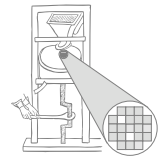


Optimierende Compiler

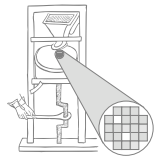
7. Static Single Assignment-Form

Andreas Koch

FG Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen
Informatik, TU Darmstadt

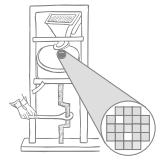
Sommersemester 2006

Organisatorisches



- Kurze Unterbrechung zur Datenflußanalyse
  - Stoff von letzter Woche (globale Redundanzeliminierung)
- Stoff der nächsten Aufgabe
  - Aber nur noch auf Untermenge von Triangle
  - Nur noch Hauptprogramm
  - Nur noch skalare Variablen
- Warum?
  - Behandlung aller Sonderfälle sehr aufwendig
  - . . . bei minimalem Lerneffekt
- Bei Interesse
  - Alle Details in Papers nachlesen

Relevante Papers 1



Ab jetzt Auszüge aus:

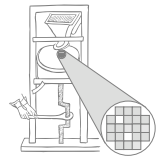
Single-Pass Generation of Static Single Assignment Form for Structured Languages

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

Relevante Papers 2



A. Koch

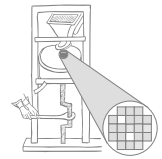
Practical Improvements to the Construction and Destruction of Static Single Assignment Form

BRIGGS, COOPER, HARVEY, SIMPSON

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

- Umwandeln aus der SSA-Form ($\rightarrow$ nächste Woche)
- Recht gut zu lesen

Relevante Papers 1



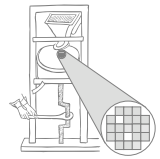
Efficiently computing static single assignment form and the control dependence graph

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

Static Single Assignment-Form

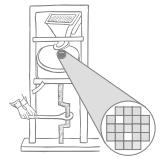


A. Koch

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

- Nur noch genau eine Zuweisung an jede Variable
  - Erzeuge eindeutige Namen für gleiche Zuweisungsziele
  - Numerierte Variablen sind Wertinstanzen der ursprünglichen Variablen
  - Kurz als Werte bezeichnet

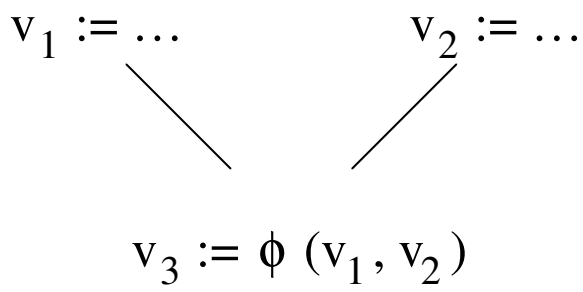
Problem: Kontrollfluß



Was passiert, wenn zwei Werte der gleichen Variable aufeinanderstoßen?

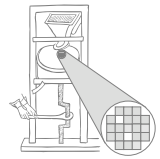
- An sogenanntem *merge* oder *join*-Punkten im Kontrollflußgraphen

➥Auflösung über Phi-Funktion



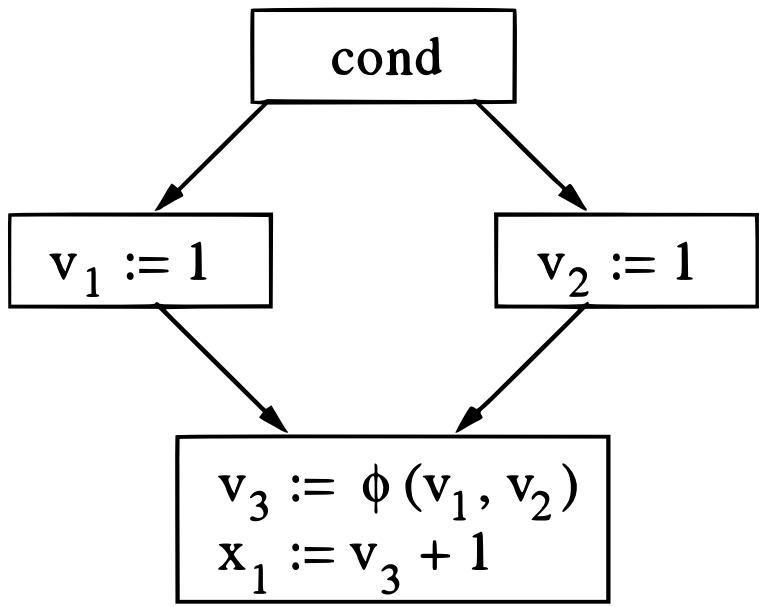
- Für jeden Kontrollzweig einen Parameter
  - Den jeweiligen Wert
- Liefert als Ergebnis den Wert entsprechend der genommenen Kante
  - Von welchem Zweig kamen wir?
  - Welcher Wert ist also der richtige?

Beispiel SSA-Form: IF-Statement

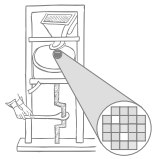


A. Koch

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

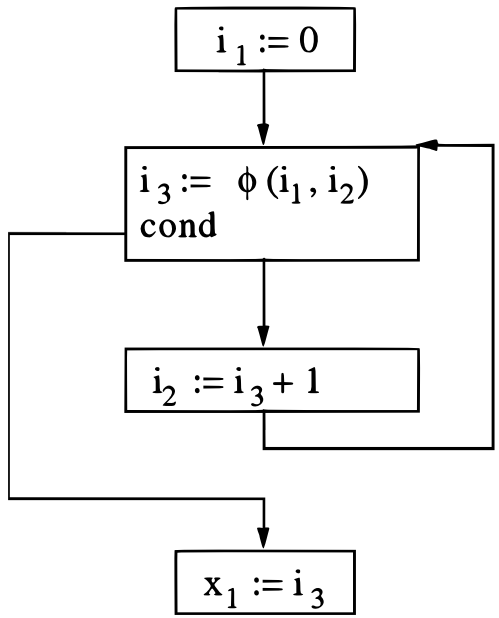


Beispiel SSA-Form: WHILE-Statement



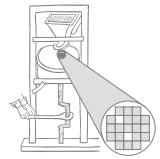
A. Koch

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



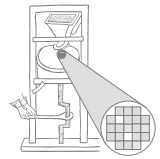
Beachte: Entscheidung, ob Wert von vor oder nach dem Schleifenkörper genommen wird.

Vorteile SSA



- 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

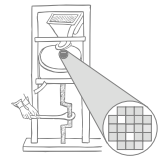
Transformation in SSA-Form 1



Drei Teilprobleme

1. Eindeutige Namen für Werte
   - Einfach durchnumerieren
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

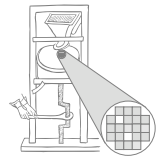
Transformation in SSA-Form 2



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 . . .

Sonderfall: Strukturierte Programmiersprachen



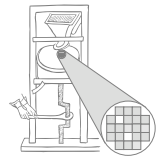
- Keine GOTOs
- Nur strukturierte Anweisungen
  - IF
  - CASE
  - WHILE
  - REPEAT
  - FOR

➥Viel einfacheres und schnelleres Vorgehen möglich

➥Brandis/Mössenböck 1994

Unser Ansatz für ein Triangle-Subset!

Einschränkungen



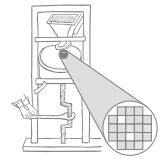
Aus Zeitgründen in OC06 keine Behandlung von

- Arrays
- Records
- Prozeduraufrufen
- Verschachtelten Geltungsbereichen

Alles handhabbar!
. . . aber aufwändig und lenkt von Kernideen ab.

Bei Interesse: Cytron et al., Abschnitt 3.1

Benennen von Werten in Basisblöcken

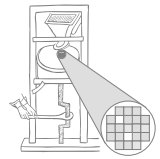


A. Koch

Assignments (original form)	*Assignments (SSA form)*	*Current values* v	x
		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

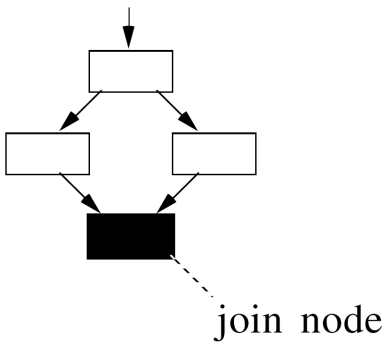
Join-Knoten 1



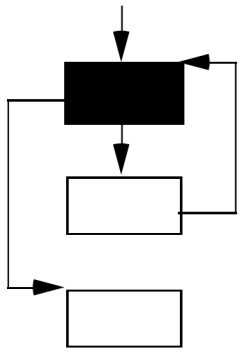
A. Koch

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

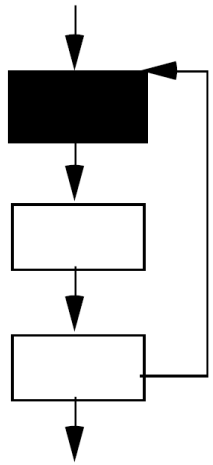
IF, CASE



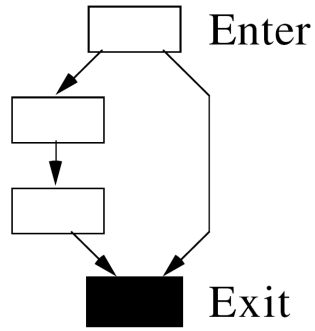
WHILE, FOR



REPEAT

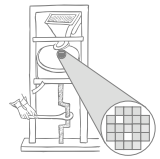


procedure



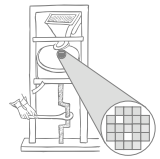
Platzhalter
(siehe später!)

Join-Knoten 2



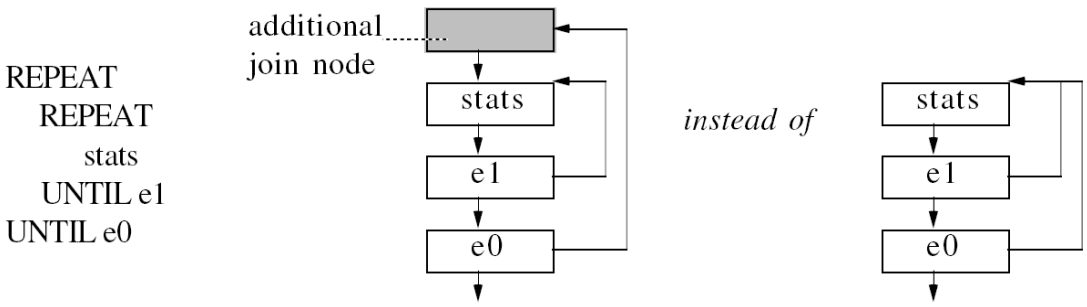
- Strukturen können verschachtelt sein
  - Bearbeite von innen nach aussen
  - Innerster Join-Knoten ist aktueller Join-Knoten
- Erzeuge keine speziellen Knoten für Joins
- Verwende bisherige Blöcke weiter

Join-Knoten 3



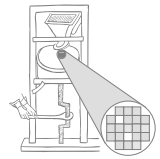
A. Koch

Ausnahme: Verschachtelte REPEAT-Anweisungen



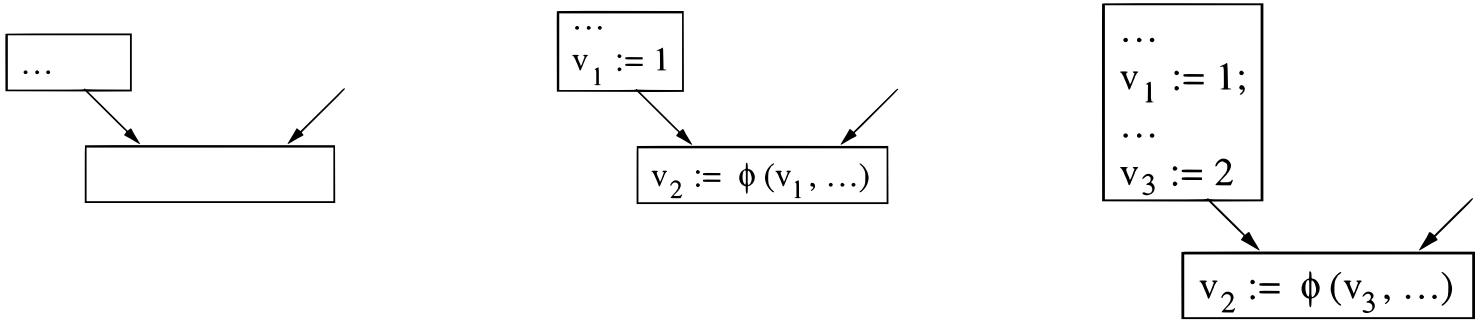
- Für spätere Optimierung hilfreich
- Sonst kein Ziel für aus der inneren Schleife bewegte Berechnungen

Phi-Knoten Erzeugen 1

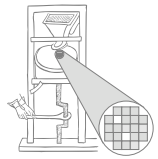


- Jede Zuweisung gehört zu einem Zweig des Kontrollflußgraphen
- Jede Zuweisung erzeugt einen neuen Wert
- Irgendwann trifft der Wert auf einen Join-Knoten
- Hier Unterscheidung zwischen allen Werten für diese Variable

➥Jede Zuweisung erzeugt oder modifiziert Phi-Funktion für Variable



Phi-Knoten Erzeugen 2

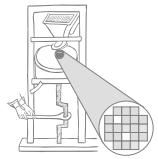


- Phi-Operand entsprechend dem bearbeiteten Zweig
- . . . wird jeweils auf letzten aktuellen Wert gesetzt
- Phi-Funktionen treten selber in Zuweisungen auf
- Erzeugen also selber neue Werte
- Führen zu weiteren Phi-Funktionen in nächstäußerem Join-Knoten
- Ende bei Erreichen des Exit-Knotens

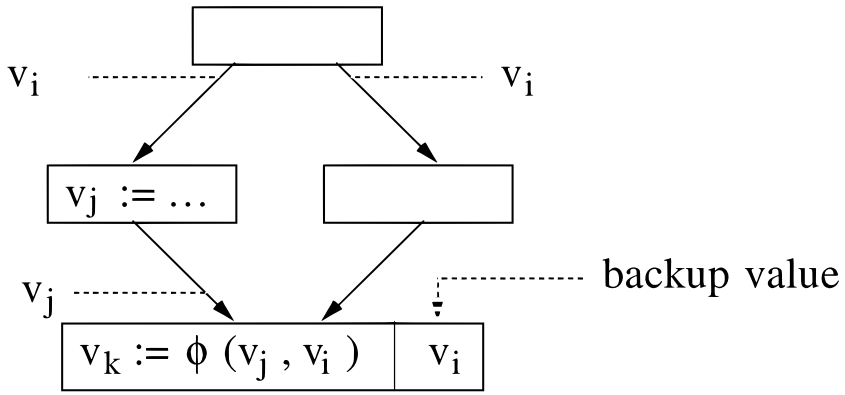
Vorgehen: Erzeugen des CFGs in SSA-Form durch Traversieren des ASTs

Könnte aber auch direkt beim Parsen geschehen.

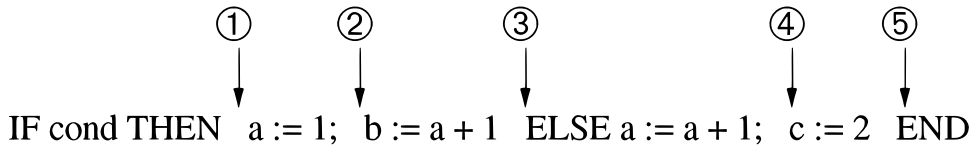
Phi-Knoten für IF-Anweisungen 1



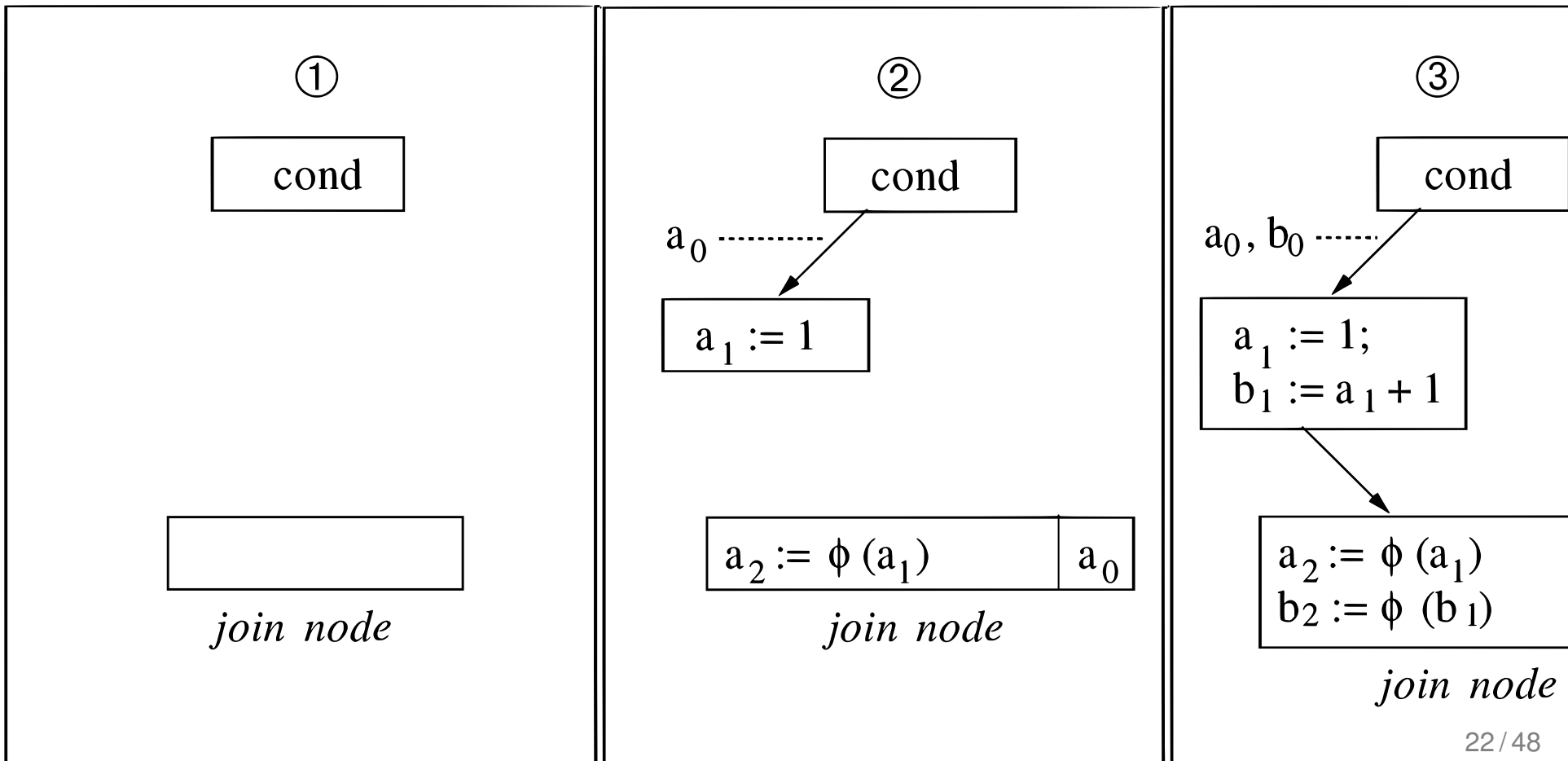
1. Bei Erreichen von IF: Erzeuge neuen Join-Knoten
   - Wird Phi-Funktionen aus THEN/ELSE enthalten
   - Wird später in den CFG eingehängt
2. Bearbeite THEN-Zweig, für eine Zuweisung an v
   - 1. Mal: Lege leere Phi-Funktion (Identität) für v an, sichere Wert v_i vor IF zusammen mit Phi-Funktion
   - 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



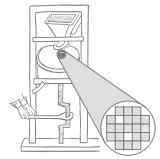
Phi-Knoten für IF-Anweisungen 2



A. Koch



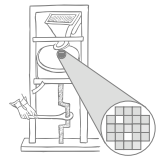
Phi-Knoten für IF-Anweisungen 3



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

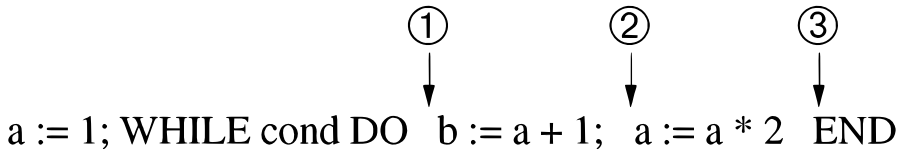
- Join-Block selber bearbeiten
- Werte Zuweisungen von Phi-Funktionen aus
- Trage neue Phi-Funktionen in nächstäußeren Join-Block ein
  - Join-Block der umschließenden Kontrollstruktur
- Trage LHS der Phi-Zuweisungen als aktuelle Werte der Variablen ein
- Hänge aktuellen Join-Block in CFG ein

Phi-Knoten in WHILE-Anweisungen 1

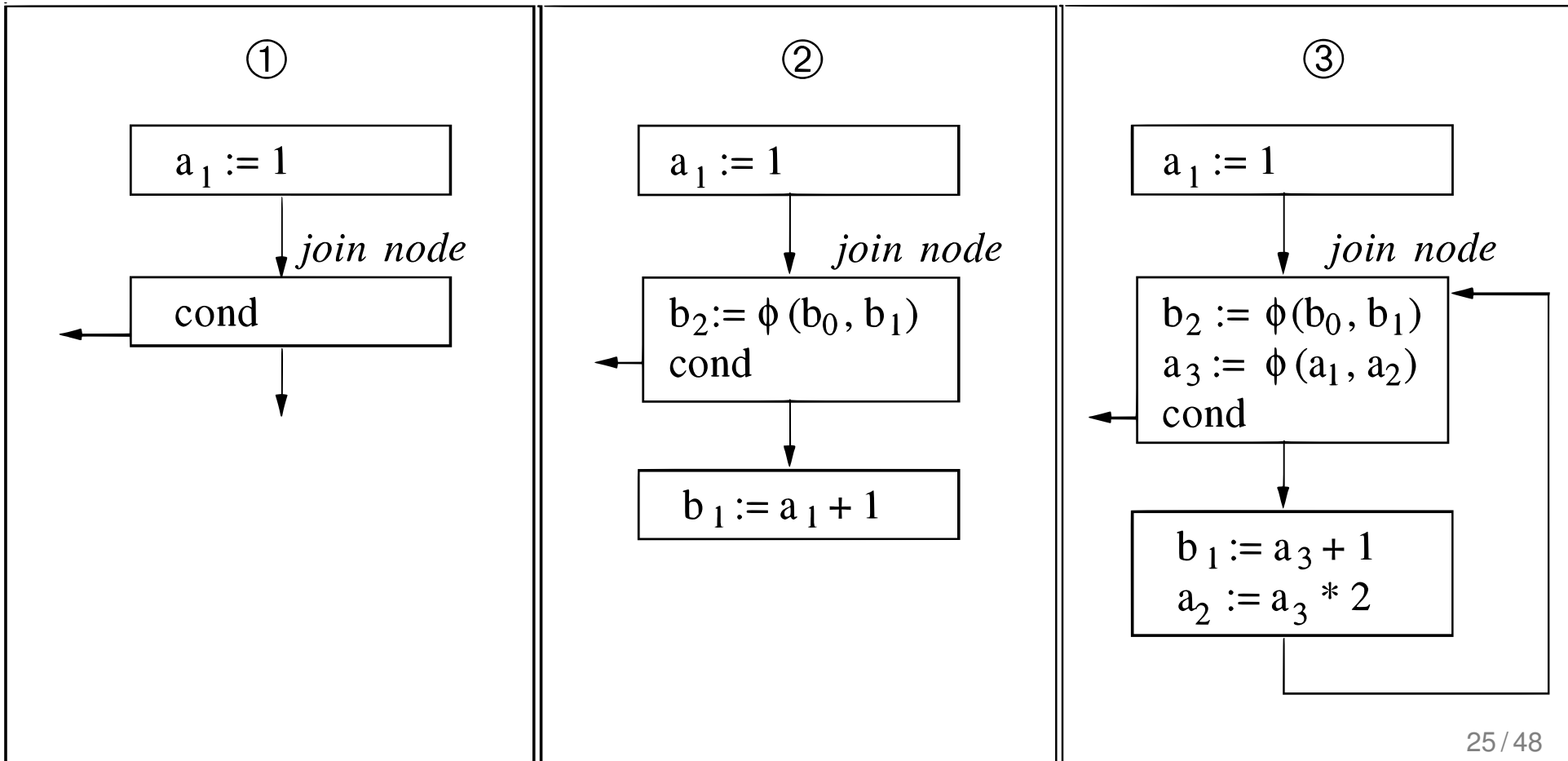


- Join-Knoten von WHILE-Anweisung ist Kopfknoten
  - Zusammentreffen von Schleifeneintritt und Rückwärtskante im CFG
- Bearbeitung des Schleifenkörpers analog zur IF-Anweisung, aber
- Bei Eintragen einer neuen Phi-Funktion in Kopfknoten
- . . . entsteht neuer aktueller Wert
- Alle Benutzungen der Variable 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

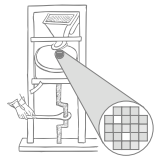
Phi-Knoten für WHILE-Anweisungen 2



A. Koch



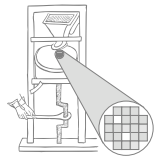
Phi-Knoten für WHILE-Anweisungen 3



- 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

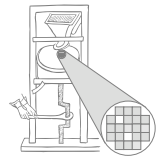
CASE und FOR würden analog zu IF und WHILE bearbeitet

Phi-Knoten für REPEAT-Anweisungen 1



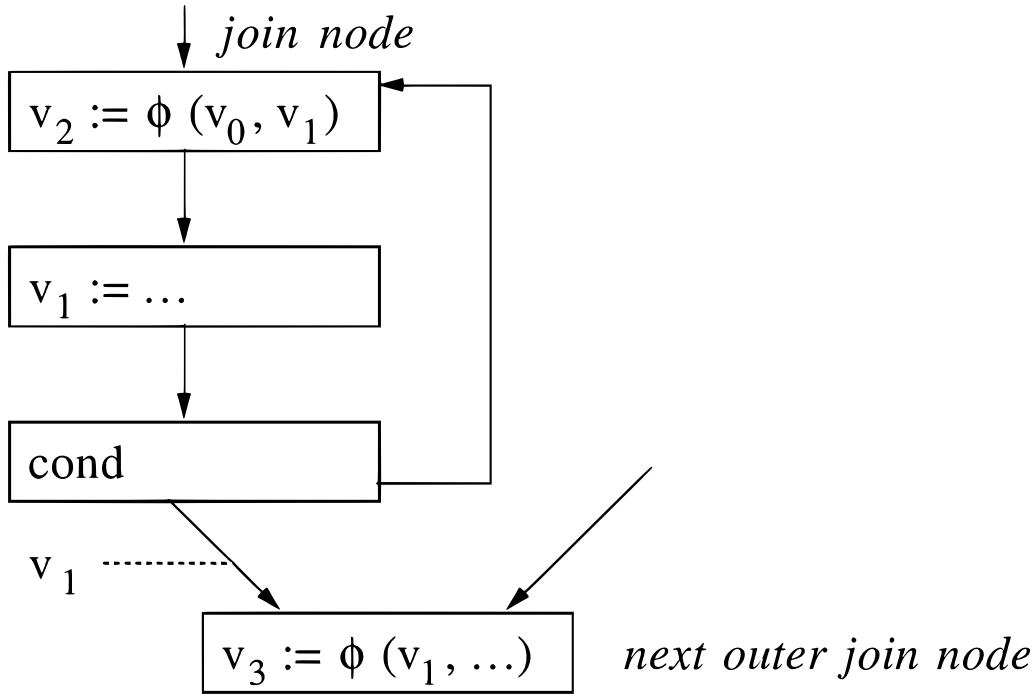
- Sonderfall!
- Konstrukt wird nicht über Join-Knoten verlassen
- Analog zu WHILE: Join-Knoten ist Schleifenkopf
  - Hier auch Phi-Zuweisungen untergebracht
- Aber Unterschied beim Festlegen des Join-Blocks!
- Aktueller Wert ist nicht Ziel der Phi-Zuweisung (wie bei WHILE)
- . . . sondern Wert zugeordnet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

Phi-Knoten für REPEAT-Anweisungen 2



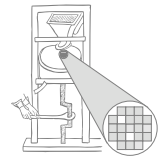
A. Koch

```
REPEAT
    v := ...
UNTIL cond
```



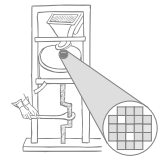
Beachte: Weiterverwendung von v_1, nicht von v_2

Kernalgorithmus



- InsertPhi
  - Erzeugt neue oder modifiziert bestehende Phi-Zuweisung in Join-Knoten b
  - Aufruf: InsertPhi(b, i, v_i, v_{old})
    - Zur Bearbeitung von Zuweisung $v_i := \ldots$
    - $\ldots$ 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

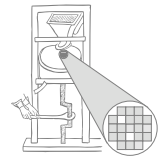
InsertPhi



A. Koch

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

CommitPhi



A. Koch

PROCEDURE CommitPhi (b: Node);

BEGIN

FOR *all ϕ-instructions "$v_i := \phi\ (v_0, \ldots, v_n) / v_{old}$" 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;

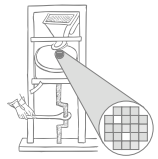
InsertPhi(B, I, val, v_{old})

END

END CommitPhi;

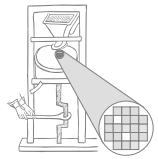
Hier Annahme: Letzter Zweig n ist Rückwärtskante der REPEAT-Schleife

Hinweise



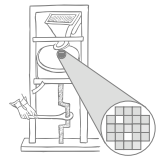
- Hier nicht gezeigt: Rücksetzen auf v_{old} bei Bearbeitung des nächsten Zweiges
- Variablen in Triangle durch Verweise auf Definitionen kennzeichnen
- Keine String-Vergleiche mehr nötig!
- Werte sind dann Tupel (Definition, Versionsnummer)

Berechnung von Dominatoren 1



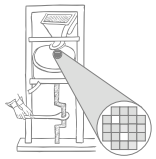
- Muß bei Cytron et al. bei der SSA-Umformung gemacht werden
- War hier nicht nötig
- Dominatoren sind aber nach wie vor nützlich
- Wie sind sie hier berechenbar?
- Viel einfacher als im allgemeinen Fall!

Berechnung von Dominatoren 2

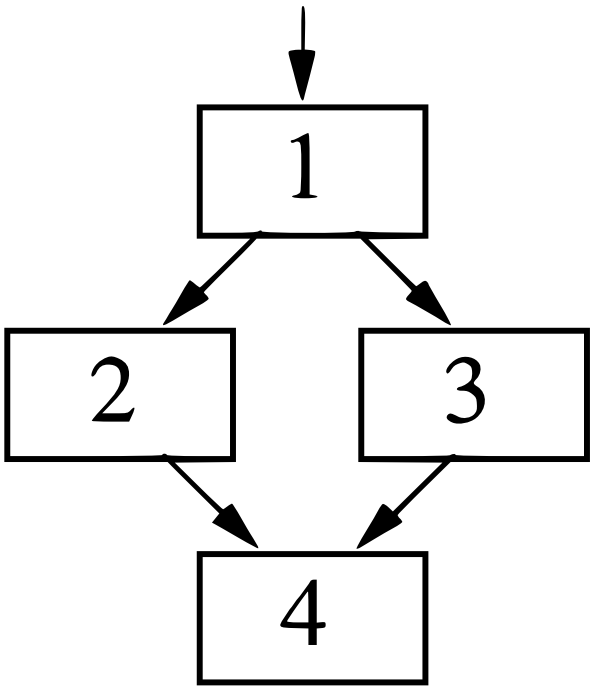


- Auch hier Berechnung in einem Pass möglich
  - Über Quelltext oder AST
- Erinnerung: Dominatorbaum
  - Vater eines Blocks ist dessen unmittelbarer Dominator IDOM
- Idee hier: Sub-CFGs der Konstrukte IF/WHILE/FOR/REPEAT/CASE
- . . . haben einen Eintrittspunkt und einen Austrittspunkt
- Der Eintrittspunkt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

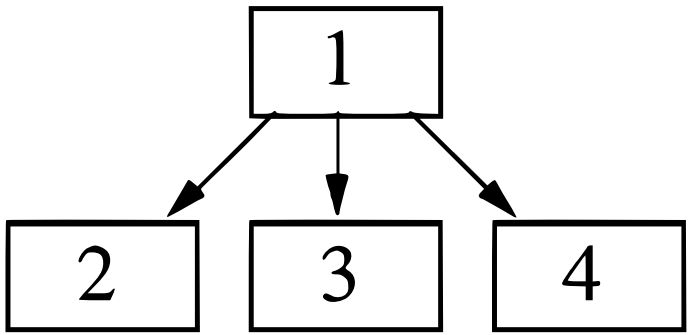
Berechnung von Dominatoren für IF, CASE



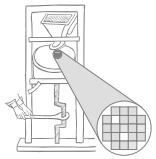
CFG



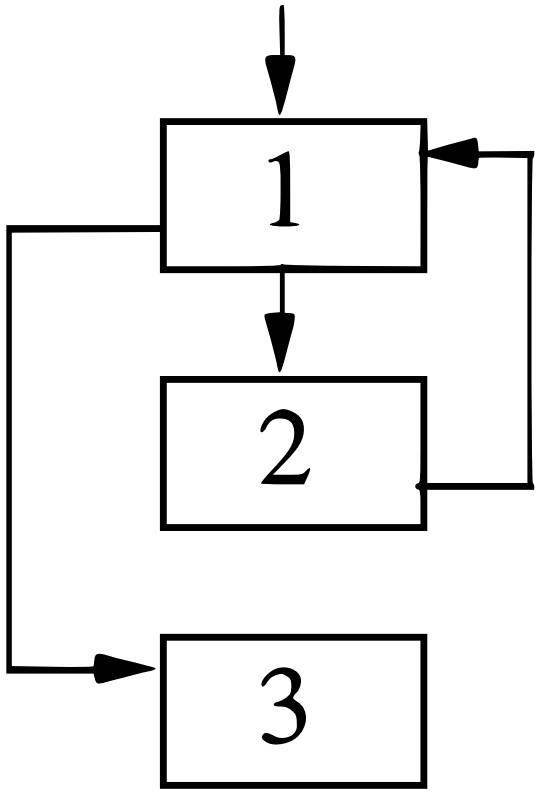
Dominatorbaum



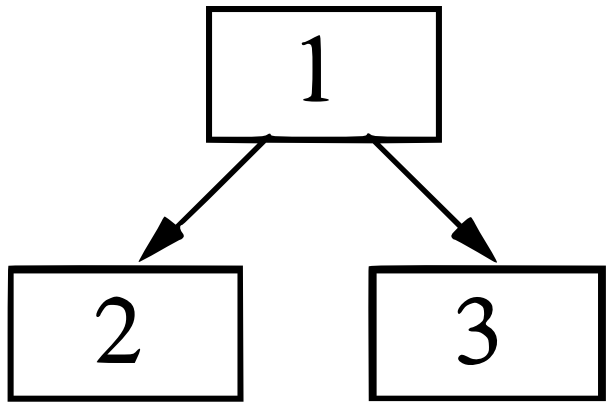
Berechnung von Dominatoren für WHILE, FOR



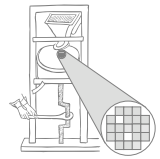
CFG



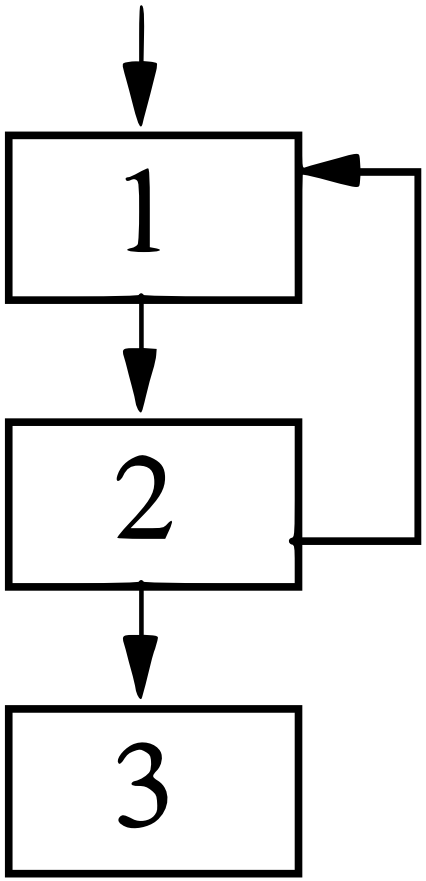
Dominatorbaum



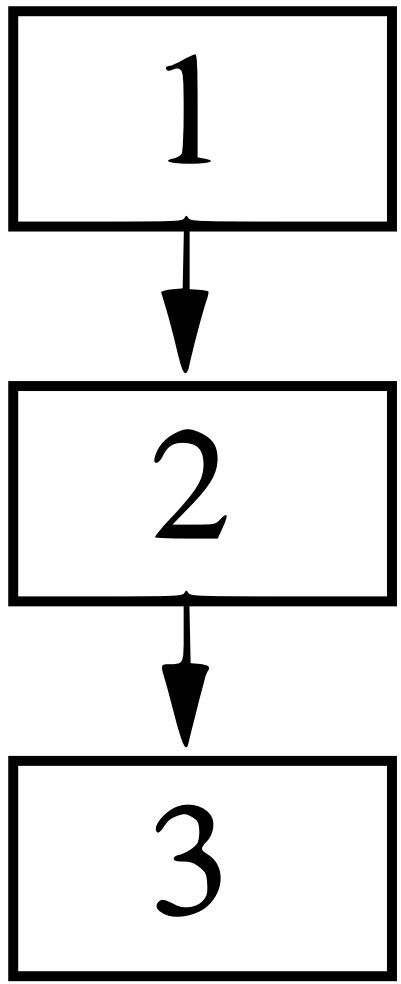
Berechnung von Dominatoren für REPEAT



CFG

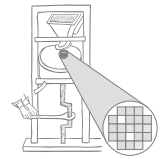


Dominatorbaum



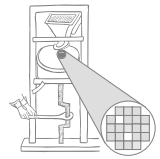
A. Koch

Rückwandlung aus der SSA-Form 1



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

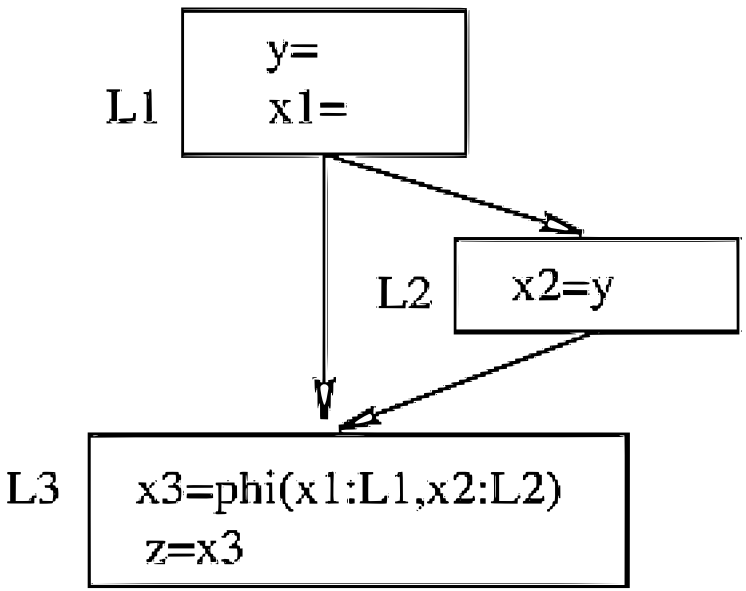
Rückwandlung aus SSA-Form 2



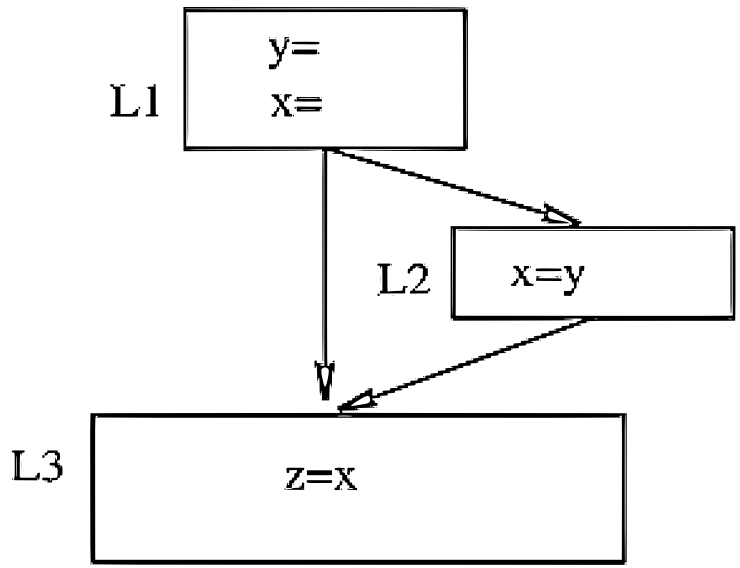
Naive Idee: Phi einfach löschen und Wertnummern entfernen

A. Koch

Vorher:

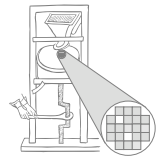


Nachher:



. . . so weit, so gut.

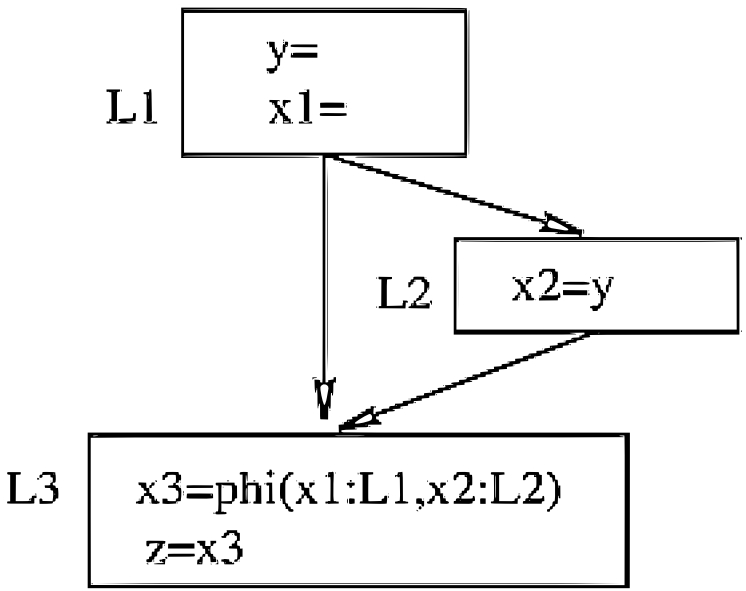
Rückwandlung aus SSA-Form 3



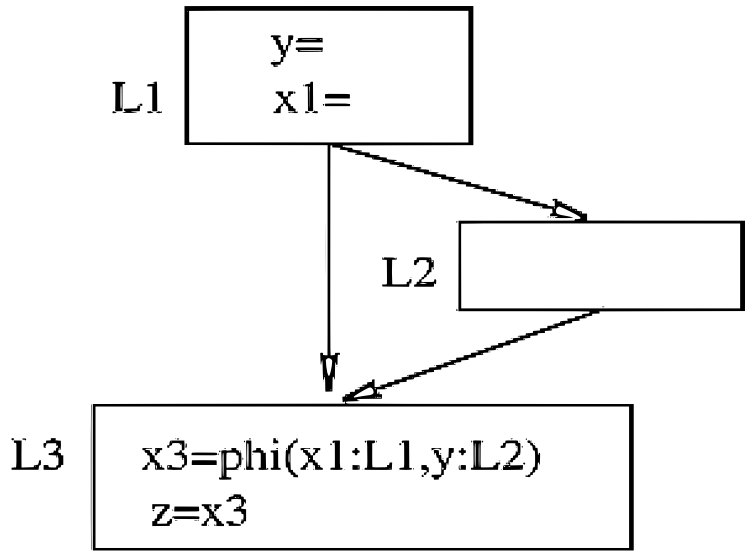
Jetzt Annahme: Einfache Optimierung hat stattgefunden

A. Koch

Vor Copy-Propagation



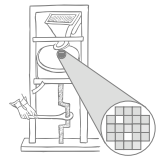
Nach Copy-Propagation



Rückwandlung durch einfaches Löschen . . . geht schief:

- Phi-Funktion auflösen nach x oder y?

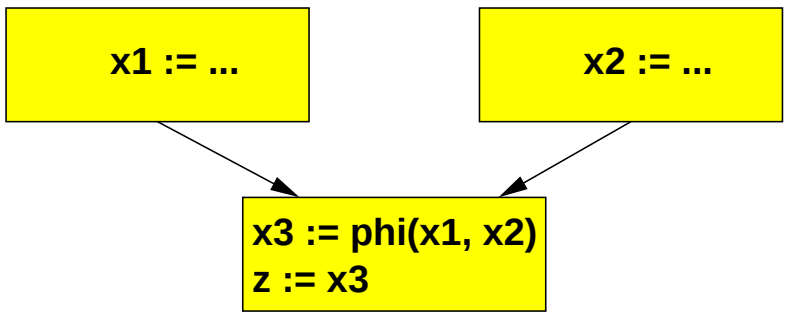
Rückwandlung aus SSA-Form 4



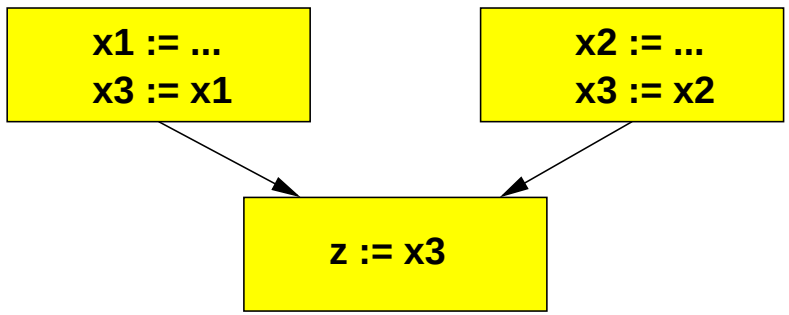
A. Koch

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

Vorher

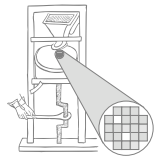


Nachher



Zielführender als naives Löschen!

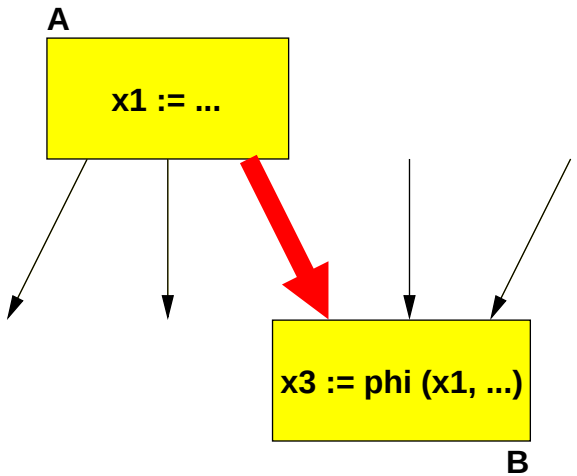
Rückwandlung aus der SSA-Form 5



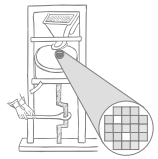
Problemfall: Kritische Kanten

Kritische Kontrollflusskante

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

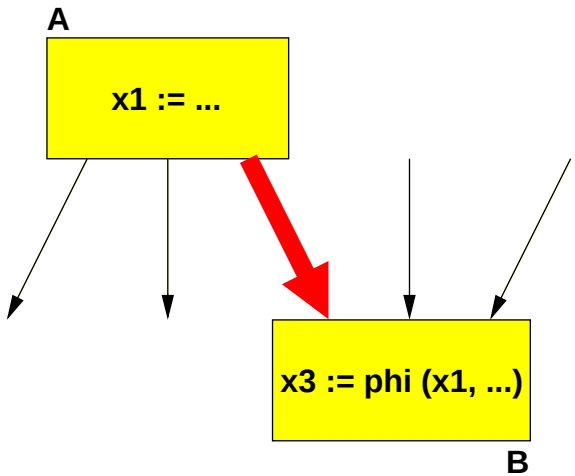


Rückwandlung aus der SSA-Form 6

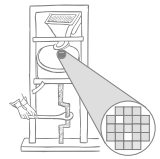


Problem bei kritischen Kanten

- Wo Kopierzuweisungen von A bei Auflösen der Phi-Funktion in B unterbringen?
- Am Ende von A?
  - Geht nicht, 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!

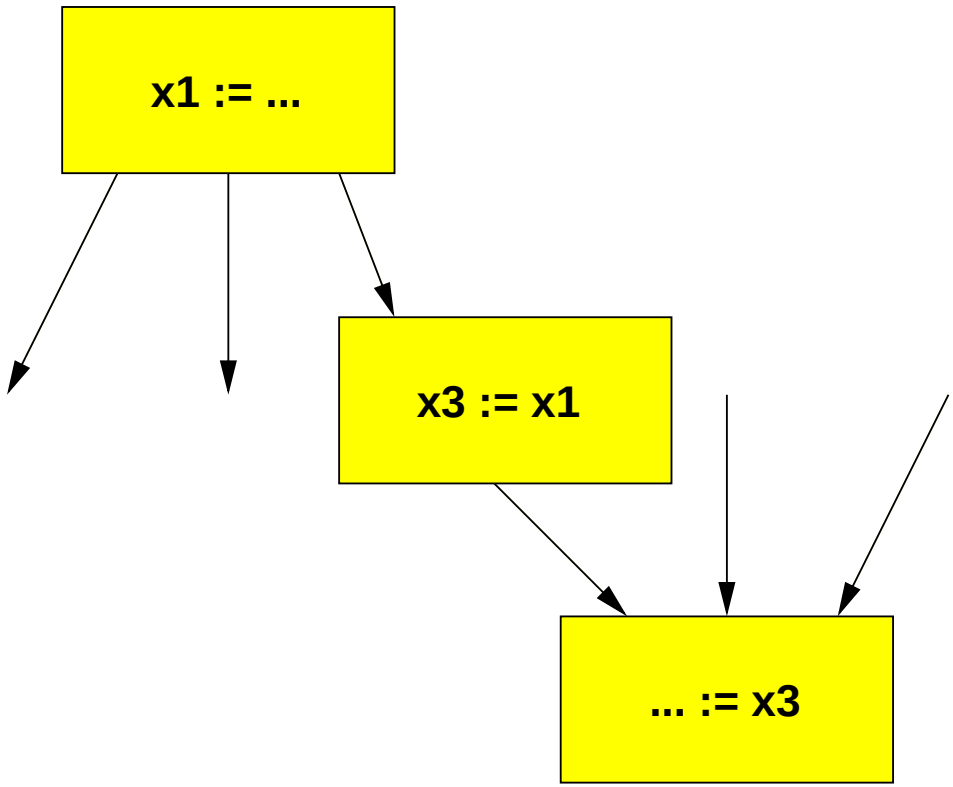


Rückwandlung aus der SSA-Form 7



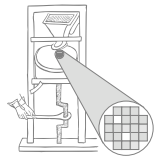
Einfache Lösung:
Kante aufspalten und neuen Block einfügen!

A. Koch



Funktioniert immer!

Rückwandlung aus der SSA-Form 8



Nachteil: Verlangsamt möglicherweise Programm

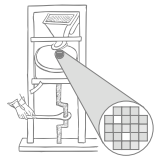
- Beispiel: Zusätzliche Sprunganweisung bei REPEAT/UNTIL

Abhilfe: Gezielteres Einfügen von Kopien

- Briggs 1998 oder Sreedhar 1999

Nicht ganz einfach, wir spalten kritische Kanten wenn nötig immer auf!

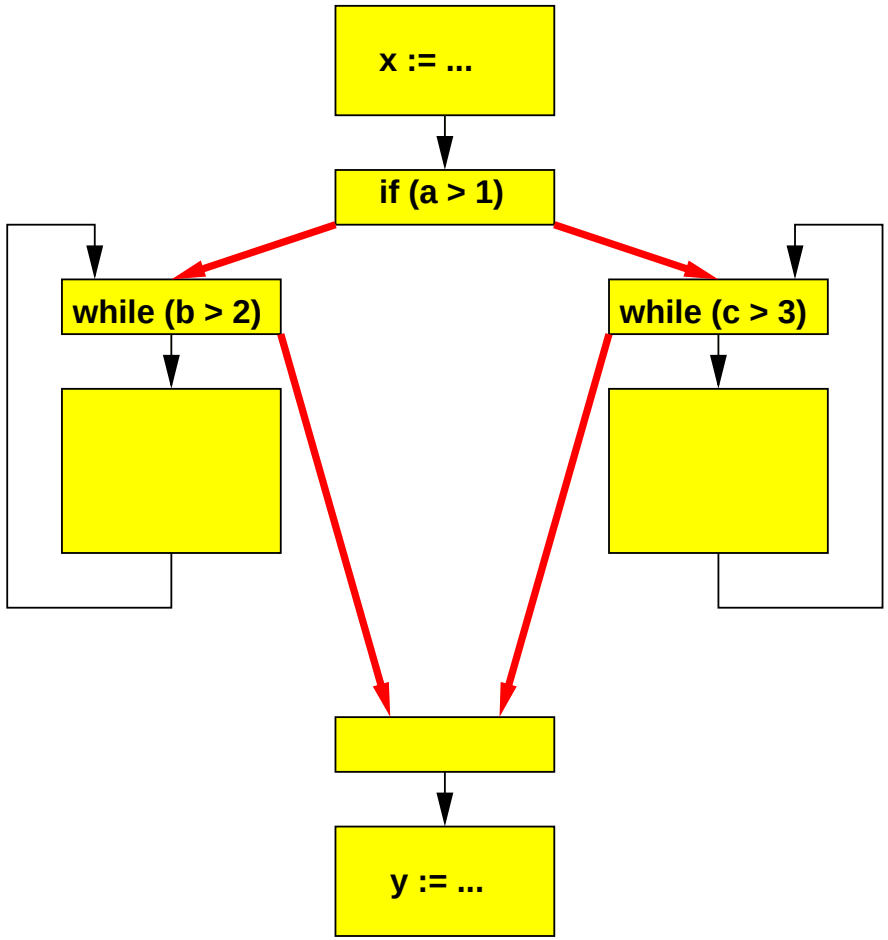
Rückwandlung aus der SSA-Form 9



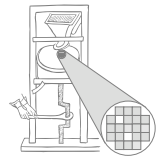
Praktisch: Können kritische Kanten in strukturierten CFGs à la Triangle auftreten?

A. Koch

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



Rückwandlung aus SSA-Form 10

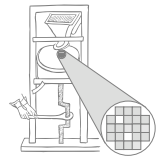


- Aber nicht alle kritischen Kanten sind relevant
- Nur solche vor Blöcken mit phi-Funktionen

Damit 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

Zusammenfassung



- Transformation in SSA-Form
- Allgemeiner Fall (aus dem Orbit)
- Sonderfall: Strukturierte Programmiersprachen
- Berechnung von Dominatoren
- Rückwandlung aus der SSA-Form

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