



A. Koch

# Optimierende Compiler

## Rückwandlung aus der SSA-Form

Andreas Koch

FG Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen  
Informatik, TU Darmstadt

Sommersemester 2008



- Interaktion zwischen SSA-Rückwandlung und Optimierung
  - Lost-Copy-Problem
  - Swap-Problem
  - Unnötige Kopieranweisungen
  - Probleme bei Platzierung der Kopieranweisungen
- Lösung: Algorithmus nach Briggs, Cooper, Harvey und Simpson
  - Paper liegt auf Web-Seite!
  - Eine Korrektur wird hier in VL besprochen



A. Koch

# Grundlagen

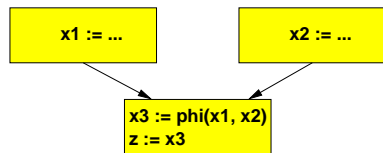
# Entfernen von Phi-Knoten

Ersetzen durch Kopieranweisungen

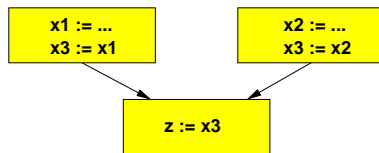


A. Koch

Vorher



Nachher

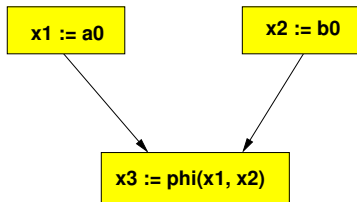


# Optimierung durch Copy Propagation

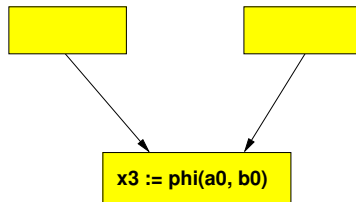


A. Koch

Original



Nach Copy-Propagation  
und Dead-Code-Elimination





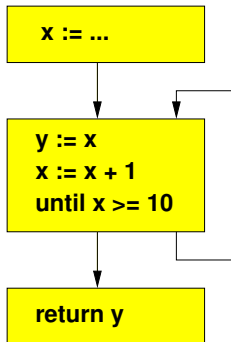
A. Koch

# Das “Lost-Copy”-Problem

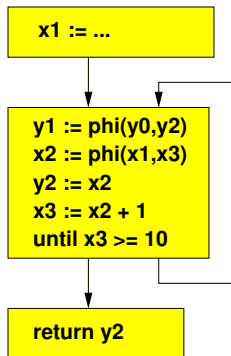
# Einfaches Beispiel: CFG zu SSA



## Normale Form



## SSA-Form

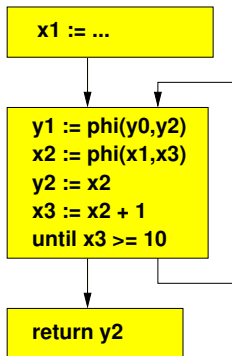


- Hierbei keine Überraschungen

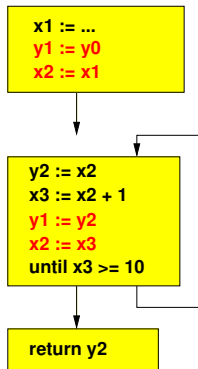
# Einfaches Beispiel: SSA zu CFG



SSA-Form



Rücktransformation  
aus SSA-Form



A. Koch

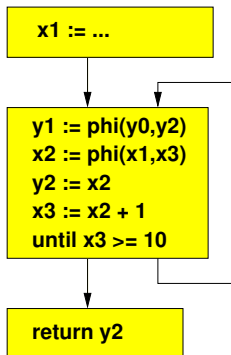
- Immer noch keine Überraschungen



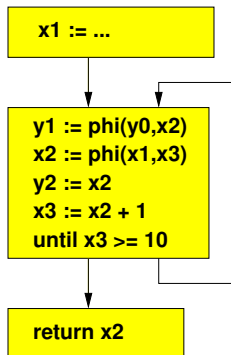
# Optimierung mit Copy Propagation



SSA-Form



SSA-Form nach  
Copy-Propagation

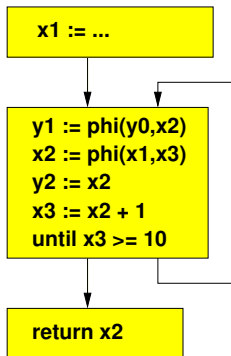


- `y2 := x2` propagiert

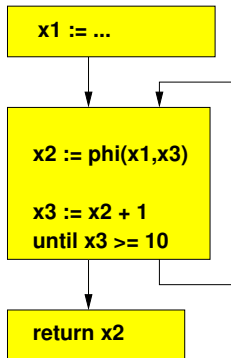
# Weitere Optimierung mit Dead Code Elim.



SSA-Form nach  
Copy-Propagation



SSA-Form nach  
Copy-Propagation  
und Dead-Code Elim.



A. Koch

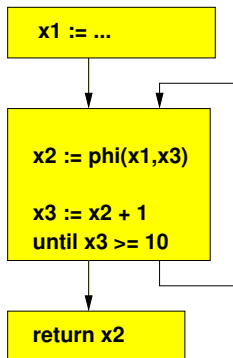
- Unnötige Kopieranweisung und Phi-Funktion für  $y_1$  entfernt

# Einfache SSA-Rückwandlung nach CFG

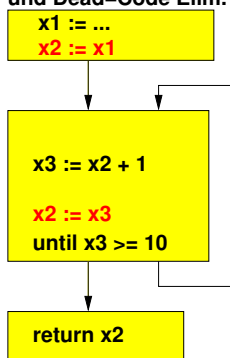


A. Koch

SSA-Form nach  
Copy-Propagation  
und Dead-Code Elim.



Rücktransformation aus  
SSA-Form nach  
Copy-Propagation  
und Dead-Code Elim.



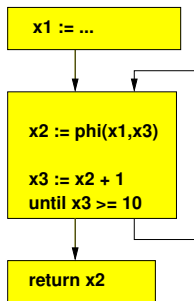
- Fehler: Falscher Wert zurückgegeben!

# Aufspalten Kritischer Kanten

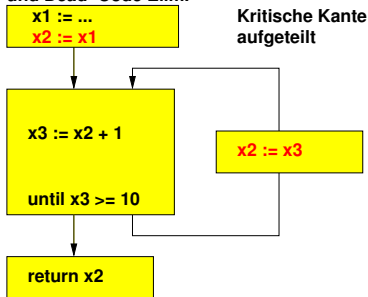


A. Koch

SSA-Form nach  
Copy-Propagation  
und Dead-Code Elim.



Rücktransformation aus  
SSA-Form nach  
Copy-Propagation  
und Dead-Code Elim.



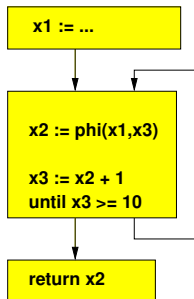
- Jetzt richtig
- Aufspalten kritischer Kanten nicht immer möglich oder wünschenswert
- Andere Lösung?

# Lösung: Wert vor Überschreiben sichern

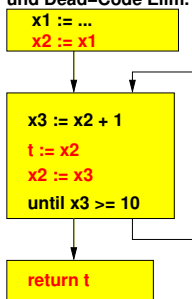


A. Koch

SSA-Form nach  
Copy-Propagation  
und Dead-Code Elim.



Rücktransformation aus  
SSA-Form nach  
Copy-Propagation  
und Dead-Code Elim.

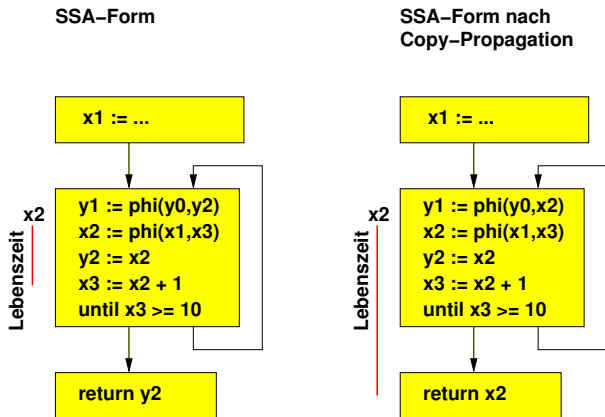


- Erkenne solche Fälle ( $\rightarrow$  Live Variables)
- Füge Sicherheitskopie ein
- Ersetze spätere Verwendungen durch Sicherheitskopie

# Allgemeines Lost-Copy-Problem 1



A. Koch

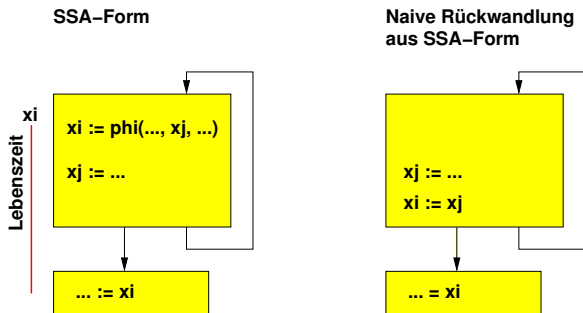


Lebenszeit von Variablen über bestimmende Phi-Funktion hinaus ausgedehnt

# Allgemeines Lost Copy-Problem 2



A. Koch



- Naive Umwandlung liefert fehlerhafte Ergebnisse
- Kopieranweisung auf  $x_i$  mitten in dessen Lebenszeit hineingesetzt
- Liefert immer  $x_j$  statt  $x_i$

# Lösung für “Lost Copy”-Problem



A. Koch

- Für genau welche Variablen müssen Sicherheitskopien erstellt werden?
- Wo müssen die jeweiligen Sicherheitskopien angelegt werden?





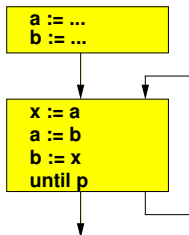
A. Koch

# Fehlerhafte Vertauschung

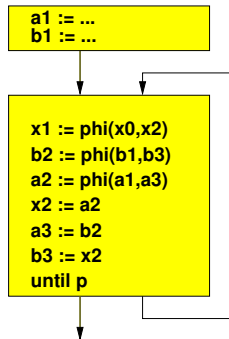
# Einfaches Beispiel: CFG zu SSA



Normale Form



SSA-Form



A. Koch

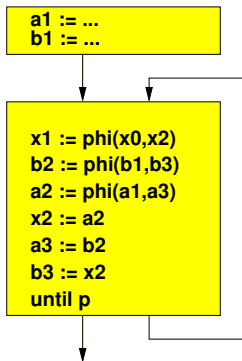
- Hierbei keine Überraschungen

# Einfaches Beispiel: SSA zu CFG

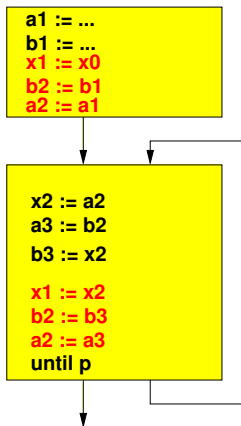


A. Koch

SSA-Form



Rückwandlung aus SSA-Form



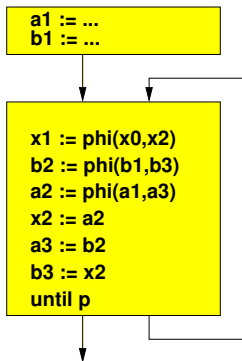
- Immer noch keine Überraschungen

# Optimierung mit Copy Propagation

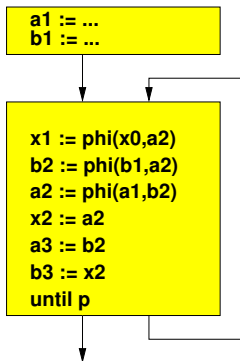


A. Koch

SSA-Form



SSA-Form nach  
Copy Propagation



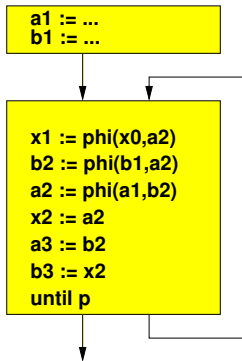
- Propagiert:  $x2 := a2$ ,  $a3 := b2$ ,  $b3 := x2$

# Weitere Optimierung mit Dead Code Elim.

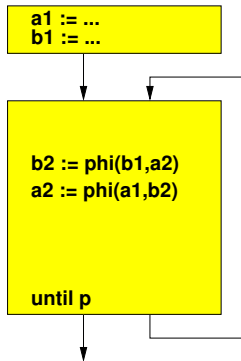


A. Koch

SSA-Form nach  
Copy Propagation



SSA-Form nach  
Copy Propagation  
und Dead Code-Elim.



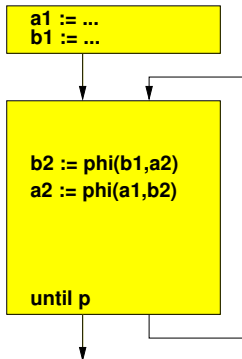
- Unnötige Kopieranweisungen und Phi-Funktion für  $x1$  entfernt

# Einfache SSA-Rückwandlung nach CFG

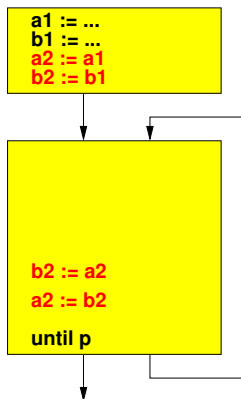


A. Koch

SSA-Form nach  
Copy Propagation  
und Dead Code-Elim.



Naive Rückwandlung  
aus SSA-Form



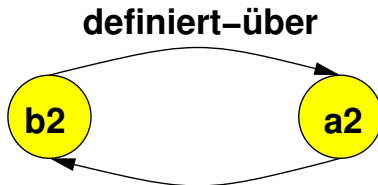
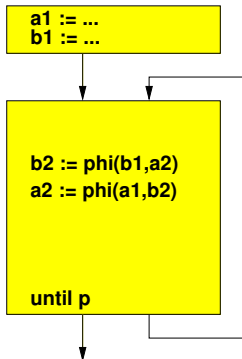
- Fehler: Keine Vertauschung mehr
- Formal werden alle Phi-Funktionen **parallel** ausgeführt
- Kopieranweisungen aber **sequentiell**

# Diskussion des Fehlers



A. Koch

SSA-Form nach  
Copy Propagation  
und Dead Code-Elim.



**definiert-über**

- Kopieranweisungen voneinander abhängig
- Welche zuerst ausführen?

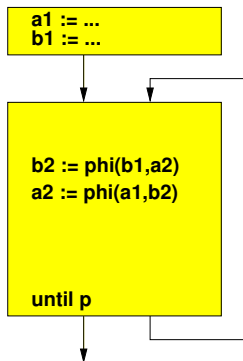
- Korrektes Vorgehen: Zyklus aufbrechen
- Einen der benötigten Werte kopieren, dann Kopie benutzen

# Korrekte SSA-Rückwandlung nach CFG

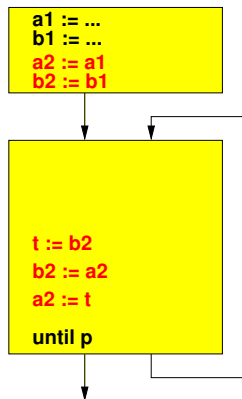


A. Koch

SSA-Form nach  
Copy Propagation  
und Dead Code-Elim.



Korrekte Rückwandlung  
aus SSA-Form



- Rechnet nun korrekt



# Lösung für Vertauschungsproblem



A. Koch

Abhängigkeitszyklen durch Einführen einer **block-lokalen** Kopie eines Phi-Funktion-**Parameters** aufbrechen.

- Unterschied zur Lösung des “Lost Copy”-Problems
- Dort **block-übergreifende** Sicherheitskopie von Phi-Funktions-**Ergebnis**

Sind bei allen Arten von Abhängigkeiten zwischen Phi-Funktionen block-lokale Kopien erforderlich?



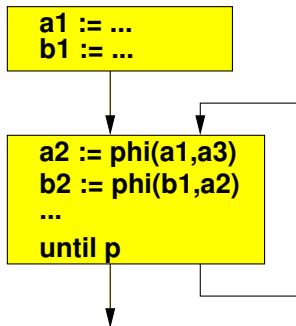
A. Koch

# Ablaufplanung statt Kopieren

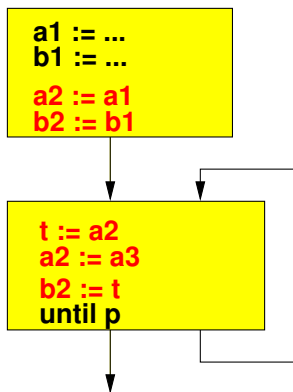
# Rückwandlung von SSA nach CFG



## SSA-Form



## Rücktransformation



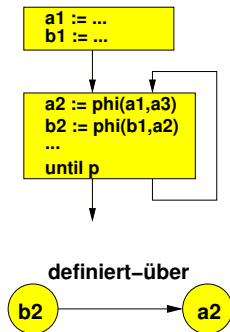
A. Koch

- $b_2$  ist von  $a_2$  abhängig  $\rightarrow$   $a_2$  lokal kopieren
- Rechnet korrekt
- Kopie ist aber **unnötiger** Aufwand!

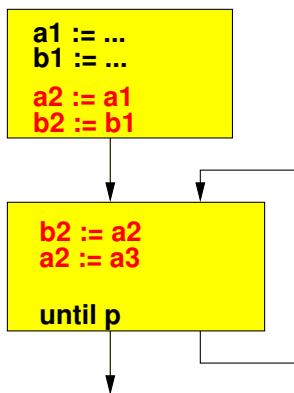
# Elegantere Lösung



## SSA-Form



## Rücktransformation



A. Koch

- Keine Kopie nötig, da keine zirkuläre Abhängigkeit
- Geschickte **Ablaufplanung** der Kopien
- Topologische Reihenfolge im Graphen



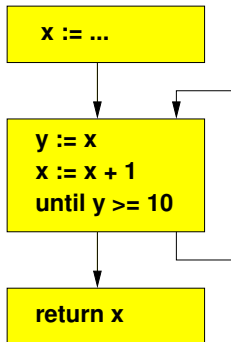
A. Koch

# Platzierung der Phi-Funktionen

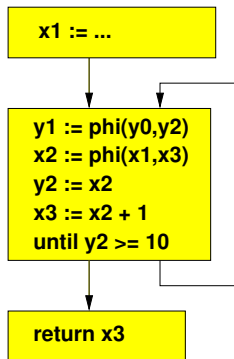
# Einfaches Beispiel: CFG nach SSA



## Normale Form



## SSA-Form



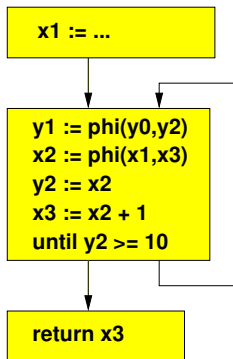
- Keine Überraschungen

# Copy-Propagation und Dead-Code-Elim.

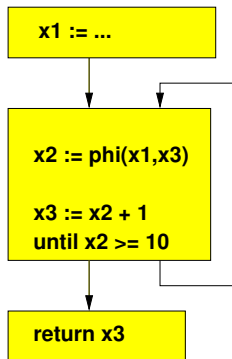


A. Koch

SSA-Form



SSA-Form nach  
Copy-Propagation  
und Dead-Code Elim.

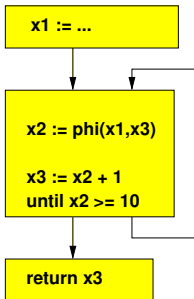


- Keine Überraschungen

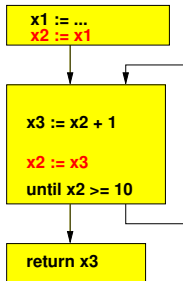
# Rückwandlung aus SSA-Form



SSA-Form nach  
Copy-Propagation  
und Dead-Code Elim.



Rücktransformation aus  
SSA-Form nach  
Copy-Propagation  
und Dead-Code Elim.



A. Koch

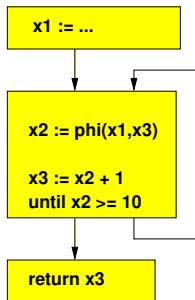
- **Fehler:** Wert für nächste Iteration
  - ... aus aufgelöster Phi-Funktion
- ... wird schon am Ende der aktuellen Iteration verwendet
  - ... in bedingtem Sprung am Block-Ende
- Phi-Kopieranweisung in Lebenszeit von `x2` eingefügt!



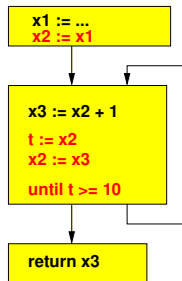
# Korrekte Rückwandlung aus SSA-Form



SSA-Form nach  
Copy-Propagation  
und Dead-Code Elim.



Rücktransformation aus  
SSA-Form nach  
Copy-Propagation  
und Dead-Code Elim.



A. Koch

- Gleiches Vorgehen wie bei Lost-Copy
  - Sicherheitskopie von aktuellem Wert vor Überschreiben anlegen
  - Dann spätere Verwendungen durch Kopie austauschen
- Dafür auch bereits vorher angelegte Kopie benutzbar
  - Eventuell bereits wegen Inter-Block Liveness angelegt

# Gesammelte Anforderungen an Algorithmus



A. Koch

- Füge Inter-Block Kopien ein, wenn Kopieranweisungen von aufgelösten Phi-Funktionen in Lebenszeit von Phi-Ergebnis liegen
- Füge lokale Kopien von Phi-Parametern ein, um zyklische Abhängigkeiten aufzubrechen
- Ordne sonstige Kopierfunktionen in richtiger Reihenfolge an
  - Sequentielle Abarbeitung muss gleiches Ergebnis wie parallele Phi-Funktionen ergeben
- Falls Ziel einer Phi-Funktion in bedingten Sprüngen am Block-Ende benutzt wird
  - Verwende dort eine eventuell bereits angelegte Inter-Block-Kopie des Ergebnisses
  - Oder lege neue lokale Kopie an und verwende diese



A. Koch

# Algorithmus nach Briggs, Cooper, Harvey und Simpson

# Grundlagen des Algorithmus



A. Koch

- Verwaltete Daten
- Durch welche **Inter-Block** Kopie soll eine Variable ersetzt werden?
- Durch welche **lokale** (Intra-Block) Kopie soll eine Variable ersetzt werden?



- Algorithmus bearbeitet Blöcke in Pre-Order-Reihenfolge im Dominatorbaum
  - Bei Abstieg: Inter-block Daten aus Vorgänger übernehmen
  - Bei Aufstieg: Inter-block Daten zurücksetzen

➔ Analog zu Geltungsbereichen von Symboltabellen

- Globale Hash-Map Variable → Stack: `Stacks[v]`
- Bei Anlegen einer neuen Kopie
  - Push des Ziels auf Stack von Ursprungsvariable
  - Spätere Verwendungen von Variable durch letztes Ziel ersetzen
- Bei Verlassen eines Geltungsbereichs
  - Alle in diesem Block gemachten Einträge entfernen
  - Ursprungsvariablen lokal je Block in `pushed` merken

# Lokale Intra-Block Daten



A. Koch

- Einfachere Struktur: Je Block
- Lokale Hash-Map von Ursprungsvariable auf Zielvariable: `Map [v]`
- Spätere Verwendungen von Variable durch aktuelle Kopie ersetzen
- Flag, ob Variable als Phi-Parameter verwendet wird:  
`IsPhiParam[v]`
  - Dann geschickte Ablaufplanung erforderlich
  - Oder sogar Aufbrechen von Zyklus

# Hauptprozedur: `replace_phi_nodes (cfg)`



A. Koch

Bearbeitet gesamten CFG.

Bestimme Live-Variablen durch Datenflussanalyse

**for** alle Variablen  $v$  im CFG **do**

`Stacks[v] ← ∅`

**end for**

`insert_copies (cfg.entryBlock())`

alle Phi-Funktionen " $x ← \Phi(\dots)$ " im ganzen CFG löschen

# insert\_copies (block)



Bearbeitet rekursiv einen Block und die von ihm dominierten Blöcke in Pre-Order des Dominatorbaums.

A. Koch

```
// Hier noch keine lokalen Inter-Block Sicherheitskopien angelegt
Pushed ← ∅
// Umbenennen auf bisherige Inter-Block Sicherheitskopien
for alle Anweisungen i in block do
  for alle Variablen v in i do
    ersetze alle v durch Stacks[v].top, wenn dies ≠ nil
  end for
end for
// einzelnen Block bearbeiten, hier findet die Hauptarbeit statt
schedule_copies (block)
// Kinder rekursiv bearbeiten
for k ist Kind vom block im Dominator-Baum do
  insert_copies (k)
end for
// in diesem Block angelegte Inter-Block Kopien verwerfen
for Variable v in Pushed do
  pop (Stacks[v])
end for
```



# schedule\_copies (block)

## 1. Pass: Initialisierung



```
// Sammele in diesem Block benötigte Kopieranweisungen, anfangs leer
Copyset ← ∅
// Meine Kopieranweisungen lösen die Phi-Funktionen meiner Nachfolger auf
for alle Nachfolger s von block do
  // bestimme welcher Vorgänger j der block für s ist
  j ← whichPred(s, block)
  // bearbeite alle Phi-Funktionen im Nachfolger
  for alle Phi-Funktionen "dest := Φ(...)" in s do
    src ← j-ter Operand der Phi-Funktion
    // diese Kopieranweisung werde ich brauchen
    Copyset ← Copyset ∪ {(src, dest)}
    // bisher noch keine lokalen Sicherheitskopien, Identitätsabbildung
    Map[src] ← src
    Map[dest] ← dest
    // src wurde als Parameter einer Phi-Funktion genutzt, später Vorsicht!
    IsPhiParam[src] ← true
  end for
end for
```

A. Koch

# schedule\_copies (block)

## 2. Pass: Abarbeitungsreihenfolge bestimmen



A. Koch

- Bestimme Worklist so, dass **zunächst** nur konfliktfreie Kopien erzeugt werden
- Also nur solche, deren Ziel nicht als Parameter einer anderen Phi-Funktion verwendet wird.
  - Dann ist die Reihenfolge der Kopieranweisungen egal
- Sonst besteht Gefahr von Vertauschungsproblem!

```
// gehe alle in diesem Block zu erzeugenden Kopien durch
```

```
for alle Kopien  $(src, dest) \in Copyset$  do  
  if  $\neg IsPhiParam[dest]$  then  
     $Worklist \leftarrow Worklist \cup (src, dest)$   
     $Copyset \leftarrow Copyset - \{(src, dest)\}$   
  end if  
end for  
// Worklist enthält jetzt nur die einfachen Fälle
```

# schedule\_copies (block)

## 3. Pass: Benötigte Kopien erzeugen



- Es müssen alle Kopien abgearbeitet werden
- Erstmal die “einfachen” aus der Worklist
- Später auch die komplizierteren, die noch in *Copyset* stehen

A. Koch

```
while Worklist  $\neq \emptyset \vee$  Copyset  $\neq \emptyset$  do  
  // Bearbeite erst einfache Fälle, kann auch komplizierte vereinfachen  
  while Worklist  $\neq \emptyset$  do  
    ➔ einfacher Fall, Pass 3a, Teil 1+2  
  end while  
  // Nun die komplizierten Fälle, erzeugt wiederum neue einfache Fälle  
  if Copyset  $\neq \emptyset$  then  
    // zirkuläre Abhängigkeit, muss durch Kopieren aufgebrochen werden  
    ➔ komplizierter Fall, Pass 3b  
  end if  
end while
```

# schedule\_copies (block)

## 3a. Pass: Erzeuge Kopien für einfache Fälle aus *Worklist*, Teil 1



- Es müssen alle Kopien abgearbeitet werden
- Erstmal die “einfachen” aus der *Worklist*

A. Koch

```
wähle eine beliebige anstehende Kopie (src, dest) ∈ Worklist
Worklist ← Worklist - {(src, dest)}
// Falls dest an Einfügestelle seiner Kopieranweisung live ist
if dest ∈ block.liveOut() then
  // vermeide Lost-Copy-Problem: Erstelle Inter-Block Sicherheitskopie
  erzeuge neue temporäre Variable "tempN"
  erzeuge Kopieranweisung "tempN := dest" vor Blockende
  // Merken für Inter-Block-Umbenennung von dest nach "tempN"
  Stacks[dest].push('`tempN`')
  Pushed ← Pushed ∪ {dest}
  if dest wird verwendet in bedingtem Sprung am Blockende then
    // diesmal einfach, wir haben ja schon eine Kopie in tempN
    ersetze Auftreten von dest durch "tempN" in allen Sprungbedingungen
  end if
else
  // dest ist zwar nicht Inter-Block live, aber vielleicht am Block-Ende
  if dest wird verwendet in bedingtem Sprung am Blockende then
    // falls ja: extra eine lokale Sicherheitskopie anlegen
    erzeuge neue temporäre Variable "tempM"
    erzeuge Kopieranweisung "tempM := dest" vor Blockende
    ersetze Auftreten von dest durch "tempM" in allen Sprungbedingungen
  end if
end if
// füge jetzt Kopieranweisung zum Auflösen der eigentlichen Phi-Funktion ein
➡ Pass 3a, Teil 2.
```

# schedule\_copies (block)

## 3a. Pass: Erzeuge Kopien für einfache Fälle aus *Worklist*, Teil 2



- Sonderfälle vorher erledigt
  - Variable war Live-Out aus Block
  - Variable in Sprungbedingung am Blockende
- Jetzt Kopieranweisungen für eigentliche Phi-Funktionen erzeugen

A. Koch

```
// Auflösung dieses Teils der Phi-Funktion
erzeuge Kopieranweisung "dest := Map[src]" vor Block-Ende
// merken, wo Wert von src jetzt verfügbar ist
Map[src] ← dest
// wurde so ein Konflikt aus Copyset aufgelöst?
for alle Kopien  $(s, d) \in \text{Copyset}$  mit  $d = \text{src}$  do
  // es gibt also eine vorher zurückgestellte Kopie mit src als Ziel
  // da oben der Wert von src in dest kopiert wurde,
  // kann src selbst nun überschrieben werden: geschickte Ablaufplanung
  Worklist ← Worklist ∪ { $(s, d)$ }
  Copyset ← Copyset - { $(s, d)$ }
end for
```

# schedule\_copies (block)

## 3b. Pass: Vereinfache komplizierte Fälle aus *Copyset*



A. Koch

- Nun keine einfachen Fälle mehr übrig
  - Geschickte Ablaufplanung hat nicht gereicht
  - Es existieren zirkuläre Abhängigkeiten ( $\rightarrow$  Vertauschungsproblem)
- Aufbrechen durch Kopieroperationen

// picke ein Element aus dem Zyklus

wähle ein beliebiges  $(src, dest) \in Copyset$

erzeuge neue temporäre Variable "temp0"

erzeuge Kopieranweisung "temp0 := dest" vor Block-Ende

// der Wert von dest steht jetzt in temp0

// dest kann also überschrieben werden, der Zyklus ist gebrochen

Map[dest]  $\leftarrow$  "temp0"

// Nun haben wir wieder einen einfachen Fall für *Worklist*

$Copyset \leftarrow Copyset - \{(src, dest)\}$

$Worklist \leftarrow Worklist \cup \{(src, dest)\}$

# Weiteres Vorgehen



A. Koch

- Beispiele aus Folien so mit Papier und Bleistift durchrechnen
- Erläuterung des Algorithmus in Briggs auf p. 29. . . 33
- Fehler bei Briggs
  - “Variable kommt in Sprungbedingung vor” nicht behandelt
  - Hier in Pass 3a, Teil 1 erledigt
- Implementieren erst **nach** dem Verstehen!
- Falls doch Vorarbeiten gemacht werden sollen
  - Datenflussanalyse für Live-Variables