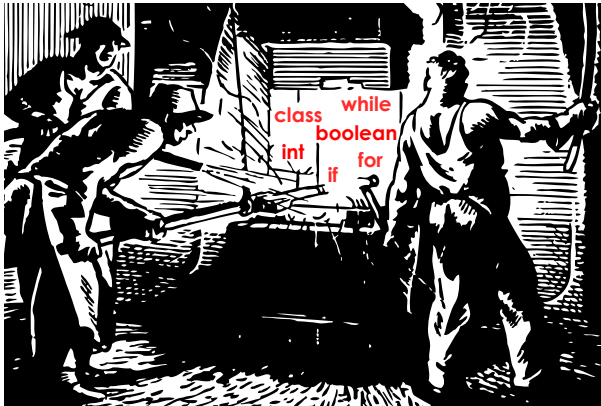


Compiler 2

4. Block: SSA → CFG Rückwandlung



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



- ▶ 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

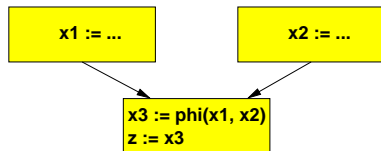


Grundlagen

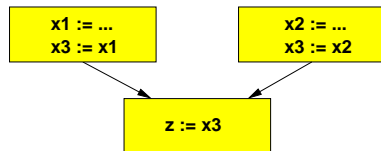
Entfernen von Phi-Knoten

Ersetzen durch Kopieranweisungen

Vorher

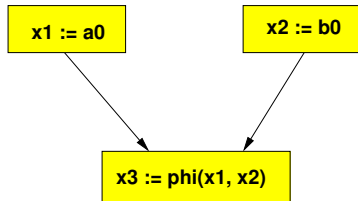


Nachher

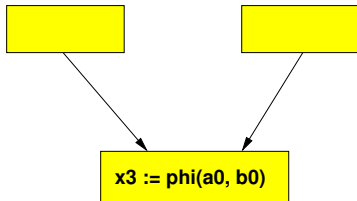


Optimierung durch Copy Propagation

Original



Nach Copy-Propagation
und Dead-Code-Elimination

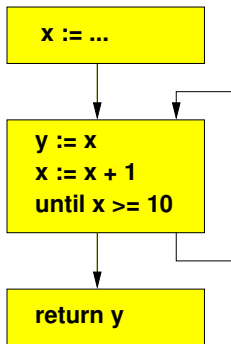




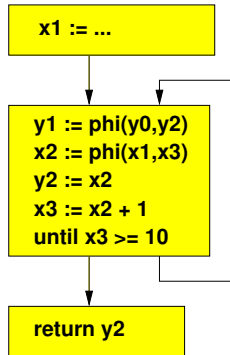
Das “Lost-Copy”-Problem

Einfaches Beispiel: CFG zu SSA

Normale Form



SSA-Form

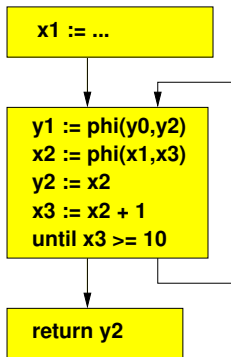


► Hierbei keine Überraschungen

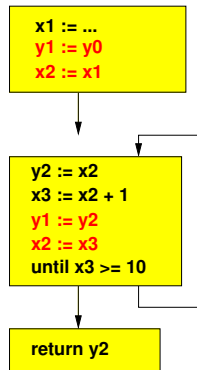
Einfaches Beispiel: SSA zu CFG



SSA-Form

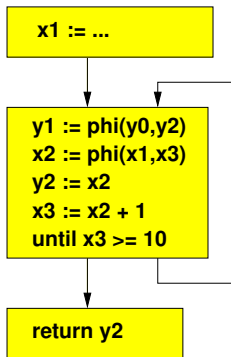


Rücktransformation aus SSA-Form

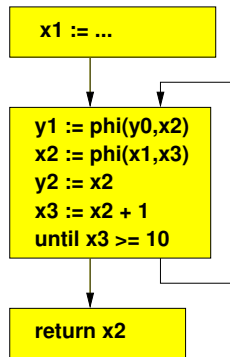


► Immer noch keine Überraschungen

SSA-Form



SSA-Form nach
Copy-Propagation



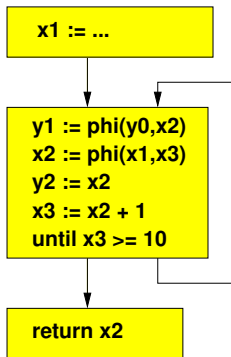
► `y2 := x2` propagiert

Weitere Optimierung mit Dead Code Elimination

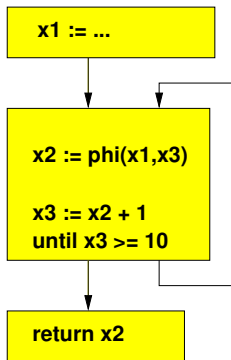


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

SSA-Form nach
Copy-Propagation



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

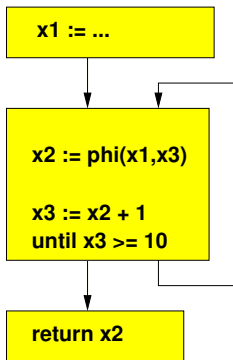


- ▶ Unnötige Kopieranweisung und Phi-Funktion für $y1$ entfernt

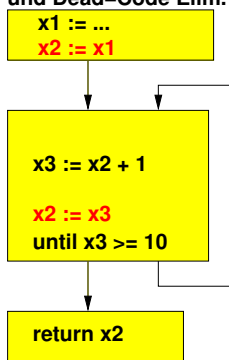
Einfache SSA-Rückwandlung nach CFG



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



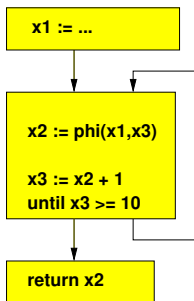
Rücktransformation aus
SSA-Form nach
Copy-Propagation
und Dead-Code Elim.



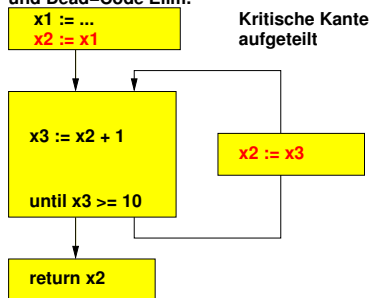
► **Fehler:** Falscher Wert zurückgegeben!

Aufspalten Kritischer Kanten

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



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

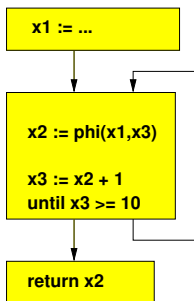


- ▶ Jetzt richtig
- ▶ Aufspalten kritischer Kanten nicht immer möglich oder wünschenswert
- ▶ Andere Lösung?

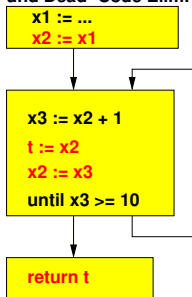
Lösung: Wert vor Überschreiben sichern



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



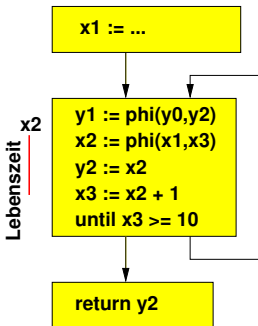
Rücktransformation aus
SSA-Form nach
Copy-Propagation
und Dead-Code Elim.



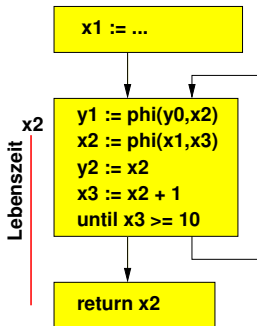
- ▶ Erkenne solche Fälle (\rightarrow Live Variables)
- ▶ Füge Sicherheitskopie ein
- ▶ Ersetze spätere Verwendungen durch Sicherheitskopie

Allgemeines Lost-Copy-Problem 1

SSA-Form

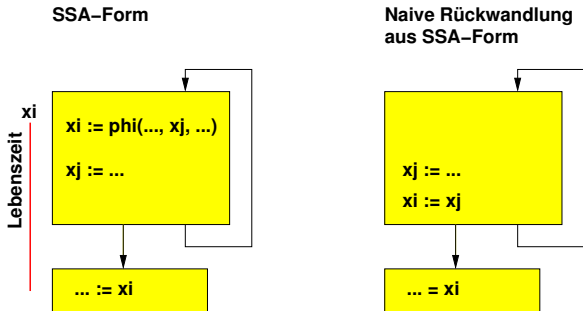


SSA-Form nach
Copy-Propagation



Lebenszeit von Variablen über bestimmende Phi-Funktion hinaus ausgedehnt

Allgemeines Lost Copy-Problem 2



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



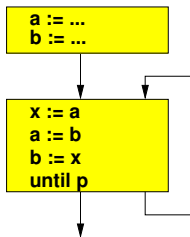
- ▶ Für genau **welche** Variablen müssen Sicherheitskopien erstellt werden?
- ▶ **Wo** müssen die jeweiligen Sicherheitskopien angelegt werden?



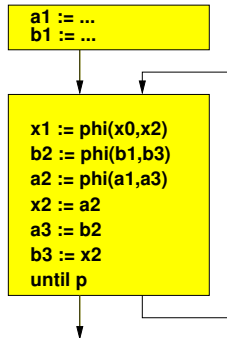
Fehlerhafte Vertauschung

Einfaches Beispiel: CFG zu SSA

Normale Form



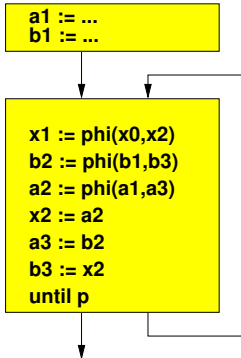
SSA-Form



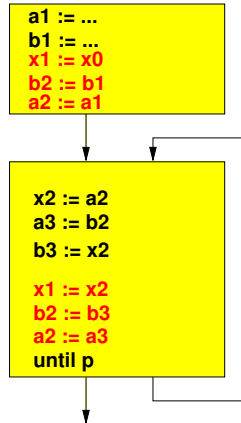
- ▶ Hierbei keine Überraschungen

Einfaches Beispiel: SSA zu CFG

SSA-Form

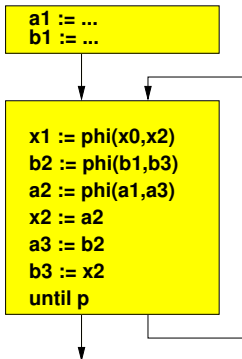


Rückwandlung aus SSA-Form



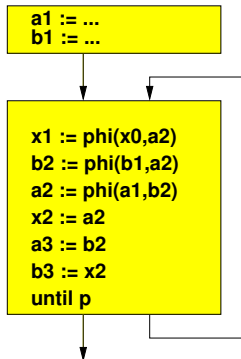
► Immer noch keine Überraschungen

SSA-Form

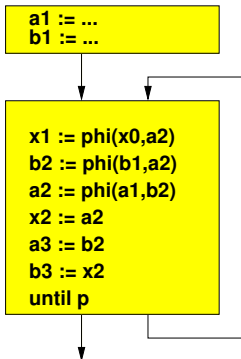


- ▶ Propagiert: `x2:=a2`, `a3:=b2`, `b3:=x2`

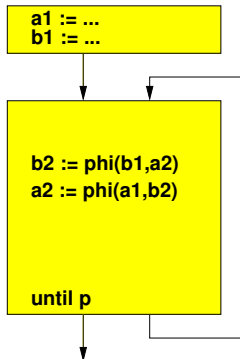
SSA-Form nach
Copy Propagation



SSA-Form nach
Copy Propagation



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

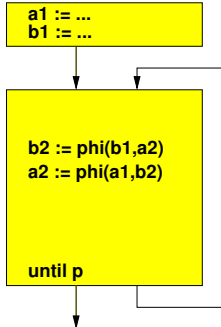


- Unnötige Kopieranweisungen und Phi-Funktion für `x1` entfernt

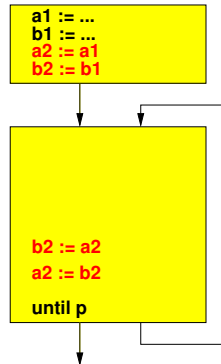
Einfache SSA-Rückwandlung nach CFG



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

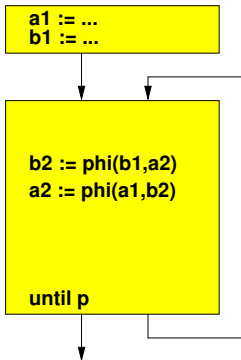


Naive Rückwandlung
aus SSA-Form

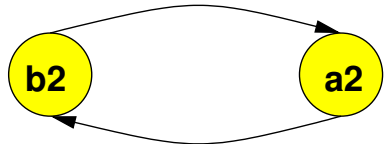


- ▶ **Fehler:** Keine Vertauschung mehr
- ▶ Formal werden alle Phi-Funktionen **parallel** ausgeführt
- ▶ Kopieranweisungen aber **sequentiell**

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



definiert-über



definiert-über

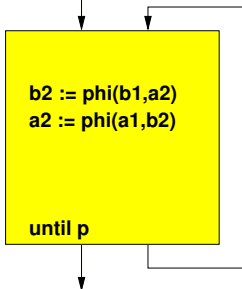
- ▶ Kopieranweisungen voneinander abhängig
- ▶ Welche zuerst ausführen?

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

Korrekte SSA-Rückwandlung nach CFG

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

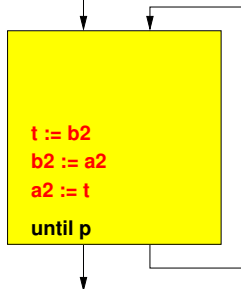
```
a1 := ...  
b1 := ...
```



► Rechnet nun korrekt

Korrekte Rückwandlung
aus SSA-Form

```
a1 := ...  
b1 := ...  
a2 := a1  
b2 := b1
```





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

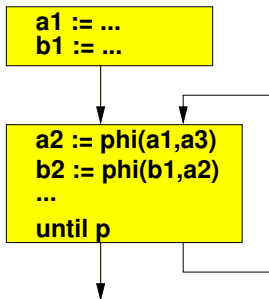
- ▶ Unterschied zur Lösung des “Lost Copy”-Problems
- ▶ Dort **block-übergreifende** Sicherheitskopie von Phi-Funktions-**Ergebnis**

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

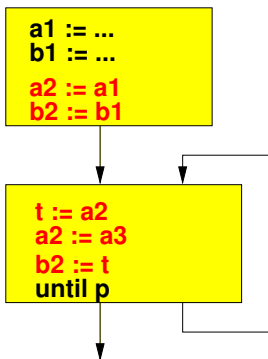


Ablaufplanung statt Kopieren

SSA-Form

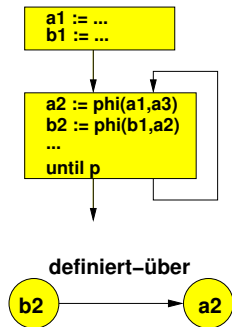


Rücktransformation

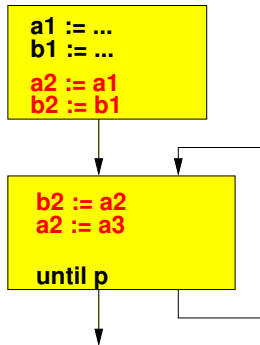


- ▶ `b2` ist von `a2` abhängig → `a2` lokal kopieren
- ▶ Rechnet korrekt
- ▶ Kopie ist aber **unnötiger** Aufwand!

SSA-Form



Rücktransformation



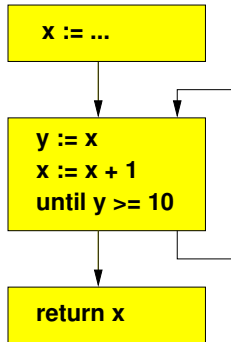
- ▶ Keine Kopie nötig, da keine zirkuläre Abhängigkeit
- ▶ Geschickte **Ablaufplanung** der Kopien
- ▶ Topologische Reihenfolge im Graphen



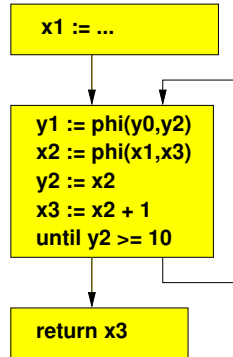
Platzierung der Phi-Funktionen

Einfaches Beispiel: CFG nach SSA

Normale Form



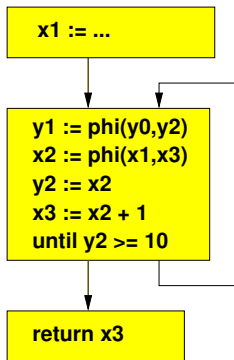
SSA-Form



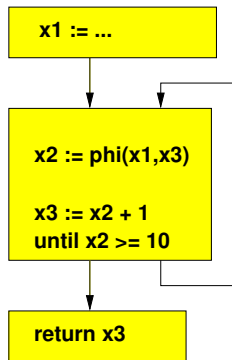
► Keine Überraschungen



SSA-Form

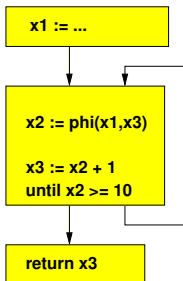


SSA-Form nach Copy-Propagation und Dead-Code Elim.

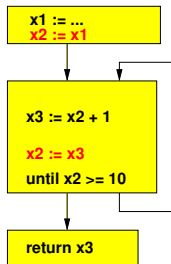


► Keine Überraschungen

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



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

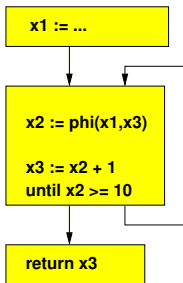


- ▶ **Fehler:** Wert für nächste Iteration
 - ▶ ... aus aufgelöster Phi-Funktion
 - ▶ ... wird schon am Ende der aktuellen Iteration verwendet
 - ▶ ... in bedingtem Sprung am Block-Ende
- ▶ Phi-Kopieranweisung in Lebenszeit von `x2` eingefügt!

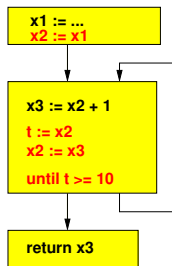
Korrekte Rückwandlung aus SSA-Form



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



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



- ▶ 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

- ▶ 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



Algorithmus nach Briggs, Cooper, Harvey und Simpson

- ▶ 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

- ▶ 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)`

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 " $x \leftarrow \Phi(\dots)$ " im ganzen CFG löschen

```
insert_copies(block)
```



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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

```
// 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



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

```
// 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 :=  $\Phi(\dots)$ " in s do
    src ← j-ter Operand der Phi-Funktion
    // diese Kopieranweisung werde ich brauchen
    Copyset ← Copyset  $\cup$  {(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
```

schedule_copies(block)

2. Pass: Abarbeitungsreihenfolge bestimmen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- ▶ 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 $\neg \text{IsPhiParam}[dest]$ **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



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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

```
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



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

```
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



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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

// Auflösung dieses Teils der Phi-Funktion

erzeuge Kopieranweisung " $dest := \text{Map}[src]$ " vor Block-Ende

// merken, wo Wert von *src* jetzt verfügbar ist

$\text{Map}[src] \leftarrow dest$

// wurde so ein Konflikt aus *Copyset* aufgelöst?

for alle Kopien $(s, d) \in \text{Copyset}$ mit $d = src$ **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

$\text{Worklist} \leftarrow \text{Worklist} \cup \{(s, d)\}$

$\text{Copyset} \leftarrow \text{Copyset} - \{(s, d)\}$

end for

schedule_copies(block)

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



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- ▶ Nun keine einfachen Fälle mehr übrig
 - ▶ Geschickte Ablaufplanung hat nicht gereicht
 - ▶ Es existieren zirkuläre Abhängigkeiten (→ 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] ← "temp0"

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

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

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

- ▶ 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