Optimierende Compiler

Partielle Redundanzeliminierung (PRE)

Andreas Koch

FG Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen
Informatik, TU Darmstadt

Sommersemester 2011

Einleitung

Common Subexpression Elimination

- Finde wiederholte Berechnungen auf einem Ausführungspfad
- . . . und beseitige alle außer der ersten
- Bisher kennengelernte Verfahren
  - LVN, SVN, DVN
  - GCSE

Totale und partielle Redundanz 1

Totale Redundanz

Ein Ausdruck ist total redundant, wenn er auf allen Pfaden zu einer redundanten Verwendung berechnet wird.

Partielle Redundanz

Ein Ausdruck ist partiell redundant, wenn er auf einigen, aber nicht auf allen Pfaden zu einer redundanten Verwendung berechnet wird.

Totale und partielle Redundanz 1

Embedded Systems & Applications

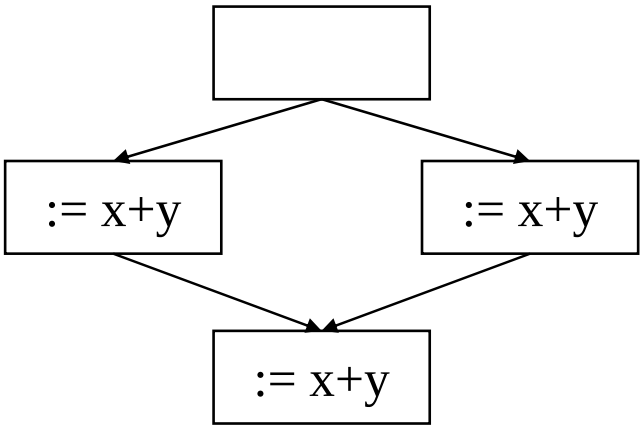
Totale Redundanz

Ein Ausdruck ist total redundant, wenn er auf allen Pfaden zu einer redundanten Verwendung berechnet wird.

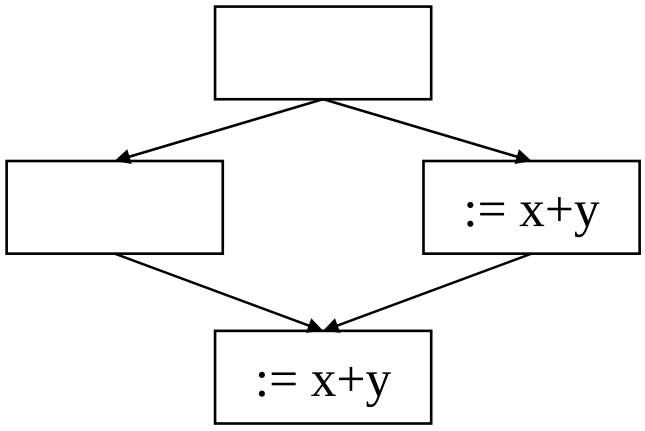
Partielle Redundanz

Ein Ausdruck ist partiell redundant, wenn er auf einigen, aber nicht auf allen Pfaden zu einer redundanten Verwendung berechnet wird.

Totale und partielle Redundanz 2



fully redundant

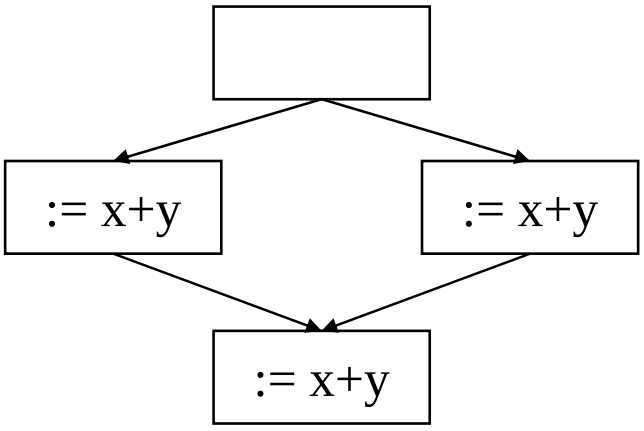


partially redundant

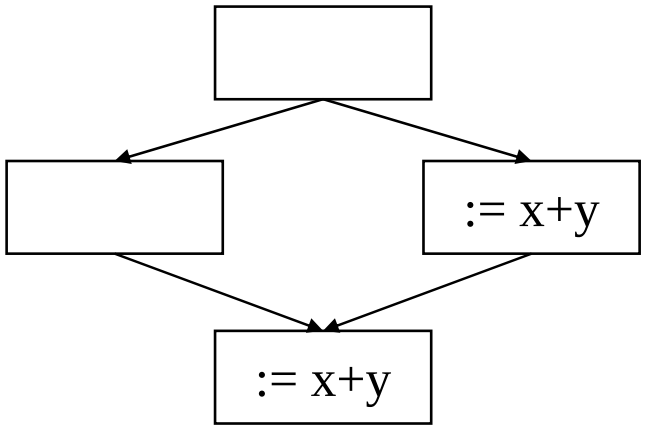
CSE erkennt nur totale Redundanz.

Quelle: CMU CS 15-745 2009

Totale und partielle Redundanz 2



fully redundant



partially redundant

CSE erkennt nur totale Redundanz.

Quelle: CMU CS 15-745 2009

Bewegung von schleifeninvarianten Anweisungen

- Loop Invariant Code Motion
- Bewege Anweisungen, die jede Iteration denselben Wert liefern
  - Dafür müssen die Operanden schleifeninvariant sein
- . . . aus der Schleife heraus

Schleifeninvarianz

Ein Operand ist schleifeninvariant, wenn

- er konstant ist, oder
- alle seine Definitionen außerhalb der Schleife liegen, oder
  - Erinnerung: Datenflußproblem REACHES “Erreichende Definitionen”
- er eine einzelne Definition innerhalb der Schleife hat, die aber selbst invariant ist.

Loop Invariant Code Motion

Embedded Systems & Applications

Naiver Ansatz: Bewege invariante Anweisungen **S** vor Schleifenkopf (pre-header).

Geht aber nur, wenn jedes **S**

- alle Verwendungen seiner LHS dominiert
- alle Schleifenausgänge dominiert (`break`, `continue`, ...)

Loop Invariant Code Motion

Embedded Systems & Applications

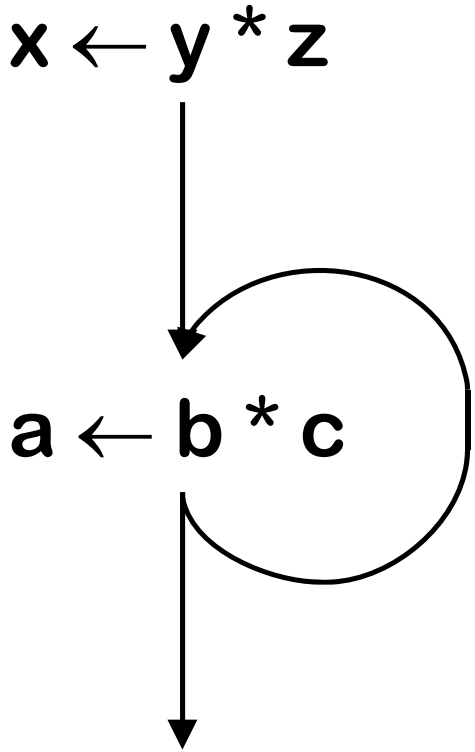
Naiver Ansatz: Bewege invariante Anweisungen **S** vor Schleifenkopf (pre-header).

Geht aber nur, wenn jedes **S**

- alle Verwendungen seiner LHS dominiert
- alle Schleifenausgänge dominiert (`break`, `continue`, `...`)

LICM und partielle Redundanz

Schleifeninvariante
Ausdrücke sind eine Art der partiellen Redundanz

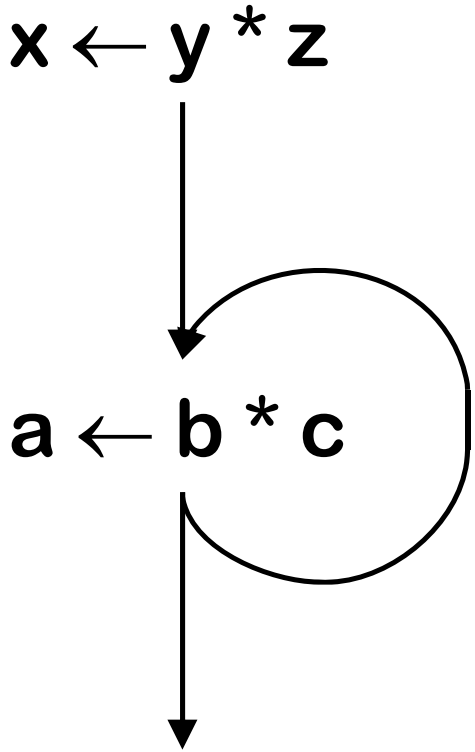


b*c nur redundant auf Rückwärtskante.

Quelle: CMU CS 15-745 2009

LICM und partielle Redundanz

Schleifeninvariante
Ausdrücke sind eine Art der partiellen Redundanz



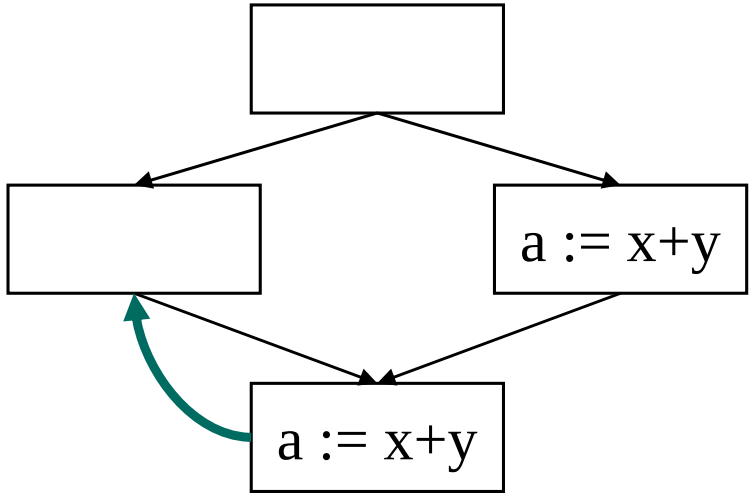
b*c nur redundant auf Rückwärtskante.

Quelle: CMU CS 15-745 2009

Eliminierung partieller Redundanz

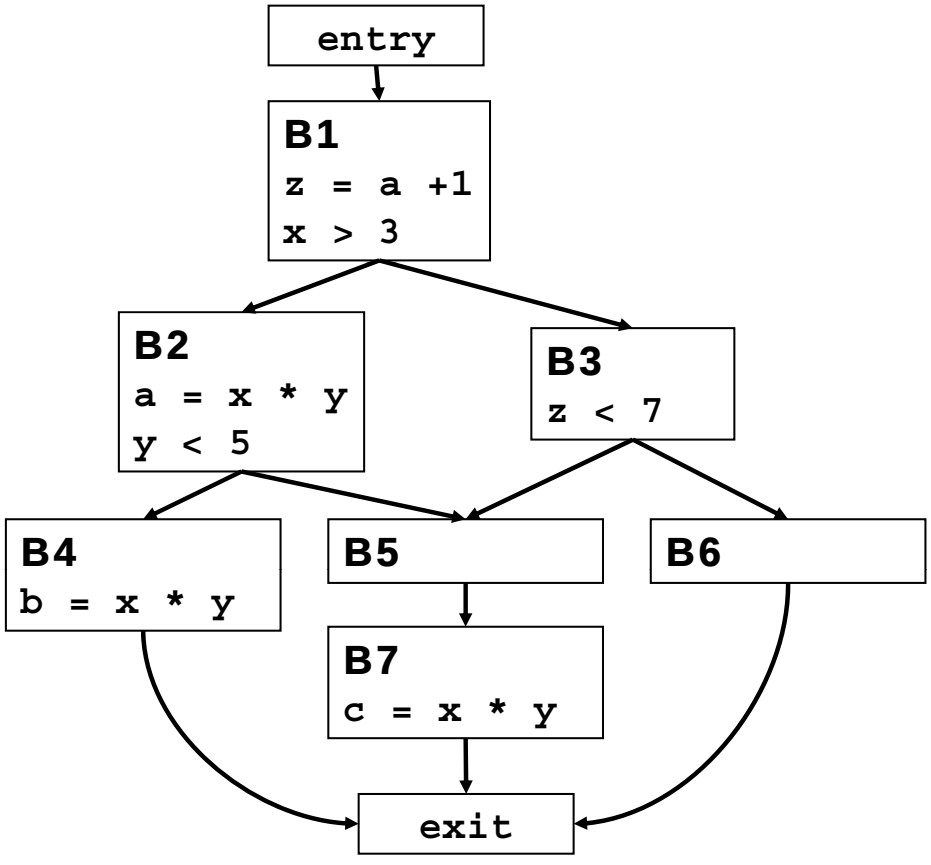
Eliminierung partieller Redundanz: Idee

- Bewege partiell redundante Berechnungen an ihre optimalen Stellen
  - Vermeide so Doppelberechnungen
- Beinhaltet CSE und LICM



Quelle: CMU CS 15-745 2009

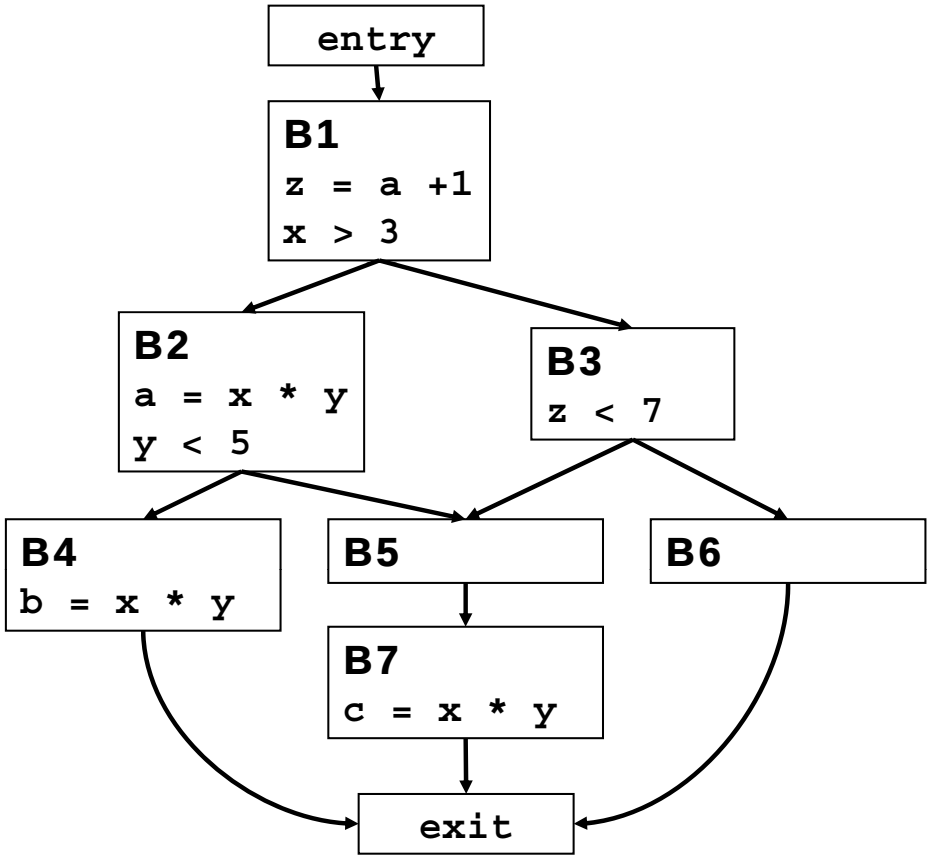
Beispiel



Welche Ausdrücke sind partiell redundant?

Quelle: CMU CS 15-745 2009

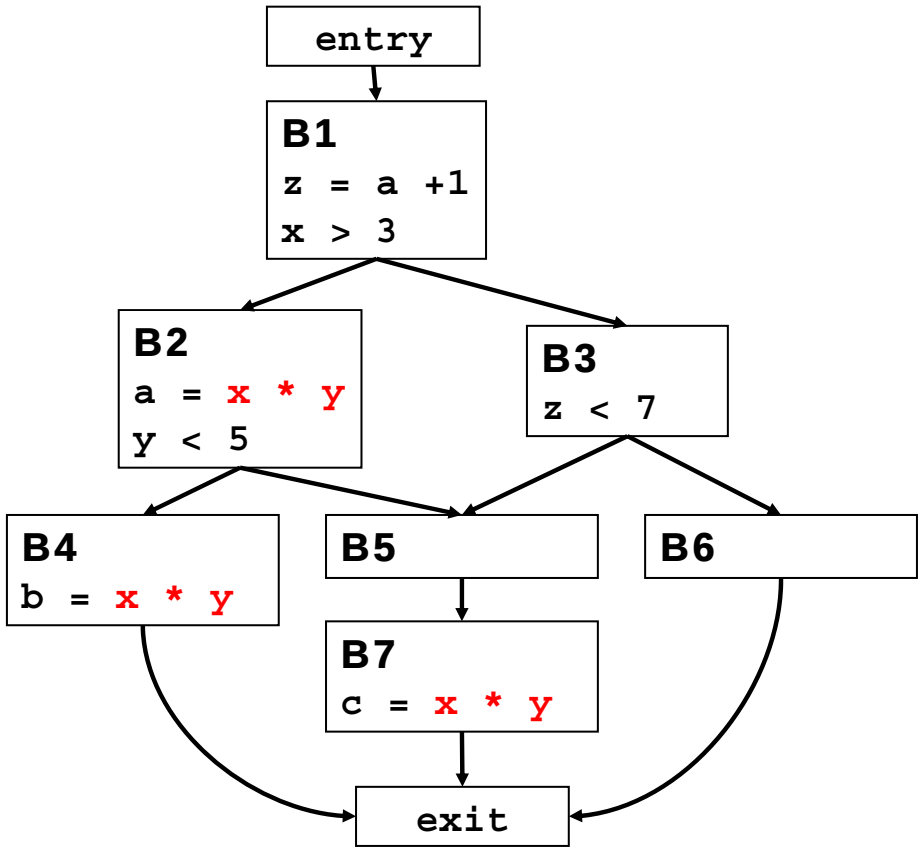
Beispiel



Welche Ausdrücke sind partiell redundant?

Quelle: CMU CS 15-745 2009

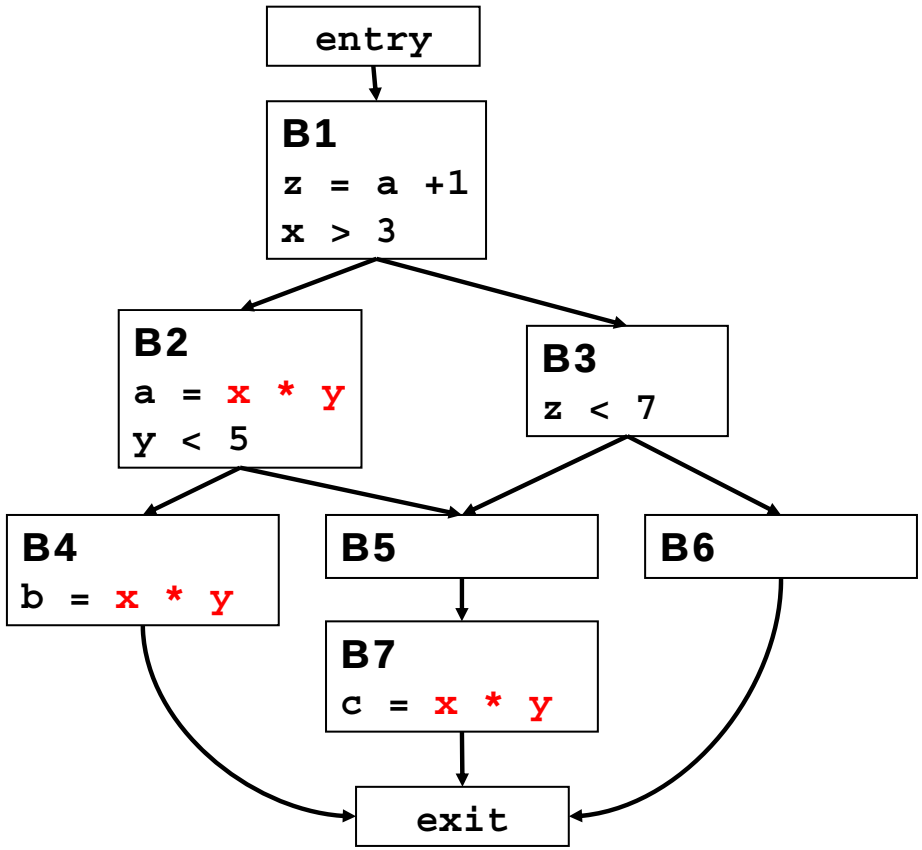
Beispiel



Wo die Berechnung tatsächlich durchführen, wo die Kopien verwenden?

Quelle: CMU CS 15-745 2009

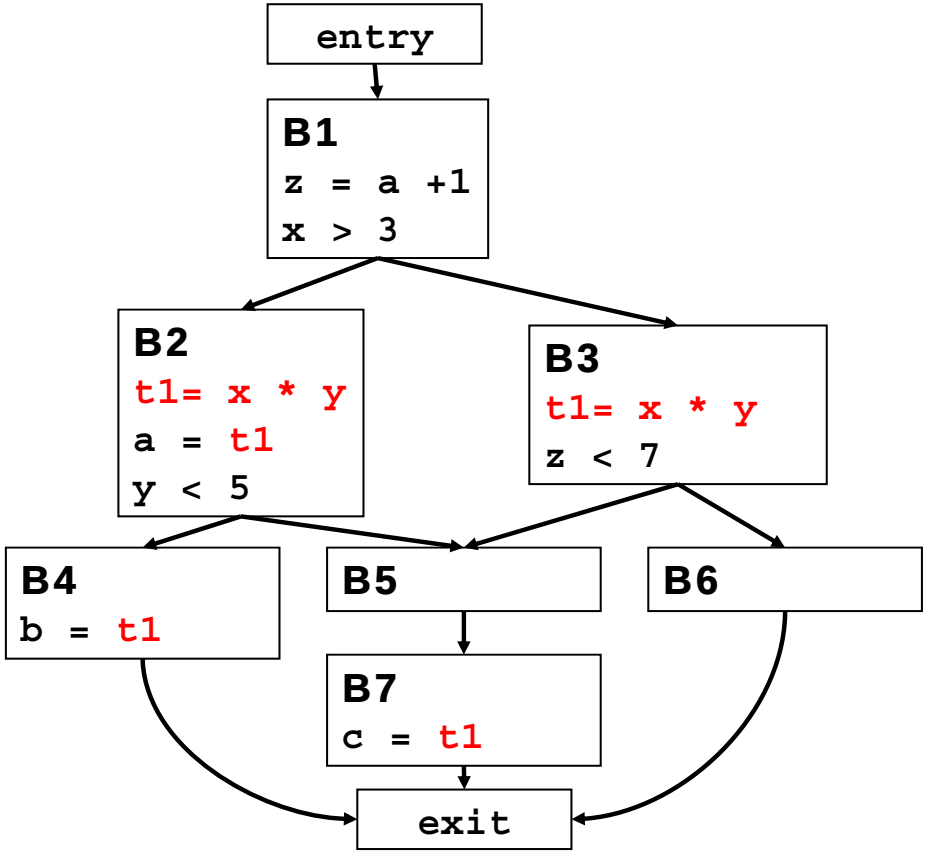
Beispiel



Wo die Berechnung tatsächlich durchführen, wo die Kopien verwenden?

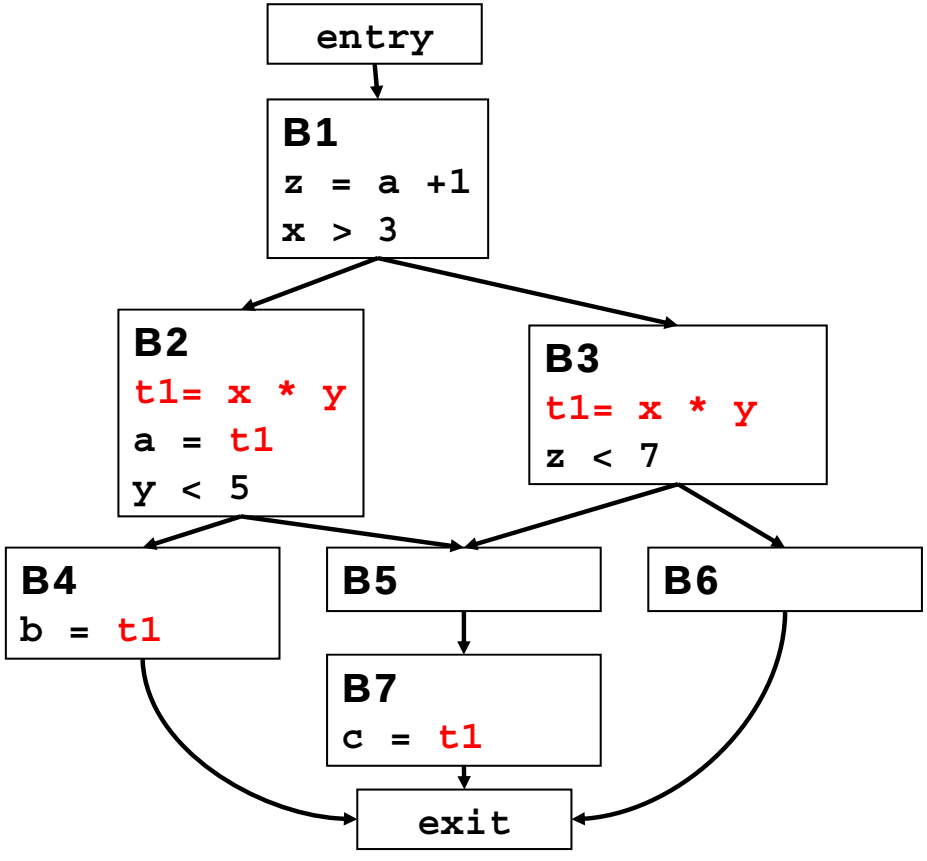
Quelle: CMU CS 15-745 2009

Beispiel



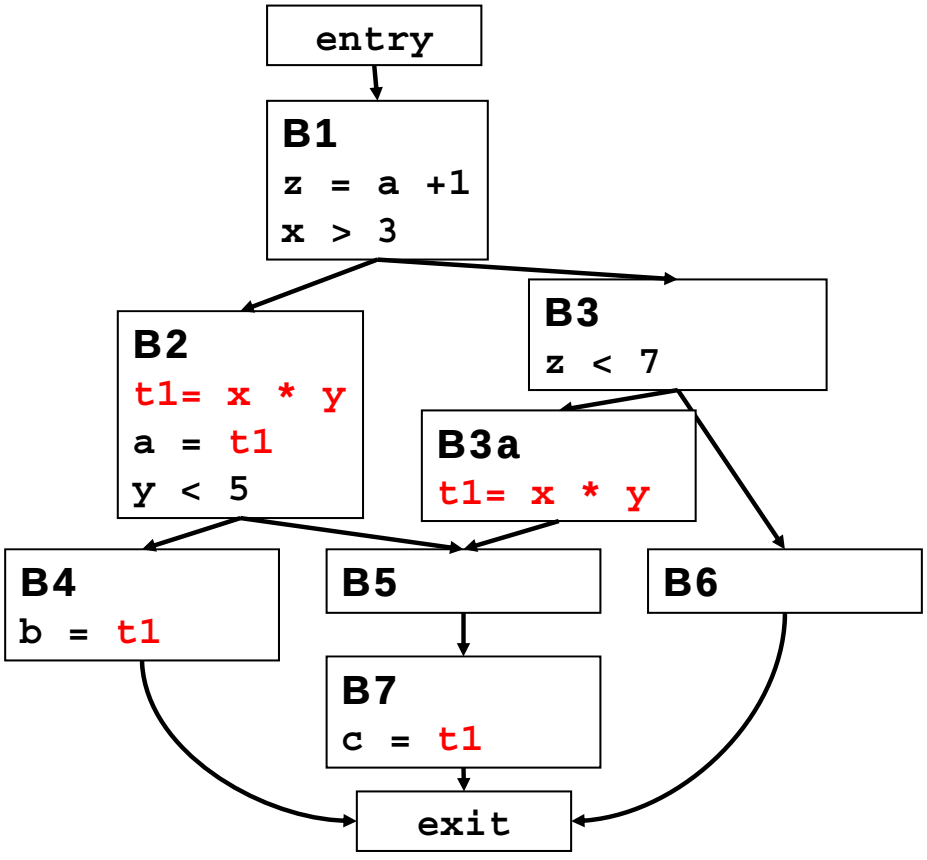
Ist das die optimale Lösung?

Beispiel



Ist das die optimale Lösung?

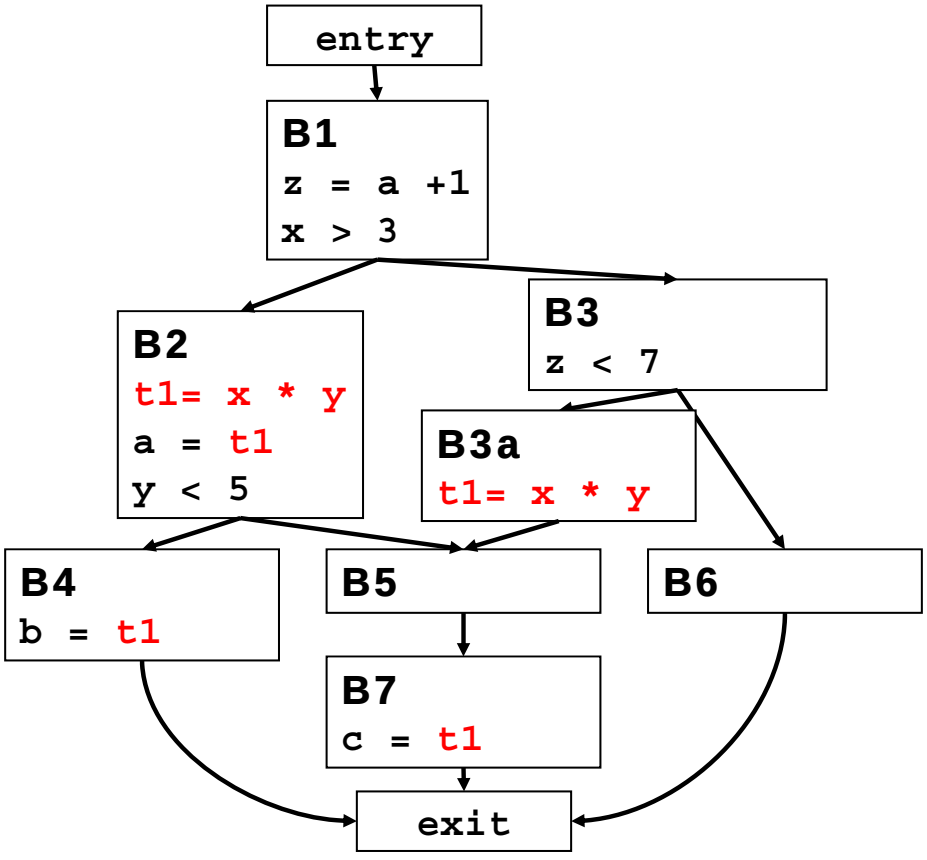
Beispiel



Was ist besonders an Kante **(B3, B5)**?

Quelle: CMU CS 15-745 2009

Beispiel

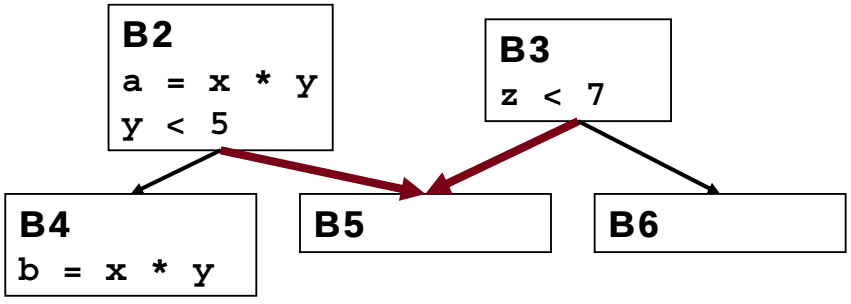


Was ist besonders an Kante **(B3, B5)**?

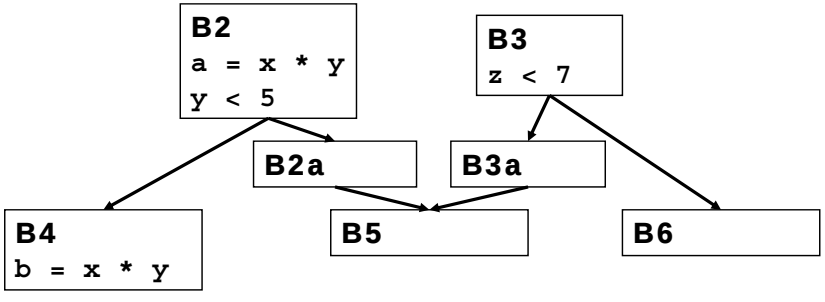
Quelle: CMU CS 15-745 2009

Kritische Kante

Vor Aufteilen



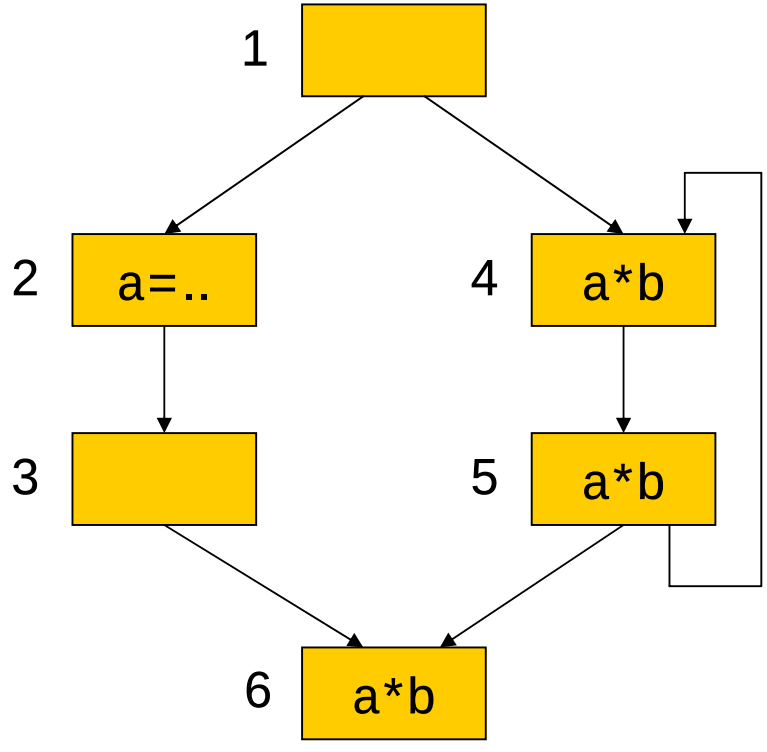
Alle kritischen Kanten aufgeteilt



Nachteil: Potentiell langsamer (Compile- und Laufzeit!)

PRE kombiniert drei Optimierungen

- CSE: `a*b` in **B5**
- LICM: `a*b` in **B4**
- Bewegung: `a*b` von **B6** nach **B3**



Quelle: Dhamdhere, Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

Qualitätskriterien

Optimale Lebenszeit

Die Lebenszeit von einer Neuberechnung zu einer Verwendung sollte so kurz wie möglich sein.

➥Benötigt weniger Register

Berechnungsoptimalität

Zur Programmlaufzeit sollen so wenige Berechnungen wie möglich ausgeführt werden.

Qualitätskriterien

Optimale Lebenszeit

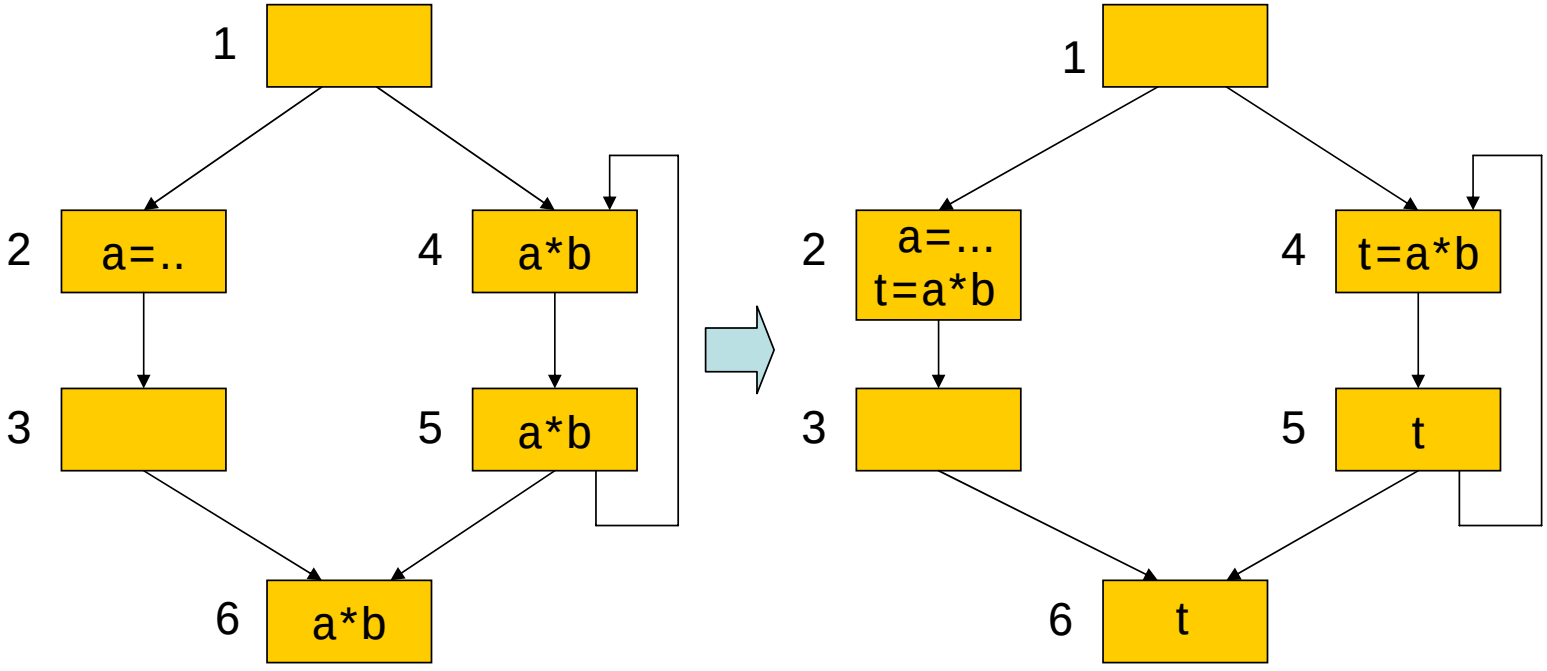
Die Lebenszeit von einer Neuberechnung zu einer Verwendung sollte so kurz wie möglich sein.

➥Benötigt weniger Register

Berechnungsoptimalität

Zur Programmlaufzeit sollen so wenige Berechnungen wie möglich ausgeführt werden.

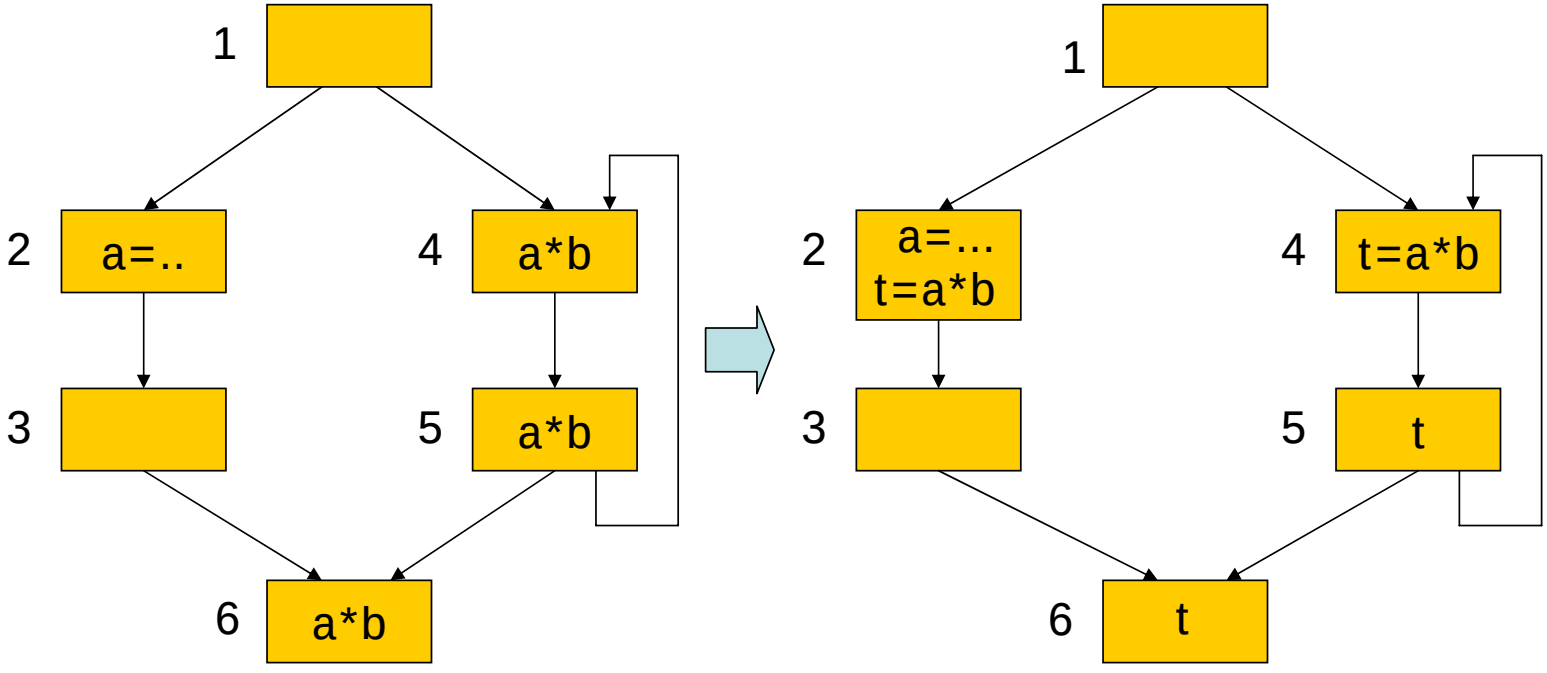
Algorithmus von Morel und Renvoise 1979



- Neue Berechnung von **a*b** eingefügt in **B2**
- **B3** wäre besser (kürzere Lebenszeit!)
- **a*b** in **B4** nicht berechnungsoptimal
  - Wegen (**B1**,**B2**) nicht am Ende von **B1** eingefügt
- **a*b** gesichert in **B2**+**B4**, wiederverwendet in **B5**+**B6**

Quelle: Dhamdhere, Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

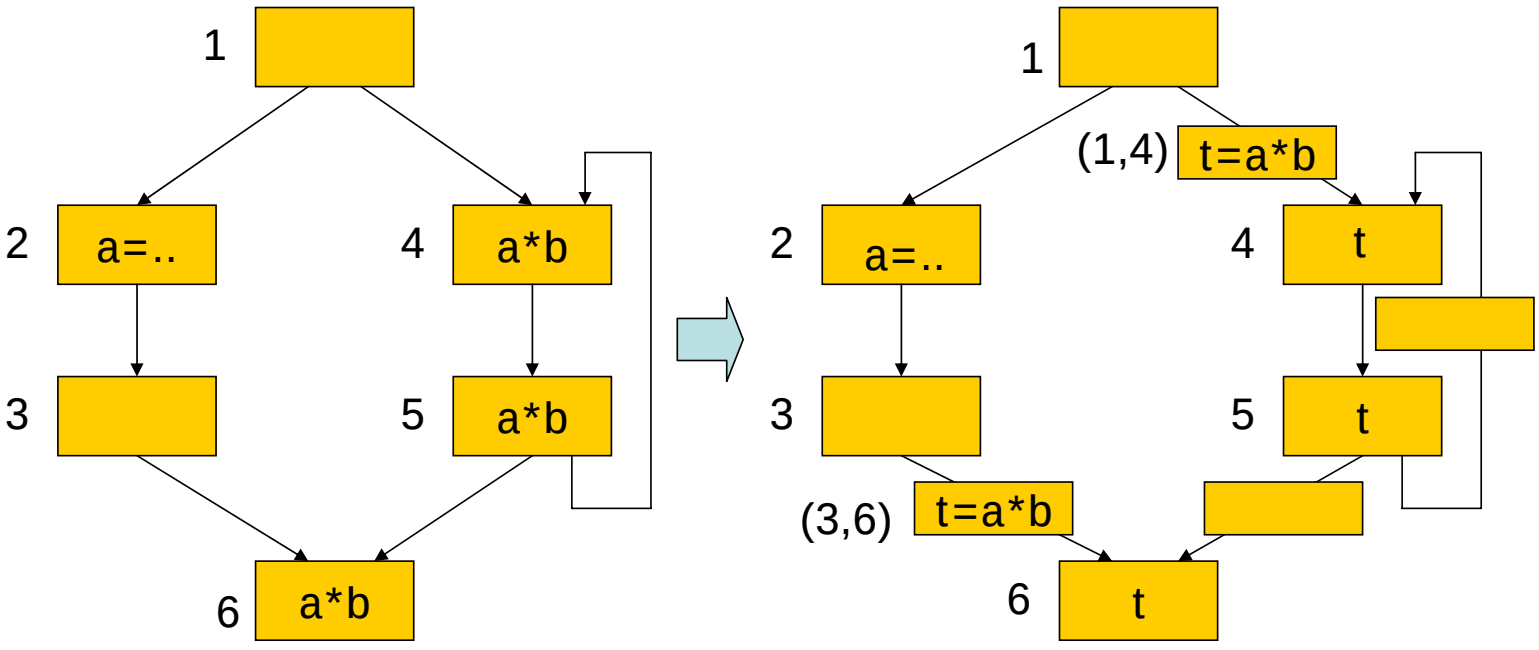
Algorithmus von Morel und Renvoise 1979



- Neue Berechnung von **a*b** eingefügt in **B2**
- **B3** wäre besser (kürzere Lebenszeit!)
- **a*b** in **B4** nicht berechnungsoptimal
  - Wegen (**B1**,**B2**) nicht am Ende von **B1** eingefügt
- **a*b** gesichert in **B2**+**B4**, wiederverwendet in **B5**+**B6**

Quelle: Dhamdhere, Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

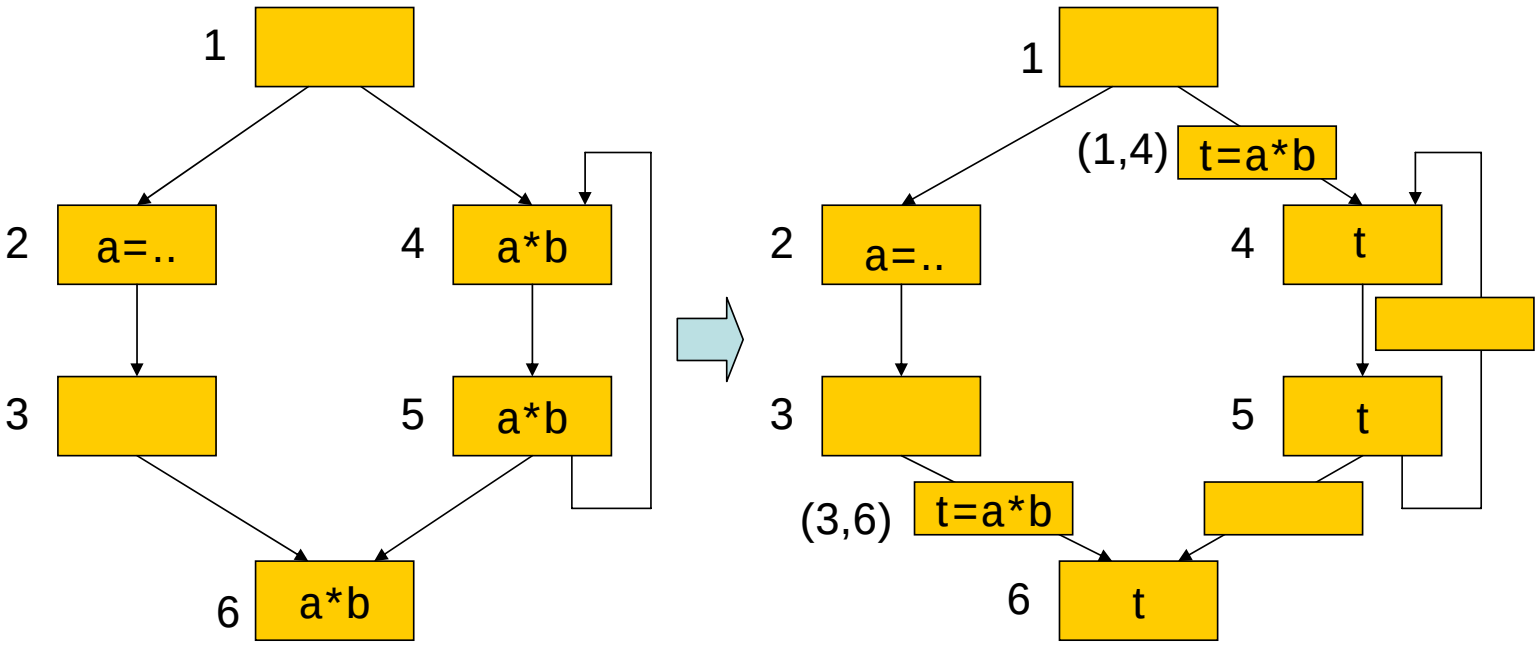
Alg. von Knoop, Ruthing und Steffen 1992
Lazy Code Motion (LCM)



- Alle Kanten zu Join-Knoten aufteilen
- **a*b** einfügen in **(B3,B6)** (hat optimale Lebenszeit!)
- **a*b** einfügen in **(B1,B4)** (berechnungsoptimal)
- Erzeugt zusätzliche Blöcke (leere entfernbar)

Quelle: Dhamdhere, Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

Alg. von Knoop, Ruthing und Steffen 1992
Lazy Code Motion (LCM)



- Alle Kanten zu Join-Knoten aufteilen
- **a*b** einfügen in **(B3,B6)** (hat optimale Lebenszeit!)
- **a*b** einfügen in **(B1,B4)** (berechnungsoptimal)
- Erzeugt zusätzliche Blöcke (leere entfernbar)

Quelle: Dhamdhere, Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

Konzepte

Verfügbarkeit

Verfügbarkeit (Availability)

Ein Ausdruck *e* ist an einer Programmstelle *p* verfügbar, wenn sein Wert auf allen Pfaden von Programmanfang zu *p* berechnet wird.

➥Totale Redundanz von *e* an *p*

Partielle Verfügbarkeit (Partial Availability)

Ein Ausdruck *e* ist an einer Programmstelle *p* partiell verfügbar, wenn sein Wert auf einigen Pfaden von Programmanfang zu *p* berechnet wird.

➥Partielle Redundanz von *e* an *p*

Verfügbarkeit

Verfügbarkeit (Availability)

Ein Ausdruck *e* ist an einer Programmstelle *p* verfügbar, wenn sein Wert auf allen Pfaden von Programmanfang zu *p* berechnet wird.

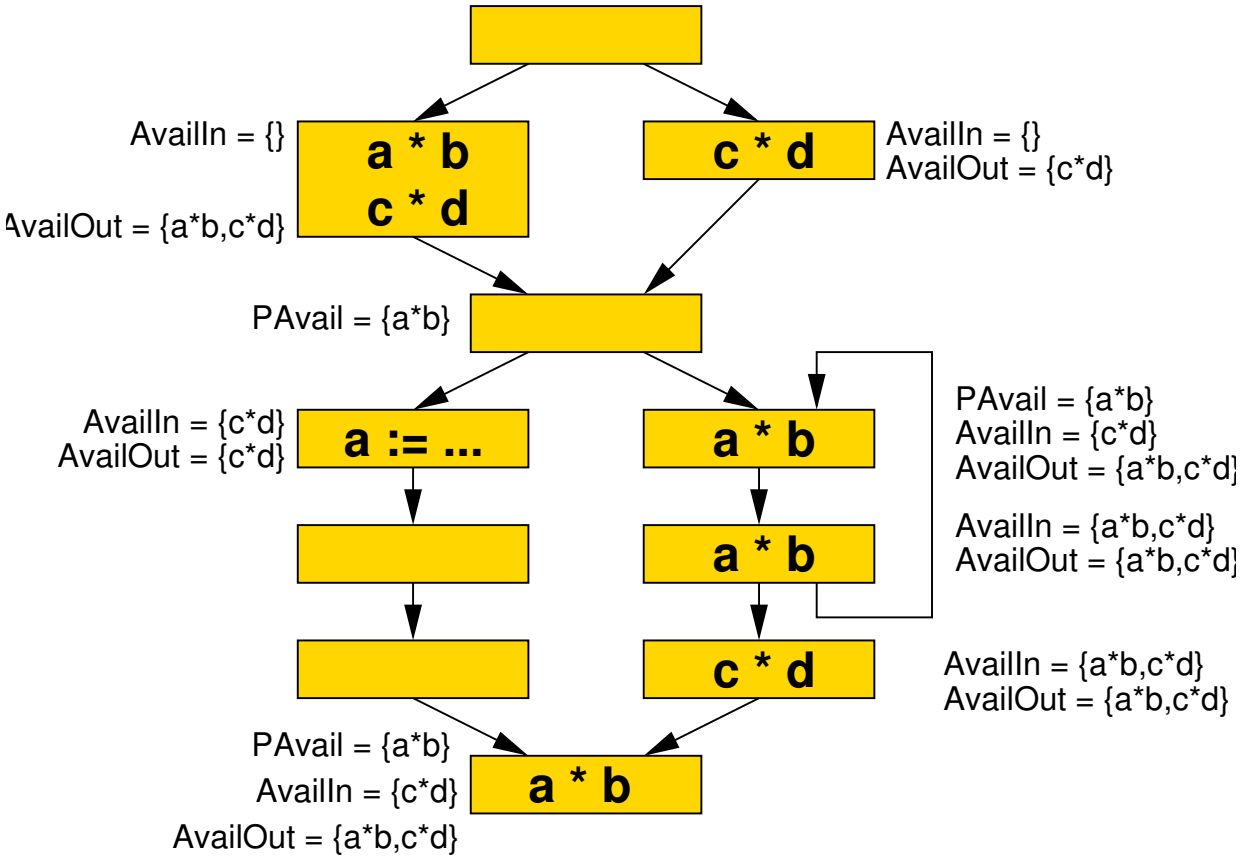
➥Totale Redundanz von *e* an *p*

Partielle Verfügbarkeit (Partial Availability)

Ein Ausdruck *e* ist an einer Programmstelle *p* partiell verfügbar, wenn sein Wert auf einigen Pfaden von Programmanfang zu *p* berechnet wird.

➥Partielle Redundanz von *e* an *p*

Beispiel: Verfügbare Ausdrücke



Lokal exponierte Ausdrücke

Embedded Systems & Applications

Nach oben exponierte Ausdrücke (Upwards Exposed)

Ausdrücke, deren Operanden vom Blockanfang bis zu ihrer Stelle nicht überschrieben werden sind nach oben exponiert.

➥Ihre Berechnung könnte an den Blockanfang vorgezogen werden

- $\rightarrow$ UEExpr
- Auch genannt lokal vorziehbar (locally anticipatable, ANTloc)

Lokal exponierte Ausdrücke

Nach oben exponierte Ausdrücke (Upwards Exposed)

Ausdrücke, deren Operanden vom Blockanfang bis zu ihrer Stelle nicht überschrieben werden sind nach oben exponiert.

➥Ihre Berechnung könnte an den Blockanfang vorgezogen werden

- $\rightarrow$ UEExpr
- Auch genannt lokal vorziehbar (locally anticipatable, ANTloc)

Lokal exponierte Ausdrücke

Embedded Systems & Applications

Nach unten exponierte Ausdrücke (Downward Exposed)

Ausdrücke, deren Operanden von ihrer Stelle bis zum Blockende nicht überschrieben werden sind nach unten exponiert.

➥Ihre Berechnung könnte an das Blockende verzögert werden

- → DEExpr

Lokal exponierte Ausdrücke

Nach unten exponierte Ausdrücke (Downward Exposed)

Ausdrücke, deren Operanden von ihrer Stelle bis zum Blockende nicht überschrieben werden sind nach unten exponiert.

➥Ihre Berechnung könnte an das Blockende verzögert werden

- $\rightarrow$ DEExpr

Beispiel: Lokal exponierte Ausdrücke

a : = 42	
w := a + b	nicht UEExpr/ANTloc, DEExpr
x := c + d	UEExpr/ANTloc, DEExpr
y := e + f	UEExpr/ANTloc, nicht DEExpr
z := a + e	nicht UEExpr/ANTloc, nicht DEExpr
e := 23	

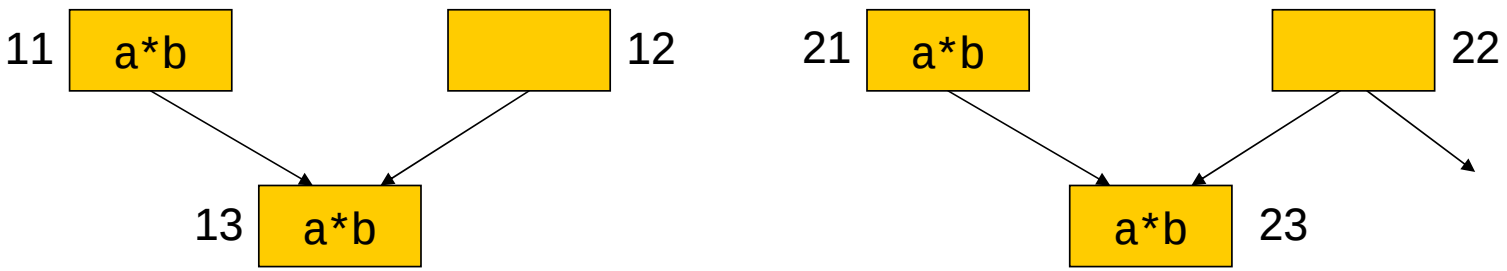
Globale Vorziehbarkeit

Vorziehbarkeit (Anticipatability)

Die Berechnung eines Ausdrucks e ist vorziehbar an eine Programmstelle p, wenn er auf allen Pfaden von p zum Programmende berechnet wird.

➥Auch genannt: Very Busy Expression

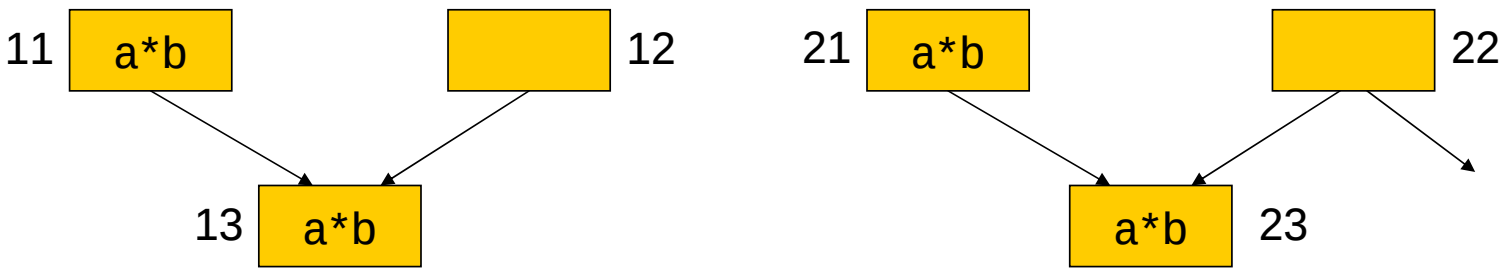
Beispiel: Vorziehbarkeit



- **a*b** vorziehbar nach Block 12
- Aber nicht nach Block 22

Quelle: Dhamdhere, Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

Beispiel: Vorziehbarkeit



- **a*b** vorziehbar nach Block 12
- Aber nicht nach Block 22

Quelle: Dhamdhere, Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

Sicherheit von Berechnungen

Sichere Berechnung

Ein Ausdruck *e* kann an der Stelle *p* sicher berechnet werden, wenn er dort bereits verfügbar ist oder dorthin vorgezogen werden kann.

➥Ziel: Gleicher Wert ohne weitere eventuelle Berechnungsfehler (exceptions, z.B. Division-by-Zero)

- Im 1. Fall wurde der Ausdruck so bereits berechnet und könnte gefahrlos noch ein weiteres Mal berechnet werden
- Im 2. Fall würden eventuelle Fehler ohnehin auftreten, da dieser Ausdruck später in jedem Fall berechnet würde

Sicherheit von Berechnungen

Sichere Berechnung

Ein Ausdruck *e* kann an der Stelle *p* sicher berechnet werden, wenn er dort bereits verfügbar ist oder dorthin vorgezogen werden kann.

➥Ziel: Gleicher Wert ohne weitere eventuelle Berechnungsfehler (exceptions, z.B. Division-by-Zero)

- Im 1. Fall wurde der Ausdruck so bereits berechnet und könnte gefahrlos noch ein weiteres Mal berechnet werden
- Im 2. Fall würden eventuelle Fehler ohnehin auftreten, da dieser Ausdruck später in jedem Fall berechnet würde

Sicherheit von Berechnungen

Sichere Berechnung

Ein Ausdruck *e* kann an der Stelle *p* sicher berechnet werden, wenn er dort bereits verfügbar ist oder dorthin vorgezogen werden kann.

➥Ziel: Gleicher Wert ohne weitere eventuelle Berechnungsfehler (exceptions, z.B. Division-by-Zero)

- Im 1. Fall wurde der Ausdruck so bereits berechnet und könnte gefahrlos noch ein weiteres Mal berechnet werden
- Im 2. Fall würden eventuelle Fehler ohnehin auftreten, da dieser Ausdruck später in jedem Fall berechnet würde

Sicherheit von Berechnungen

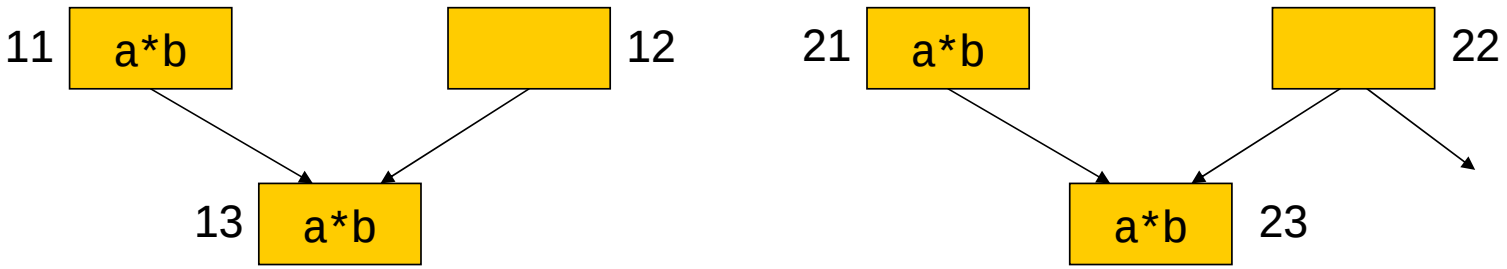
Sichere Berechnung

Ein Ausdruck *e* kann an der Stelle *p* sicher berechnet werden, wenn er dort bereits verfügbar ist oder dorthin vorgezogen werden kann.

➥Ziel: Gleicher Wert ohne weitere eventuelle Berechnungsfehler (exceptions, z.B. Division-by-Zero)

- Im 1. Fall wurde der Ausdruck so bereits berechnet und könnte gefahrlos noch ein weiteres Mal berechnet werden
- Im 2. Fall würden eventuelle Fehler ohnehin auftreten, da dieser Ausdruck später in jedem Fall berechnet würde

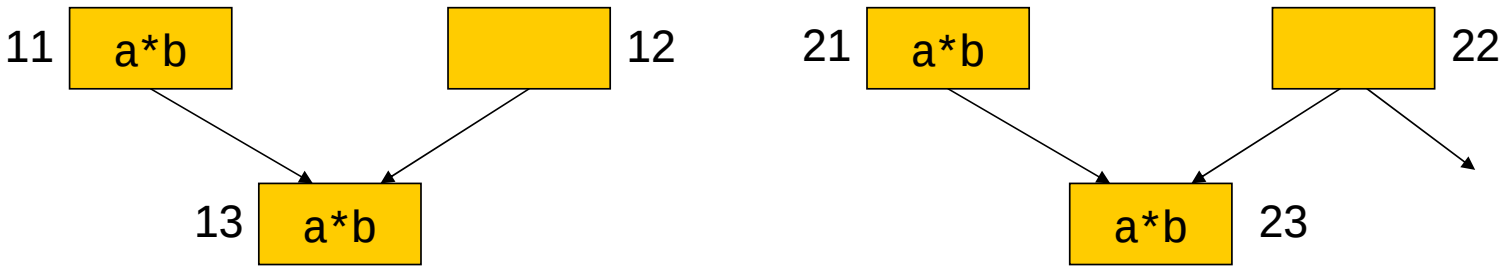
Beispiel: Sicherheit



- Neuberechnung von **a*b** in Block 12 ist sicher
- **a*b** in Block 22 ist unsicher
- **a*b** in Kante (Block 22, Block 23) wäre sicher

Quelle: Dhamdhere ,Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

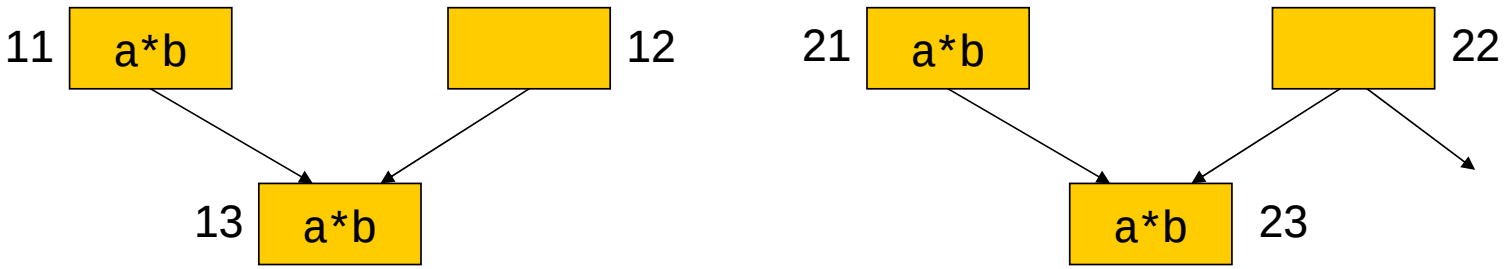
Beispiel: Sicherheit



- Neuberechnung von **a*b** in Block 12 ist sicher
- **a*b** in Block 22 ist unsicher
- **a*b** in Kante (Block 22, Block 23) wäre sicher

Quelle: Dhamdhere ,Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

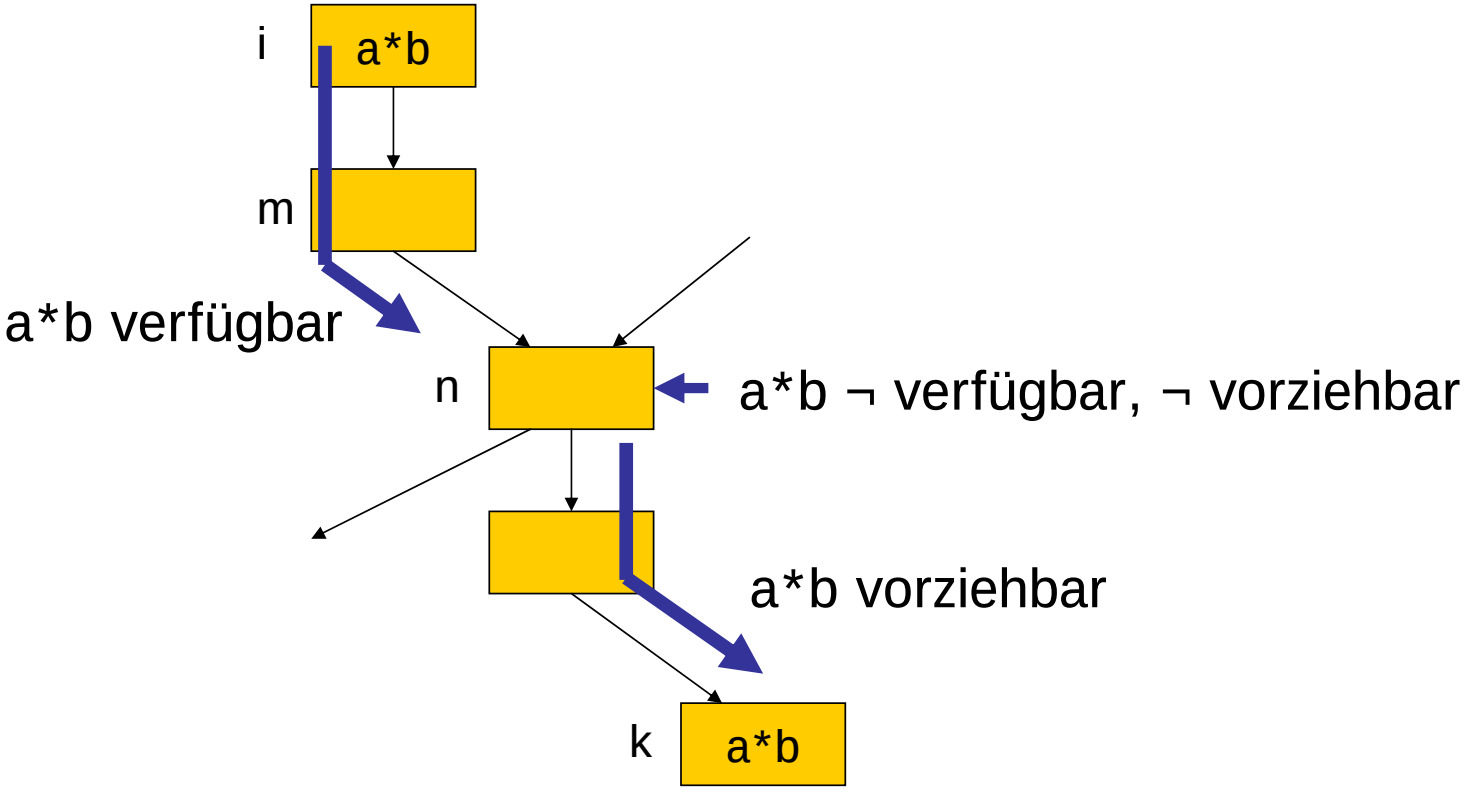
Beispiel: Sicherheit



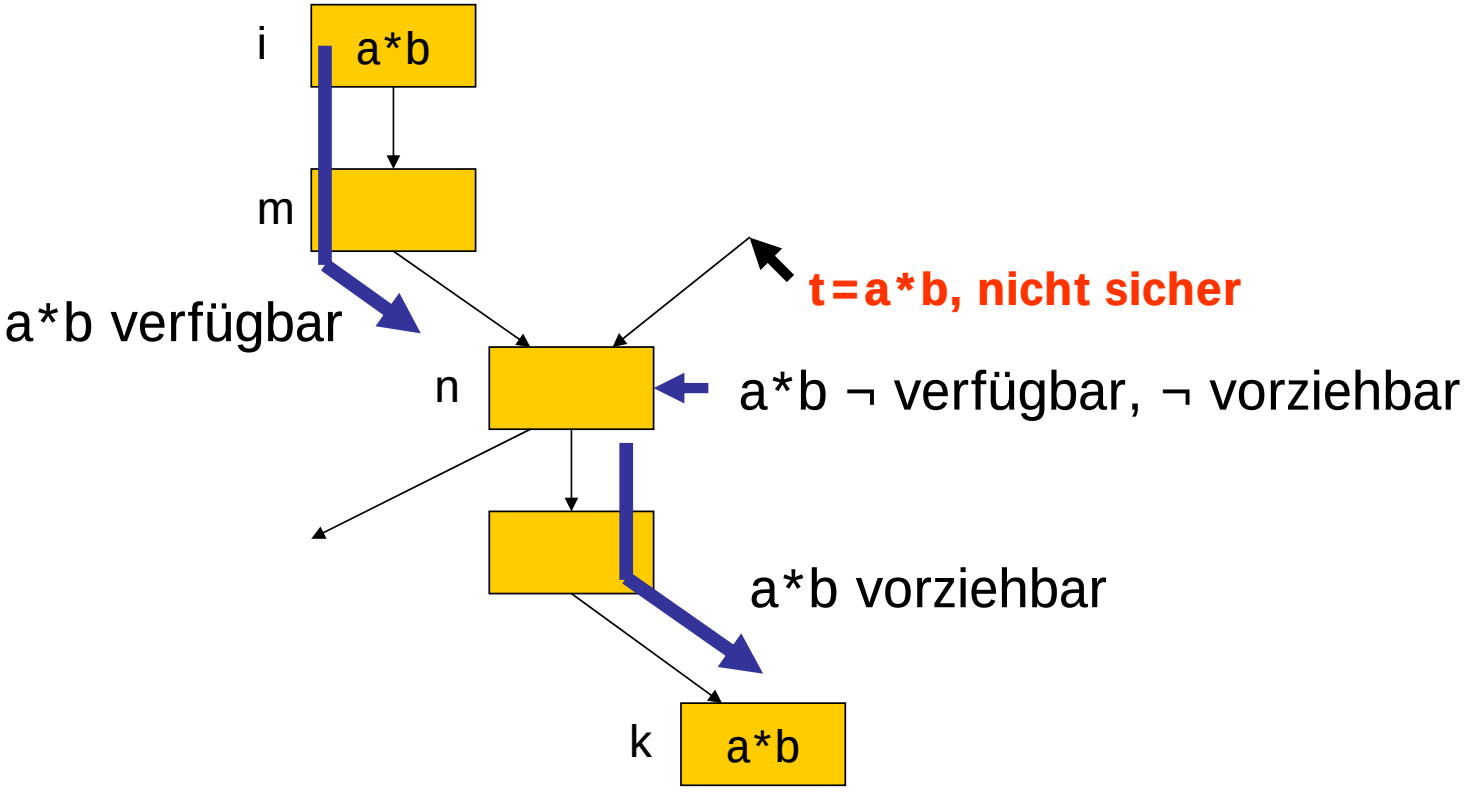
- Neuberechnung von **a*b** in Block 12 ist sicher
- **a*b** in Block 22 ist unsicher
- **a*b** in Kante (Block 22, Block 23) wäre sicher

Quelle: Dhamdhere ,Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

Beispiel: Verfügbar, vorziehbar, sicher



Beispiel: Verfügbar, vorziehbar, sicher



Transparenz und Leere

Transparenz

Ein Block **B** ist transparent in Hinblick auf einen Ausdruck *e*, wenn er selbst keine Zuweisungen an Operanden von *e* enthält.

Leere

Ein Block **B** ist leer in Hinblick auf einen Ausdruck *e*, wenn er selbst weder eine Auswertung von *e* enthält noch Zuweisungen an Operanden von *e*.

➥Schreibweise: empty(**B**) = TRUE bezüglich *e*

Transparenz und Leere

Transparenz

Ein Block **B** ist transparent in Hinblick auf einen Ausdruck *e*, wenn er selbst keine Zuweisungen an Operanden von *e* enthält.

Leere

Ein Block **B** ist leer in Hinblick auf einen Ausdruck *e*, wenn er selbst weder eine Auswertung von *e* enthält noch Zuweisungen an Operanden von *e*.

➥Schreibweise: empty(**B**) = TRUE bezüglich *e*

Transparenz und Leere

Transparenz

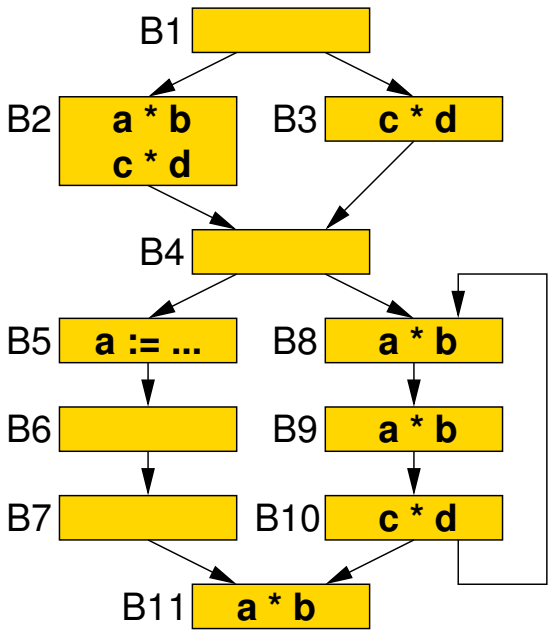
Ein Block **B** ist transparent in Hinblick auf einen Ausdruck *e*, wenn er selbst keine Zuweisungen an Operanden von *e* enthält.

Leere

Ein Block **B** ist leer in Hinblick auf einen Ausdruck *e*, wenn er selbst weder eine Auswertung von *e* enthält noch Zuweisungen an Operanden von *e*.

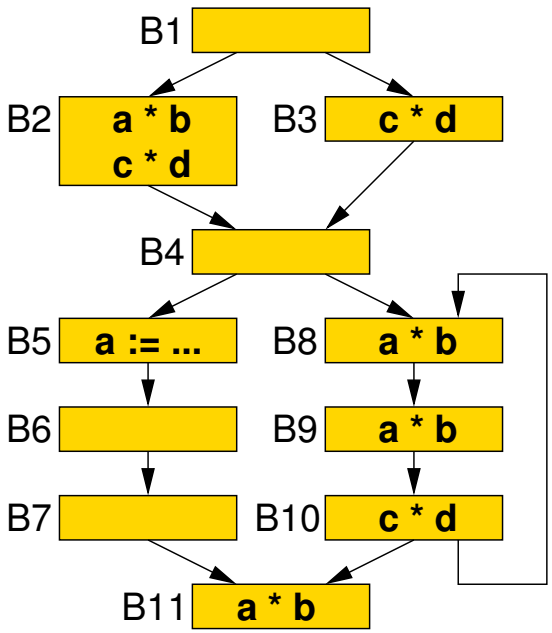
➥Schreibweise: empty(**B**) = TRUE bezüglich *e*

Beispiel: Transparenz



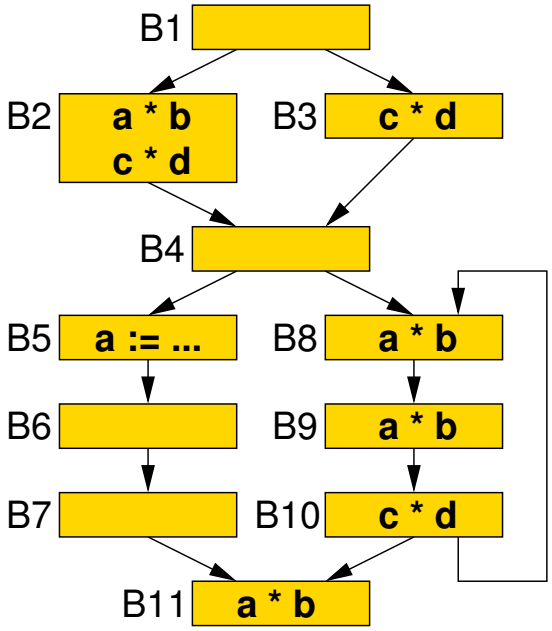
- Für **a*b**
  - Alle Blöcke ausser **B5** sind transparent
  - $b \in \{$ **B1, B3, B4, B6, B7, B10** $\}$: empty(b) = TRUE
- Für **c*d**
  - Alle Blöcke sind transparent
  - $b \in \{$ **B1, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B11** $\}$: empty(b) = TRUE

Beispiel: Transparenz



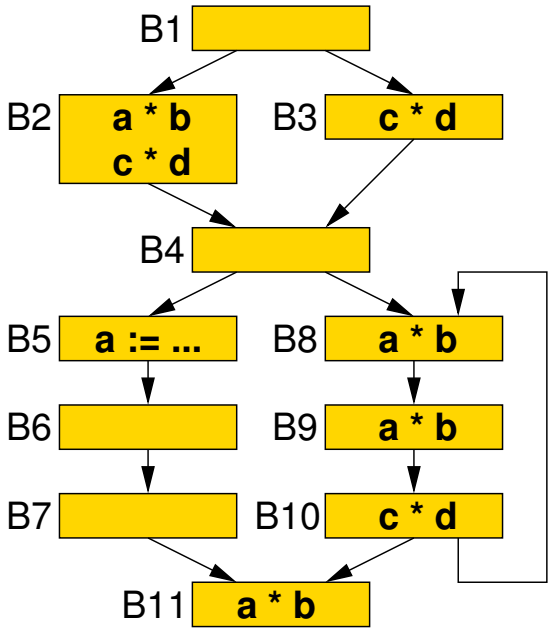
- Für **a*b**
  - Alle Blöcke ausser **B5** sind transparent
  - $b \in \{$ **B1, B3, B4, B6, B7, B10** $\}$: empty(b) = TRUE
- Für **c*d**
  - Alle Blöcke sind transparent
  - $b \in \{$ **B1, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B11** $\}$: empty(b) = TRUE

Beispiel: Transparenz



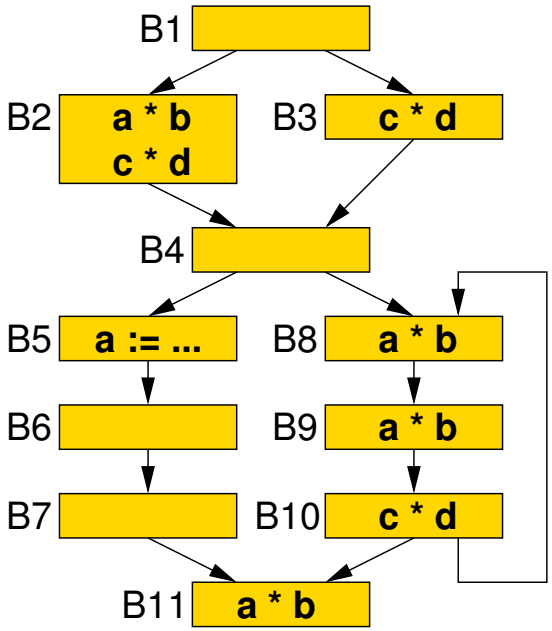
- Für **a*b**
  - Alle Blöcke ausser **B5** sind transparent
  - $b \in \{$ **B1, B3, B4, B6, B7, B10** $\}$: empty(b) = TRUE
- Für **c*d**
  - Alle Blöcke sind transparent
  - $b \in \{$ **B1, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B11** $\}$: empty(b) = TRUE

Beispiel: Transparenz



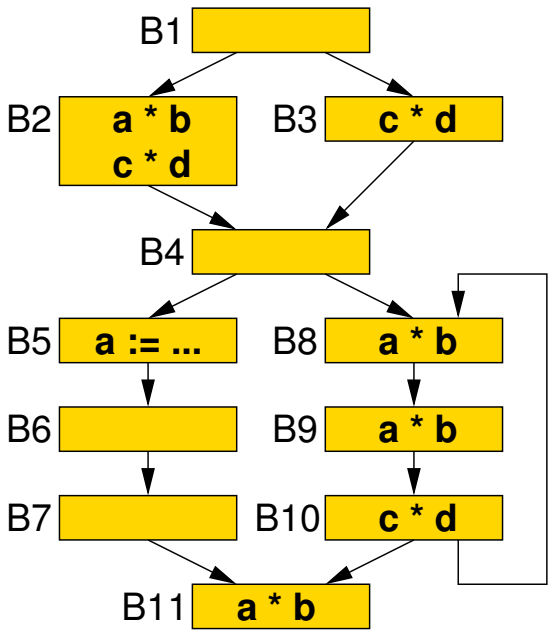
- Für **a*b**
  - Alle Blöcke ausser **B5** sind transparent
  - $b \in \{$ **B1, B3, B4, B6, B7, B10** $\}$: empty(b) = TRUE
- Für **c*d**
  - Alle Blöcke sind transparent
  - $b \in \{$ **B1, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B11** $\}$: empty(b) = TRUE

Beispiel: Transparenz



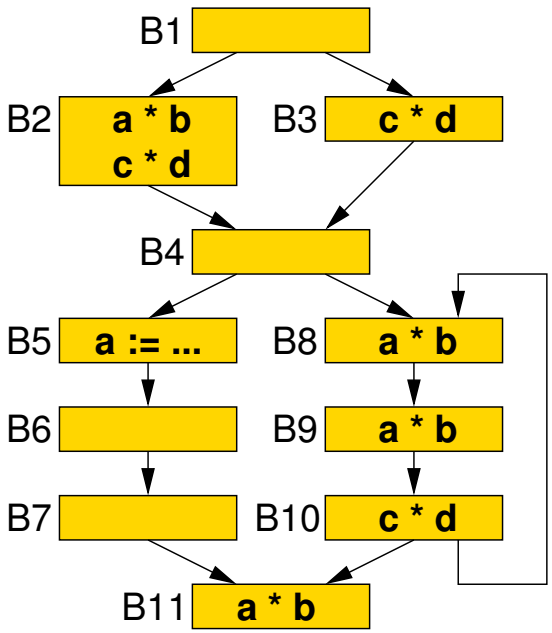
- Für **a*b**
  - Alle Blöcke ausser **B5** sind transparent
  - $b \in \{$ **B1, B3, B4, B6, B7, B10** $\}$: empty(b) = TRUE
- Für **c*d**
  - Alle Blöcke sind transparent
  - $b \in \{$ **B1, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B11** $\}$: empty(b) = TRUE

Beispiel: Transparenz



- Für **a*b**
  - Alle Blöcke ausser **B5** sind transparent
  - $b \in \{$ **B1, B3, B4, B6, B7, B10** $\}$: empty(b) = TRUE
- Für **c*d**
  - Alle Blöcke sind transparent
  - $b \in \{$ **B1, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B11** $\}$: empty(b) = TRUE

Beispiel: Transparenz



- Für **a*b**
  - Alle Blöcke ausser **B5** sind transparent
  - $b \in \{$ **B1, B3, B4, B6, B7, B10** $\}$: empty(b) = TRUE
- Für **c*d**
  - Alle Blöcke sind transparent
  - $b \in \{$ **B1, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B11** $\}$: empty(b) = TRUE

Anforderungen an guten PRE-Algorithmus

- Bearbeite alle partiell redundanten Verwendungen von Ausdrücken *e*
  - Berechnungsoptimalität
- Füge Neuberechnungen von *e* an sicheren Stellen ein
- Lösche nun total redundant gewordene Berechnungen von *e*
- Achte auf kurze Lebenszeiten von neuberechneten Werten
- Vermeide unnötiges Aufteilen von Kanten
- Bevorzuge schnelleren Algorithmus
- Am besten auch noch möglichst einfach zu verstehen

Anforderungen an guten PRE-Algorithmus

- Bearbeite alle partiell redundanten Verwendungen von Ausdrücken *e*
  - Berechnungsoptimalität
- Füge Neuberechnungen von *e* an sicheren Stellen ein
- Lösche nun total redundant gewordene Berechnungen von *e*
- Achte auf kurze Lebenszeiten von neuberechneten Werten
- Vermeide unnötiges Aufteilen von Kanten
- Bevorzuge schnelleren Algorithmus
- Am besten auch noch möglichst einfach zu verstehen

Anforderungen an guten PRE-Algorithmus

- Bearbeite alle partiell redundanten Verwendungen von Ausdrücken *e*
  - Berechnungsoptimalität
- Füge Neuberechnungen von *e* an sicheren Stellen ein
- Lösche nun total redundant gewordene Berechnungen von *e*
- Achte auf kurze Lebenszeiten von neuberechneten Werten
- Vermeide unnötiges Aufteilen von Kanten
- Bevorzuge schnelleren Algorithmus
- Am besten auch noch möglichst einfach zu verstehen

Anforderungen an guten PRE-Algorithmus

- Bearbeite alle partiell redundanten Verwendungen von Ausdrücken *e*
  - Berechnungsoptimalität
- Füge Neuberechnungen von *e* an sicheren Stellen ein
- Lösche nun total redundant gewordene Berechnungen von *e*
- Achte auf kurze Lebenszeiten von neuberechneten Werten
- Vermeide unnötiges Aufteilen von Kanten
- Bevorzuge schnelleren Algorithmus
- Am besten auch noch möglichst einfach zu verstehen

Anforderungen an guten PRE-Algorithmus

- Bearbeite alle partiell redundanten Verwendungen von Ausdrücken *e*
  - Berechnungsoptimalität
- Füge Neuberechnungen von *e* an sicheren Stellen ein
- Lösche nun total redundant gewordene Berechnungen von *e*
- Achte auf kurze Lebenszeiten von neuberechneten Werten
- Vermeide unnötiges Aufteilen von Kanten
- Bevorzuge schnelleren Algorithmus
- Am besten auch noch möglichst einfach zu verstehen

Anforderungen an guten PRE-Algorithmus

- Bearbeite alle partiell redundanten Verwendungen von Ausdrücken *e*
  - Berechnungsoptimalität
- Füge Neuberechnungen von *e* an sicheren Stellen ein
- Lösche nun total redundant gewordene Berechnungen von *e*
- Achte auf kurze Lebenszeiten von neuberechneten Werten
- Vermeide unnötiges Aufteilen von Kanten
- Bevorzuge schnelleren Algorithmus
- Am besten auch noch möglichst einfach zu verstehen

Anforderungen an guten PRE-Algorithmus

- Bearbeite alle partiell redundanten Verwendungen von Ausdrücken *e*
  - Berechnungsoptimalität
- Füge Neuberechnungen von *e* an sicheren Stellen ein
- Lösche nun total redundant gewordene Berechnungen von *e*
- Achte auf kurze Lebenszeiten von neuberechneten Werten
- Vermeide unnötiges Aufteilen von Kanten
- Bevorzuge schnelleren Algorithmus
- Am besten auch noch möglichst einfach zu verstehen

Anforderungen an guten PRE-Algorithmus

- Bearbeite alle partiell redundanten Verwendungen von Ausdrücken *e*
  - Berechnungsoptimalität
- Füge Neuberechnungen von *e* an sicheren Stellen ein
- Lösche nun total redundant gewordene Berechnungen von *e*
- Achte auf kurze Lebenszeiten von neuberechneten Werten
- Vermeide unnötiges Aufteilen von Kanten
- Bevorzuge schnelleren Algorithmus
- Am besten auch noch möglichst einfach zu verstehen

PRE mit Eliminierungspfaden

PRE mit Eliminierungspfaden

E-path_PRE – Partial Redundancy Elimination Made Easy
ACM SIGPLAN Notices, 2002, vol. 37, no 8, pp. 53-65

- Dhanajay M. Dhamdhere
- Korrigierte Fassung auf OC Web-Site
- Verfeinert zusammen mit Dheeraj Kumar 2006

PRE mit Eliminierungspfaden

E-path_PRE – Partial Redundancy Elimination Made Easy
ACM SIGPLAN Notices, 2002, vol. 37, no 8, pp. 53-65

- Dhanajay M. Dhamdhere
- Korrigierte Fassung auf OC Web-Site
- Verfeinert zusammen mit Dheeraj Kumar 2006

PRE mit Eliminierungspfaden

E-path_PRE – Partial Redundancy Elimination Made Easy
ACM SIGPLAN Notices, 2002, vol. 37, no 8, pp. 53-65

- Dhanajay M. Dhamdhere
- Korrigierte Fassung auf OC Web-Site
- Verfeinert zusammen mit Dheeraj Kumar 2006

Eliminierbarkeitspfad (E-Pfad)

Eliminierbarkeitspfad (E-Pfad, eliminatability path)

Ein E-Pfad für einen Ausdruck *e* ist ein Pfad $b_i, \ldots, b_k$ im CFG so dass

1. *e* lokal verfügbar in b_i und lokal vorziehbar in b_k ist
2. Für $b \in (b_i, \ldots, b_k)$ gilt: *empty(b)* = TRUE
3. *e* ist sicher auf jeder Ausgangskante eines Blocks $b \in [b_i, \ldots, b_k)$

Notation: Ein Pfad $[b_i, \ldots, b_k]$ enthält seine Anfangs- und Endblöcke, ein Pfad $(b_i, \ldots, b_k)$ nicht.

Eliminierbarkeitspfad (E-Pfad)

Eliminierbarkeitspfad (E-Pfad, eliminatability path)

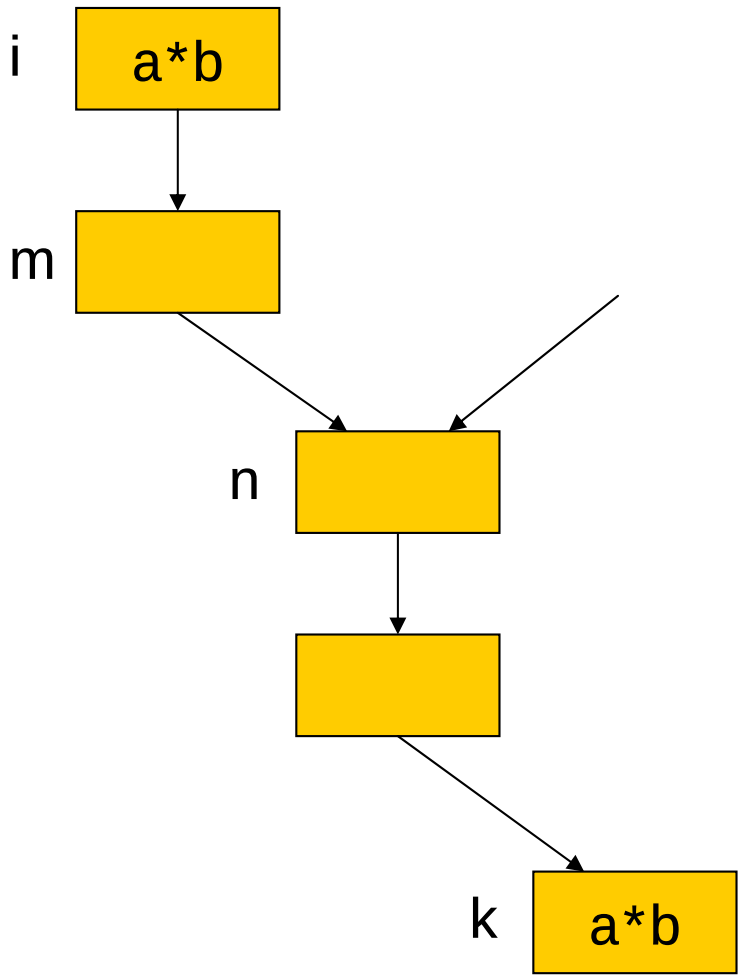
Ein E-Pfad für einen Ausdruck *e* ist ein Pfad $b_i, \ldots, b_k$ im CFG so dass

1. *e* lokal verfügbar in b_i und lokal vorziehbar in b_k ist
2. Für $b \in (b_i, \ldots, b_k)$ gilt: *empty(b)* = TRUE
3. *e* ist sicher auf jeder Ausgangskante eines Blocks $b \in [b_i, \ldots, b_k)$

Notation: Ein Pfad $[b_i, \ldots, b_k]$ enthält seine Anfangs- und Endblöcke, ein Pfad $(b_i, \ldots, b_k)$ nicht.

Beispiel: E-Pfad

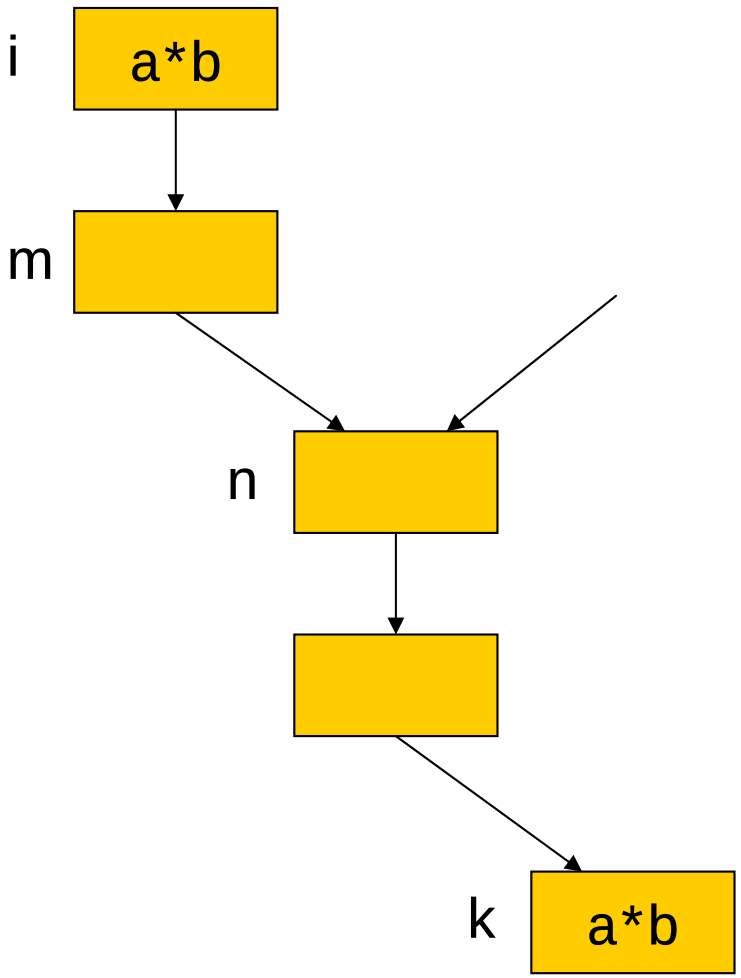
- **a*b** ist verfügbar an Ende von $[i \ldots m]$
- **a*b** ist vorziehbar am Ende von $[n \ldots k)$
- Berechnung von **a*b** in Block k ist eliminierbar



Quelle: Dhamdhere Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

Beispiel: E-Pfad

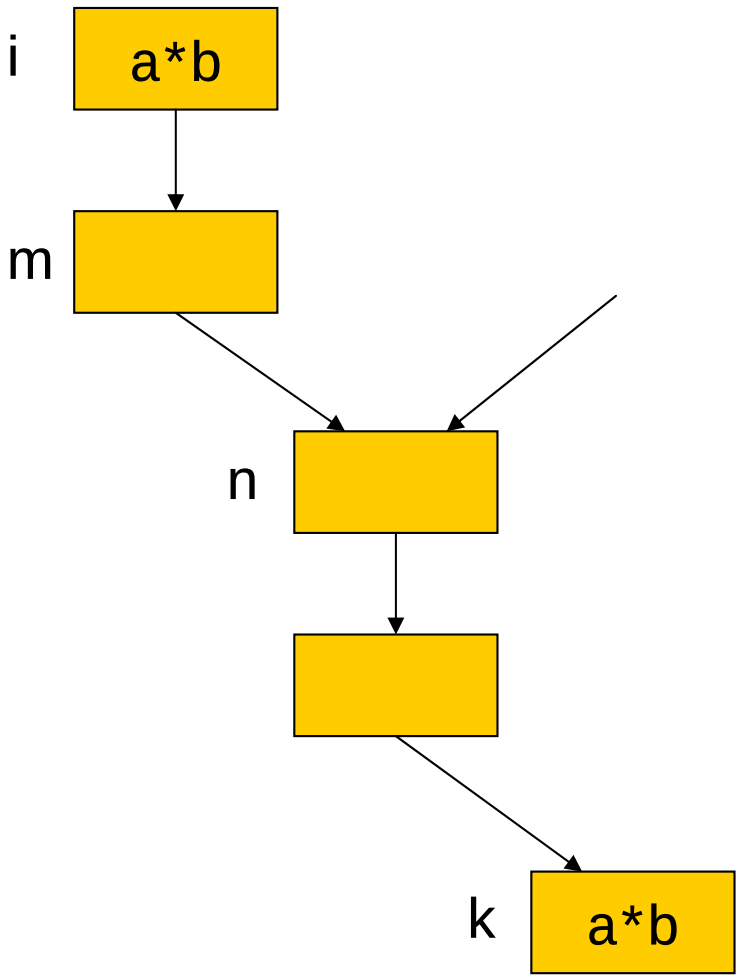
- **a*b** ist verfügbar an Ende von $[i \ldots m]$
- **a*b** ist vorziehbar am Ende von $[n \ldots k)$
- Berechnung von **a*b** in Block k ist eliminierbar



Quelle: Dhamdhere Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

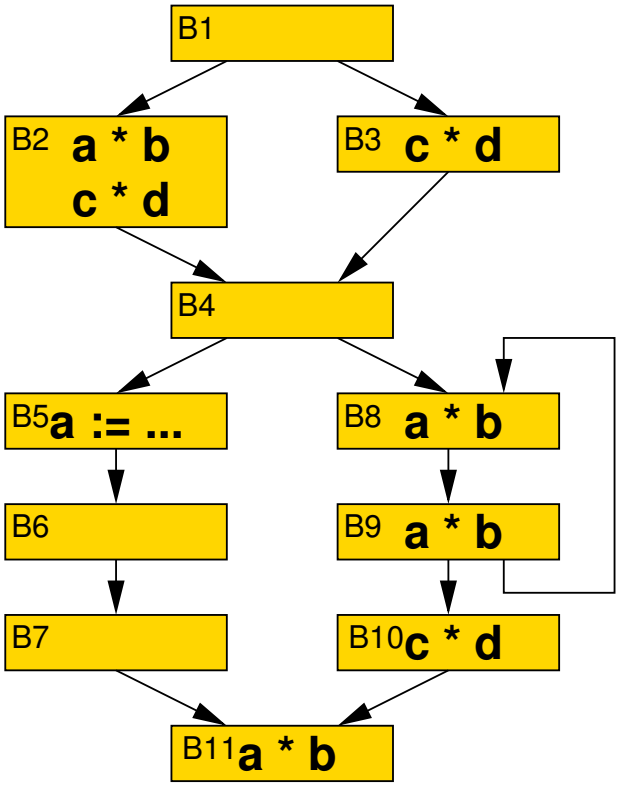
Beispiel: E-Pfad

- **a*b** ist verfügbar an Ende von $[i \ldots m]$
- **a*b** ist vorziehbar am Ende von $[n \ldots k)$
- Berechnung von **a*b** in Block k ist eliminierbar



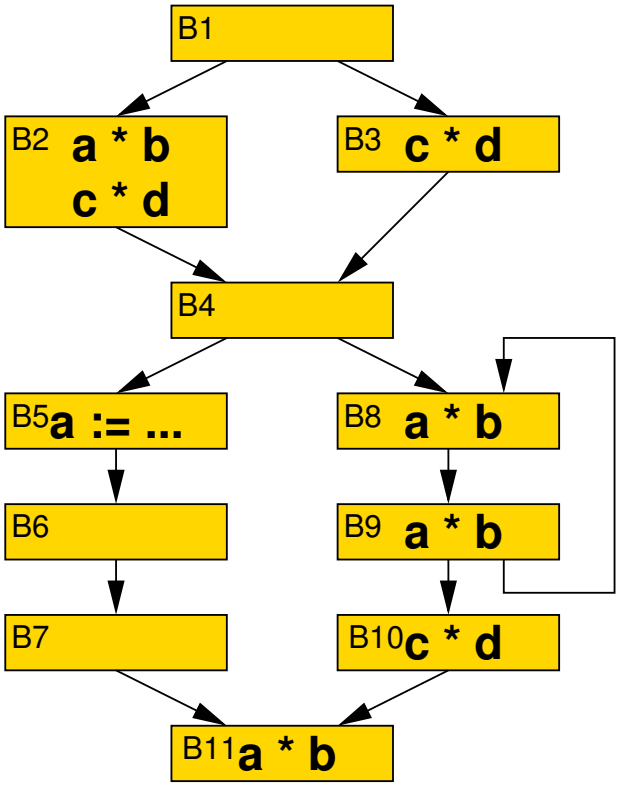
Quelle: Dhamdhere Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

Beispiele für E-Pfade



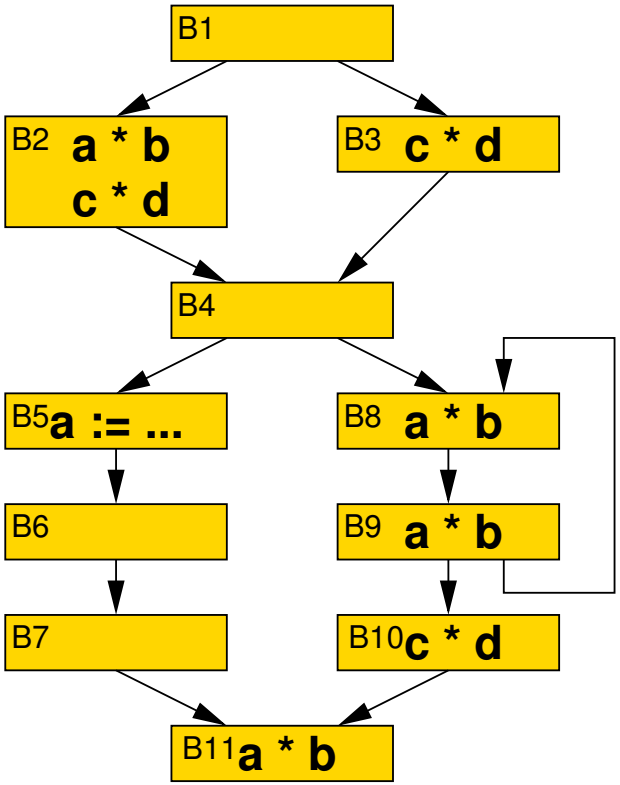
- Für **a*b**
  - $[b_8, b_9]$
  - $[b_9, b_8]$
  - $[b_9, b_{10}, b_{11}]$
  - Nicht: $[b_2, b_4, b_8]$
- Für **c*d**
  - $[b_2, b_4, b_8, b_9, b_{10}]$
  - $[b_3, b_4, b_8, b_9, b_{10}]$

Beispiele für E-Pfade



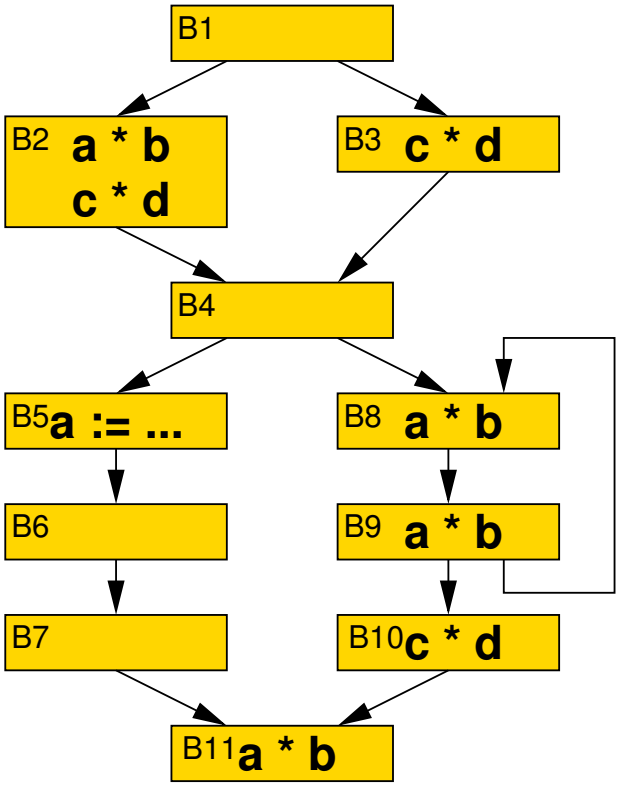
- Für **a*b**
  - $[b_8, b_9]$
  - $[b_9, b_8]$
  - $[b_9, b_{10}, b_{11}]$
  - Nicht: $[b_2, b_4, b_8]$
- Für **c*d**
  - $[b_2, b_4, b_8, b_9, b_{10}]$
  - $[b_3, b_4, b_8, b_9, b_{10}]$

Beispiele für E-Pfade



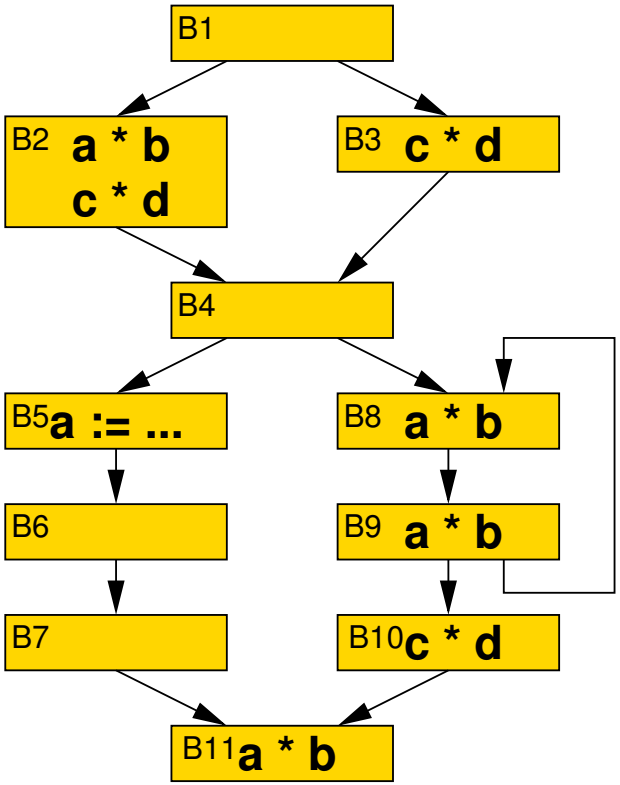
- Für **a*b**
  - $[b_8, b_9]$
  - $[b_9, b_8]$
  - $[b_9, b_{10}, b_{11}]$
  - Nicht: $[b_2, b_4, b_8]$
- Für **c*d**
  - $[b_2, b_4, b_8, b_9, b_{10}]$
  - $[b_3, b_4, b_8, b_9, b_{10}]$

Beispiele für E-Pfade



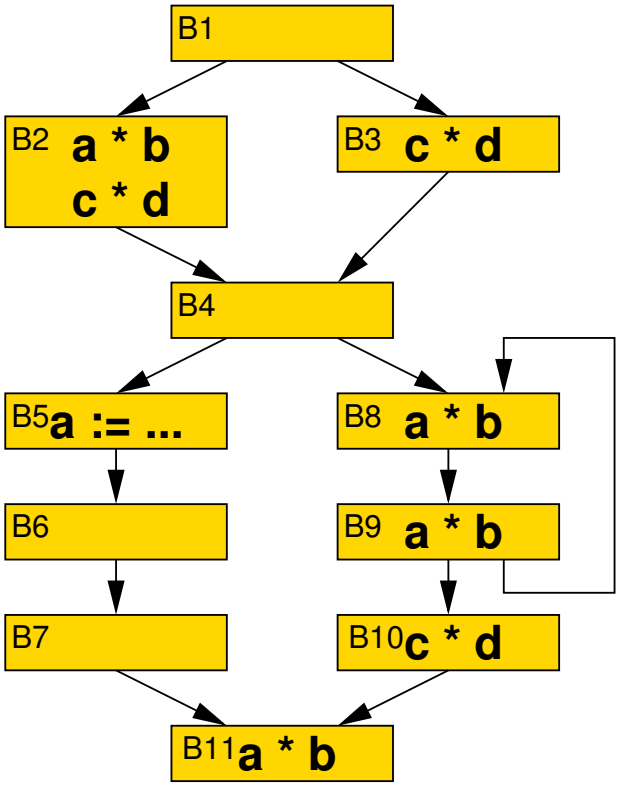
- Für **a*b**
  - $[b_8, b_9]$
  - $[b_9, b_8]$
  - $[b_9, b_{10}, b_{11}]$
  - Nicht: $[b_2, b_4, b_8]$
- Für **c*d**
  - $[b_2, b_4, b_8, b_9, b_{10}]$
  - $[b_3, b_4, b_8, b_9, b_{10}]$

Beispiele für E-Pfade



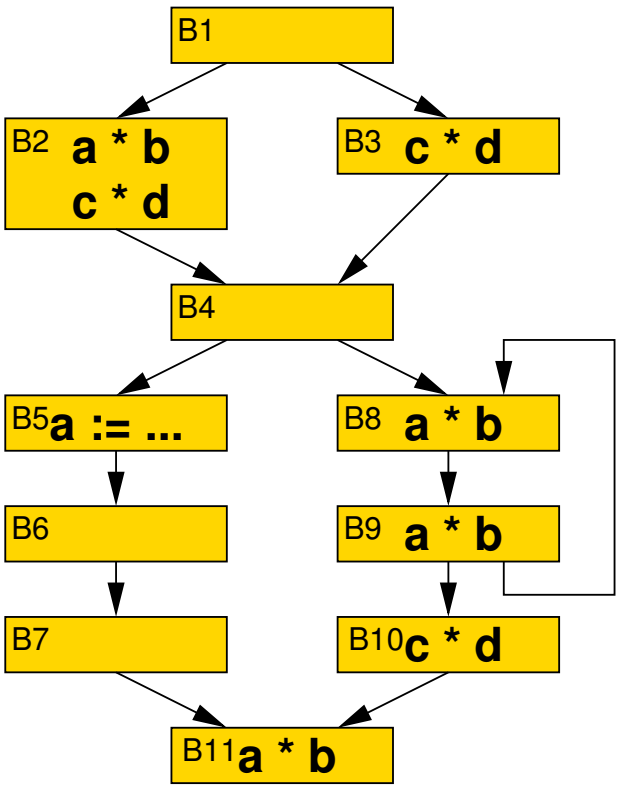
- Für **a*b**
  - $[b_8, b_9]$
  - $[b_9, b_8]$
  - $[b_9, b_{10}, b_{11}]$
  - Nicht: $[b_2, b_4, b_8]$
- Für **c*d**
  - $[b_2, b_4, b_8, b_9, b_{10}]$
  - $[b_3, b_4, b_8, b_9, b_{10}]$

Beispiele für E-Pfade



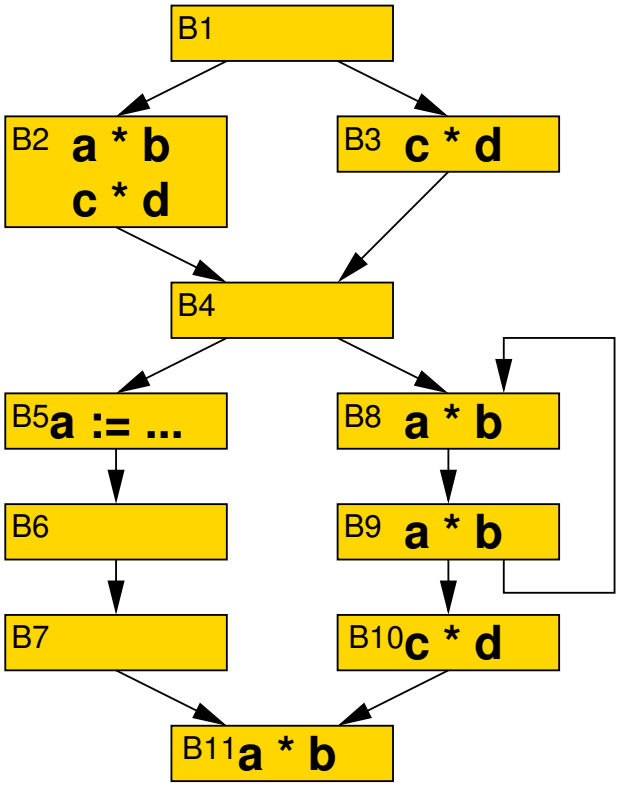
- Für **a*b**
  - $[b_8, b_9]$
  - $[b_9, b_8]$
  - $[b_9, b_{10}, b_{11}]$
  - Nicht: $[b_2, b_4, b_8]$
- Für **c*d**
  - $[b_2, b_4, b_8, b_9, b_{10}]$
  - $[b_3, b_4, b_8, b_9, b_{10}]$

Beispiele für E-Pfade



- Für **a*b**
  - $[b_8, b_9]$
  - $[b_9, b_8]$
  - $[b_9, b_{10}, b_{11}]$
  - Nicht: $[b_2, b_4, b_8]$
- Für **c*d**
  - $[b_2, b_4, b_8, b_9, b_{10}]$
  - $[b_3, b_4, b_8, b_9, b_{10}]$

Beispiele für E-Pfade



- Für **a*b**
  - $[b_8, b_9]$
  - $[b_9, b_8]$
  - $[b_9, b_{10}, b_{11}]$
  - Nicht: $[b_2, b_4, b_8]$
- Für **c*d**
  - $[b_2, b_4, b_8, b_9, b_{10}]$
  - $[b_3, b_4, b_8, b_9, b_{10}]$

Idee für die Optimierung

- Das erste Vorkommen von e im Endblock b_k des E-Pfades $[b_i, \ldots, b_k]$ ist eliminierbar
- Das vorherige Evaluationsergebnis des Ausdrucks e wird dazu gesichert in der Variable t_e
- Wird der Pfad $(b_i, \ldots, b_k)$ von einem Block ausserhalb b_h über eine Kante (b_h, b_j) betreten
- ...muss e (falls nötig) mit $t_e := e$ berechnet und gesichert werden ...
  - Am Ende des Blocks b_h, falls $|\text{succ}(b_h)| = 1$
  - Auf der aufgeteilten Kante (b_h, b_j) sonst
  - Lebenszeitoptimale Platzierung (so spät wie möglich)
- Eine Neuberechnung und Sicherung ist nicht nötig, falls b_h selber auf einem E-Pfad für e liegt.

Idee für die Optimierung

- Das erste Vorkommen von e im Endblock b_k des E-Pfades $[b_i, \ldots, b_k]$ ist eliminierbar
- Das vorherige Evaluationsergebnis des Ausdrucks e wird dazu gesichert in der Variable t_e
- Wird der Pfad $(b_i, \ldots, b_k)$ von einem Block ausserhalb b_h über eine Kante (b_h, b_j) betreten
- ...muss e (falls nötig) mit $t_e := e$ berechnet und gesichert werden ...
  - Am Ende des Blocks b_h, falls $|\text{succ}(b_h)| = 1$
  - Auf der aufgeteilten Kante (b_h, b_j) sonst
  - Lebenszeitoptimale Platzierung (so spät wie möglich)
- Eine Neuberechnung und Sicherung ist nicht nötig, falls b_h selber auf einem E-Pfad für e liegt.

Idee für die Optimierung

- Das erste Vorkommen von e im Endblock b_k des E-Pfades $[b_i, \ldots, b_k]$ ist eliminierbar
- Das vorherige Evaluationsergebnis des Ausdrucks e wird dazu gesichert in der Variable t_e
- Wird der Pfad $(b_i, \ldots, b_k)$ von einem Block ausserhalb b_h über eine Kante (b_h, b_j) betreten
- . . . muss e (falls nötig) mit $t_e := e$ berechnet und gesichert werden . . .
  - Am Ende des Blocks b_h, falls $|\text{succ}(b_h)| = 1$
  - Auf der aufgeteilten Kante (b_h, b_j) sonst
  - Lebenszeitoptimale Platzierung (so spät wie möglich)
- Eine Neuberechnung und Sicherung ist nicht nötig, falls b_h selber auf einem E-Pfad für e liegt.

Idee für die Optimierung

- Das erste Vorkommen von e im Endblock b_k des E-Pfades $[b_i, \ldots, b_k]$ ist eliminierbar
- Das vorherige Evaluationsergebnis des Ausdrucks e wird dazu gesichert in der Variable t_e
- Wird der Pfad $(b_i, \ldots, b_k)$ von einem Block ausserhalb b_h über eine Kante (b_h, b_j) betreten
- ...muss e (falls nötig) mit $t_e := e$ berechnet und gesichert werden ...
  - Am Ende des Blocks b_h, falls $|\text{succ}(b_h)| = 1$
  - Auf der aufgeteilten Kante (b_h, b_j) sonst
  - Lebenszeitoptimale Platzierung (so spät wie möglich)
- Eine Neuberechnung und Sicherung ist nicht nötig, falls b_h selber auf einem E-Pfad für e liegt.

Idee für die Optimierung

- Das erste Vorkommen von e im Endblock b_k des E-Pfades $[b_i, \ldots, b_k]$ ist eliminierbar
- Das vorherige Evaluationsergebnis des Ausdrucks e wird dazu gesichert in der Variable t_e
- Wird der Pfad $(b_i, \ldots, b_k)$ von einem Block ausserhalb b_h über eine Kante (b_h, b_j) betreten
- ...muss e (falls nötig) mit $t_e := e$ berechnet und gesichert werden ...
  - Am Ende des Blocks b_h, falls $|\text{succ}(b_h)| = 1$
  - Auf der aufgeteilten Kante (b_h, b_j) sonst
  - Lebenszeitoptimale Platzierung (so spät wie möglich)
- Eine Neuberechnung und Sicherung ist nicht nötig, falls b_h selber auf einem E-Pfad für e liegt.

Idee für die Optimierung

- Das erste Vorkommen von e im Endblock b_k des E-Pfades $[b_i, \ldots, b_k]$ ist eliminierbar
- Das vorherige Evaluationsergebnis des Ausdrucks e wird dazu gesichert in der Variable t_e
- Wird der Pfad $(b_i, \ldots, b_k)$ von einem Block ausserhalb b_h über eine Kante (b_h, b_j) betreten
- ...muss e (falls nötig) mit $t_e := e$ berechnet und gesichert werden ...
  - Am Ende des Blocks b_h, falls $|\text{succ}(b_h)| = 1$
  - Auf der aufgeteilten Kante (b_h, b_j) sonst
  - Lebenszeitoptimale Platzierung (so spät wie möglich)
- Eine Neuberechnung und Sicherung ist nicht nötig, falls b_h selber auf einem E-Pfad für e liegt.

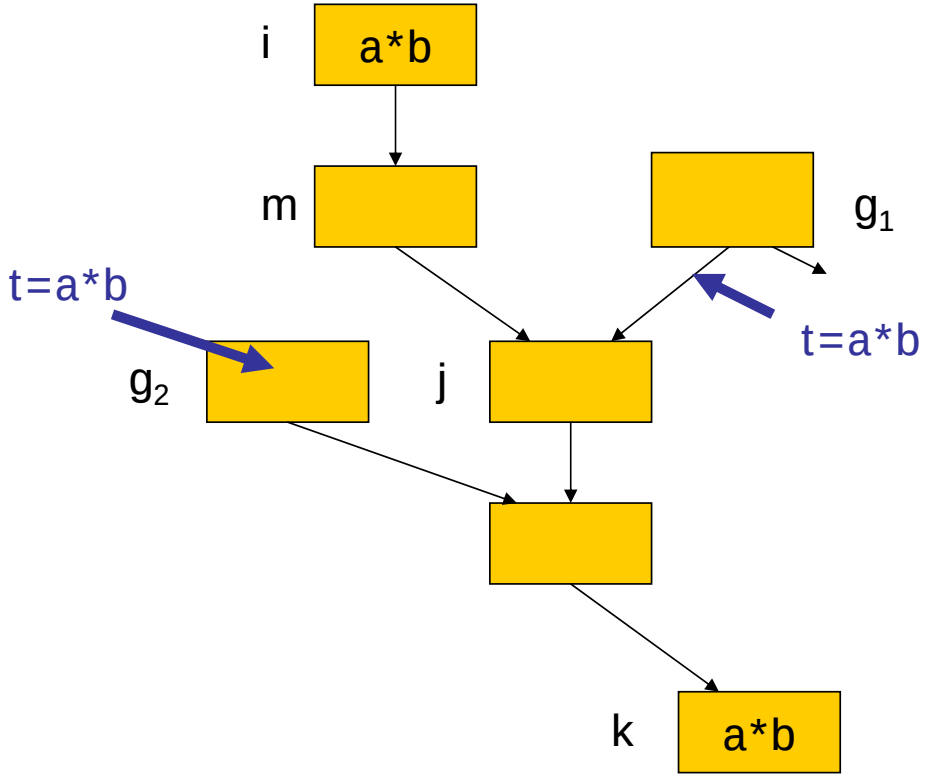
Idee für die Optimierung

- Das erste Vorkommen von e im Endblock b_k des E-Pfades $[b_i, \ldots, b_k]$ ist eliminierbar
- Das vorherige Evaluationsergebnis des Ausdrucks e wird dazu gesichert in der Variable t_e
- Wird der Pfad $(b_i, \ldots, b_k)$ von einem Block ausserhalb b_h über eine Kante (b_h, b_j) betreten
- ...muss e (falls nötig) mit $t_e := e$ berechnet und gesichert werden ...
  - Am Ende des Blocks b_h, falls $|\text{succ}(b_h)| = 1$
  - Auf der aufgeteilten Kante (b_h, b_j) sonst
  - Lebenszeitoptimale Platzierung (so spät wie möglich)
- Eine Neuberechnung und Sicherung ist nicht nötig, falls b_h selber auf einem E-Pfad für e liegt.

Idee für die Optimierung

- Das erste Vorkommen von e im Endblock b_k des E-Pfades $[b_i, \ldots, b_k]$ ist eliminierbar
- Das vorherige Evaluationsergebnis des Ausdrucks e wird dazu gesichert in der Variable t_e
- Wird der Pfad $(b_i, \ldots, b_k)$ von einem Block ausserhalb b_h über eine Kante (b_h, b_j) betreten
- ...muss e (falls nötig) mit $t_e := e$ berechnet und gesichert werden ...
  - Am Ende des Blocks b_h, falls $|\text{succ}(b_h)| = 1$
  - Auf der aufgeteilten Kante (b_h, b_j) sonst
  - Lebenszeitoptimale Platzierung (so spät wie möglich)
- Eine Neuberechnung und Sicherung ist nicht nötig, falls b_h selber auf einem E-Pfad für e liegt.

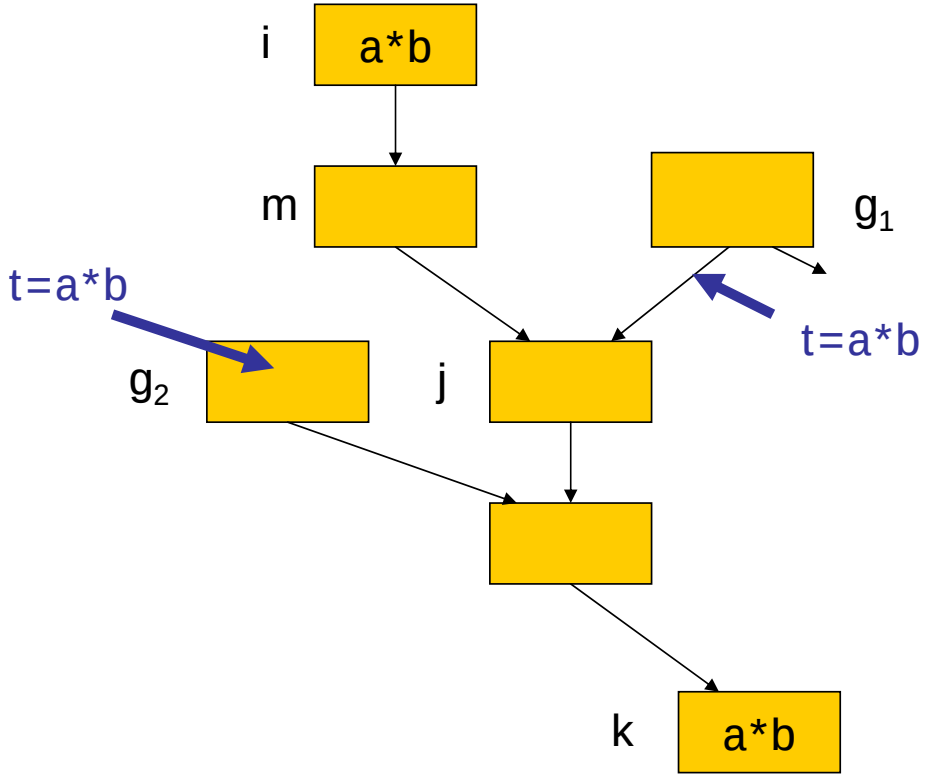
Lebenszeitoptimalität durch E-Pfade



- E-Pfad: $[i, \ldots, k]$
- Einfügen von Berechnungen von e und Kopieren
  - In Kante (g_1, j) und Block g_2

Quelle: Dhamdhere Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

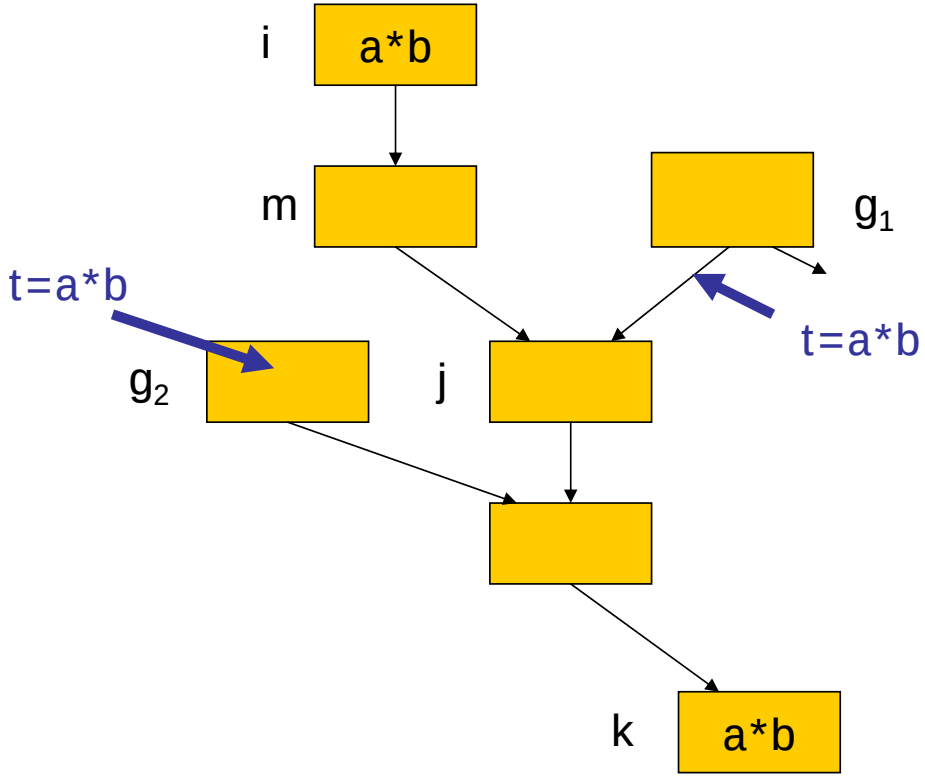
Lebenszeitoptimalität durch E-Pfade



- E-Pfad: $[i, \ldots, k]$
- Einfügen von Berechnungen von e und Kopieren
  - In Kante (g_1, j) und Block g_2

Quelle: Dhamdhere Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

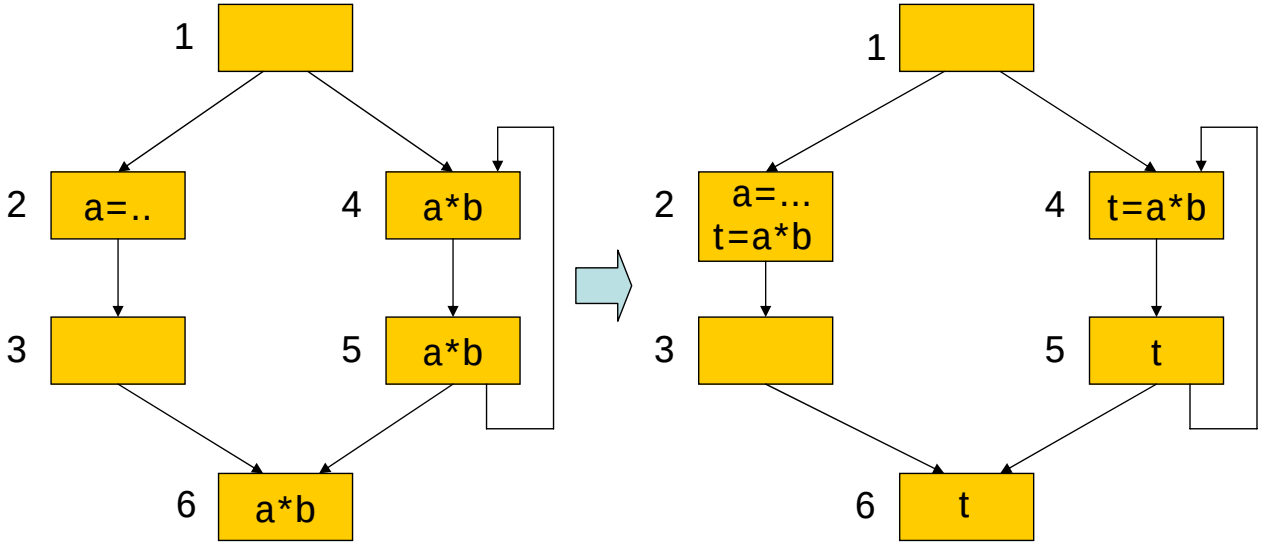
Lebenszeitoptimalität durch E-Pfade



- E-Pfad: $[i, \ldots, k]$
- Einfügen von Berechnungen von e und Kopieren
  - In Kante (g_1, j) und Block g_2

Quelle: Dhamdhere Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

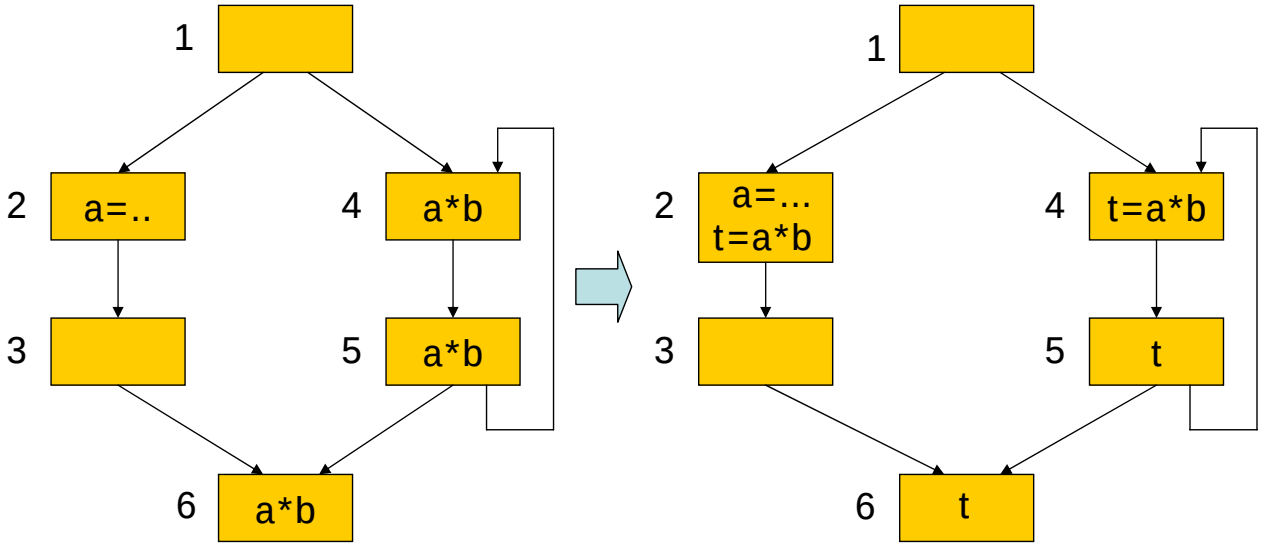
Vergleich mit Ergebnis nach MRA



- E-Pfade: $[4,5]$, $[5,4]$, $[5,6]$
- Herstellen totaler Redundanz: Einfügen in Ast 2,3
  - Nach MRA in 2, mit E-Pfaden in 3: Lebenszeitoptimal
- Entfernen von Redundanz in 4
  - Nach MRA nicht möglich
  - $[5,4]$ ist E-Pfad, Berechnung in 4 muss entfernbar sein
    $\rightarrow$ Kante (1,4) aufteilen, dort Berechnen und Kopieren

Quelle: Dhamdhere Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

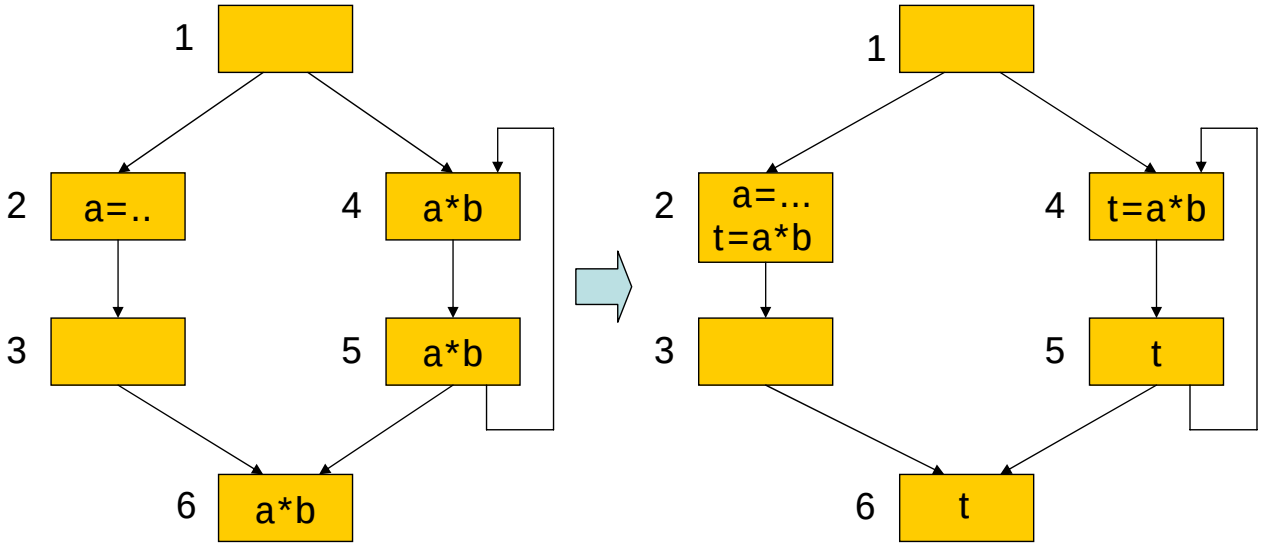
Vergleich mit Ergebnis nach MRA



- E-Pfade: $[4,5]$, $[5,4]$, $[5,6]$
- Herstellen totaler Redundanz: Einfügen in Ast 2,3
  - Nach MRA in 2, mit E-Pfaden in 3: Lebenszeitoptimal
- Entfernen von Redundanz in 4
  - Nach MRA nicht möglich
  - $[5,4]$ ist E-Pfad, Berechnung in 4 muss entfernbar sein
    $\rightarrow$ Kante (1,4) aufteilen, dort Berechnen und Kopieren

Quelle: Dhamdhere Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

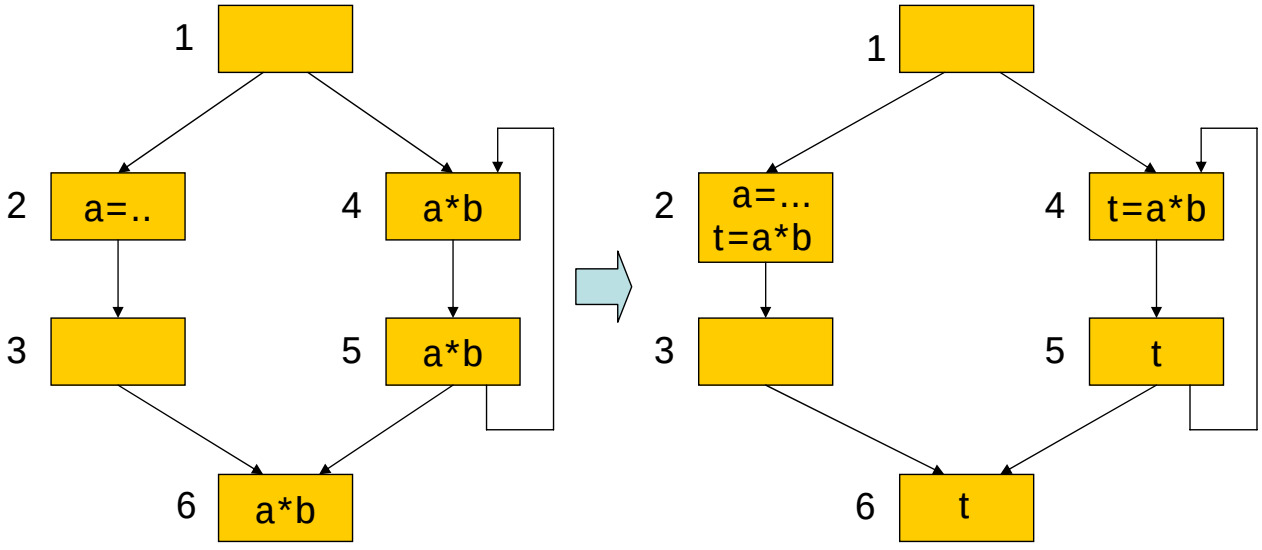
Vergleich mit Ergebnis nach MRA



- E-Pfade: $[4,5]$, $[5,4]$, $[5,6]$
- Herstellen totaler Redundanz: Einfügen in Ast 2,3
  - Nach MRA in 2, mit E-Pfaden in 3: Lebenszeitoptimal
- Entfernen von Redundanz in 4
  - Nach MRA nicht möglich
  - $[5,4]$ ist E-Pfad, Berechnung in 4 muss entfernbar sein
    $\rightarrow$ Kante (1,4) aufteilen, dort Berechnen und Kopieren

Quelle: Dhamdhere Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

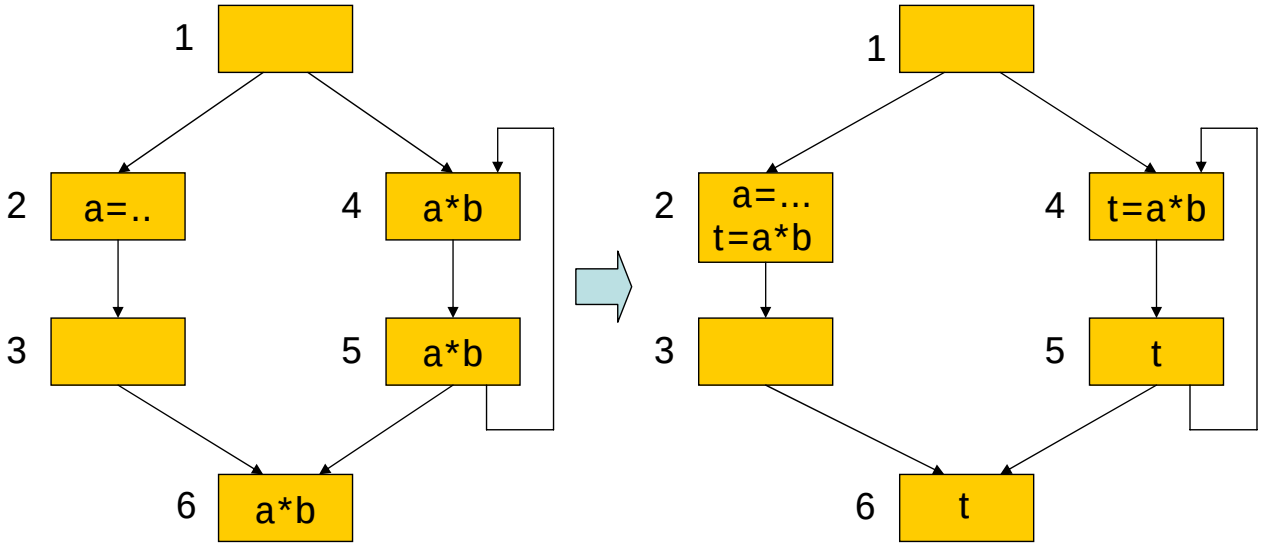
Vergleich mit Ergebnis nach MRA



- E-Pfade: $[4,5]$, $[5,4]$, $[5,6]$
- Herstellen totaler Redundanz: Einfügen in Ast 2,3
  - Nach MRA in 2, mit E-Pfaden in 3: Lebenszeitoptimal
- Entfernen von Redundanz in 4
  - Nach MRA nicht möglich
  - $[5,4]$ ist E-Pfad, Berechnung in 4 muss entfernbar sein
    $\rightarrow$ Kante (1,4) aufteilen, dort Berechnen und Kopieren

Quelle: Dhamdhere Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

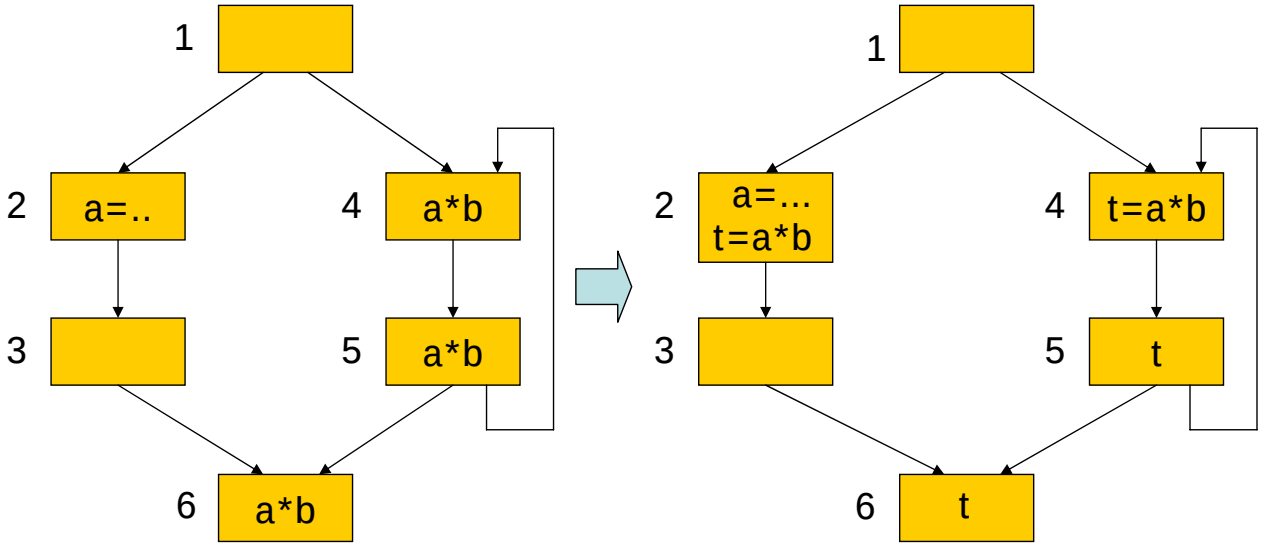
Vergleich mit Ergebnis nach MRA



- E-Pfade: $[4,5]$, $[5,4]$, $[5,6]$
- Herstellen totaler Redundanz: Einfügen in Ast 2,3
  - Nach MRA in 2, mit E-Pfaden in 3: Lebenszeitoptimal
- Entfernen von Redundanz in 4
  - Nach MRA nicht möglich
  - $[5,4]$ ist E-Pfad, Berechnung in 4 muss entfernbar sein
    $\rightarrow$ Kante (1,4) aufteilen, dort Berechnen und Kopieren

Quelle: Dhamdhere Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

Vergleich mit Ergebnis nach MRA



- E-Pfade: $[4,5]$, $[5,4]$, $[5,6]$
- Herstellen totaler Redundanz: Einfügen in Ast 2,3
  - Nach MRA in 2, mit E-Pfaden in 3: Lebenszeitoptimal
- Entfernen von Redundanz in 4
  - Nach MRA nicht möglich
  - $[5,4]$ ist E-Pfad, Berechnung in 4 muss entfernbar sein
    $\rightarrow$ Kante (1,4) aufteilen, dort Berechnen und Kopieren

Quelle: Dhamdhere Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

Aktionen während Optimierung

Wert von e sichern

Füge Anweisung `t`$_e$ `:=` e vor einer Benutzung von e ein und ersetze Benutzung durch t_e

Neue Berechnung von e einfügen

Füge Anweisung `t`$_e$ `:=` e ein

Eliminiere redundante Berechnung von e

Ersetze e durch t_e

An welchen Stellen diese Aktionen ausführen?

Aktionen während Optimierung

Embedded Systems & Applications

Wert von e sichern

Füge Anweisung $\texttt{t}_e$ `:=` e vor einer Benutzung von e ein und ersetze Benutzung durch t_e

Neue Berechnung von e einfügen

Füge Anweisung $\texttt{t}_e$ `:=` e ein

Eliminiere redundante Berechnung von e

Ersetze e durch t_e

An welchen Stellen diese Aktionen ausführen?

Aktionen während Optimierung

Embedded Systems & Applications

Wert von e sichern

Füge Anweisung $\texttt{t}_e$ `:=` e vor einer Benutzung von e ein und ersetze Benutzung durch t_e

Neue Berechnung von e einfügen

Füge Anweisung $\texttt{t}_e$ `:=` e ein

Eliminiere redundante Berechnung von e

Ersetze e durch t_e

An welchen Stellen diese Aktionen ausführen?

Aktionen während Optimierung

Embedded Systems & Applications

Wert von e sichern

Füge Anweisung $\texttt{t}_e$ `:=` e vor einer Benutzung von e ein und ersetze Benutzung durch t_e

Neue Berechnung von e einfügen

Füge Anweisung $\texttt{t}_e$ `:=` e ein

Eliminiere redundante Berechnung von e

Ersetze e durch t_e

An welchen Stellen diese Aktionen ausführen?

Aktionen während Optimierung

Embedded Systems & Applications

Wert von e sichern

Füge Anweisung $\texttt{t}_e$ `:=` e vor einer Benutzung von e ein und ersetze Benutzung durch t_e

Neue Berechnung von e einfügen

Füge Anweisung $\texttt{t}_e$ `:=` e ein

Eliminiere redundante Berechnung von e

Ersetze e durch t_e

An welchen Stellen diese Aktionen ausführen?

Neue Notation

Prädikatenschreibweise
Alternative zur Mengennotation

Prädikate bestimmen für jeden Ausdruck e, ob eine Aussage wahr oder falsch ist

Wahr für alle am Ende eines Blocks b verfügbaren Ausdr.

avail(b) = TRUE für $e \Leftrightarrow e \in \text{AVAILOUT}(b)$

Wahr für alle in den Block b vorziehbaren Ausdrücke

ant(b) = TRUE für $e \Leftrightarrow e \in \text{ANT}(b)$

Wahr für alle Ausdrücke, für die beides gilt

avail$(b) \cdot$ ant(b) = TRUE $\Leftrightarrow e \in (\text{AVAILOUT}(b) \cap \text{ANT}(b))$

Wahr für alle Ausdrücke, für die mindestens eines gilt

avail(b) + ant(b) = TRUE $\Leftrightarrow e \in (\text{AVAILOUT}(b) \cup \text{ANT}(b))$

Prädikatenschreibweise
Alternative zur Mengennotation

Prädikate bestimmen für jeden Ausdruck e, ob eine Aussage wahr oder falsch ist

Wahr für alle am Ende eines Blocks b verfügbaren Ausdr.

avail(b) = TRUE für $e \Leftrightarrow e \in \text{AVAILOUT}(b)$

Wahr für alle in den Block b vorziehbaren Ausdrücke

ant(b) = TRUE für $e \Leftrightarrow e \in \text{ANT}(b)$

Wahr für alle Ausdrücke, für die beides gilt

avail$(b) \cdot$ ant(b) = TRUE $\Leftrightarrow e \in (\text{AVAILOUT}(b) \cap \text{ANT}(b))$

Wahr für alle Ausdrücke, für die mindestens eines gilt

avail(b) + ant(b) = TRUE $\Leftrightarrow e \in (\text{AVAILOUT}(b) \cup \text{ANT}(b))$

Prädikatenschreibweise
Alternative zur Mengennotation

Prädikate bestimmen für jeden Ausdruck e, ob eine Aussage wahr oder falsch ist

Wahr für alle am Ende eines Blocks b verfügbaren Ausdr.

avail*(b)* = TRUE für $e \Leftrightarrow e \in \textsc{AvailOut}(b)$

Wahr für alle in den Block b vorziehbaren Ausdrücke

ant*(b)* = TRUE für $e \Leftrightarrow e \in \textsc{Ant}(b)$

Wahr für alle Ausdrücke, für die beides gilt

avail*(b)* $\cdot$ ant*(b)* = TRUE $\Leftrightarrow e \in (\textsc{AvailOut}(b) \cap \textsc{Ant}(b))$

Wahr für alle Ausdrücke, für die mindestens eines gilt

avail*(b)* + ant*(b)* = TRUE $\Leftrightarrow e \in (\textsc{AvailOut}(b) \cup \textsc{Ant}(b))$

Prädikatenschreibweise
Alternative zur Mengennotation

Prädikate bestimmen für jeden Ausdruck e, ob eine Aussage wahr oder falsch ist

Wahr für alle am Ende eines Blocks b verfügbaren Ausdr.

avail*(b)* = TRUE für $e \Leftrightarrow e \in \text{AVAILOUT}(b)$

Wahr für alle in den Block b vorziehbaren Ausdrücke

ant*(b)* = TRUE für $e \Leftrightarrow e \in \text{ANT}(b)$

Wahr für alle Ausdrücke, für die beides gilt

avail*(b)* $\cdot$ ant*(b)* = TRUE $\Leftrightarrow e \in (\text{AVAILOUT}(b) \cap \text{ANT}(b))$

Wahr für alle Ausdrücke, für die mindestens eines gilt

avail*(b)* + ant*(b)* = TRUE $\Leftrightarrow e \in (\text{AVAILOUT}(b) \cup \text{ANT}(b))$

Prädikatenschreibweise
Alternative zur Mengennotation

Prädikate bestimmen für jeden Ausdruck e, ob eine Aussage wahr oder falsch ist

Wahr für alle am Ende eines Blocks b verfügbaren Ausdr.

avail*(b)* = TRUE für $e \Leftrightarrow e \in \textsc{AvailOut}(b)$

Wahr für alle in den Block b vorziehbaren Ausdrücke

ant*(b)* = TRUE für $e \Leftrightarrow e \in \textsc{Ant}(b)$

Wahr für alle Ausdrücke, für die beides gilt

avail*(b)* $\cdot$ ant*(b)* = TRUE $\Leftrightarrow e \in (\textsc{AvailOut}(b) \cap \textsc{Ant}(b))$

Wahr für alle Ausdrücke, für die mindestens eines gilt

avail*(b)* + ant*(b)* = TRUE $\Leftrightarrow e \in (\textsc{AvailOut}(b) \cup \textsc{Ant}(b))$

Konfluenzoperatoren in Prädikatenschreibweise

Konjunktion

cpin(b) $= \prod_p$ *cpout(p)* = TRUE für Kopie c
$\Leftrightarrow c \in \bigcap_{p \in pred(b)} \textsc{CPout}(p)$

Disjunktion

liveout(b) $= \sum_s$ *livein(s)* = TRUE für Variable v
$\Leftrightarrow v \in \bigcup_{s \in succ(b)} \textsc{LiveIn}(s)$

Konfluenzoperatoren in Prädikatenschreibweise

Konjunktion

cpin(b) $= \prod_p$ *cpout(p)* = TRUE für Kopie c
$\Leftrightarrow c \in \bigcap_{p \in pred(b)} \textsc{CPout}(p)$

Disjunktion

liveout(b) $= \sum_s$ *livein(s)* = TRUE für Variable v
$\Leftrightarrow v \in \bigcup_{s \in succ(b)} \textsc{LiveIn}(s)$

Prädikate darstellen als Bitvektor

Embedded Systems & Applications

Für alle Ausdrücke eindeutige Zuordnung festlegen

a*b $\rightarrow$ Bit 1
c*d $\rightarrow$ Bit 2
...

Wert 12	entspricht Prädikat x	entspricht Menge
00	$\neg x_{a*b}, \neg x_{c*d}$	$\emptyset$
01	$\neg x_{a*b}, x_{c*d}$	$\{\mathbf{c*d}\}$
10	$x_{a*b}, \neg x_{c*d}$	$\{\mathbf{a*b}\}$
11	x_{a*b}, x_{c*d}	$\{\mathbf{a*b}, \mathbf{c*d}\}$

- Bitvektoren können sehr lang werden
- Prädikate liefern Ergebnisse als Bitvektor
- Damit logische Verknüpfungen effizient implementierbar

Prädikate darstellen als Bitvektor

Für alle Ausdrücke eindeutige Zuordnung festlegen

a*b $\rightarrow$ Bit 1
c*d $\rightarrow$ Bit 2
...

Wert 12	entspricht Prädikat x	entspricht Menge
00	$\neg x_{a*b}, \neg x_{c*d}$	$\emptyset$
01	$\neg x_{a*b}, x_{c*d}$	$\{\mathbf{c*d}\}$
10	$x_{a*b}, \neg x_{c*d}$	$\{\mathbf{a*b}\}$
11	x_{a*b}, x_{c*d}	$\{\mathbf{a*b}, \mathbf{c*d}\}$

- Bitvektoren können sehr lang werden
- Prädikate liefern Ergebnisse als Bitvektor
- Damit logische Verknüpfungen effizient implementierbar

Prädikate darstellen als Bitvektor

Embedded Systems & Applications

Für alle Ausdrücke eindeutige Zuordnung festlegen

a*b $\rightarrow$ Bit 1
c*d $\rightarrow$ Bit 2
...

Wert 12	entspricht Prädikat x	entspricht Menge
00	$\neg x_{a*b}, \neg x_{c*d}$	$\emptyset$
01	$\neg x_{a*b}, x_{c*d}$	$\{\mathbf{c*d}\}$
10	$x_{a*b}, \neg x_{c*d}$	$\{\mathbf{a*b}\}$
11	x_{a*b}, x_{c*d}	$\{\mathbf{a*b}, \mathbf{c*d}\}$

- Bitvektoren können sehr lang werden
- Prädikate liefern Ergebnisse als Bitvektor
- Damit logische Verknüpfungen effizient implementierbar

Prädikate darstellen als Bitvektor

Embedded Systems & Applications

Für alle Ausdrücke eindeutige Zuordnung festlegen

a*b $\rightarrow$ Bit 1
c*d $\rightarrow$ Bit 2
...

Wert 12	entspricht Prädikat x	entspricht Menge
00	$\neg x_{a*b}, \neg x_{c*d}$	$\emptyset$
01	$\neg x_{a*b}, x_{c*d}$	$\{\mathbf{c*d}\}$
10	$x_{a*b}, \neg x_{c*d}$	$\{\mathbf{a*b}\}$
11	x_{a*b}, x_{c*d}	$\{\mathbf{a*b}, \mathbf{c*d}\}$

- Bitvektoren können sehr lang werden
- Prädikate liefern Ergebnisse als Bitvektor
- Damit logische Verknüpfungen effizient implementierbar

Prädikate darstellen als Bitvektor

Für alle Ausdrücke eindeutige Zuordnung festlegen

a*b $\rightarrow$ Bit 1
c*d $\rightarrow$ Bit 2
...

Wert 12	entspricht Prädikat x	entspricht Menge
00	$\neg x_{a*b}, \neg x_{c*d}$	$\emptyset$
01	$\neg x_{a*b}, x_{c*d}$	$\{\mathbf{c*d}\}$
10	$x_{a*b}, \neg x_{c*d}$	$\{\mathbf{a*b}\}$
11	x_{a*b}, x_{c*d}	$\{\mathbf{a*b}, \mathbf{c*d}\}$

- Bitvektoren können sehr lang werden
- Prädikate liefern Ergebnisse als Bitvektor
- Damit logische Verknüpfungen effizient implementierbar

Prädikate darstellen als Bitvektor

Für alle Ausdrücke eindeutige Zuordnung festlegen

a*b $\rightarrow$ Bit 1
c*d $\rightarrow$ Bit 2
...

Wert 12	entspricht Prädikat x	entspricht Menge
00	$\neg x_{a*b}, \neg x_{c*d}$	$\emptyset$
01	$\neg x_{a*b}, x_{c*d}$	$\{\mathbf{c*d}\}$
10	$x_{a*b}, \neg x_{c*d}$	$\{\mathbf{a*b}\}$
11	x_{a*b}, x_{c*d}	$\{\mathbf{a*b}, \mathbf{c*d}\}$

- Bitvektoren können sehr lang werden
- Prädikate liefern Ergebnisse als Bitvektor
- Damit logische Verknüpfungen effizient implementierbar

Beispiel: Verküpfung von Prädikaten
Mittels Bit-Operatoren

Embedded Systems & Applications

Zuordnung von Ausdrücken e an Bits

a*b $\rightarrow$ Bit 1
c*d $\rightarrow$ Bit 2
a*d $\rightarrow$ Bit 3
...

Gegeben: Zwei Prädikate x und y bezüglich Ausdruck e
Annahme: $x = 101, y = 011$

$$x \cdot y = x \& y = 001$$
$$x + y = x | y = 111$$

Beispiel: Verküpfung von Prädikaten
Mittels Bit-Operatoren

Embedded Systems & Applications

Zuordnung von Ausdrücken e an Bits

a*b $\rightarrow$ Bit 1
c*d $\rightarrow$ Bit 2
a*d $\rightarrow$ Bit 3
...

Gegeben: Zwei Prädikate x und y bezüglich Ausdruck e
Annahme: $x = 101, y = 011$

$$x \cdot y = x\&y = 001$$
$$x + y = x|y = 111$$

Beispiel: Verküpfung von Prädikaten
Mittels Bit-Operatoren

Embedded Systems & Applications

Zuordnung von Ausdrücken e an Bits

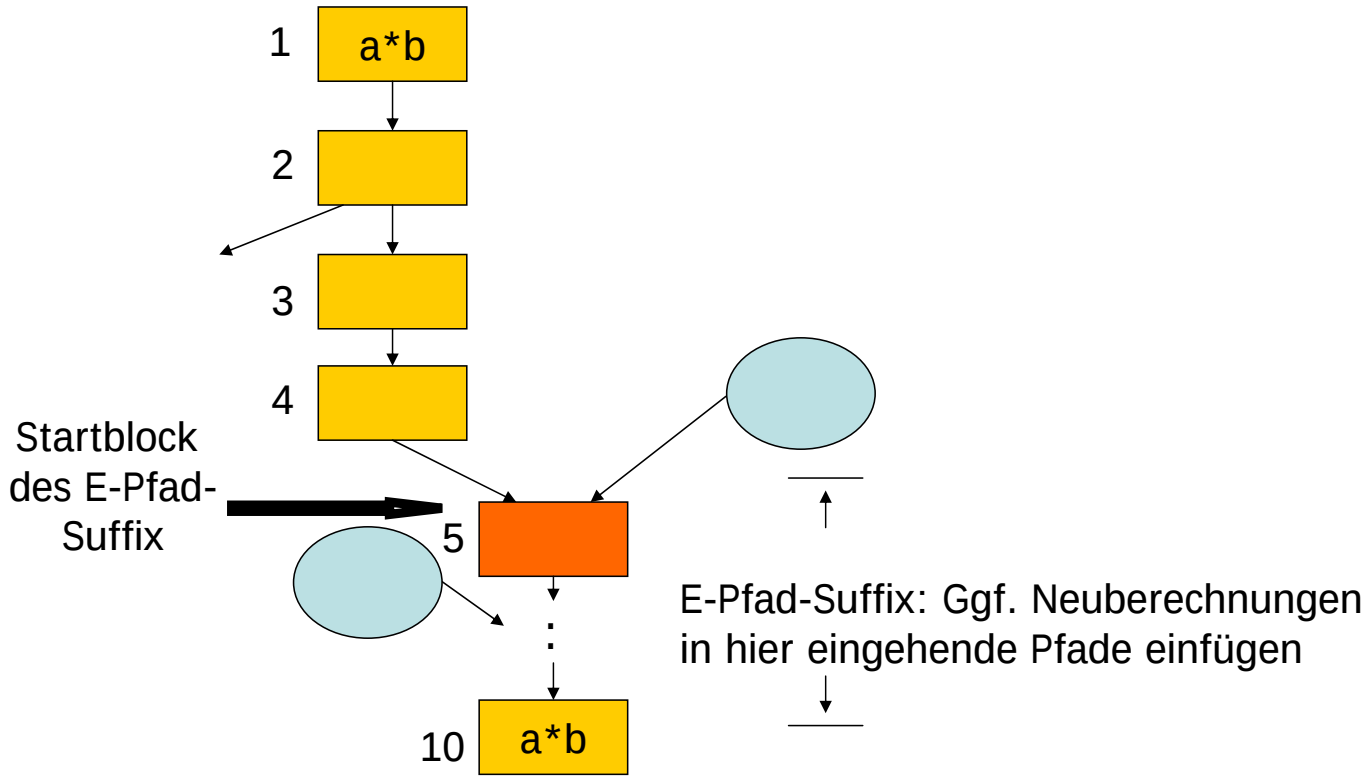
a*b $\rightarrow$ Bit 1
c*d $\rightarrow$ Bit 2
a*d $\rightarrow$ Bit 3
...

Gegeben: Zwei Prädikate x und y bezüglich Ausdruck e
Annahme: $x = 101, y = 011$

$$x \cdot y = x \& y = 001$$
$$x + y = x | y = 111$$

Bestimmen von E-Pfaden

Anatomie eines E-Pfades



$b \in (1,2]$ avail(b) $\cdot \neg$ant(b)

$b \in [3,4]$ avail(b) $\cdot$ ant(b)

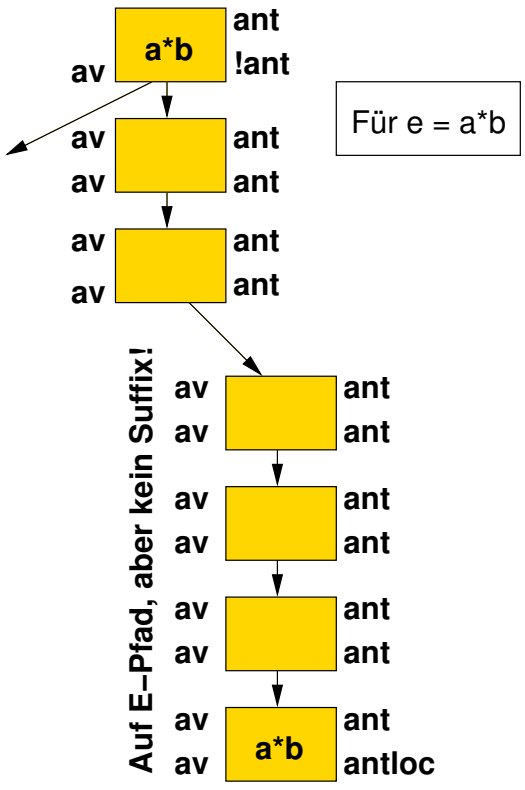
$b \in [5,\ldots,10]$ $\neg$avail(b) $\cdot$ ant(b)

E-Pfad-Suffix

Quelle: Dhamdhere, Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

Beispiel: Leerer E-Pfad-Suffix

Anforderung an E-Pfad-Suffix: $\neg avail(b) \cdot ant(b)$



Algorithmus zum Bestimmen von E-Pfaden

- E-Pfad $[b_i, \ldots, b_k]$ hat drei (ggf. leere) Segmente
  - avail(b) $\cdot \neg$ant(b)
  - avail(b) $\cdot$ ant(b)
  - $\neg$avail(b) $\cdot$ ant(b)
- Finde Start des E-Pfad-Suffixes: Suche Block b_m mit $\neg\text{avail}(b_m) \cdot \text{ant}(b_m) \cdot \sum_p \text{avail}(p)$
- Suche rückwärts von b_m durch Segmente
  avail(b) $\cdot$ ant(b)
  avail(b) $\cdot \neg$ant(b)
  bis Start des E-Pfads b_i erreicht
- Suche vorwärts von b_m durch Segment
  $\neg$avail(b) $\cdot$ ant(b)
  bis Ende des E-Pfades erreicht

Algorithmus zum Bestimmen von E-Pfaden

- E-Pfad $[b_i, \ldots, b_k]$ hat drei (ggf. leere) Segmente
  - avail(b) $\cdot \neg$ant(b)
  - avail(b) $\cdot$ ant(b)
  - $\neg$avail(b) $\cdot$ ant(b)
- Finde Start des E-Pfad-Suffixes: Suche Block b_m mit $\neg\text{avail}(b_m) \cdot \text{ant}(b_m) \cdot \sum_p \text{avail(p)}$
- Suche rückwärts von b_m durch Segmente
  avail(b) $\cdot$ ant(b)
  avail(b) $\cdot \neg$ant(b)
  bis Start des E-Pfads b_i erreicht
- Suche vorwärts von b_m durch Segment
  $\neg$avail(b) $\cdot$ ant(b)
  bis Ende des E-Pfades erreicht

Algorithmus zum Bestimmen von E-Pfaden

- E-Pfad $[b_i, \ldots, b_k]$ hat drei (ggf. leere) Segmente
  - avail(b) $\cdot \neg$ant(b)
  - avail(b) $\cdot$ ant(b)
  - $\neg$avail(b) $\cdot$ ant(b)
- Finde Start des E-Pfad-Suffixes: Suche Block b_m mit $\neg\text{avail}(b_m) \cdot \text{ant}(b_m) \cdot \sum_p \text{avail(p)}$
- Suche rückwärts von b_m durch Segmente
  avail(b) $\cdot$ ant(b)
  avail(b) $\cdot \neg$ant(b)
  bis Start des E-Pfads b_i erreicht
- Suche vorwärts von b_m durch Segment
  $\neg$avail(b) $\cdot$ ant(b)
  bis Ende des E-Pfades erreicht

Algorithmus zum Bestimmen von E-Pfaden

- E-Pfad $[b_i, \ldots, b_k]$ hat drei (ggf. leere) Segmente
  - avail(b) $\cdot \neg$ant(b)
  - avail(b) $\cdot$ ant(b)
  - $\neg$avail(b) $\cdot$ ant(b)
- Finde Start des E-Pfad-Suffixes: Suche Block b_m mit $\neg\text{avail}(b_m) \cdot \text{ant}(b_m) \cdot \sum_p \text{avail(p)}$
- Suche rückwärts von b_m durch Segmente
  avail(b) $\cdot$ ant(b)
  avail(b) $\cdot \neg$ant(b)
  bis Start des E-Pfads b_i erreicht
- Suche vorwärts von b_m durch Segment
  $\neg$avail(b) $\cdot$ ant(b)
  bis Ende des E-Pfades erreicht

Algorithmus zum Bestimmen von E-Pfaden

- E-Pfad $[b_i, \ldots, b_k]$ hat drei (ggf. leere) Segmente
  - avail(b) $\cdot \neg$ant(b)
  - avail(b) $\cdot$ ant(b)
  - $\neg$avail(b) $\cdot$ ant(b)
- Finde Start des E-Pfad-Suffixes: Suche Block b_m mit $\neg\text{avail}(b_m) \cdot \text{ant}(b_m) \cdot \sum_p \text{avail}(p)$
- Suche rückwärts von b_m durch Segmente
  avail(b) $\cdot$ ant(b)
  avail(b) $\cdot \neg$ant(b)
  bis Start des E-Pfads b_i erreicht
- Suche vorwärts von b_m durch Segment
  $\neg$avail(b) $\cdot$ ant(b)
  bis Ende des E-Pfades erreicht

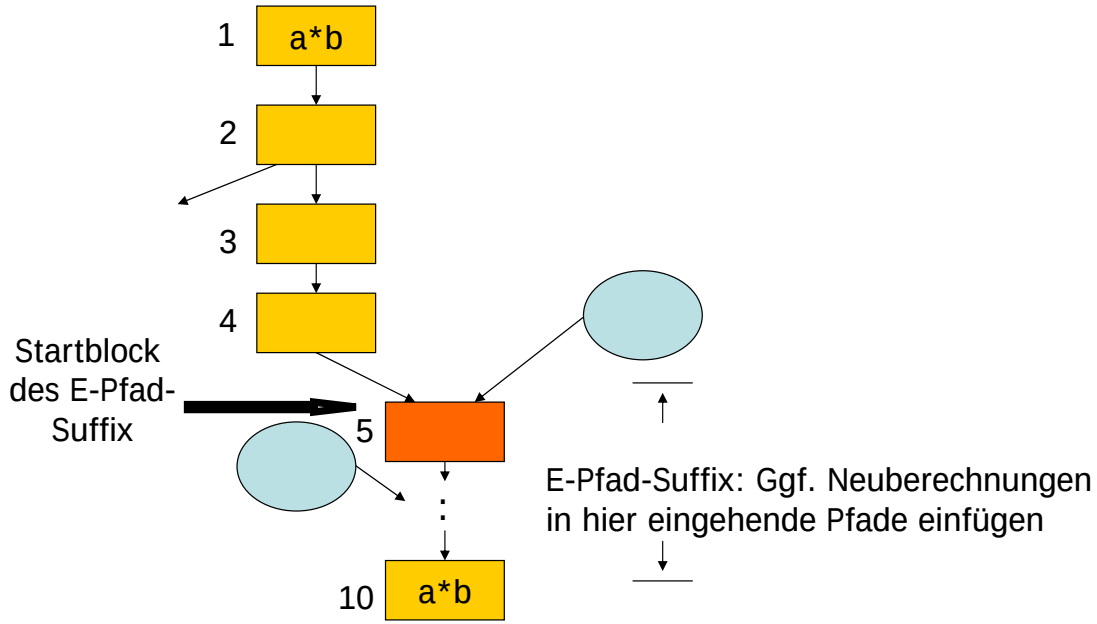
Algorithmus zum Bestimmen von E-Pfaden

- E-Pfad $[b_i, \ldots, b_k]$ hat drei (ggf. leere) Segmente
  - avail(b) $\cdot \neg$ant(b)
  - avail(b) $\cdot$ ant(b)
  - $\neg$avail(b) $\cdot$ ant(b)
- Finde Start des E-Pfad-Suffixes: Suche Block b_m mit $\neg$avail(b_m) $\cdot$ ant(b_m) $\cdot \sum_p$ avail(p)
- Suche rückwärts von b_m durch Segmente
  avail(b) $\cdot$ ant(b)
  avail(b) $\cdot \neg$ant(b)
  bis Start des E-Pfads b_i erreicht
- Suche vorwärts von b_m durch Segment
  $\neg$avail(b) $\cdot$ ant(b)
  bis Ende des E-Pfades erreicht

Algorithmus zum Bestimmen von E-Pfaden

- E-Pfad $[b_i, \ldots, b_k]$ hat drei (ggf. leere) Segmente
  - avail(b) $\cdot \neg$ant(b)
  - avail(b) $\cdot$ ant(b)
  - $\neg$avail(b) $\cdot$ ant(b)
- Finde Start des E-Pfad-Suffixes: Suche Block b_m mit $\neg$avail$(b_m) \cdot$ ant$(b_m) \cdot \sum_p$ avail(p)
- Suche rückwärts von b_m durch Segmente
  avail(b) $\cdot$ ant(b)
  avail(b) $\cdot \neg$ant(b)
  bis Start des E-Pfads b_i erreicht
- Suche vorwärts von b_m durch Segment
  $\neg$avail(b) $\cdot$ ant(b)
  bis Ende des E-Pfades erreicht

Aktionen nach Bestimmen des E-Pfades

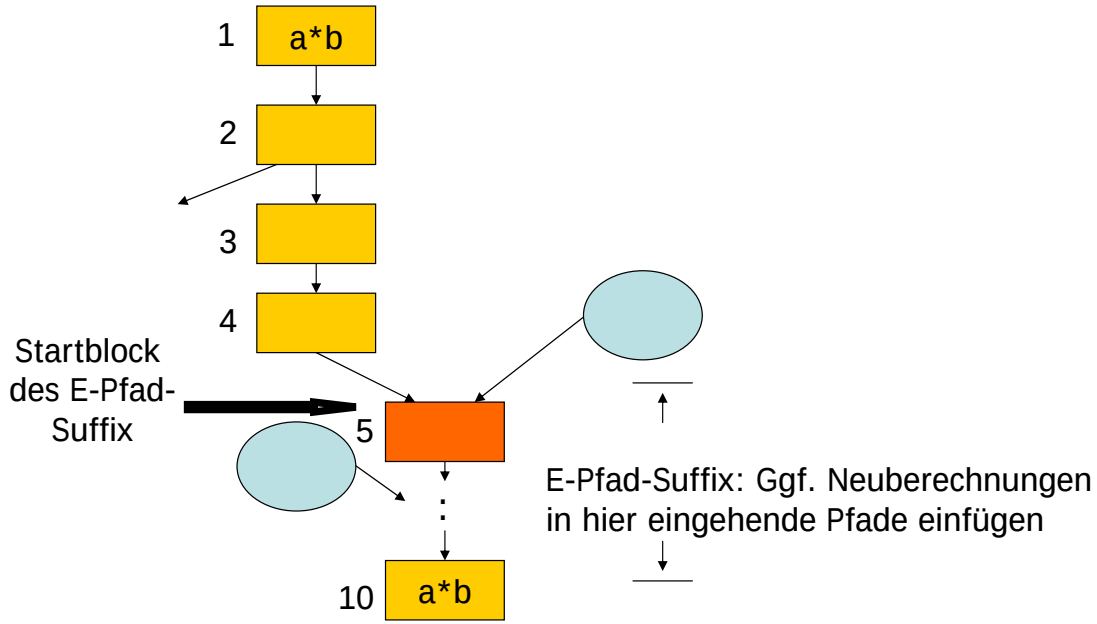


Start des E-Pfades Sichere Wert von e in t_e

E-Pfad-Suffix Füge Neuberechnungen $t_e := e$ in eingehende Pfade ein

Ende des E-Pfades Ersetzte redundante Berechnung von e durch t_e

Aktionen nach Bestimmen des E-Pfades

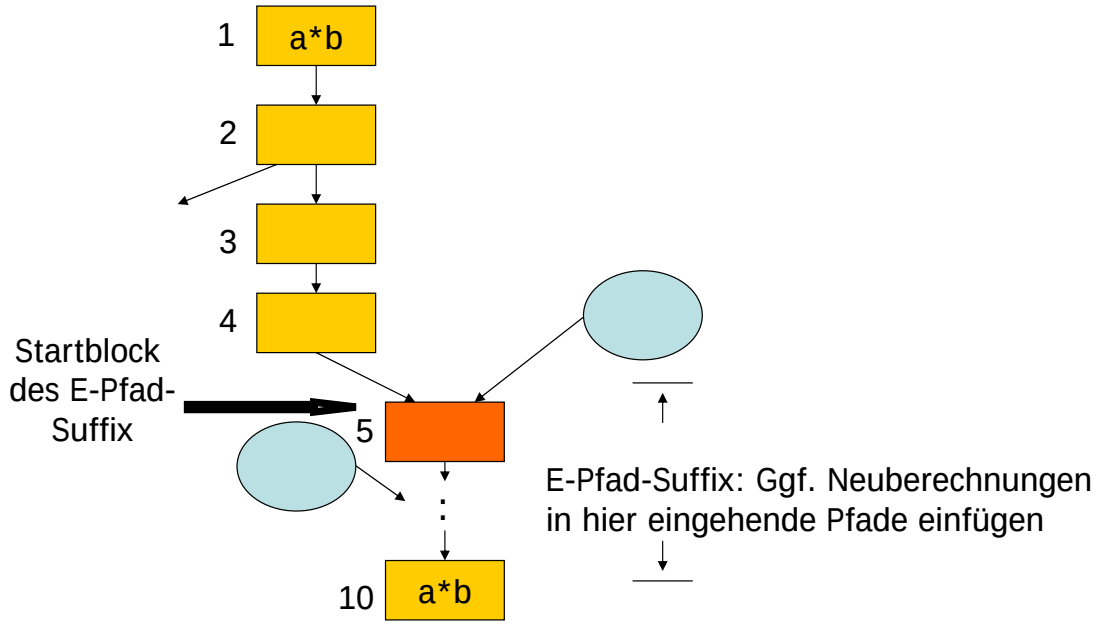


Start des E-Pfades Sichere Wert von e in t_e

E-Pfad-Suffix Füge Neuberechnungen $t_e := e$ in eingehende Pfade ein

Ende des E-Pfades Ersetzte redundante Berechnung von e durch t_e

Aktionen nach Bestimmen des E-Pfades



Start des E-Pfades Sichere Wert von e in t_e

E-Pfad-Suffix Füge Neuberechnungen $t_e := e$ in eingehende Pfade ein

Ende des E-Pfades Ersetzte redundante Berechnung von e durch t_e

Parallele Lösung der E-Pfad-Bestimmung

- Löse E-Pfad-Problem für alle Ausdrücke gleichzeitig
- Erinnerung: Ergebnisse der Prädikate sind Bitvektoren
- Bitweise Verknüpfung mit AND und OR
- Berechnet nicht nur E-Pfade
- Direkte Bestimmung von
  - Blöcken mit zu eliminierenden Ausdrücken
  - Einfügestellen (Blöcke, Kanten) für Neuberechnungen
  - Stellen für Sichern von Werten

Parallele Lösung der E-Pfad-Bestimmung

- Löse E-Pfad-Problem für alle Ausdrücke gleichzeitig
- Erinnerung: Ergebnisse der Prädikate sind Bitvektoren
- Bitweise Verknüpfung mit AND und OR
- Berechnet nicht nur E-Pfade
- Direkte Bestimmung von
  - Blöcken mit zu eliminierenden Ausdrücken
  - Einfügestellen (Blöcke, Kanten) für Neuberechnungen
  - Stellen für Sichern von Werten

Parallele Lösung der E-Pfad-Bestimmung

- Löse E-Pfad-Problem für alle Ausdrücke gleichzeitig
- Erinnerung: Ergebnisse der Prädikate sind Bitvektoren
- Bitweise Verknüpfung mit AND und OR
- Berechnet nicht nur E-Pfade
- Direkte Bestimmung von
  - Blöcken mit zu eliminierenden Ausdrücken
  - Einfügestellen (Blöcke, Kanten) für Neuberechnungen
  - Stellen für Sichern von Werten

Parallele Lösung der E-Pfad-Bestimmung

- Löse E-Pfad-Problem für alle Ausdrücke gleichzeitig
- Erinnerung: Ergebnisse der Prädikate sind Bitvektoren
- Bitweise Verknüpfung mit AND und OR
- Berechnet nicht nur E-Pfade
- Direkte Bestimmung von
  - Blöcken mit zu eliminierenden Ausdrücken
  - Einfügestellen (Blöcke, Kanten) für Neuberechnungen
  - Stellen für Sichern von Werten

Parallele Lösung der E-Pfad-Bestimmung

- Löse E-Pfad-Problem für alle Ausdrücke gleichzeitig
- Erinnerung: Ergebnisse der Prädikate sind Bitvektoren
- Bitweise Verknüpfung mit AND und OR
- Berechnet nicht nur E-Pfade
- Direkte Bestimmung von
  - Blöcken mit zu eliminierenden Ausdrücken
  - Einfügestellen (Blöcke, Kanten) für Neuberechnungen
  - Stellen für Sichern von Werten

Parallele Lösung der E-Pfad-Bestimmung

- Löse E-Pfad-Problem für alle Ausdrücke gleichzeitig
- Erinnerung: Ergebnisse der Prädikate sind Bitvektoren
- Bitweise Verknüpfung mit AND und OR
- Berechnet nicht nur E-Pfade
- Direkte Bestimmung von
  - Blöcken mit zu eliminierenden Ausdrücken
  - Einfügestellen (Blöcke, Kanten) für Neuberechnungen
  - Stellen für Sichern von Werten

Parallele Lösung der E-Pfad-Bestimmung

- Löse E-Pfad-Problem für alle Ausdrücke gleichzeitig
- Erinnerung: Ergebnisse der Prädikate sind Bitvektoren
- Bitweise Verknüpfung mit AND und OR
- Berechnet nicht nur E-Pfade
- Direkte Bestimmung von
  - Blöcken mit zu eliminierenden Ausdrücken
  - Einfügestellen (Blöcke, Kanten) für Neuberechnungen
  - Stellen für Sichern von Werten

Parallele Lösung der E-Pfad-Bestimmung

- Löse E-Pfad-Problem für alle Ausdrücke gleichzeitig
- Erinnerung: Ergebnisse der Prädikate sind Bitvektoren
- Bitweise Verknüpfung mit AND und OR
- Berechnet nicht nur E-Pfade
- Direkte Bestimmung von
  - Blöcken mit zu eliminierenden Ausdrücken
  - Einfügestellen (Blöcke, Kanten) für Neuberechnungen
  - Stellen für Sichern von Werten

Datenflussproblem

Art des Datenflussproblems

- Datenflussproblem über Prädikate von Ausdrücken
- Zerlegung in
  - Verschiedene Teilprobleme
  - Vorberechenbare Eigenschaften
  - Herleitbare Eigenschaften (durch DF-Löser)

Art des Datenflussproblems

- Datenflussproblem über Prädikate von Ausdrücken
- Zerlegung in
  - Verschiedene Teilprobleme
  - Vorberechenbare Eigenschaften
  - Herleitbare Eigenschaften (durch DF-Löser)

Art des Datenflussproblems

- Datenflussproblem über Prädikate von Ausdrücken
- Zerlegung in
  - Verschiedene Teilprobleme
  - Vorberechenbare Eigenschaften
  - Herleitbare Eigenschaften (durch DF-Löser)

Art des Datenflussproblems

- Datenflussproblem über Prädikate von Ausdrücken
- Zerlegung in
  - Verschiedene Teilprobleme
  - Vorberechenbare Eigenschaften
  - Herleitbare Eigenschaften (durch DF-Löser)

Art des Datenflussproblems

- Datenflussproblem über Prädikate von Ausdrücken
- Zerlegung in
  - Verschiedene Teilprobleme
  - Vorberechenbare Eigenschaften
  - Herleitbare Eigenschaften (durch DF-Löser)

Vorberechenbare Eigenschaften

Ausdruck ist lokal verfügbar (locally available)

comp(b) = TRUE: e wird in b berechnet (computed) und seine Operanden hinterher nicht überschrieben

➥$e \in$ DEExpr(b)

Ausdruck ist lokal vorziehbar (locally anticipatable)

antloc(b) = TRUE: Operanden von e werden vor Berechnung nicht zugewiesen

➥$e \in$ UEExpr(b)

Block ist transparent für Ausdruck

transp(b) = TRUE: b hat keine Zuweisungen an Operanden von e

➥$e \notin$ ExprKill(b)

Vorberechenbare Eigenschaften

Ausdruck ist lokal verfügbar (locally available)

comp(b) = TRUE: e wird in b berechnet (computed) und seine Operanden hinterher nicht überschrieben

➥$e \in$ DEExpr(b)

Ausdruck ist lokal vorziehbar (locally anticipatable)

antloc(b) = TRUE: Operanden von e werden vor Berechnung nicht zugewiesen

➥$e \in$ UEExpr(b)

Block ist transparent für Ausdruck

transp(b) = TRUE: b hat keine Zuweisungen an Operanden von e

➥$e \notin$ ExprKill(b)

Vorberechenbare Eigenschaften

Ausdruck ist lokal verfügbar (locally available)

comp(b) = TRUE: e wird in b berechnet (computed) und seine Operanden hinterher nicht überschrieben

➥$e \in$ DEExpr(b)

Ausdruck ist lokal vorziehbar (locally anticipatable)

antloc(b) = TRUE: Operanden von e werden vor Berechnung nicht zugewiesen

➥$e \in$ UEExpr(b)

Block ist transparent für Ausdruck

transp(b) = TRUE: b hat keine Zuweisungen an Operanden von e

➥$e \notin$ ExprKill(b)

Beispiel für vorberechenbare Eigenschaften

Bit 1: a+b
Bit 2: c+d
Bit 3: e+f
Bit 4: a+e
Bit 5: q+r
Bit 6: x+y

comp(B1) =111100
antloc(B1)=011000
transp(B1)=010010

B1

a : = 42	
w := a + b	nicht UEExpr/ANTloc, DEExpr
x := c + d	UEExpr/ANTloc, DEExpr
y := e + f	UEExpr/ANTloc, nicht DEExpr
z := a + e	nicht UEExpr/ANTloc, nicht DEExpr
e := 23	

Verfügbare Ausdrücke

availin(b) e ist verfügbar bei Eintritt in b

availout(b) e ist verfügbar bei Austritt aus b

Berechnung

$$\begin{aligned} \text{availin}(b) &= \prod_p \text{availout}(p) \\ \text{availout}(b) &= \text{availin}(b) \cdot \text{transp}(b) + \text{comp}(b) \end{aligned}$$

Verfügbare Ausdrücke

availin(b) e ist verfügbar bei Eintritt in b

availout(b) e ist verfügbar bei Austritt aus b

Berechnung

$$\begin{aligned} \text{availin}(b) &= \prod_p \text{availout}(p) \\ \text{availout}(b) &= \text{availin}(b) \cdot \text{transp}(b) + \text{comp}(b) \end{aligned}$$

Verfügbare Ausdrücke

availin(b) e ist verfügbar bei Eintritt in b

availout(b) e ist verfügbar bei Austritt aus b

Berechnung

$$\begin{aligned} \text{availin}(b) &= \prod_p \text{availout}(p) \\ \text{availout}(b) &= \text{availin}(b) \cdot \text{transp}(b) + \text{comp}(b) \end{aligned}$$

Verfügbare Ausdrücke

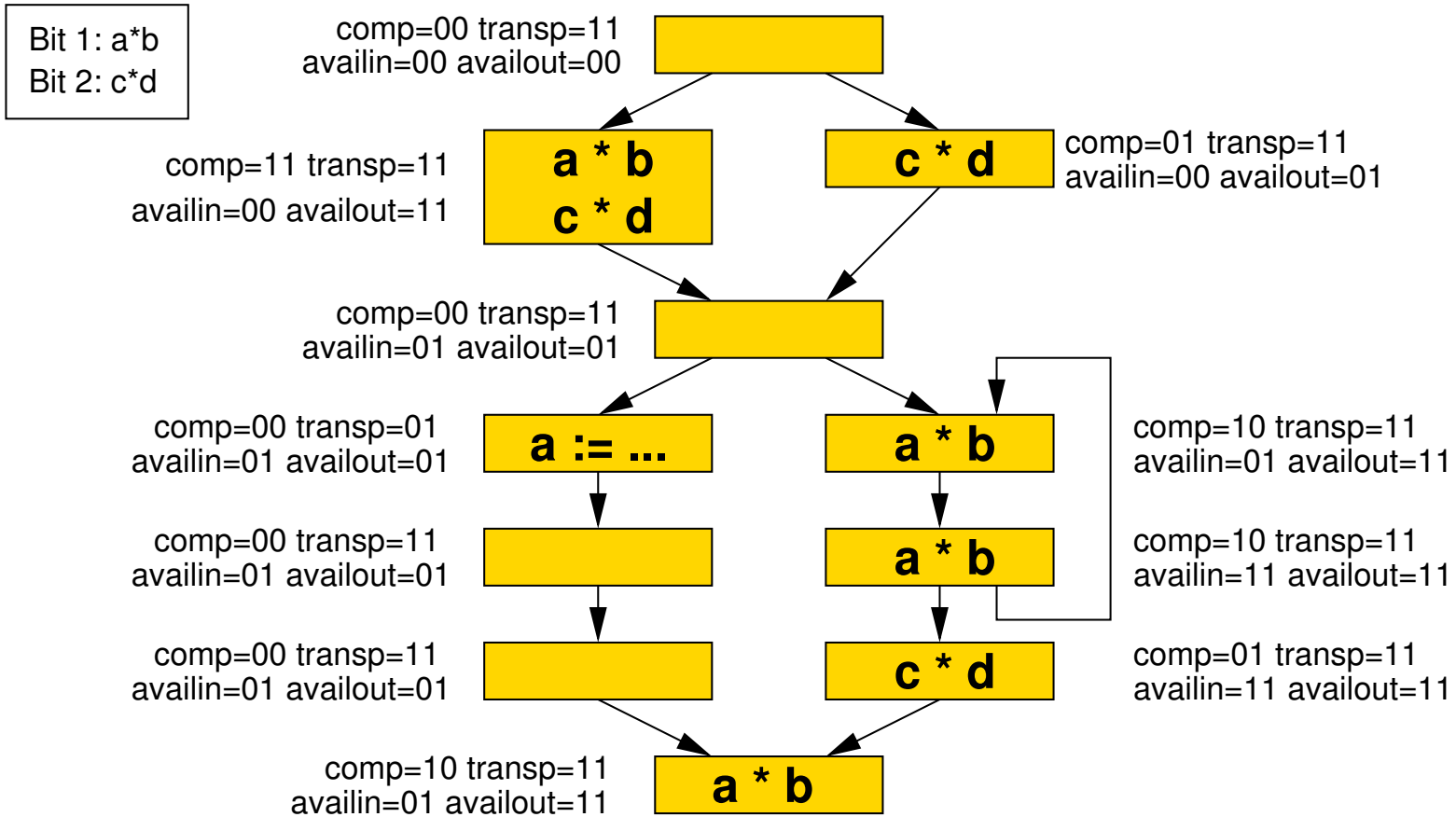
availin(b) e ist verfügbar bei Eintritt in b

availout(b) e ist verfügbar bei Austritt aus b

Berechnung

$$\begin{aligned} \text{availin}(b) &= \prod_p \text{availout}(p) \\ \text{availout}(b) &= \text{availin}(b) \cdot \text{transp}(b) + \text{comp}(b) \end{aligned}$$

Beispiel verfügbare Ausdrücke
In Prädikatennotation



$$\begin{aligned} \text{availin}(b) &= \prod_p \text{availout}(p) \\ \text{availout}(b) &= \text{availin}(b) \cdot \text{transp}(b) + \text{comp}(b) \end{aligned}$$

Vorziehbare Ausdrücke

Embedded Systems & Applications

antin(b) e ist vorziehbar bei Eintritt in b

antout(b) e ist vorziehbar bei Austritt aus b

Berechnung

$$\begin{aligned} \text{antin}(b) &= \text{antout}(b) \cdot \text{transp}(b) + \text{antloc}(b) \\ \text{antout}(b) &= \prod_s \text{antin}(s) \end{aligned}$$

Vorziehbare Ausdrücke

Embedded Systems & Applications

antin(b) e ist vorziehbar bei Eintritt in b

antout(b) e ist vorziehbar bei Austritt aus b

Berechnung

$$\begin{aligned} \text{antin}(b) &= \text{antout}(b) \cdot \text{transp}(b) + \text{antloc}(b) \\ \text{antout}(b) &= \prod_s \text{antin}(s) \end{aligned}$$

Vorziehbare Ausdrücke

Embedded Systems & Applications

antin(b) e ist vorziehbar bei Eintritt in b

antout(b) e ist vorziehbar bei Austritt aus b

Berechnung

$$\begin{aligned} \text{antin}(b) &= \text{antout}(b) \cdot \text{transp}(b) + \text{antloc}(b) \\ \text{antout}(b) &= \prod_s \text{antin}(s) \end{aligned}$$

Vorziehbare Ausdrücke

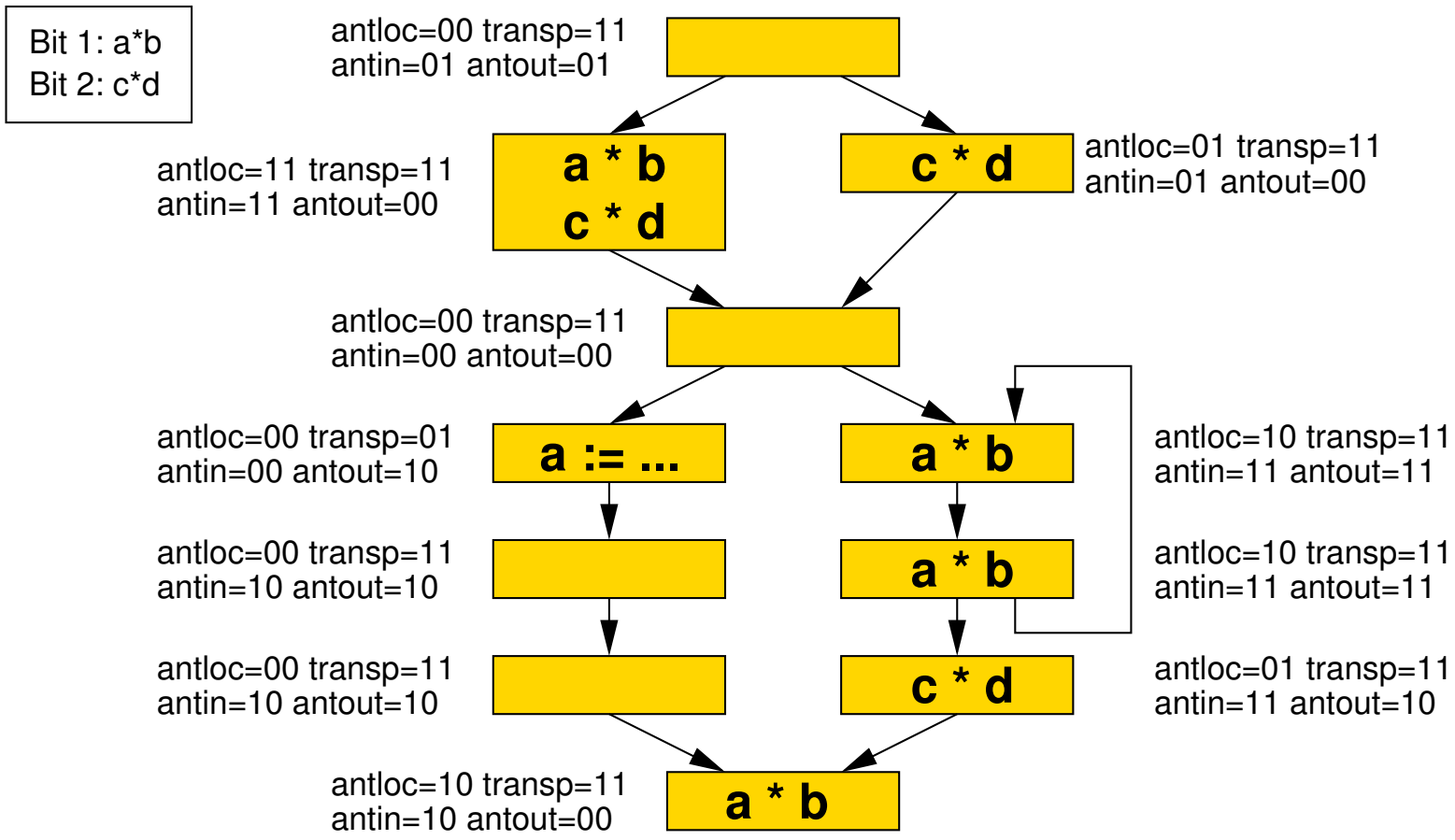
antin(b) e ist vorziehbar bei Eintritt in b

antout(b) e ist vorziehbar bei Austritt aus b

Berechnung

$$\begin{aligned} \text{antin}(b) &= \text{antout}(b) \cdot \text{transp}(b) + \text{antloc}(b) \\ \text{antout}(b) &= \prod_s \text{antin}(s) \end{aligned}$$

Beispiel vorziehbare Ausdrücke
In Prädikatennotation

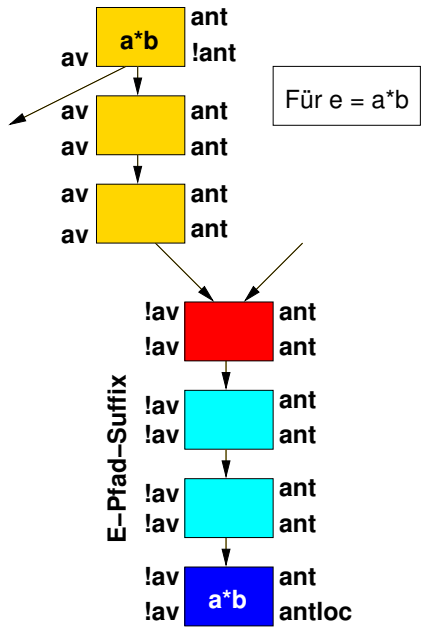


$$\begin{aligned} \text{antin}(b) &= \text{antout}(b) \cdot \text{transp}(b) + \text{antloc}(b) \\ \text{antout}(b) &= \prod_s \text{antin}(s) \end{aligned}$$

Bestimmen von Blöcken in E-Pfad-Suffix

epsin(b) Blockanfang von b liegt auf einem E-Pfad-Suffix für e

epsout(b) Blockende von b liegt auf einem E-Pfad-Suffix für e



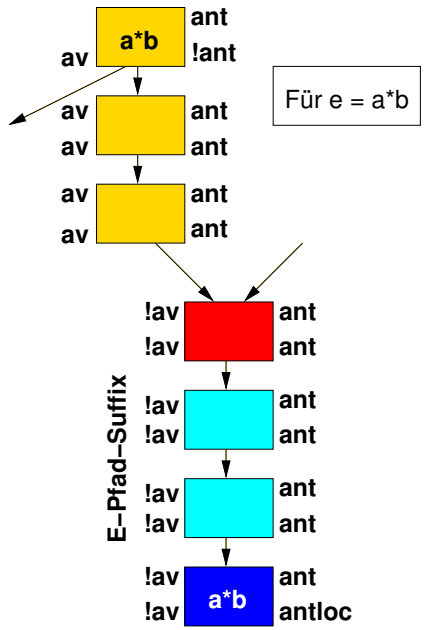
Berechnung

$$\text{epsin}(b) = (\sum_p (\text{availout}(p) + \text{epsout}(p))) \cdot \text{antin}(b) \cdot \neg\text{availin}(b)$$
$$\text{epsout}(b) = \text{epsin}(b) \cdot \neg\text{antloc}(b)$$

Bestimmen von Blöcken in E-Pfad-Suffix

epsin(b) Blockanfang von b liegt auf einem E-Pfad-Suffix für e

epsout(b) Blockende von b liegt auf einem E-Pfad-Suffix für e



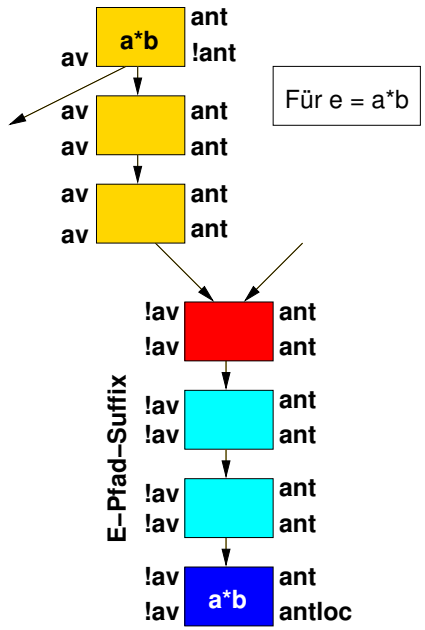
Berechnung

$$\text{epsin}(b) = (\sum_p (\text{availout}(p) + \text{epsout}(p))) \cdot \text{antin}(b) \cdot \neg\text{availin}(b)$$
$$\text{epsout}(b) = \text{epsin}(b) \cdot \neg\text{antloc}(b)$$

Bestimmen von Blöcken in E-Pfad-Suffix

epsin(b) Blockanfang von b liegt auf einem E-Pfad-Suffix für e

epsout(b) Blockende von b liegt auf einem E-Pfad-Suffix für e



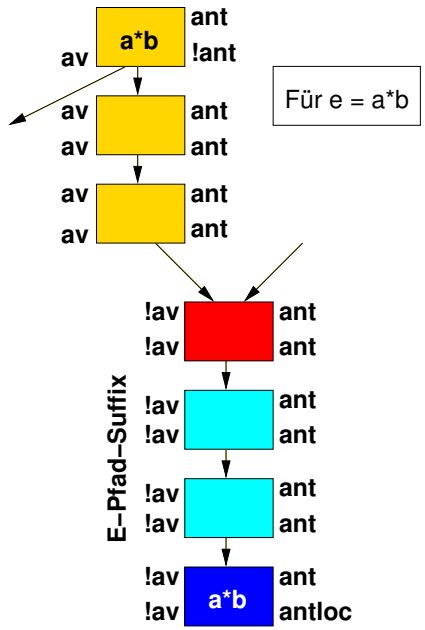
Berechnung

$$\text{epsin}(b) = (\sum_p (\text{availout}(p) + \text{epsout}(p))) \cdot \text{antin}(b) \cdot \neg\text{availin}(b)$$
$$\text{epsout}(b) = \text{epsin}(b) \cdot \neg\text{antloc}(b)$$

Bestimmen von Blöcken in E-Pfad-Suffix

epsin(b) Blockanfang von b liegt auf einem E-Pfad-Suffix für e

epsout(b) Blockende von b liegt auf einem E-Pfad-Suffix für e

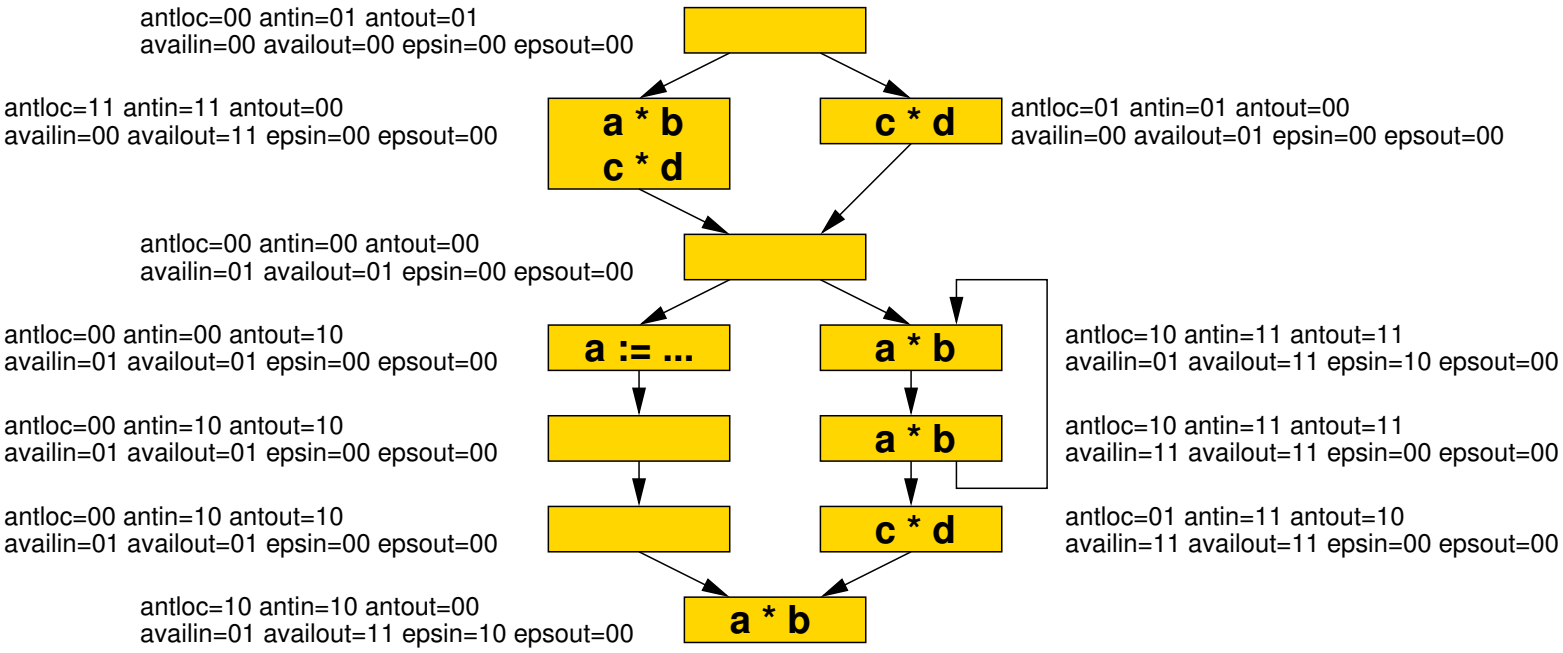


Berechnung

$$\text{epsin}(b) = (\sum_p (\text{availout}(p) + \text{epsout}(p))) \cdot \text{antin}(b) \cdot \neg\text{availin}(b)$$

$$\text{epsout}(b) = \text{epsin}(b) \cdot \neg\text{antloc}(b)$$

Beispiel E-Pfad-Suffix
In Prädikatennotation

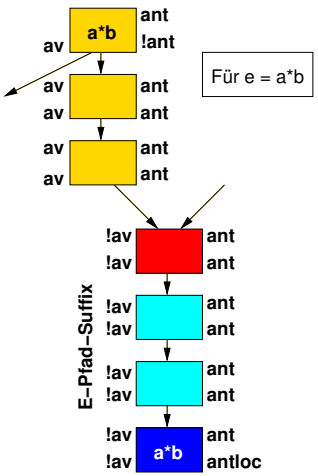


$$\begin{aligned} \text{epsin}(b) &= (\textstyle\sum_p (\text{availout}(p) + \text{epsout}(p))) \cdot \text{antin}(b) \cdot \neg\text{availin}(b) \\ \text{epsout}(b) &= \text{epsin}(b) \cdot \neg\text{antloc}(b) \end{aligned}$$

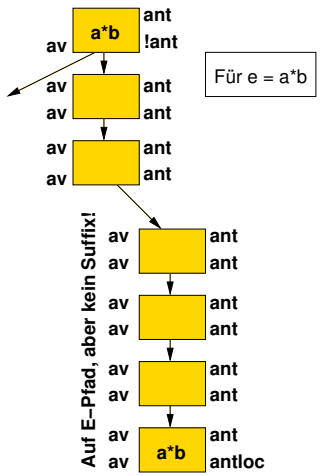
Idee: Bestimmen der Blöcke der redundanten Berechnungen

Redundante $e \in \text{UEExpr}(b_k)$ liegen im Endblock b_k eines E-Pfades

E-Pfad-Suffix $\neq \emptyset$
Endblock des
E-Pfad-Suffixes
$\Leftrightarrow \text{epsin}(b) \cdot \text{antloc}(b)$



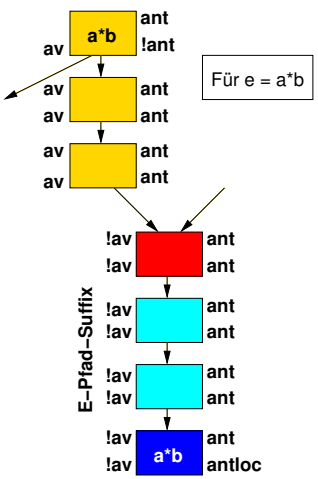
E-Pfad-Suffix $= \emptyset$
Endblock des E-Pfades
$\Leftrightarrow \text{availin}(b) \cdot \text{antloc}(b)$



Idee: Bestimmen der Blöcke der redundanten Berechnungen

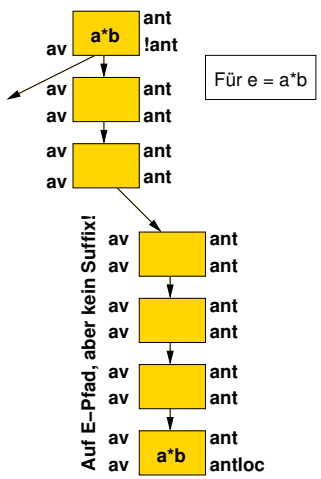
Redundante $e \in \text{UEExpr}(b_k)$ liegen im Endblock b_k eines E-Pfades

E-Pfad-Suffix $\neq \emptyset$
Endblock des
E-Pfad-Suffixes
$\Leftrightarrow \text{epsin}(b) \cdot \text{antloc}(b)$



E-Pfad-Suffix $= \emptyset$
Endblock des E-Pfades

$\Leftrightarrow \text{availin}(b) \cdot \text{antloc}(b)$



Erkennen von redundanten Berechnungen

redund(b) Berechnung von e in b ist redundant und kann durch $\mathtt{t}_e$ ersetzt werden

Berechnung

$$\text{redund}(b) = (\text{epsin}(b) + \text{availin}(b)) \cdot \text{antloc}(b)$$

Genauer: Alle lokal antizipierbaren e, also $e \in \text{UEExpr}(b_k)$ sind redundant.

➥Können eliminiert werden

Erkennen von redundanten Berechnungen

redund(b) Berechnung von e in b ist redundant und kann durch $\mathtt{t}_e$ ersetzt werden

Berechnung

$$\text{redund}(b) = (\text{epsin}(b) + \text{availin}(b)) \cdot \text{antloc}(b)$$

Genauer: Alle lokal antizipierbaren e, also $e \in \text{UEExpr}(b_k)$ sind redundant.

➥Können eliminiert werden

Erkennen von redundanten Berechnungen

redund(b) Berechnung von e in b ist redundant und kann durch $\mathtt{t}_e$ ersetzt werden

Berechnung

$$\text{redund}(b) = (\text{epsin}(b) + \text{availin}(b)) \cdot \text{antloc}(b)$$

Genauer: Alle lokal antizipierbaren e, also $e \in \text{UEExpr}(b_k)$ sind redundant.

➥Können eliminiert werden

Erkennen von redundanten Berechnungen

redund(b) Berechnung von e in b ist redundant und kann durch $\mathtt{t}_e$ ersetzt werden

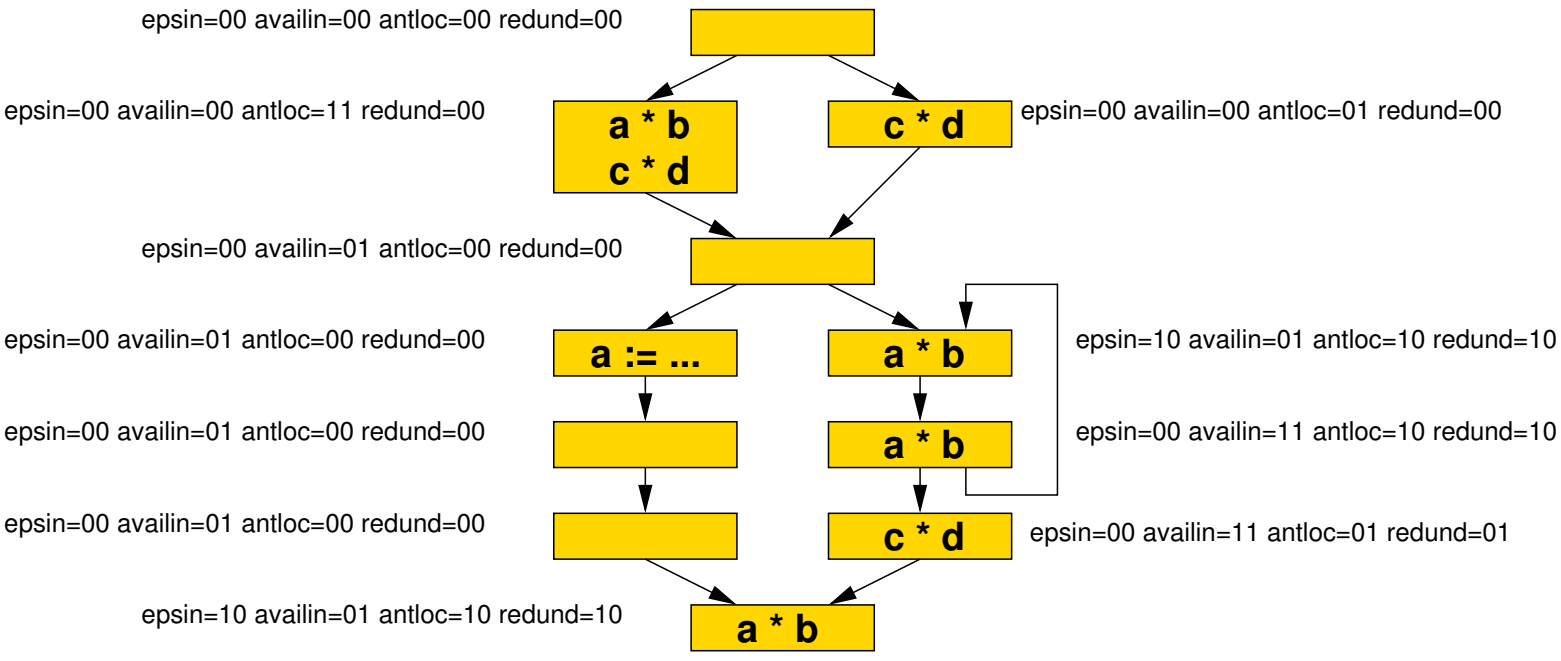
Berechnung

$$\text{redund}(b) = (\text{epsin}(b) + \text{availin}(b)) \cdot \text{antloc}(b)$$

Genauer: Alle lokal antizipierbaren e, also $e \in \text{UEExpr}(b_k)$ sind redundant.

➥Können eliminiert werden

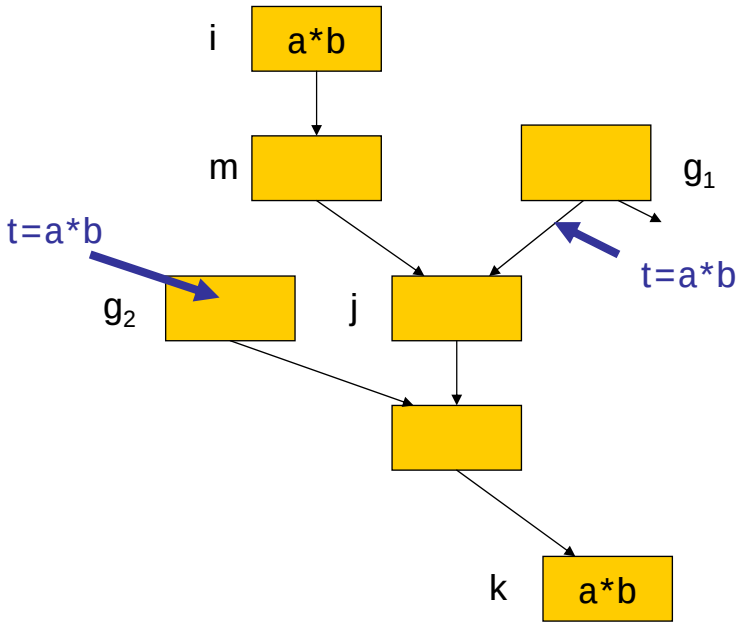
Beispiel Redundanz
In Prädikatennotation



$$\text{redund}(b) = (\text{epsin}(b) + \text{availin}(b)) \cdot \text{antloc}(b)$$

Einfügestellen für neue Berechnungen
Wo muß t_e := e eingefügt werden?

An Eintrittspunkten in den Pfad!



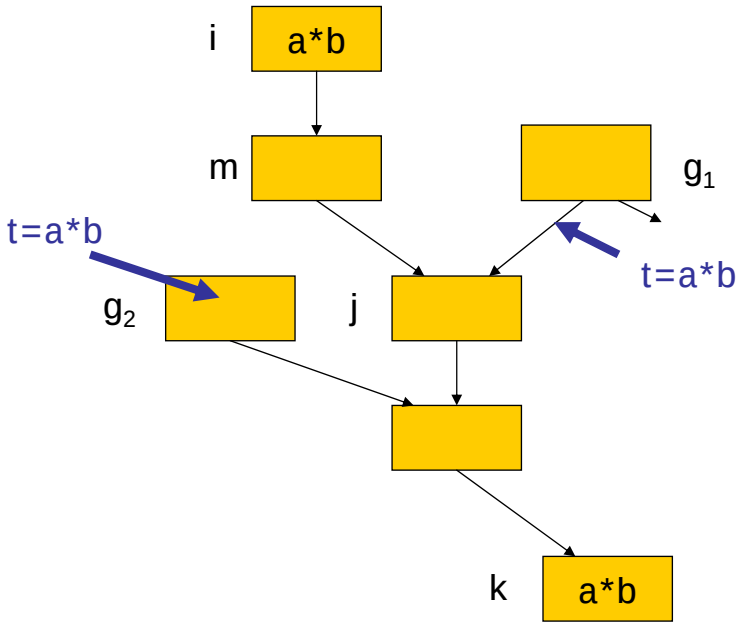
- Wenn alle Nachfolger von externem Block in E-Pfad: In Block
- Sonst in aufgeteilte Kante

Quelle: Dhamdhere, Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

Einfügestellen für neue Berechnungen

Wo muß t_e := e eingefügt werden?

An Eintrittspunkten in den Pfad!



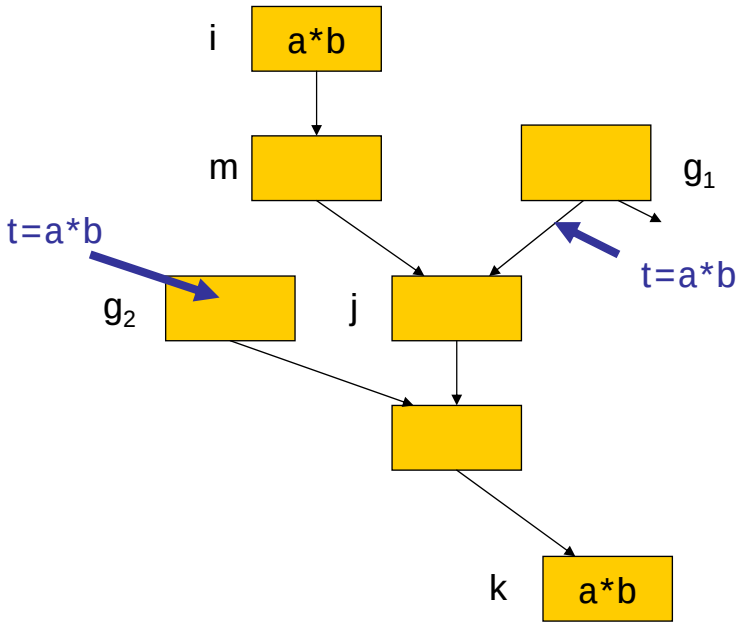
- Wenn alle Nachfolger von externem Block in E-Pfad: In Block
- Sonst in aufgeteilte Kante

Quelle: Dhamdhere, Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

Einfügestellen für neue Berechnungen

Wo muß t_e := e eingefügt werden?

An Eintrittspunkten in den Pfad!



- Wenn alle Nachfolger von externem Block in E-Pfad: In Block
- Sonst in aufgeteilte Kante

Quelle: Dhamdhere, Code optimization by partial redundancy elimination using Eliminatability paths (E-paths)

Einfügestellen für neue Berechnungen bestimmen

Embedded Systems & Applications

insert(b_h) Füge $\texttt{t}_e$:= e am Ende von Block b_h ein

insert(b_h, b_j) Füge $\texttt{t}_e$:= e in aufgeteilte Kante (b_h, b_j) ein

$b_h \notin$ E-Pfad, $b_j \in$ E-Pfad $(b_i, \ldots, b_k]$

Berechnung

$$\begin{aligned} \text{insert}(b_h) &= \neg\text{availout}(b_h) \cdot \neg\,\text{epsout}(b_h) \cdot \prod_s \text{epsin}(s) \\ \text{insert}(b_h, b_j) &= \neg\text{availout}(b_h) \cdot \neg\,\text{epsout}(b_h) \cdot \neg\,\text{insert}(b_h) \cdot \text{epsin}(b_j) \end{aligned}$$

Einfügestellen für neue Berechnungen bestimmen

Embedded Systems & Applications

insert(b_h) Füge $\texttt{t}_e$:= e am Ende von Block b_h ein

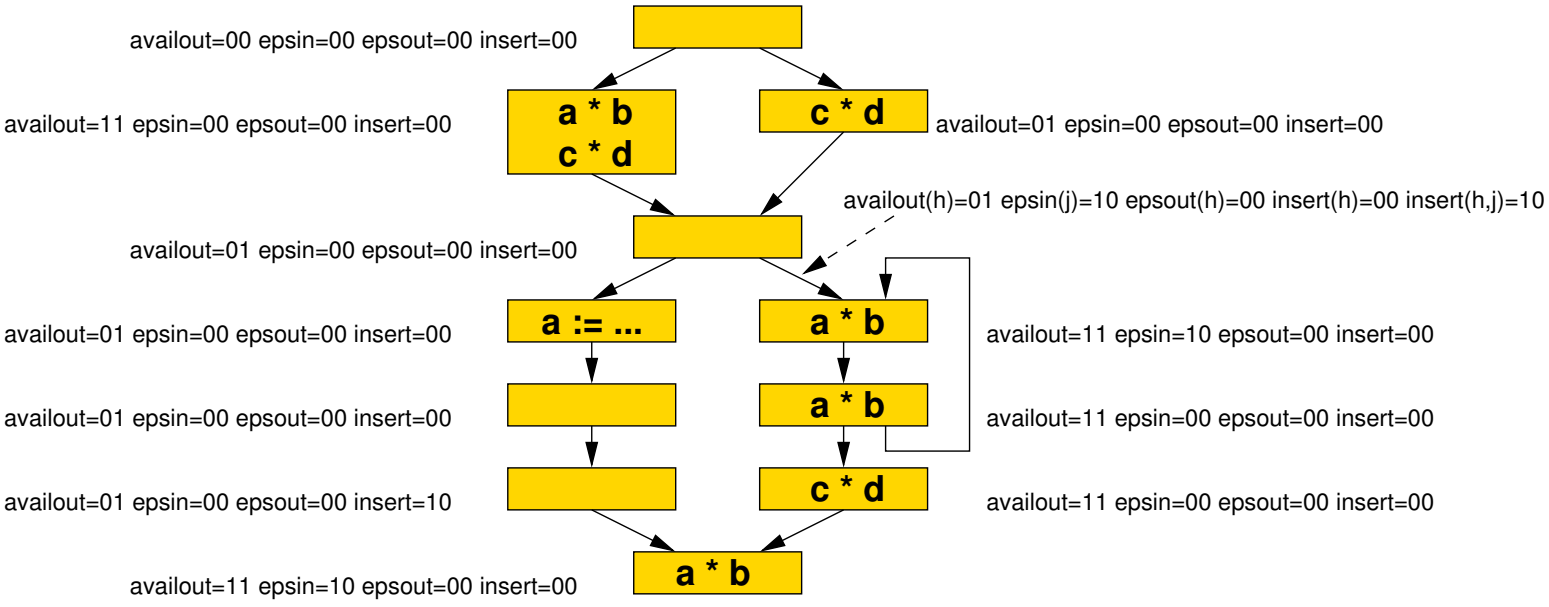
insert(b_h, b_j) Füge $\texttt{t}_e$:= e in aufgeteilte Kante (b_h, b_j) ein

$b_h \notin$ E-Pfad, $b_j \in$ E-Pfad $(b_i, \ldots, b_k]$

Berechnung

$$\begin{aligned} \text{insert}(b_h) &= \neg\text{availout}(b_h) \cdot \neg\,\text{epsout}(b_h) \cdot \textstyle\prod_s \text{epsin}(s) \\ \text{insert}(b_h, b_j) &= \neg\text{availout}(b_h) \cdot \neg\,\text{epsout}(b_h) \cdot \neg\,\text{insert}(b_h) \cdot \text{epsin}(b_j) \end{aligned}$$

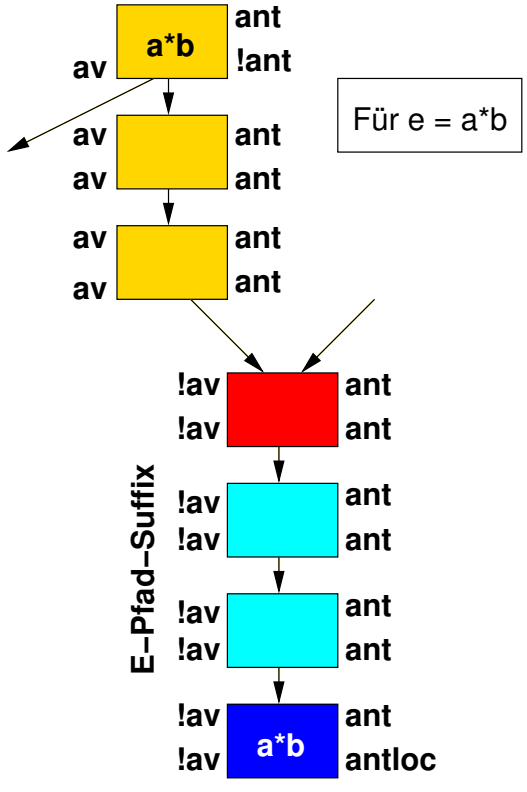
Beispiel Einfügen von Berechnungen



$$\begin{aligned} \text{insert}(b_h) &= \neg\text{availout}(b_h) \cdot \neg\,\text{epsout}(b_h) \cdot \textstyle\prod_s \text{epsin}(s) \\ \text{insert}(b_h, b_j) &= \neg\text{availout}(b_h) \cdot \neg\,\text{epsout}(b_h) \cdot \neg\,\text{insert}(b_h) \cdot \text{epsin}(b_j) \end{aligned}$$

Sichern von Berechnungsergebnissen

Am Anfang des E-Pfades!

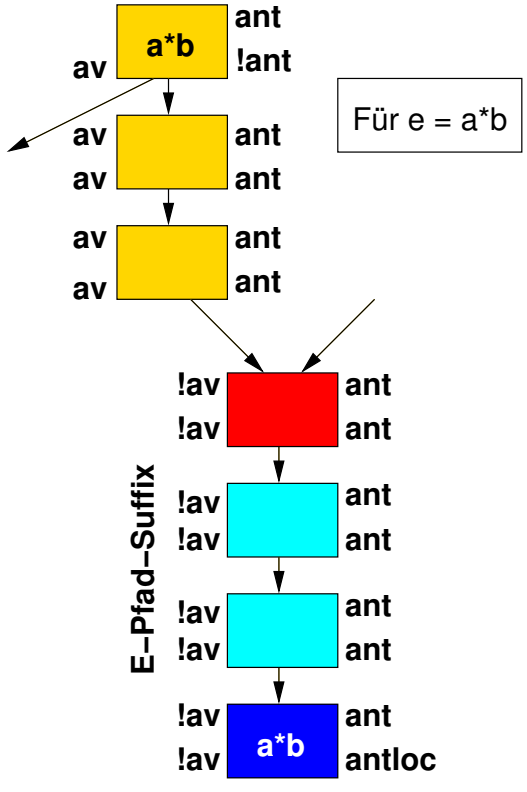


➥Startblock des E-Pfades bestimmen!

Sichern von Berechnungsergebnissen

Embedded Systems & Applications

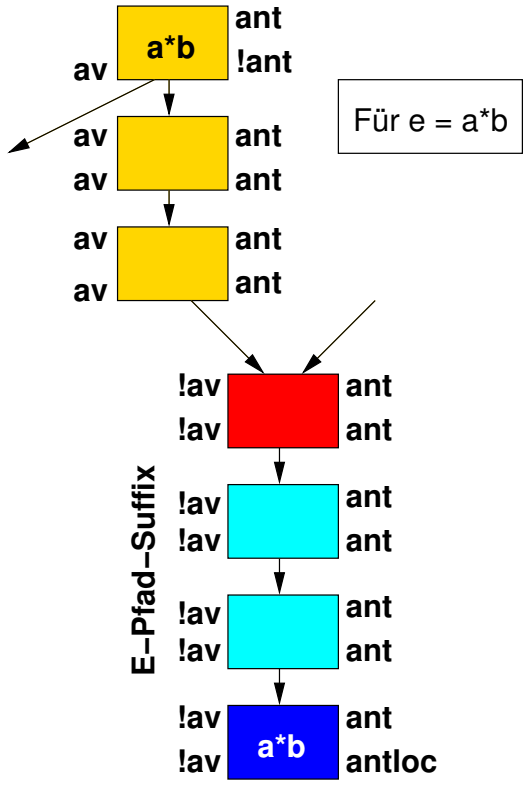
Am Anfang des E-Pfades!



➥Startblock des E-Pfades bestimmen!

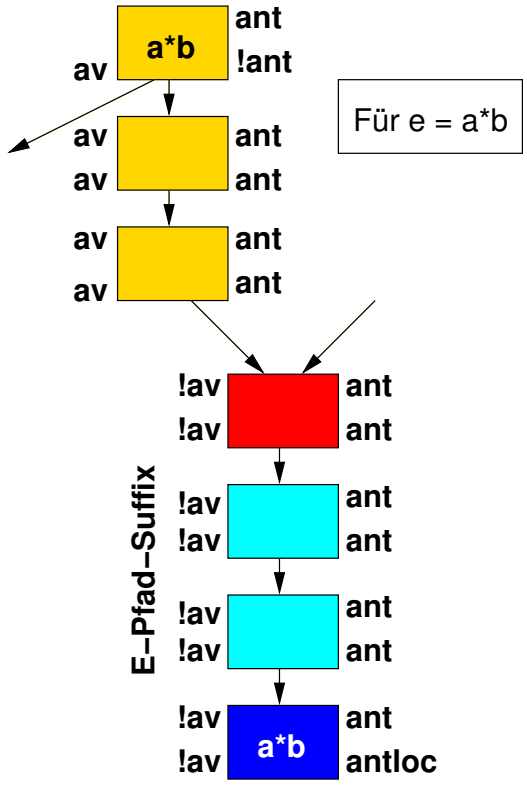
Idee zur Bestimmung des Startblocks

- Beginne bei bekanntem Block und suche rückwärts
- Beginne bei Startblock des E-Pfad-Suffix
  - ... falls E-Pfad einen Suffix hat
- Sonst: Suche von Endblock des E-Pfades aus rückwärts
- Bis nicht-redundante Berechnung von e gefunden



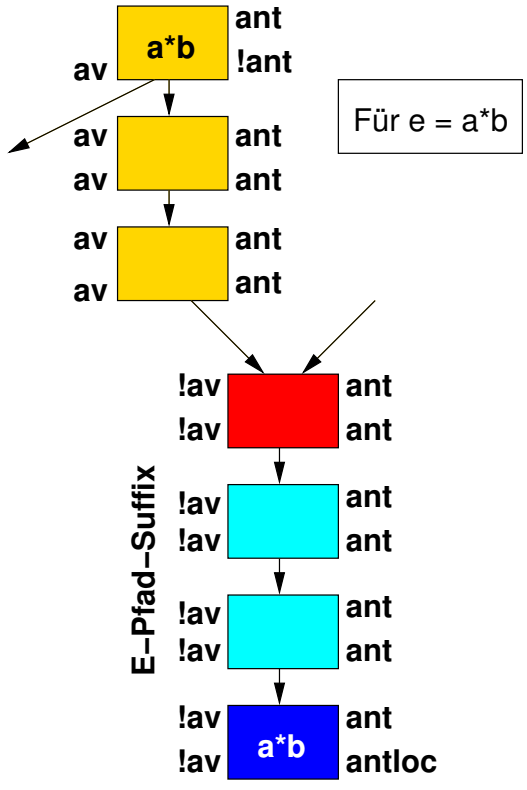
Idee zur Bestimmung des Startblocks

- Beginne bei bekanntem Block und suche rückwärts
- Beginne bei Startblock des E-Pfad-Suffix
  - ... falls E-Pfad einen Suffix hat
- Sonst: Suche von Endblock des E-Pfades aus rückwärts
- Bis nicht-redundante Berechnung von e gefunden



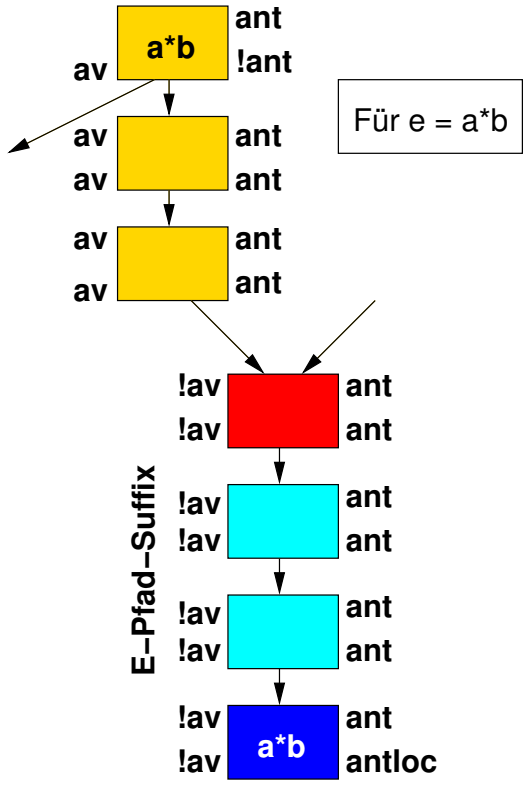
Idee zur Bestimmung des Startblocks

- Beginne bei bekanntem Block und suche rückwärts
- Beginne bei Startblock des E-Pfad-Suffix
  - ... falls E-Pfad einen Suffix hat
- Sonst: Suche von Endblock des E-Pfades aus rückwärts
- Bis nicht-redundante Berechnung von e gefunden



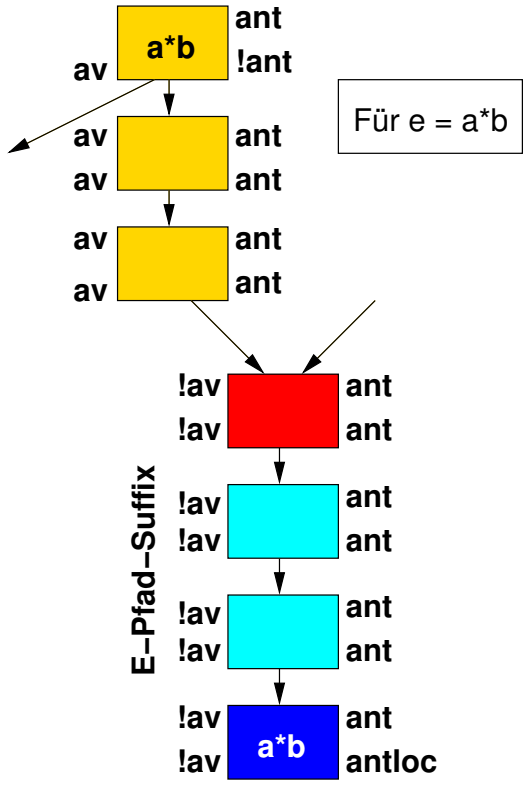
Idee zur Bestimmung des Startblocks

- Beginne bei bekanntem Block und suche rückwärts
- Beginne bei Startblock des E-Pfad-Suffix
  - ... falls E-Pfad einen Suffix hat
- Sonst: Suche von Endblock des E-Pfades aus rückwärts
- Bis nicht-redundante Berechnung von e gefunden



Idee zur Bestimmung des Startblocks

- Beginne bei bekanntem Block und suche rückwärts
- Beginne bei Startblock des E-Pfad-Suffix
  - ... falls E-Pfad einen Suffix hat
- Sonst: Suche von Endblock des E-Pfades aus rückwärts
- Bis nicht-redundante Berechnung von e gefunden

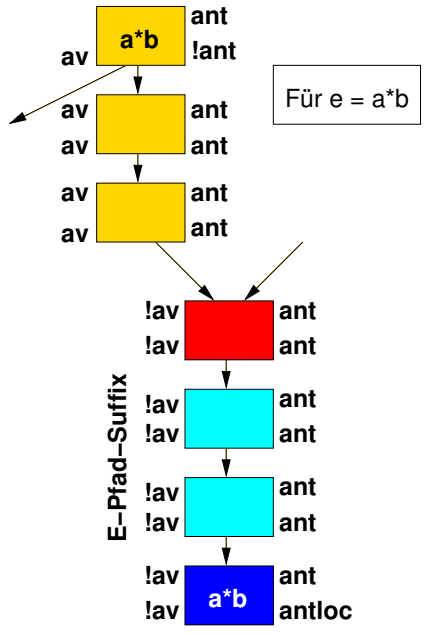


Berechnung des Startblocks

svupin(b) Sichere Berechnungsergebnis für e über Blockeingang von b

svupout(b) Sichere Berechnungsergebnis für e über Blockausgang von b

save(b) Sichere Berechnungsergebnis in $\mathtt{t}_e$ in Block b



Berechnung

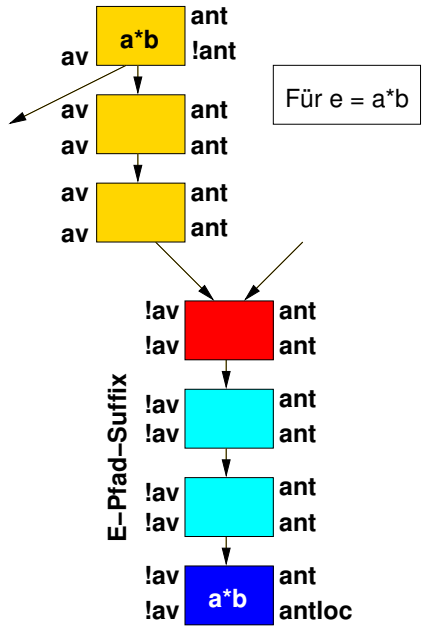
$$\begin{aligned} \text{svupout}(b) &= (\textstyle\sum_s (\text{epsin}(s) + \text{redund}(s) + \text{svupin}(s))) \cdot \text{availout}(b) \\ \text{svupin}(b) &= \text{svupout}(b) \cdot \neg\, \text{comp}(b) \\ \text{save}(b) &= \text{svupout}(b) \cdot \text{comp}(b) \cdot \neg\, (\text{redund}(b) \cdot \text{transp}(b)) \end{aligned}$$

Berechnung des Startblocks

svupin(b) Sichere Berechnungsergebnis für e über Blockeingang von b

svupout(b) Sichere Berechnungsergebnis für e über Blockausgang von b

save(b) Sichere Berechnungsergebnis in $\mathtt{t}_e$ in Block b

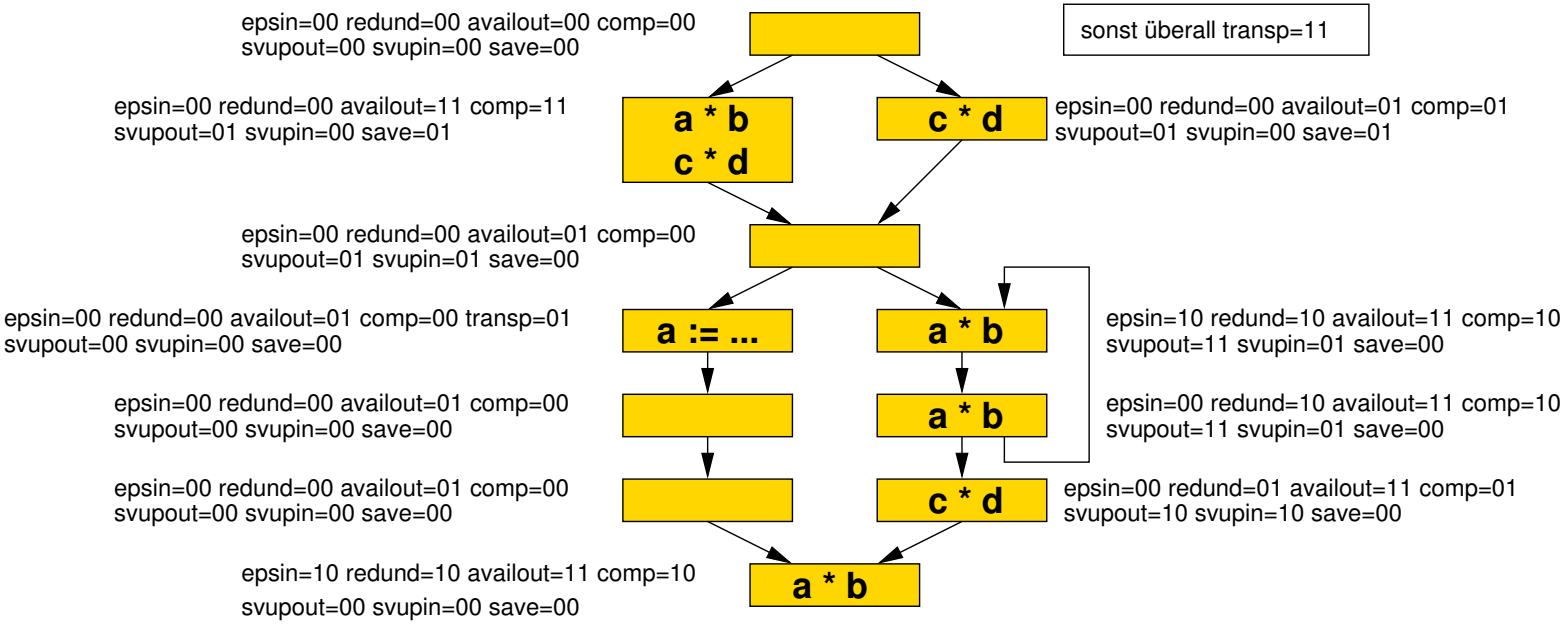


Berechnung

$$\begin{aligned} \text{svupout}(b) &= (\textstyle\sum_s (\text{epsin}(s) + \text{redund}(s) + \text{svupin}(s))) \cdot \text{availout}(b) \\ \text{svupin}(b) &= \text{svupout}(b) \cdot \neg\, \text{comp}(b) \\ \text{save}(b) &= \text{svupout}(b) \cdot \text{comp}(b) \cdot \neg\, (\text{redund}(b) \cdot \text{transp}(b)) \end{aligned}$$

Beispiel Bestimmung des E-Pfad-Startblöcke

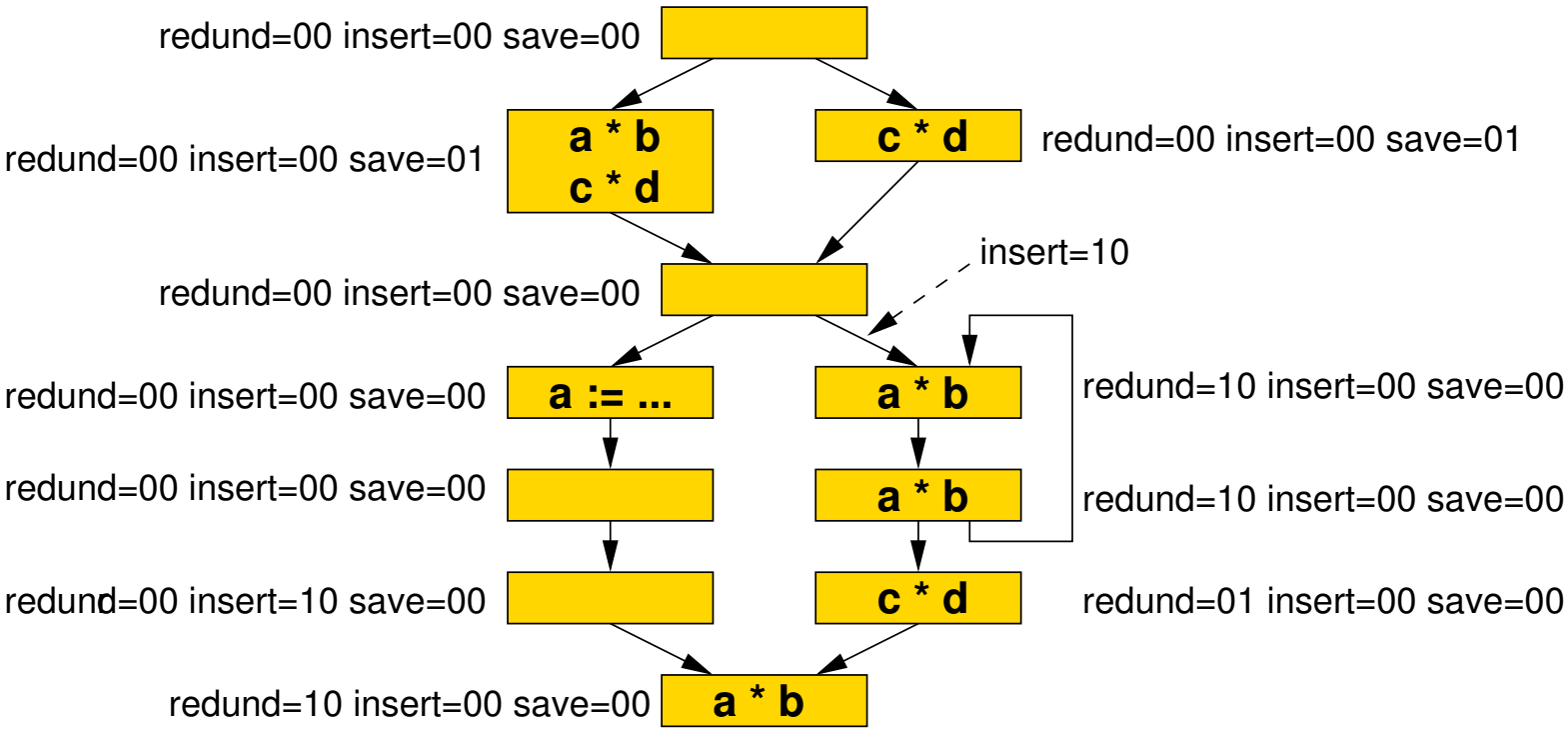
Stellen zum Sichern der Berechungsergebnisse



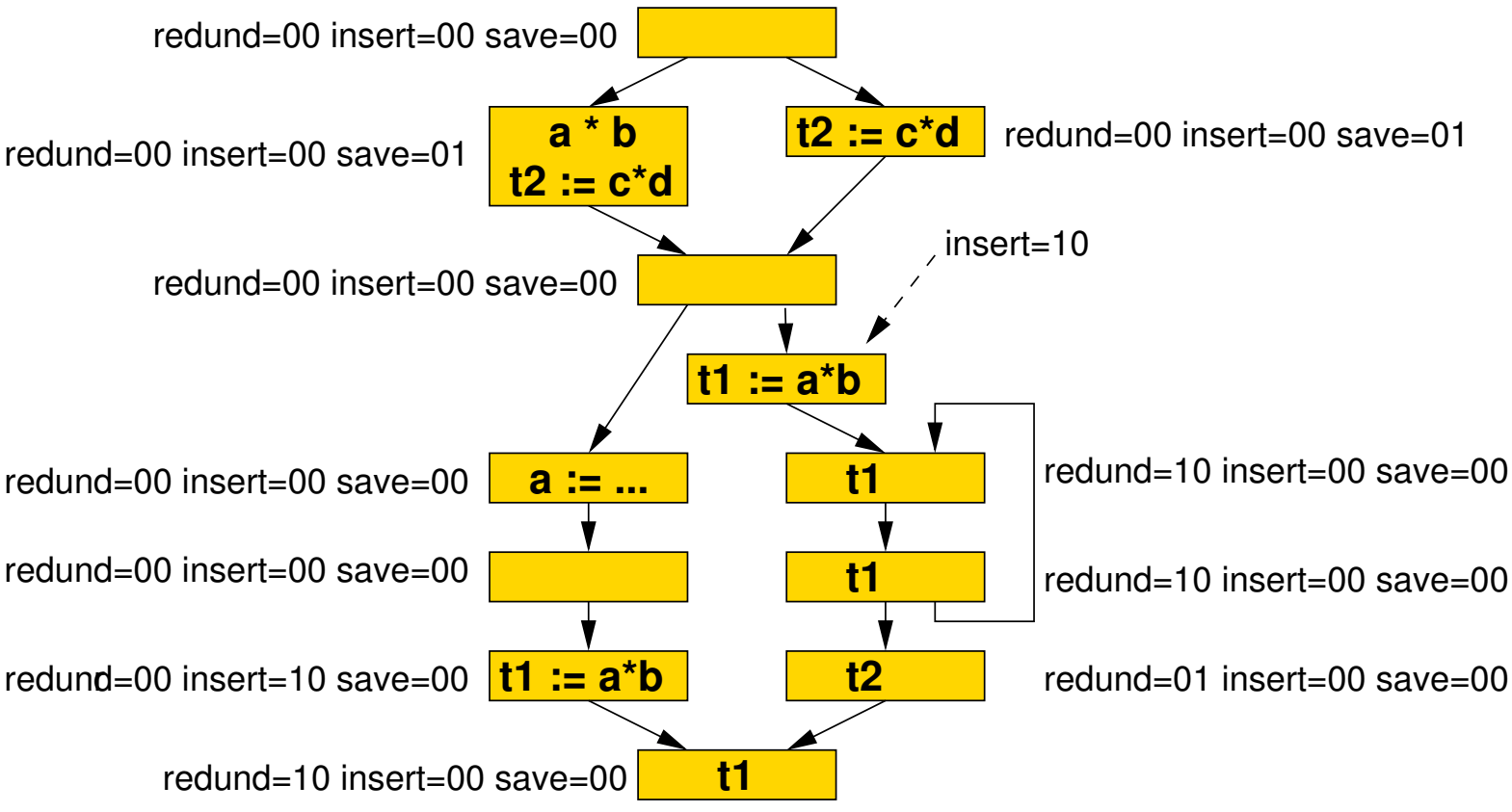
$$
\begin{aligned}
\text{svupout}(b) &= (\textstyle\sum_s (\text{epsin}(s) + \text{redund}(s) + \text{svupin}(s))) \cdot \text{availout}(b) \\
\text{svupin}(b) &= \text{svupout}(b) \cdot \neg\, \text{comp}(b) \\
\text{save}(b) &= \text{svupout}(b) \cdot \text{comp}(b) \cdot \neg\, (\text{redund}(b) \cdot \text{transp}(b))
\end{aligned}
$$

Beispiel Zusammenfassung Datenflussanalyse

Bisher berechnete Ergebnisse



Beispiel PRE-Optimierung
Auf Basis der Datenfluss-Ergebnisse



Zusammenfassung

- PRE ist eine sehr mächtige Optimierung
- Lösbar durch komplexes Datenflußproblem
  - Hier aber schon deutlich einfacher als klassische Verfahren!
- Noch weitere Verfeinerung möglich
  - Optimierung auf SSA-Form → SSA-PRE
  - Verfeinerte Stellung des Datenflussproblems → D. Kumar 2006, geringerer Rechenaufwand

Zusammenfassung

- PRE ist eine sehr mächtige Optimierung
- Lösbar durch komplexes Datenflußproblem
  - Hier aber schon deutlich einfacher als klassische Verfahren!
- Noch weitere Verfeinerung möglich
  - Optimierung auf SSA-Form → SSA-PRE
  - Verfeinerte Stellung des Datenflussproblems → D. Kumar 2006, geringerer Rechenaufwand

Zusammenfassung

- PRE ist eine sehr mächtige Optimierung
- Lösbar durch komplexes Datenflußproblem
  - Hier aber schon deutlich einfacher als klassische Verfahren!
- Noch weitere Verfeinerung möglich
  - Optimierung auf SSA-Form → SSA-PRE
  - Verfeinerte Stellung des Datenflussproblems → D. Kumar 2006, geringerer Rechenaufwand

Zusammenfassung

- PRE ist eine sehr mächtige Optimierung
- Lösbar durch komplexes Datenflußproblem
  - Hier aber schon deutlich einfacher als klassische Verfahren!
- Noch weitere Verfeinerung möglich
  - Optimierung auf SSA-Form $\rightarrow$ SSA-PRE
  - Verfeinerte Stellung des Datenflussproblems $\rightarrow$ D. Kumar 2006, geringerer Rechenaufwand

Zusammenfassung

- PRE ist eine sehr mächtige Optimierung
- Lösbar durch komplexes Datenflußproblem
  - Hier aber schon deutlich einfacher als klassische Verfahren!
- Noch weitere Verfeinerung möglich
  - Optimierung auf SSA-Form $\rightarrow$ SSA-PRE
  - Verfeinerte Stellung des Datenflussproblems $\rightarrow$ D. Kumar 2006, geringerer Rechenaufwand

Zusammenfassung

- PRE ist eine sehr mächtige Optimierung
- Lösbar durch komplexes Datenflußproblem
  - Hier aber schon deutlich einfacher als klassische Verfahren!
- Noch weitere Verfeinerung möglich
  - Optimierung auf SSA-Form $\rightarrow$ SSA-PRE
  - Verfeinerte Stellung des Datenflussproblems $\rightarrow$ D. Kumar 2006, geringerer Rechenaufwand