

# Compiler II

## Kontrollflussgraphen und Static Single Assignment-Form

Andreas Koch

FG Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen  
Informatik, TU Darmstadt

Sommersemester 2012

C2

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

C2

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

C2

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

C2

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.

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

C2

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.

C2

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
```

C2

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;
```

C2

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

C2

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**

C2

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Engl. *control flow graph* (CFG)

C2

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Engl. *control flow graph* (CFG)

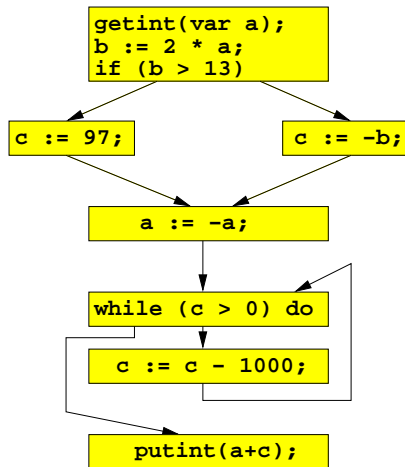
- **Knoten** sind Basisblöcke
- **Kanten** sind Sprünge zwischen den Blöcken
- Sprünge treten also nur am **Ende** eines Blocks auf!
- Sprungziel ist immer ein **Blockanfang**
  - In Triangle: if/then/else, while/do
    - Strukturierte Programmierung

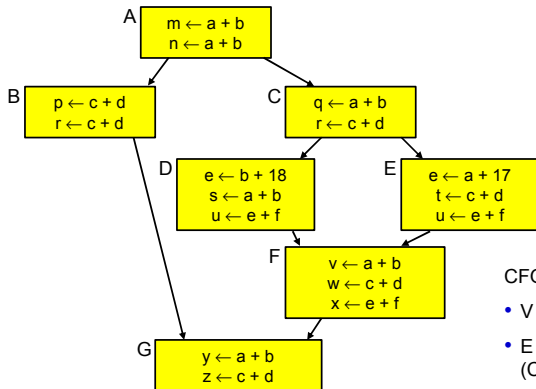
Engl. *control flow graph* (CFG)

- **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()



```
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  $G = (V, E)$

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA Erzeugen

SSA für strukturierte Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

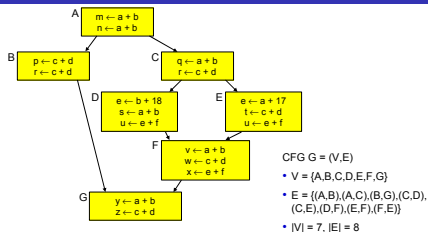
SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

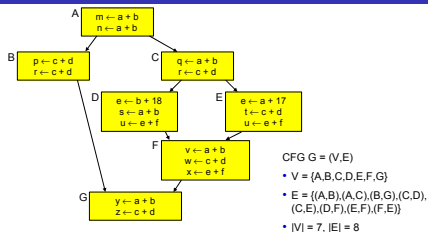
Dominatoren

# 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?”



- 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:  $x \gg x$

C2

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  $x \ggg y$ .

## 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  $x \ggg y$ .



## Dominatoren

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

C2

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  $y$ .

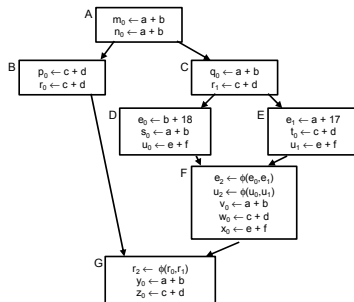
## Unmittelbarer Dominator (*immediate dominator*)

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

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

## Dominatormengen

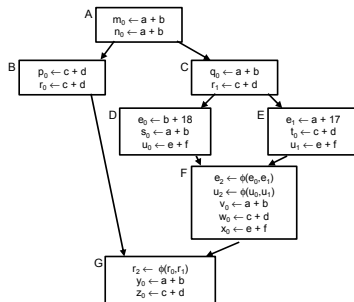
Block	Dom	IDom
A	A	-
B	A,B	A
C	A,C	A
D	A,C, D	C
E	A,C, E	C
F	A,C,F	C
G	A,G	A



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

## Dominatormengen

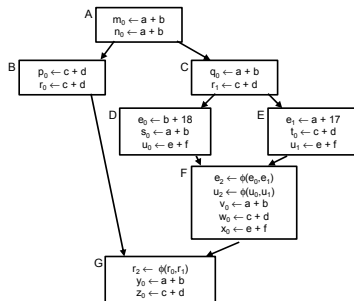
Block	Dom	IDom
A	A	-
B	A,B	A
C	A,C	A
D	A,C, D	C
E	A,C, E	C
F	A,C,F	C
G	A,G	A



- 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 ...

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

# Vorschau Redundanzeliminierung

C2

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;
```

C2

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;
```

C2

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;
```

C2

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Bisher: Zugriff auf Werte über Namen (von Variablen)

C2

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

$a \leftarrow x + y$

\*  $b \leftarrow x + y$

$a \leftarrow 17$

\*  $c \leftarrow x + y$

C2

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
```

## Value Numbering

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

C2

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
```

## Value Numbering

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

## Umgeschrieben

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

C2

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
```

## 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!

C2

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
```

## 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**)

C2

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
```

## 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 (**a<sup>3</sup>** nach **t<sup>3</sup>**)

C2

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
```

## 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 (**a<sup>3</sup>** nach **t<sup>3</sup>**)
  - **Vergebe eindeutige Namen für Zuweisungen**

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 (**a<sup>3</sup>** nach **t<sup>3</sup>**)
  - **Vergebe eindeutige Namen für Zuweisungen**
    - Kein Überschreiben mehr möglich

Durchnumerieren der LHS-Variablen  
(→ Variablenversionen)

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

**Redundanz**

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Durchnumerieren der LHS-Variablen  
( $\rightarrow$  Variablenversionen)

## Eingabe-Code

$$a_0 \leftarrow x_0 + y_0$$

$$* b_0 \leftarrow x_0 + y_0$$

$$a_1 \leftarrow 17$$

$$* c_0 \leftarrow x_0 + y_0$$

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Durchnumerieren der LHS-Variablen  
( $\rightarrow$  Variablenversionen)

## Eingabe-Code

$$a_0 \leftarrow x_0 + y_0$$

$$* b_0 \leftarrow x_0 + y_0$$

$$a_1 \leftarrow 17$$

$$* c_0 \leftarrow x_0 + y_0$$

## Value Numbering

$$a_0^3 \leftarrow x_0^1 + y_0^2$$

$$* b_0^3 \leftarrow x_0^1 + y_0^2$$

$$a_1^4 \leftarrow 17$$

$$* c_0^3 \leftarrow x_0^1 + y_0^2$$

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Durchnumerieren der LHS-Variablen  
( $\rightarrow$  Variablenversionen)

## Eingabe-Code

$a_0 \leftarrow x_0 + y_0$   
\*  $b_0 \leftarrow x_0 + y_0$   
 $a_1 \leftarrow 17$   
\*  $c_0 \leftarrow x_0 + y_0$

## Value Numbering

$a_0^3 \leftarrow x_0^1 + y_0^2$   
\*  $b_0^3 \leftarrow x_0^1 + y_0^2$   
 $a_1^4 \leftarrow 17$   
\*  $c_0^3 \leftarrow x_0^1 + y_0^2$

## Umgeschrieben

$a_0^3 \leftarrow x_0^1 + y_0^2$   
\*  $b_0^3 \leftarrow a_0^3$   
 $a_1^4 \leftarrow 17$   
\*  $c_0^3 \leftarrow a_0^3$

C2

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

C2

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

**SSA**

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

# Static Single Assignment-Form

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

- 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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

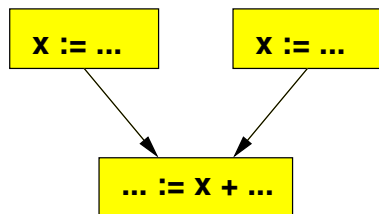
Dominatoren

```
// 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



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

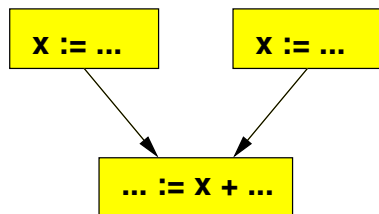
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

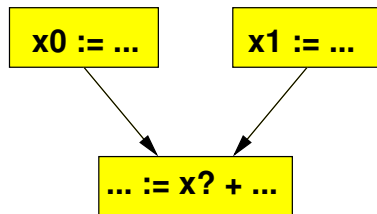
Dominatoren

- 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?

C2

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

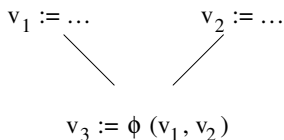
Rückwandlung

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

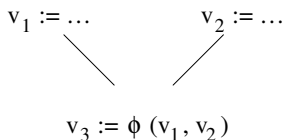
Rückwandlung

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

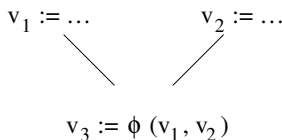
Rückwandlung

Dominatoren

Was passiert, wenn zwei Werte der gleichen Variable aufeinanderstoßen?

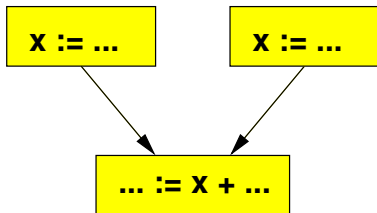
- An sogenanntem *merge* oder *join*-Punkten im Kontrollflußgraphen

➔ 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?

## Ursprünglicher CFG



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

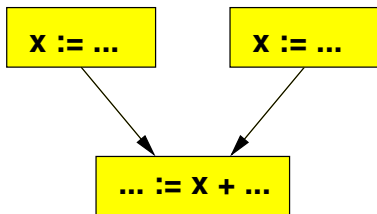
SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

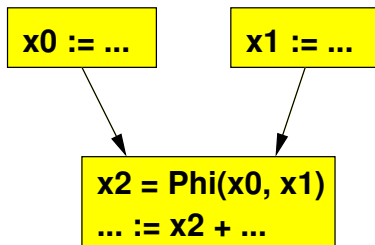
Rückwandlung

Dominatoren

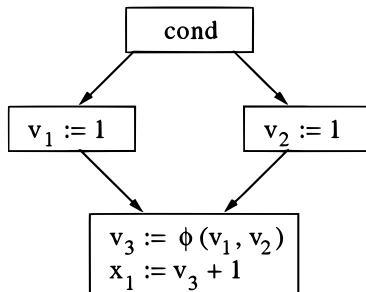
Ursprünglicher CFG



Auflösung durch  $\phi$ -Funktion



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



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

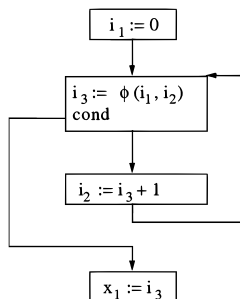
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

# Beispiel SSA-Form: WHILE-Statement

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



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

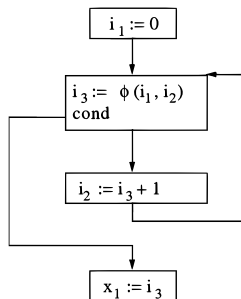
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren



```
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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Für jeden Wert genau eine Definition
- Jede Zuweisung legt neuen Wert an
- Kein Auslöschen (*kill*) von Werten möglich

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- 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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

## Drei Teilprobleme

- 1 Eindeutige Namen für Werte
  - Einfach durchnummerieren

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

## Drei Teilprobleme

- 1 Eindeutige Namen für Werte
  - Einfach durchnummerieren
- 2 Einfügen von Phi-Funktionen
  - Holzhammermethode
    - An jedem join-Point für **alle** Variablen Phi-Funktionen einfügen
  - Erzeugt **sehr viele** Phi-Funktionen, die meisten unnötig

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

## Drei Teilprobleme

- 1 Eindeutige Namen für Werte
  - Einfach durchnummerieren
- 2 Einfügen von Phi-Funktionen
  - 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

C2

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 entschieden werden muß
  - Aufeinandertreffen von **verschiedenen** Definitionen an Dominatorgrenzen
- Algorithmus nicht trivial ...



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

C2

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

C2

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

C2

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!

C2

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

C2

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

C2

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.

C2

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren



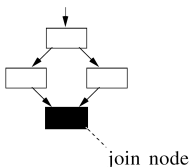
<i>Assignments (original form)</i>	<i>Assignments (SSA form)</i>	<i>Current values</i>	
		<i>v</i>	<i>x</i>
		$v_0$	$x_0$
$v := 0;$	$v_1 := 0;$	$v_1$	$x_0$
$x := v + 1;$	$x_1 := v_1 + 1;$	$v_1$	$x_1$
$v := 2$	$v_2 := 2$	$v_2$	$x_1$

- 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

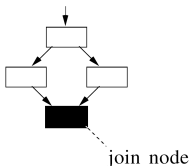
*IF, CASE*



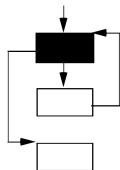
Bei strukturierten Programmiersprachen:

**Alle** Join-Knoten sind durch Konstrukte bereits vorgegeben

*IF, CASE*

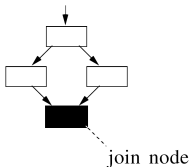


*WHILE, FOR*

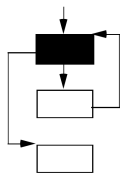


Bei strukturierten Programmiersprachen:  
**Alle** Join-Knoten sind durch Konstrukte bereits vorgegeben

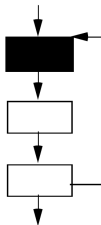
*IF, CASE*



*WHILE, FOR*



*REPEAT*



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

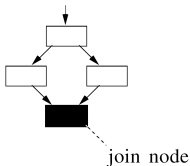
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

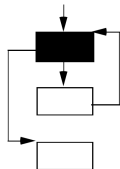
Dominatoren

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

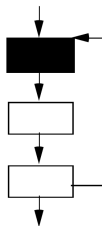
*IF, CASE*



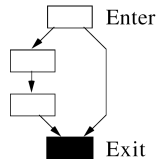
*WHILE, FOR*



*REPEAT*

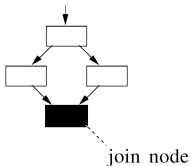


*procedure*

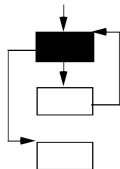


Bei strukturierten Programmiersprachen:  
**Alle** Join-Knoten sind durch Konstrukte bereits vorgegeben

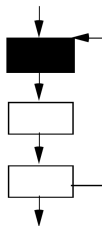
*IF, CASE*



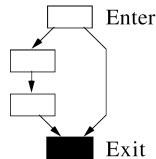
*WHILE, FOR*



*REPEAT*



*procedure*



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

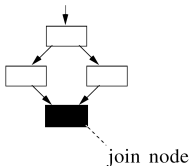
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

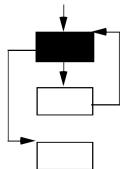
Dominatoren

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

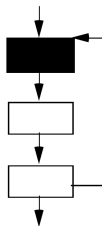
*IF, CASE*



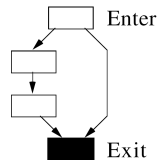
*WHILE, FOR*



*REPEAT*



*procedure*



Platzhalter  
(siehe später!)

C2

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 Join-Knoten ist **aktueller** Join-Knoten

C2

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 Join-Knoten ist **aktueller** Join-Knoten
- Erzeuge keine **speziellen** Knoten für Joins
- Verwende bisherige Blöcke weiter

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

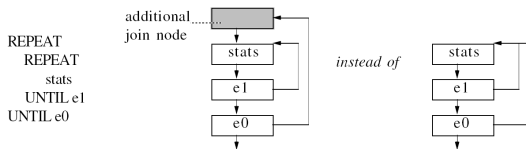
SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

## Ausnahme: Verschachtelte REPEAT-Anweisungen



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

C2

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)

C2

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

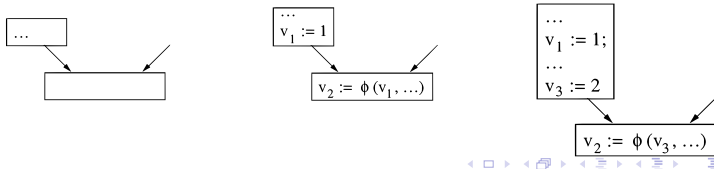
- **Jede** Zuweisung gehört zu einem Zweig des Kontrollflußgraphen
- Jede Zuweisung erzeugt einen neuen Wert
  - Ggf. auch bei Prozeduraufruf (**var**, global, nicht-lokal)
- Irgendwann trifft der Wert auf einen **Join-Knoten**
- Dort **Unterscheidung** zwischen allen Werten für diese Variable

➔ 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



- Phi-Operand entsprechend dem **bearbeiteten** Zweig
- ... wird jeweils auf **letzten aktuellen** Wert gesetzt

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Phi-Operand entsprechend dem **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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren



- Phi-Operand entsprechend dem **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**

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Phi-Operand entsprechend dem **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.

C2

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

C2

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  $v_i$  **vor** IF zusammen mit Phi-Funktion
  - Sonst: Setze Phi-Operand auf jeweils **aktuellen** Wert  $v_j$

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

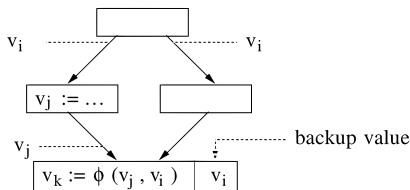
SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

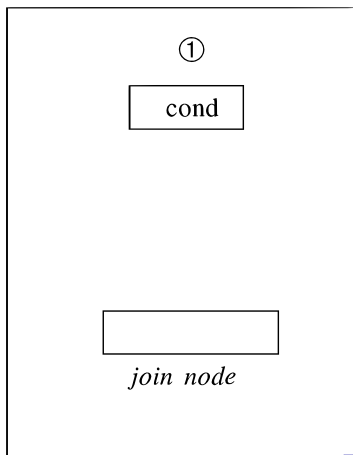
Rückwandlung

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  $v_i$  **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



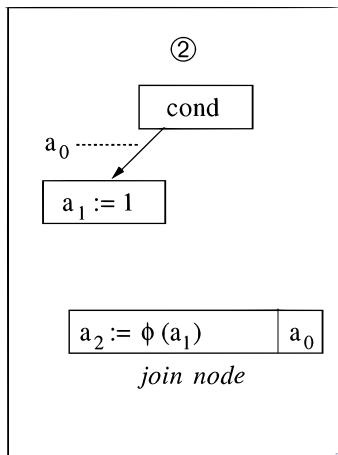
①  
IF cond THEN a := 1; b := a + 1

②

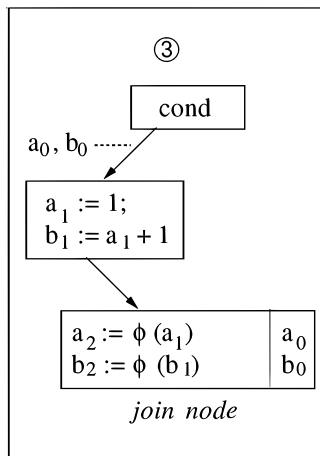
③  
ELSE a := a + 1; c := 2

④

⑤  
END



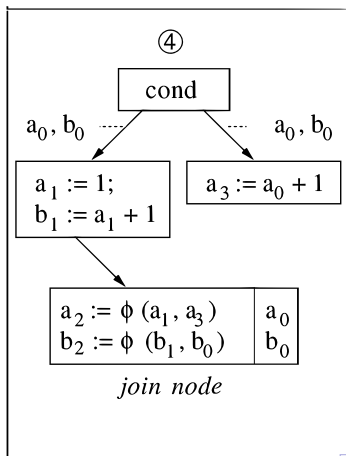
①            ②            ③                            ④            ⑤  
IF cond THEN a := 1; b := a + 1 ELSE a := a + 1; c := 2 END





# Phi-Knoten für IF-Anweisungen 2

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



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

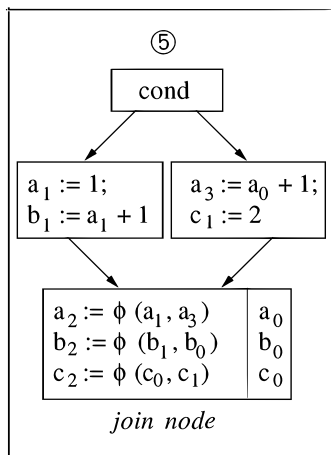
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

# 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



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Nach Abarbeiten von THEN und ELSE-Zweigen:

C2

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

C2

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

C2

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

C2

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

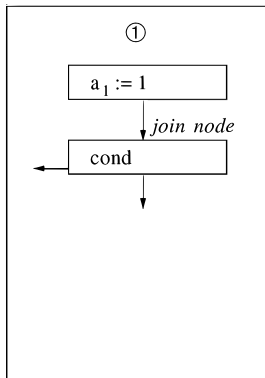
# Phi-Knoten für WHILE-Anweisungen 2

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

②  
↓  
b := a + 1;

③  
↓  
a := a \* 2

END



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

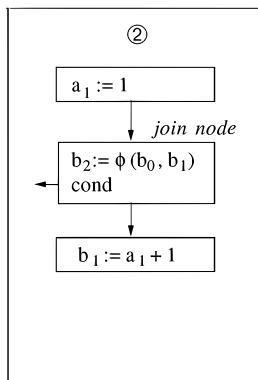
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

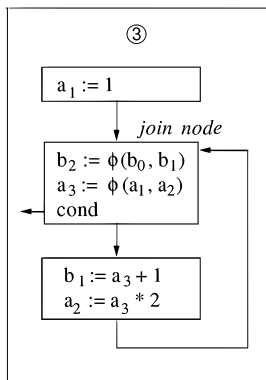


①  
a := 1; WHILE cond DO ② b := a + 1; a := a \* 2 ③ END



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  $a_3$ !

- Nach der Bearbeitung des Schleifenkörpers
- ... **Festlegen** der Phi-Zuweisungen im Join-Knoten

C2

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  $b_2$

C2

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- Sonderfall!
- Konstrukt wird **nicht** über Join-Knoten verlassen

C2

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

C2

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

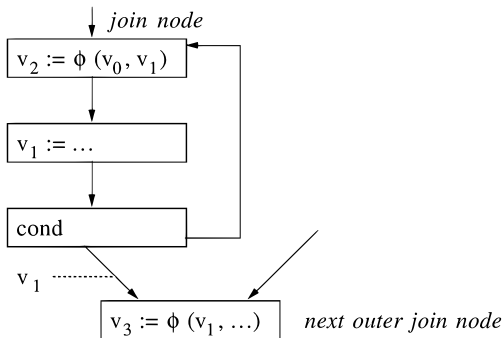
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren



REPEAT  
   $v := \dots$   
UNTIL cond



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

C2

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  $v_i := \dots$
  - $\dots$  die im  $i$ -ten, zum Block  $b$  führenden Zweig steht
  - $v_{old}$  ist aktueller Wert **vor** dieser Zuweisung
  - Wird als Sicherheitskopie abgespeichert

C2

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

```
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;
```

C2

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, l, val,  $v_{old}$ )  
  END  
END CommitPhi;
```

C2

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, l, val,  $v_{old}$ )  
  END  
END CommitPhi;
```

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

C2

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA 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)

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA 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

C2

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  $g$

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

- $\{f3, g3\} = p() \{f2, g2\}$  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 :-)

C2

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

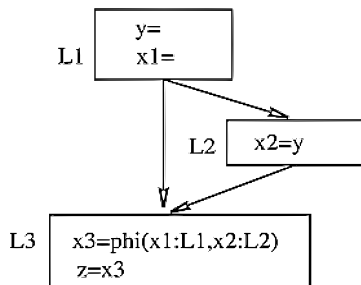
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

Naive Idee: Phi einfach löschen und Wertnummern entfernen

Vorher:



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

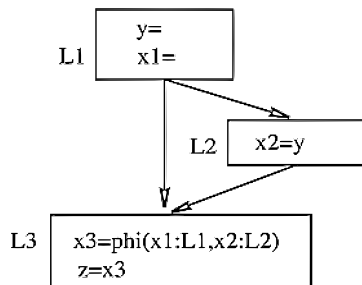
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

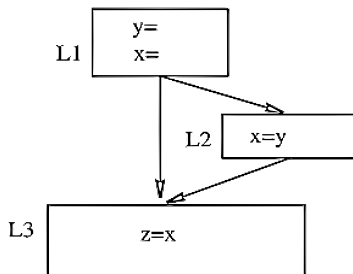
Dominatoren

Naive Idee: Phi einfach löschen und Wertnummern entfernen

Vorher:



Nachher:



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

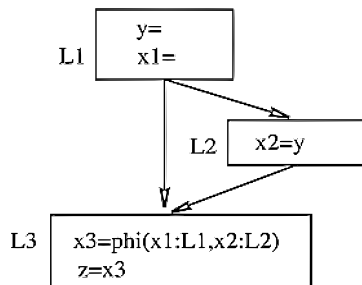
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

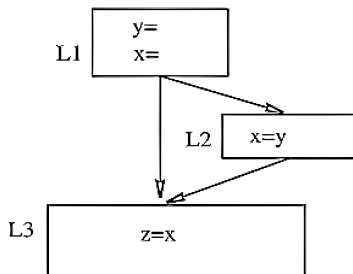
Dominatoren

Naive Idee: Phi einfach löschen und Wertnummern entfernen

Vorher:



Nachher:



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

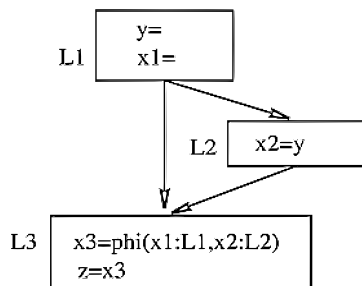
Rückwandlung

Dominatoren

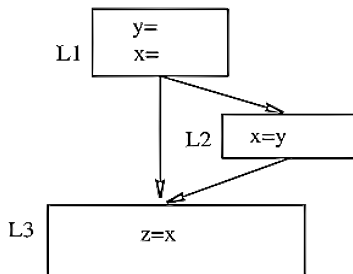


Naive Idee: Phi einfach löschen und Wertnummern entfernen

Vorher:



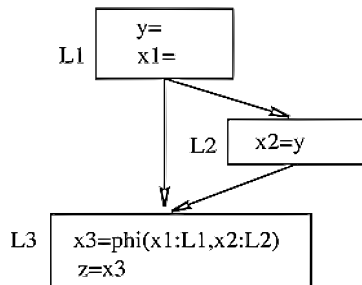
Nachher:



... so weit, so gut.

Jetzt Annahme: Einfache Optimierung hat stattgefunden

Vor Copy-Propagation



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA Erzeugen

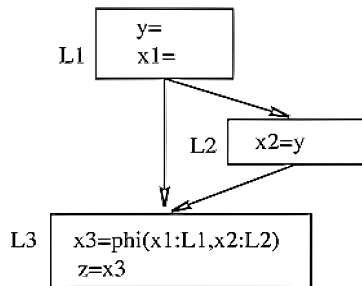
SSA für strukturierte Sprachen

Rückwandlung

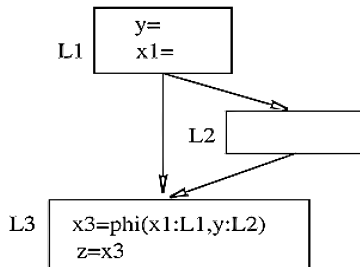
Dominatoren

Jetzt Annahme: Einfache Optimierung hat stattgefunden

Vor Copy-Propagation



Nach Copy-Propagation



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

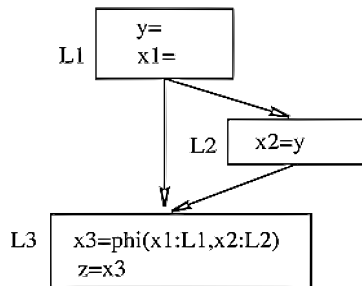
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

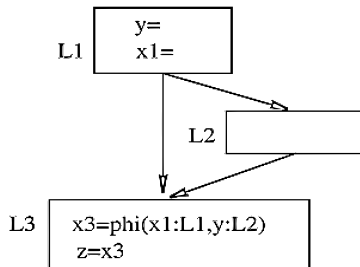
Dominatoren

Jetzt Annahme: Einfache Optimierung hat stattgefunden

Vor Copy-Propagation



Nach Copy-Propagation



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

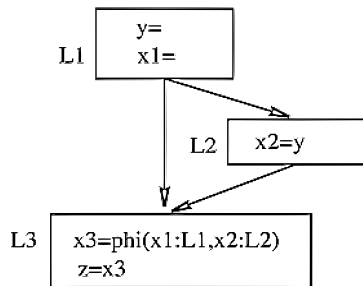
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

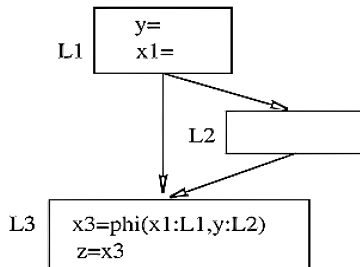
Dominatoren

Jetzt Annahme: Einfache Optimierung hat stattgefunden

Vor Copy-Propagation



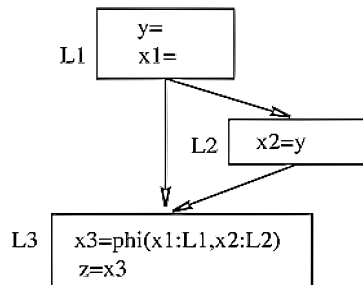
Nach Copy-Propagation



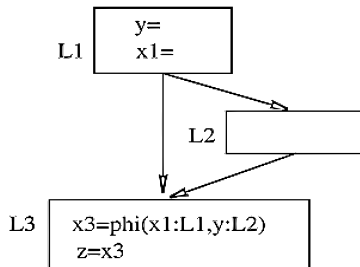
Rückwandlung durch einfaches Löschen ...

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?

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA Erzeugen

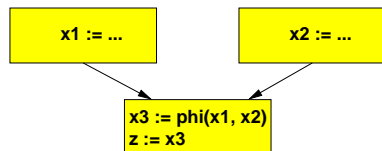
SSA für strukturierte Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

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

Vorher



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA Erzeugen

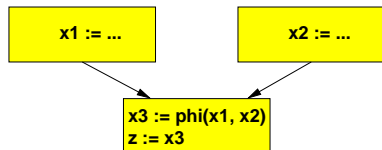
SSA für strukturierte Sprachen

Rückwandlung

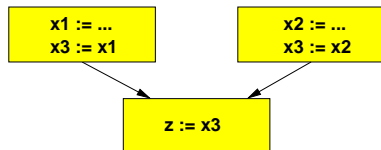
Dominatoren

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

Vorher



Nachher



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

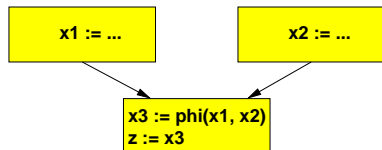
Rückwandlung

Dominatoren

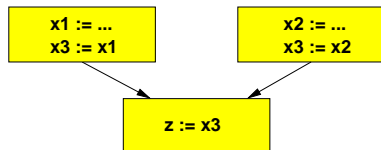


Besserer Ansatz: Füge Kopieroperationen in Vorgängerblöcke der Phi-Funktion ein

Vorher



Nachher



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

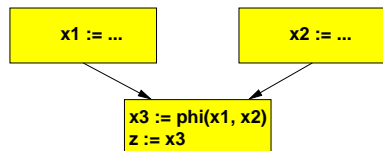
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

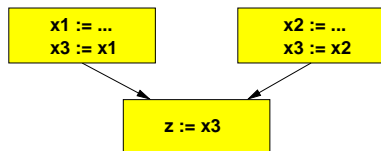
Dominatoren

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

Vorher



Nachher



Zielführender als naives Löschen!

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

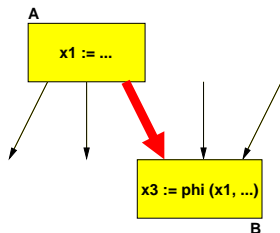
Rückwandlung

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?

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

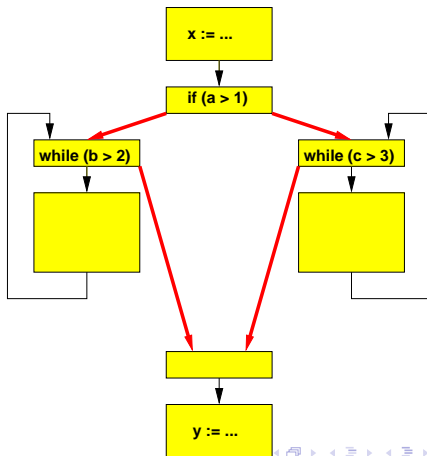
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

**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 := ...
```



## Problem bei kritischen Kanten

- Wo Kopierzuweisungen von A bei Auflösen der Phi-Funktion in B unterbringen?

C2

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!

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

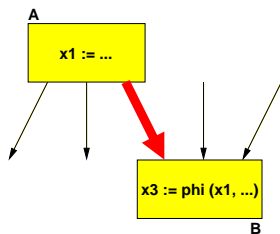
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

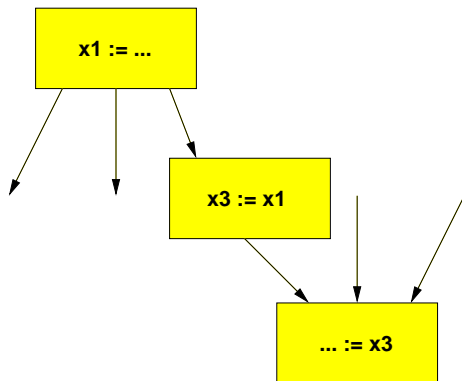
## Problem bei kritischen Kanten

- 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!

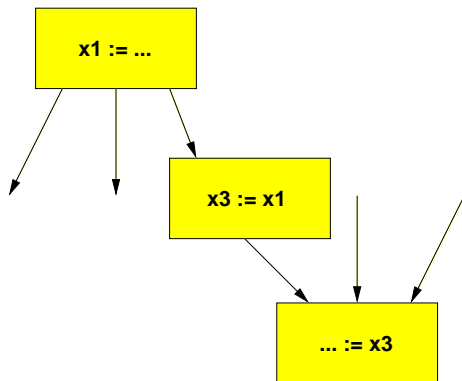




Einfache Lösung:  
Kante aufspalten und neuen Block einfügen!



Einfache Lösung:  
Kante aufspalten und neuen Block einfügen!



Funktioniert immer!

Nachteil: Verlangsamt möglicherweise Programm

- Beispiel: Zusätzliche Sprunganweisung bei REPEAT/UNTIL

C2

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

C2

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!

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

C2

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

C2

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!

C2

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

C2

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
- Dominatorbaum
  - Vater eines Blocks ist dessen unmittelbarer Dominator  
IDOM

C2

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
- 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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

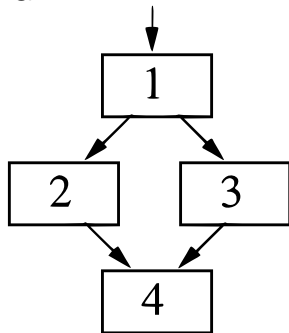
SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

CFG



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

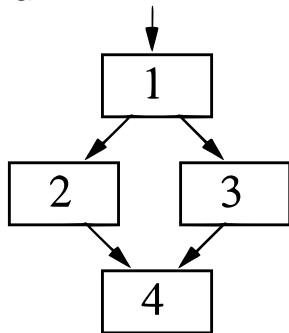
SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

CFG



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

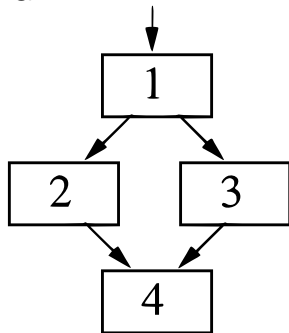
SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

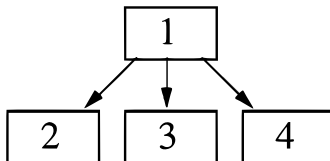
Rückwandlung

Dominatoren

CFG



Dominatorbaum



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

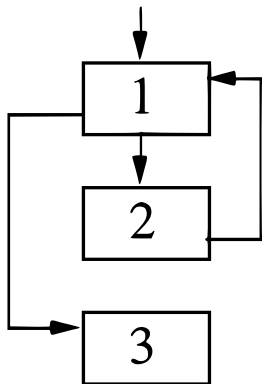
SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

CFG



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

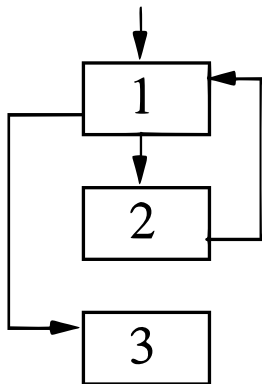
SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren



CFG



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

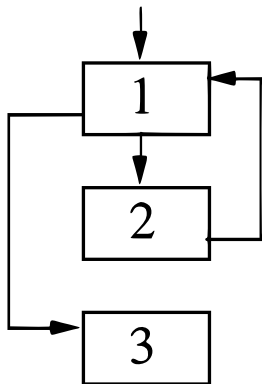
SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

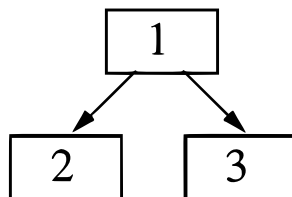
Rückwandlung

Dominatoren

CFG



Dominatorbaum



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

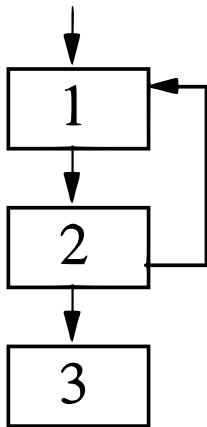
SSA Erzeugen

SSA für strukturierte Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

CFG



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

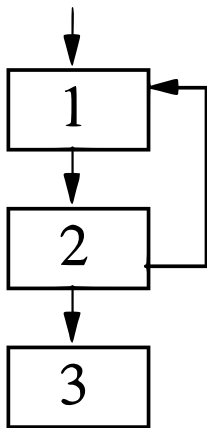
SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren

CFG



C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

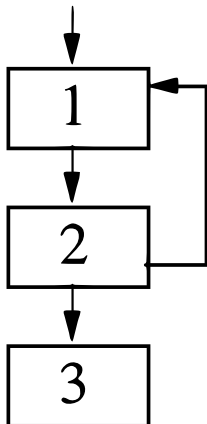
SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

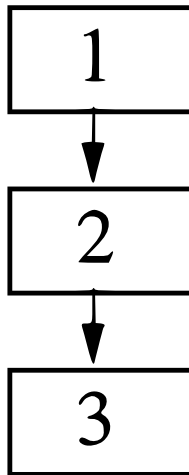
Rückwandlung

Dominatoren

CFG



Dominatorbaum



C2

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

C2

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

C2

A. Koch

Organisatorisch

CFGs

Dominanz

Redundanz

SSA

SSA  
Erzeugen

SSA für  
strukturierte  
Sprachen

Rückwandlung

Dominatoren