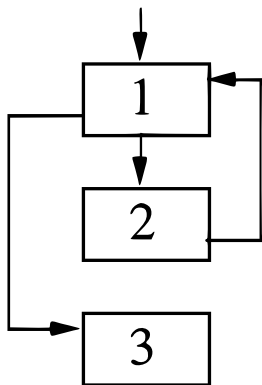
SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

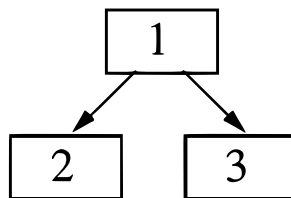
Rückwandlung

Dominatoren

CFG



Dominatorbaum



OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

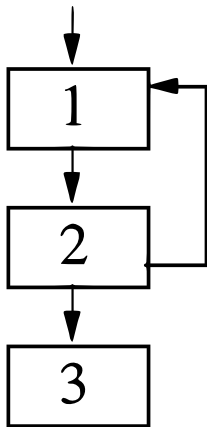
SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

CFG



Dominatorbaum

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

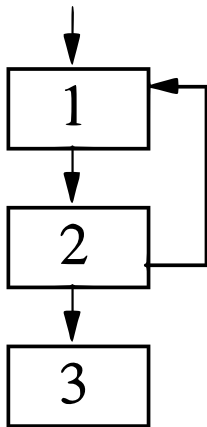
SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

CFG



Dominatorbaum

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

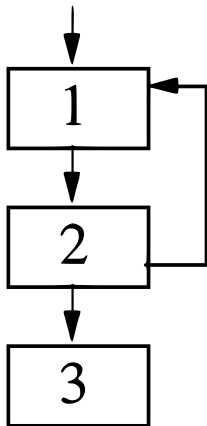
SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

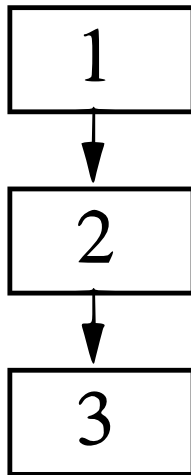
Rückwandlung

Dominatoren

CFG



Dominatorbaum



OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Kontrollflussgraphen
- Versionsnummern für Variablen
- Aufbau der SSA-Form
- Transformation in SSA-Form
- Allgemeiner Fall (aus dem Orbit)
- Sonderfall: Strukturierte Programmiersprachen
- Rückwandlung aus der SSA-Form (einfaches Verfahren!)
- Berechnung von Dominatoren

Aktuelle Aufgabe: Erzeuge aus Triangle AST CFG in SSA-Form nach Methode von Brandis und Mössenböck

- Kontrollflussgraphen
- Versionsnummern für Variablen
- Aufbau der SSA-Form
- Transformation in SSA-Form
- Allgemeiner Fall (aus dem Orbit)
- Sonderfall: Strukturierte Programmiersprachen
- Rückwandlung aus der SSA-Form (einfaches Verfahren!)
- Berechnung von Dominatoren

Aktuelle Aufgabe: Erzeuge aus Triangle AST CFG in SSA-Form nach Methode von Brandis und Mössenböck

OptComp

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA
Erzeugen

SSA für
strukturierte
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren