Compiler 1: Grundlagen

Code-Generierung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

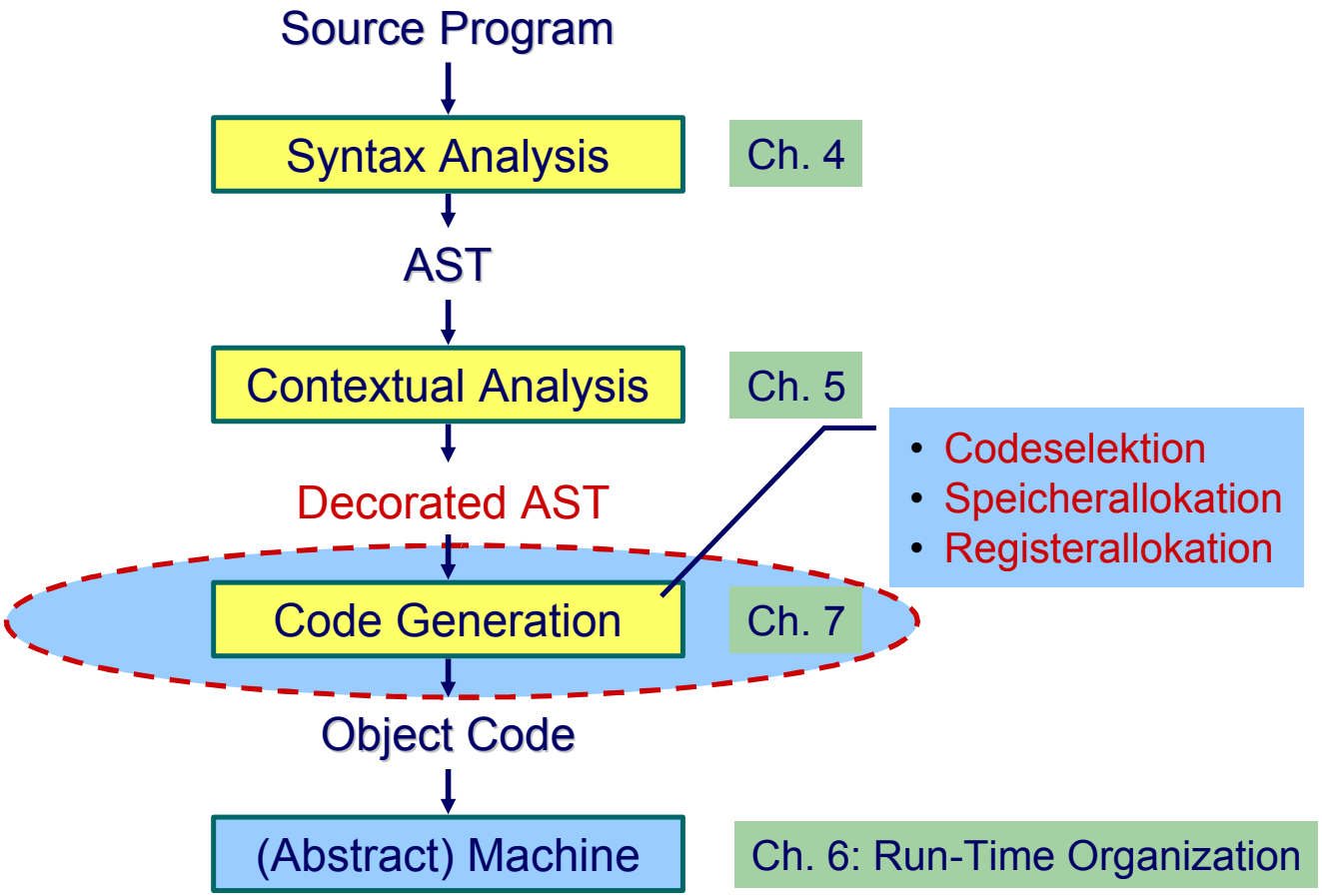
WS 2015/16

Andreas Koch

FG Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen
Informatik, TU Darmstadt

Compile-Fluß

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT



Code-Generierung Intro 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Abhängig von Eingabesprache
  - Syntaktische Analyse
  - Kontextanalyse
- Abhängig von Eingabesprache und Zielmaschine
  - Codegenerierung

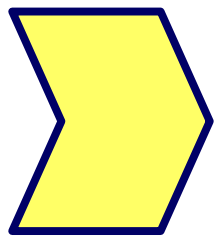
➥Schwierig allgemein zu formulieren

Code-Generierung Intro 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Codegenerierung befaßt sich mit Semantik der Eingabesprache

```
let
    var x: integer;
    var y: integer
in begin
    y := 2;
    x := 7;
    printint(y);
    printint(x);
end
```



```
PUSH      2
LOADL     2
STORE(1)  1[SB]
LOADL     7
STORE(1)  0[SB]
LOAD(1)   1[SB]
CALL      putint
LOAD(1)   0[SB]
CALL      putint
HALT
```

➥Gleiche Semantik für Quellprogramm und Zielprogramm

Code-Generierung Intro 3

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Aufteilung in Unterprobleme

- Code-Selektion
  Ordnet Phrasen aus Quellprogramm Folgen von Maschineninstruktionen zu
- Speicherallokation
  Weist jeder Variablen Speicherplatz zu und führt über diesen Buch
- Registerallokation
  Verwaltet Registerverwendung für Variablen und Zwischenergebnisse (nicht in TAM!)

Code-Selektion 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Semantik
  - In der Regel auf Phrasenebene beschrieben
  - Expressions, Commands, Declarations, . . .

Vorgehensweise

Induktives Herleiten der Übersetzung des gesamten Programmes aus Übersetzungen von Einzelphrasen

- Problem: Mehrere semantisch korrekte Übersetzungen für eine Phrase
- Wie konkrete Instruktionsfolge auswählen?

➥Code-Selektion

Code-Selektion 2 – Ideen und Konzepte

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Code-Funktion

Bildet Phrase auf Instruktionsfolge ab.

Definition durch:

Code-Schablone

Ordnet jeder speziellen *Form* einer Phrase eine Definition in Form von Maschineninstruktionen oder Anwendungen von Code-Funktionen zu.

Wichtig: Eingabesprache muß vollständig durch Code-Schablonen abgedeckt werden.

Beispiel: Code-Funktion 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

execute : **Command** $\rightarrow$ **Instruction***

Anweisungsfolge `C1; C2`
Semantik: Führe erst `C1` aus, dann `C2`.

execute [[`C1 ; C2`]] =
execute[[`C1`]]
execute[[`C2`]]

Beispiel: Code-Funktion 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Zuweisung `I := E`

Semantik: Weise Wert von Ausdruck `E` an die Variable bezeichnet durch `I` zu

execute [[`I := E`]] =
evaluate[[`E`]]
`STORE a`, mit `a`=Adresse von Variable `I`

Beispiel: Code-Funktion 3

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Anweisungsfolge `f := f*n; n := n-1`

execute [[`f := f*n; n := n-1`]] =

execute [[`f := f*n`]]
execute [[`n := n-1`]] =

evaluate [[`f*n`]]
`STORE f`

evaluate [[`n - 1`]]
`STORE n` =

```
LOAD f
LOAD n
CALL mult
STORE f
LOAD n
CALL pred
STORE n
```

Aufbau einer Code-Funktion

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Orientiert sich an Subphrasenstruktur

$$
\begin{aligned}
&f_P\ [[\ \ldots \mathrm{Q} \ldots \mathrm{R} \ldots\ ]] = \\
&\quad \ldots \\
&\quad f_Q\ [[\ \mathrm{Q}\ ]] \\
&\quad \ldots \\
&\quad f_R\ [[\ \mathrm{R}\ ]] \\
&\quad \ldots
\end{aligned}
$$

Code-Spezifikation 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Sammlung aller
  - Code-Funktionen
  - Code-Schablonen
- Muß Eingabesprache vollständig überdecken

Code-Spezifikation für Mini-Triangle

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Abstrakte Syntax

```
Program ::= Command                          Program
Command  ::= V-name := Expression            AssignCommand
           | Identifier ( Expression )        CallCommand
           | Command ; Command               SequentialCommand
           | if Expression then Command      IfCommand
             else Command
           | while Expression do Command     WhileCommand
           | let Declaration in Command      LetCommand
```

$$
\begin{aligned}
\mathit{run} &: \text{Program} \rightarrow \text{Instruction*} \\
\mathit{execute} &: \text{Command} \rightarrow \text{Instruction*} \\
\mathit{evaluate} &: \text{Expression} \rightarrow \text{Instruction*} \\
\mathit{fetch} &: \text{V-name} \rightarrow \text{Instruction*} \\
\mathit{assign} &: \text{V-name} \rightarrow \text{Instruction*} \\
\mathit{elaborate} &: \text{Declaration} \rightarrow \text{Instruction*}
\end{aligned}
$$

Code-Spezifikation 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

class	*code function*	*effect of the generated code*
Program	***run P***	Run the program P and then halt, starting and finishing with an empty stack.
Command	***execute C***	Execute the command C, possibly updating variables, but neither expanding nor contracting the stack.
Expression	***evaluate E***	Evaluate the expression E, pushing its result on the stack top, but having no other effects.
V-name	***fetch V***	Push the value of the constant or variable named V on the stack.
V-name	***assign V***	Pop a value from the stack top, and store it in the variable named V.
Declaration	***elaborate D***	Elaborate the declaration D, expanding the stack to make space for any constants and variables declared therein.

Code-Schablone: Run

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

$$\mathit{run}\ [\mathrm{C}]$$
$$= \quad \mathit{execute}\ [\mathrm{C}]$$
$$\texttt{HALT}$$

Code-Schablone: Anweisungsfolge

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

$$\textit{execute}\ [C_1\ ;\ C_2]$$
$$= \quad \textit{execute}\ [C_1]$$
$$\textit{execute}\ [C_2]$$

Code-Schablone: Zuweisung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

$$execute\ [V := E]$$

$$= \quad evaluate\ [E]$$

$$assign\ [V]$$

Code-Schablone: Bedingte Anweisung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

$$
\begin{array}{lll}
\textit{execute}\,[\texttt{if}\ E\ \texttt{then}\ C_1\ \texttt{else}\ C_2] & & \\
= & \textit{evaluate}\,[E] & \\
 & \texttt{JUMPIF(0)} & \texttt{Lelse} \\
 & \textit{execute}\,[C_1] & \\
 & \texttt{JUMP} & \texttt{Lfi} \\
\texttt{Lelse:} & \textit{execute}\,[C_2] & \\
\texttt{Lfi:} & &
\end{array}
$$

Code-Schablone: Schleife

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

execute [**while** *E* **do** *C*] =

```
        Lwhile:   evaluate [E]
                  JUMPIF(0)  Lend
                  execute [C]
                  JUMP  Lwhile
         Lend:
```

Code-Schablone: Deklaration

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

$$\textit{execute}\,[\texttt{let}\ D\ \texttt{in}\ C] = \textit{elaborate}\,[D]\ \textit{execute}\,[C]\ \texttt{POP(0)}\ s$$

`POP` nur wenn $s > 0$ (zusätzlicher Speicher alloziert wurde)

Beispiel Code-Schablonen 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
while i > 0 do i := i - 2
```

execute [*while i>0 do i:=i-2*]

- *evaluate* [*i>0*]

```
50: LOAD      i
51: LOADL     0
52: CALL      gt
53: JUMPIF(0) 59
```

- *execute* [*i:=i-2*]

```
54: LOAD      i
55: LOADL     2
56: CALL      sub
57: STORE     i
58: JUMP      50
59:
```

execute [*while* E *do* C]

```
  =  Lwhile:  evaluate [E]
              JUMPIF(0)   Lend
              execute [C]
              JUMP        Lwhile
       Lend:
```

Code-Schablonen für Ausdrücke

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Integer-Literal

```
evaluate[IL] =
    LOADL v          ;  v is the value of IL
```

Variable

```
evaluate[V] =
    fetch V
```

Unärer Operator

```
evaluate[O E] =
    evaluate E
    CALL p           ;  p is the address of the routine corresponding to O
```

Binärer Operator

```
evaluate[E1 O E2] =
    evaluate E1
    evaluate E2
    CALL p           ;  p is the address of the routine corresponding to O
```

Code-Schablonen für Deklarationen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Konstante

```
elaborate[const I ~ E] =
    evaluate E          ;   ... and decorate the tree
```

- Beachte: Legt berechneten Wert auf Stack ab!
- Optimierung möglich:
  - Setze Wert der Konstante direkt in Maschinencode ein
  - Dann leere Schablone

Variable

```
elaborate[var I : T] =
    PUSH  size(T)               ;   ... and decorate the tree
```

Deklarationsfolge

```
elaborate[D1; D2] =
    elaborate D1
    elaborate D2
```

Code-Schablone für Vname

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Beachte: Mini-Triangle, keine lokalen Variablen!

Lesen

```
fetch[I] =
    LOAD d[SB] ;   d is the address of I
```

Schreiben

```
assign[I] =
    STORE d[SB] ;   ditto
```

Beispiel Code-Schablonen 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
execute[let const n ~ 7; var i : Integer in i := n*n]


=   elaborate[const n ~ 7; var i : Integer]
    execute[i := n*n]


=   elaborate[const n ~ 7]
    elaborate[var i : Integer]
    evaluate[n*n]
    assign[i]


=   LOADL 7
    PUSH 1
    LOAD n
    LOAD n
    CALL mult
    STORE i
    POP(0) 2
```

Kann noch optimiert werden (`const n`), $\rightarrow$ Inlining.

Sonderfallbehandlung 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Spezialisierte Schablonen für Sonderfälle

Beispiel: `i + 1`

Allg. Schablone

```
LOAD    i
LOADL   1
CALL    add
```

Spez. Schablone

```
LOAD    i
CALL    succ
```

Effizienterer Code für "+1".

Analoges Vorgehen für Inlining von Konstanten

Sonderfallbehandlung 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Inlining von Konstanten in Maschinen-Code

Konstante `I` mit statischem Wert $v = \text{valueOf}(IL)$

fetch `[I] =`
    `LOADL  v  ;` ... v retrieved from DAST

elaborate `[const I ~ IL] =`
    `;` ... just decorate the tree

Beispiel Sonderfallbehandlung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
execute[let const n ~ 7; var i : Integer in i := n*n] =
    elaborate[const n ~ 7; var i : Integer]
    execute[i := n*n]

=   elaborate[const n ~ 7]
    elaborate[var i : Integer]
    evaluate[n*n]
    assign[i]

=
    PUSH 1
    LOADL 7
    LOADL 7
    CALL mult
    STORE i
    POP(0) 1
```

Jetzt kein Speicherzugriff mehr für `n` erforderlich.

Implementierung eines Code-Generators

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Systematischer Aufbau
- Orientiert sich direkt an Code-Funktionen
- Code-Funktionen beschreiben rekursiven Algorithmus zur Traversierung vom DAST
- Wieder bewährtes Visitor-Entwurfsmuster verwenden

Repräsentation vom TAM-Instruktionen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
package TAM;

public class Instruction {
    public int op;    // op-code (LOADop, LOADAop, etc.)
    public int n;     // length field
    public int r;     // register field (SBr, LBr, L1r, etc.)
    public int d;     // operand field
}

public class Machine {
    public static final byte // op-codes (Table C.2)
        LOADop = 0, LOADAop = 1, ...;

    public static final byte // register numbers (Table C.1)
        CBr = 0, CTr = 1, PBr = 2, PTr = 3, ...;

    private static Instruction[] code = new Instruction[1024];
}

public class Interpreter {
    ...
}
```

Erzeugen vom TAM-Instruktionen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
package Triangle.CodeGenerator;
public class Encoder extends Visitor {
    /** Append an instruction to the object program. */
    private void emit(int op, int n, int r, int d) {
        Instruction nextInstr = new Instruction();
        if (n > 255) {
            reporter.reportRestriction(
                "length of operand can't exceed 255 words");
            n = 255; // to allow code generation to continue
        }
        nextInstr.op = op;
        nextInstr.n  = n;
        nextInstr.r  = r;
        nextInstr.d  = d;
        if (nextInstrAddr == Machine.PB)
            reporter.reportRestriction(
                "too many instructions for code segment");
        else {
            Machine.code[nextInstrAddr] = nextInstr;
            nextInstrAddr = nextInstrAddr + 1;
        }
    }
    private short nextInstrAddr = 0;
}
```

Code-Generierung via Visitor 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Beispiel: Generiere Code für gesamtes Programm

```
public class Encoder implements Visitor {
   public Object visitProgram(Program prog, Object arg ) {
      prog.C.visit(this,arg);
      emit(Machine.HALTop, 0, 0, 0);
      return null;
   }
   ...
}
```

Code-Generierung via Visitor 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Aufgaben der einzelnen Visitor-Methoden bei Code-Generierung

phrase class	*visitor method*	*behaviour of the visitor method*
Program	**`visitProgram`**	generate code as specified by ***run[P]***
Command	**`visit..Cmd`**	generate code as specified by ***execute[C]***
Expression	**`visit..Expr`**	generate code as specified by ***evaluate[E]***
V-name	**`visit..Vname`**	return “entity description” for the visited variable or constant name (i.e. use the “decoration”).
Declaration	**`visit..Decl`**	generate code as specified by ***elaborate[D]***
Type-Den	**`visit..TypeDen`**	return the size of the type

Sonderfall Vname

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Tritt je nach Umgebung mit zwei unterschiedlichen Bedeutungen auf

- Auslesen des Wertes einer Variablen
- Ziel einer Zuweisung

Getrennt realisieren

```
public class Encoder implements Visitor {
    ...
    public void encodeFetch(Vname name) {
        // as specified by fetch code template ...
    }
}

    public void encodeAssign(Vname name) {
        // as specified by assign code template ...
    }
}
```

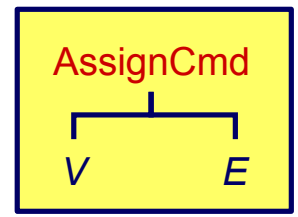
... aber nicht in einem Visitor, sondern für Visitor benutzbar.

Beispiel Benutzung von VName 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Ziel einer Zuweisung

execute [*V* := *E*] = *evaluate* [*E*]
assign [*V*]




```
public Object visitAssignCmd(AssignCmd cmd, Object
   arg) {
    cmd.E.visit(this, arg);
    encodeAssign(cmd.V);
}
```

Beispiel Benutzung von VName 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Innerhalb eines Ausdrucks

```
public Object visitVnameExpression(VnameExpression expr,
                                   Object arg) {
    encodeFetch(expr.V);
    return new Short((short) 1);
}
```

Einfache Ausdrücke

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Integer Literale

```
public Object visitIntegerExpression(IntegerExpression expr,
                                     Object arg) {
    short v = valuation(expr.I.spelling);
    emit(Instruction.LOADLop, (byte) 0, (byte) 0, v);
    return new Short((short) 1);
}
```

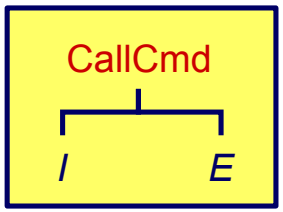
Prozeduraufruf

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Vereinfacht für Mini-Triangle

- Nur primitive Funktionen
- Mit maximal einem Parameter

execute [*I* (*E*)] = *evaluate* [*E*]
CALL p



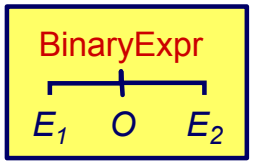

```
public Object visitCallCmd(CallCmd cmd, Object arg) {
   cmd.E.visit(this, arg);
   short p = address of primitive routine for name cmd.I
   emit(Instruction.CALLop,
        Instruction.SBr,
        Instruction.PBr, p);
   return null;
}
```

Binärer Operator

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Gleicher Mechanismus wie Prozeduraufruf

$$evaluate\,[E_1\ op\ E_2] = evaluate\,[E_1]$$
$$evaluate\,[E_2]$$
$$\texttt{CALL p}$$




```
public Object visitBinaryExpression(
                    BinaryExpression expr, Object arg) {
   expr.E1.visit(this, arg);
   expr.E2.visit(this, arg);
   short p = address for expr.O operation
   emit(Instruction.CALLop,
        Instruction.SBr,
        Instruction.PBr, p);
   return null;
}
```

Kontrollstrukturen 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

`if/then, while, ...`

```
execute [while E do C] = Lwhile:  evaluate [E]
                                  JUMPIF(0)   Lend
                                  execute [C]
                                  JUMP        Lwhile
                          Lend:
```

- Realisiert durch bedingte und unbedingte Sprunginstruktionen
- Rückwärtssprünge einfach: Zieladresse bereits generiert und bekannt
- Vorwärtssprünge schwieriger
  - Instruktionen bis hin zur Zieladresse noch nicht generiert
  - Wert der Zieladresse damit unbekannt

Kontrollstrukturen 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
execute [while E do C] = Lwhile:  evaluate [E]
                                  JUMPIF(0)   Lend
                                  execute [C]
                                  JUMP        Lwhile
                          Lend:
```

➥“Nachbessern” bereits generierten Codes (*backpatching*)

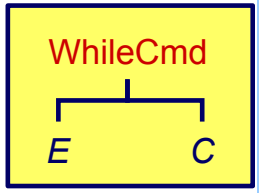
1. Erzeuge Sprunginstruktion mit “leerer” (=0) Zieladresse
2. Merke Adresse dieser unvollständigen Sprunginstruktion
3. Wenn Code-Generierung gewünschte Zieladresse erreicht, trage echten Adresswert in gemerkte unvollständige Sprunginstruktion nach

Beispiel Backpatching 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

execute [*while E do C*] =

```
Lwhile:  evaluate [E]
         JUMPIF(0)   Lend
         execute [C]
         JUMP        Lwhile
Lend:
```



execute [*while E do C*] = Lw

Le

```
public Object visitWhileCmd(WhileCmd cmd, Object arg) {
   short lwhile = nextInstrAddr;
   cmd.E.visit(this, arg);
   short jump2end = nextInstrAddr;
   emit(Instruction.JUMPIFop, 0, Instruction.CBr, 0);
   cmd.C.visit(this, arg);
   emit(Instruction.JUMPop, 0, Instruction.CBr, lwhile);
   short lend = nextInstrAddr;
   code[jump2end].d = lend;
}
```

```
public Object visitWhileC
   short lwhile = nextIns
   cmd.E.visit(this, arg)
   short jump2end = nextI
   emit(Instruction.JUMPI
   cmd.C.visit(this, arg)
   emit(Instruction.JUMPo
   short lend = nextInstr
   code[jump2end].d = len
}
```

Beispiel Backpatching 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

execute [**if** *E* **then** C_1 **else** C_2]

```
=          evaluate [E]
           JUMPIF(0)    Lelse
           execute [C1]
           JUMP         Lfi
Lelse:     execute [C2]
Lfi:
```

Doppeltes Backpatching bei `if/then/else`

```
public Object visitIfCommand(IfCommand com, Object arg) {
    com.E.visit(this, arg);
    short i = nextInstrAddr;
    emit(Instruction.JUMPIFop, (byte) 0,
         Instruction.CBr, (short) 0);
    com.C1.visit(this, arg);
    short j = nextInstrAddr;
    emit(Instruction.JUMPop, (byte) 0,
         Instruction.CBr, (short) 0);
    short Lelse = nextInstrAddr;
    patch(i, Lelse);
    com.C2.visit(this, arg);
    short Lfi = nextInstrAddr;
    patch(j, Lfi);
    return null;
}
```

Konstanten und Variablen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
execute [let D in C] =  elaborate [D]
                        execute [C]
                        POP(0)      s
```

nur wenn s > 0, wobei s = Speichermenge alloziert für D.

- . . . aber wie eine Deklaration “elaborieren”?
- Weise Variablen und unbekannten Konstanten (?) Speicherort zu
- Bei Ende von Geltungsbereich: Betroffene Speicherbereiche freigeben

Ziel: Bestimme `d` in

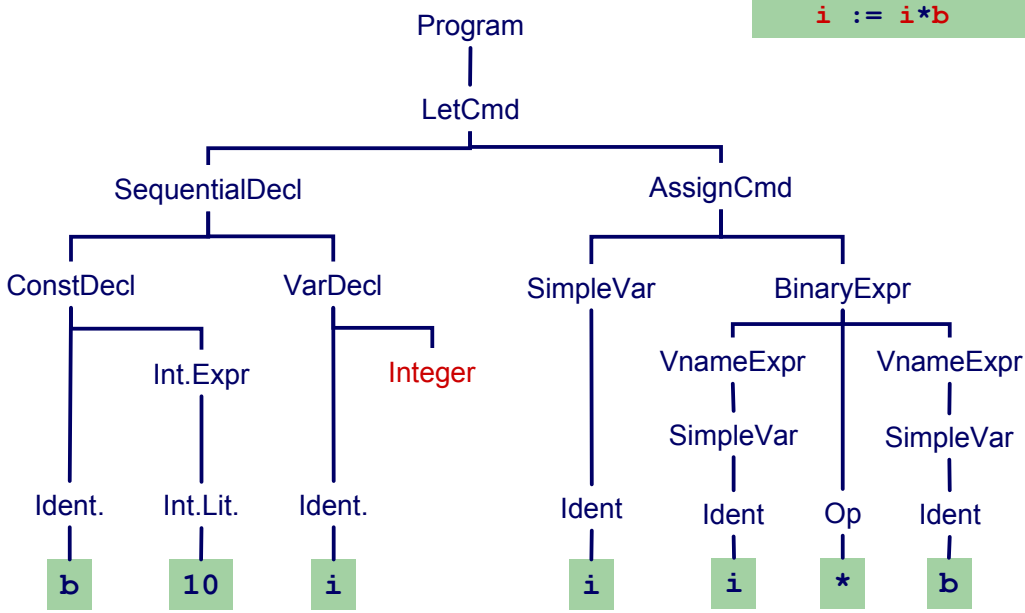
```
fetch [V]    =    LOAD(1)  d[SB]
```

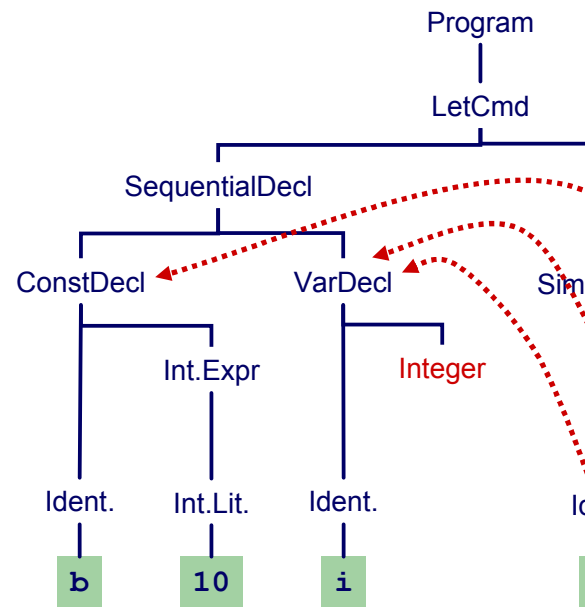
```
assign [V]   =    STORE(1)  d[SB]
```

Beispiel Konstanten und Variablen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
let
   const b ~ 10;
   var i: Integer
in
   i := i*b
```





Fallunterscheidung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Bekannter Wert und bekannte Adresse

```
let
   const b ~ 10;
   var i: Integer
in
   i := i*b
```

```
PUSH      1
LOAD(1)   4[SB]
LOADL     10
CALL      mult
STORE(1)  4[SB]
POP(0)    1
```

Platz für `i`

Unbekannter Wert und bekannte Adresse

```
let
   var x: Integer
in let
      const y ~ 365 + x
   in putint(y)
```

bekannte Adresse:
address = 5

Unbekannter Wert:
size = 1
address = 6

```
PUSH      1        ; room for x
PUSH      1        ; room for y
LOADL     365
LOAD(1)   5[SB]    ; load x
CALL      add      ; 365+x
STORE(1)  6[SB]    ; y ~ 365+x
LOAD(1)   6[SB]
CALL      putint
POP(0)    1
POP(0)    1
```

Fallunterscheidung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Bekannter Wert	const Deklaration mit einem Literal
Unbekannter Wert	const Deklaration mit einem Ausdruck
Bekannte Adresse	var Deklaration
Unbekannte Adresse	Argument-Adresse gebunden an var-Parameter

Handhabung im Code-Generator 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Deklaration eines Bezeichners `id`: Binde `id` an neuen **Entitätsdeskriptor**

- Bekannter Wert: Speichere Wert und seine Größe
- Bekannte Adresse: Speichere Adresse und fordere Platz an

Benutzung von `id`: Rufe passenden Deskriptor ab und erzeuge Code, um auf beschriebene Entität zuzugreifen

- Lade Konstante direkt via `LOADL`
- Lade Variable von bekannter Adresse via `LOAD`

Verwaltung der Daten im DAST

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Implementierung des Entitätsdeskriptors durch `RuntimeEntity`

```
public abstract class RuntimeEntity {
   public short size;
   ...
}
public class KnownValue extends RuntimeEntity {
   public short value;
   ...
}
public class UnknownValue extends RuntimeEntity {
   public short address;
   ...
}
public class KnownAddress extends RuntimeEntity {
   public short address;
   ...
}

public abstract class AST {
   public RuntimeEntity entity;
   ...
}
```

Handhabung im Code-Generator 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Wie mit unbekannten Werten oder Adressen verfahren?

- Erzeuge Code zur Evaluation der Entität zur Laufzeit
- Speichere Ergebnis an bekannter Adresse ab
- Erzeuge Entitätsdeskriptor für diese Adresse
- Nutze Entitätsdeskriptor, um Inhalt der Adresse bei Verwendung der unbekannten Entität auszulesen

Statische Vergabe von Adressen 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Globale Variablen

```
let
   var a: Integer;
   var b: Boolean;
   var c: Integer
in begin
   ...
end
```

var	size	address
a	1	[0]SB
b	1	[1]SB
c	1	[2]SB

In TAM, echte Maschinen haben hier wahrscheinlich unterschiedliche Grössen

Verschachtelte Blöcke

```
let var a: Integer
in  begin
    ...
    let var b: Boolean;
        var c: Integer
    in ...

    let var d: Integer
    in ...
end
```

var	size	address
a	1	[0]SB
b	1	[1]SB
c	1	[2]SB
d	1	[1]SB

d verwendet Platz von **b** wieder (anderer Geltungsbereich)

Statische Vergabe von Adressen 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Code-Generator führt Buch über Größe des belegten Speichers
- In Abhängigkeit von Deklarationen und Geltungsbereichen
- Implementierung: Erweitern des Visitors
  - Verwende Parameter `Object arg` zur Eingabe des aktuell belegten Speicherplatzes
  - Verwende Funktionsergebnis zur Rückgabe des zusätzlich benötigten Speicherplatzes
  - Verpacken der Angaben in ein `Short`-Objekt

```
public Object visitXYZ(XYZ xyz, Object arg)
```

Falls nicht Null, **`Short`**-Objekt mit zusätzlich benötigtem Platz

`Short`-Objekt mit bisher benötigtem Speicherplatz

Verwaltung der Daten im Visitor 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Allgemeines Schema
Weitergabe der bisherigen Belegung in `gs`

```
public Object visit...Command(..., Object arg) {
  short gs = ((Short) arg).shortValue();
  ...
}
```

➥Ist auch nächste freie Adresse!

Weitergabe der Erhöhung des Speicherbedarfs im Ergebnis

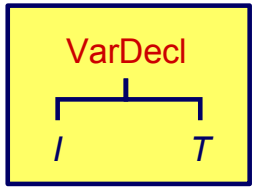
```
public Object visit...Declaration(...) {
  ...
  return new Short(...);
}
```

Verwaltung der Daten im Visitor 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Elaboriere Variablendeklaration

elaborate [*var I : T*] = `PUSH s` *where s = size of T*




```
public Object visitVarDecl(VarDecl decl, Object arg) {
   short gs = shortValueOf(arg);
   short s  = shortValueOf(decl.T.visit(this, null));
   decl.entity = new KnownAddress(s, gs);
   emit(Instruction.PUSHop, 0, 0, s);
   return new Short(s);
}
```

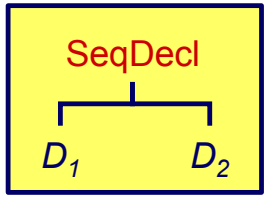
Remember the size and address of the variable.

Verwaltung der Daten im Visitor 3

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Elaboriere Folge von Deklarationen

$$elaborate\,[D_1\,;\,D_2] = elaborate\,[D_1]\;\; elaborate\,[D_2]$$




```
public Object visitSeqDecl(SeqDecl decl, Object arg) {
   short gs = shortValueOf(arg);
   short s1 = shortValueOf(decl.D1.visit(this, gs));
   short s2 = shortValueOf(decl.D2.visit(this,
                                         new Short(gs+s1)));
   return new Short(s1+s2);
}
```

Verwaltung der Daten im Visitor 4

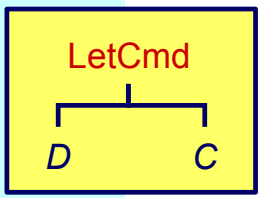
TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Führe kompletten `let`-Block aus

execute [*let D in C*] = *elaborate* [*D*]
execute [C]
POP(0) s

nur wenn s>0, wobei s Größe des durch D angeforderten Speichers ist.

```
public Object visitLetCmd(LetCmd cmd, Object arg) {
   short gs = shortValueOf(arg);
   short s  = shortValueOf(cmd.D.visit(this, gs));
   cmd.C.visit(this, new Short(gs+s));
   if (s > 0)
      emit(Instruction.POPop, 0, 0, s);
   return null;
}
```

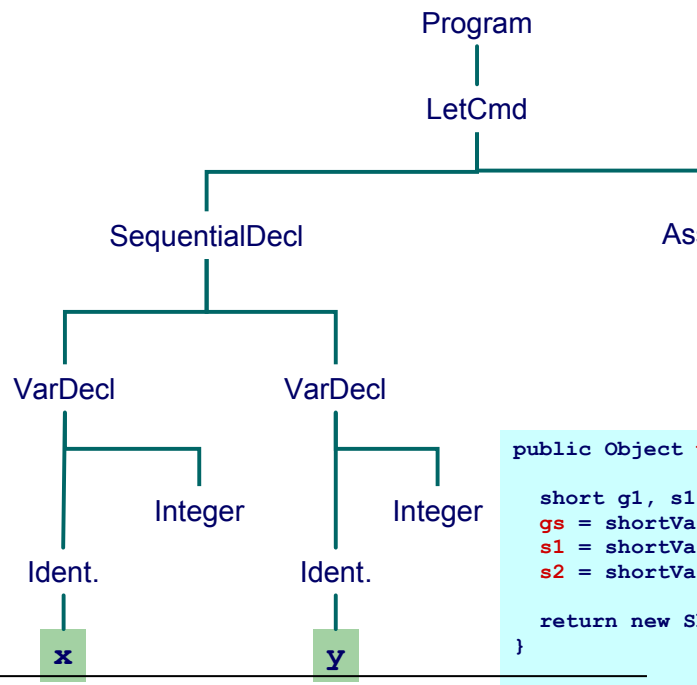



```
private static short shortValueOf(Object obj) {
    return ((Short)obj).shortValue();
}
```

Beispiel Speicherverwaltung im Visitor

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
let
   var x: Integer;
   var y: Integer
in
   x := y
```




```
public Object
  short g1, s1
  gs = shortVa
  s1 = shortVa
  s2 = shortVa

  return new S
}
```

Zugriff auf bekannte Adressen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Bekannte Werte, Variablen und unbekannte Werte

fetch [I] =	LOADL	v	wobei v = Wert gebunden an I
fetch [I] =	LOAD(s)	d[SB]	wobei d = Adresse gebunden an I und s = size(Typ von I)

```
public Object encodeFetch(Vname name, short s) {
   RuntimeEntity entity =
      (RuntimeEntity) name.visit(this, null);
   if (entity instanceof KnownValue) {
      short v = ((KnownValue entity).value;
      emit(Instruction.LOADLop, 0, 0, v);
   } else {
      short d = (entity instanceof UnknownValue) ?
          ((UnknownValue)entity).address :
          ((KnownAddress)entity).address;
      emit(Instruction.LOADop, s, Instruction.SBr, d);
   }
}
```

Stack-Verwaltung 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Bisher diskutiert: Mini-Triangle

- Flache Block-Struktur
- Verschachtelte Deklarationen
- Adressierung der ...
  - globalen Variablen über `+offset[SB]`
  - lokalen Variablen über `+offset[SB]`

Stack-Verwaltung 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Nun Erweiterung auf Triangle mit Prozeduren und Funktionen

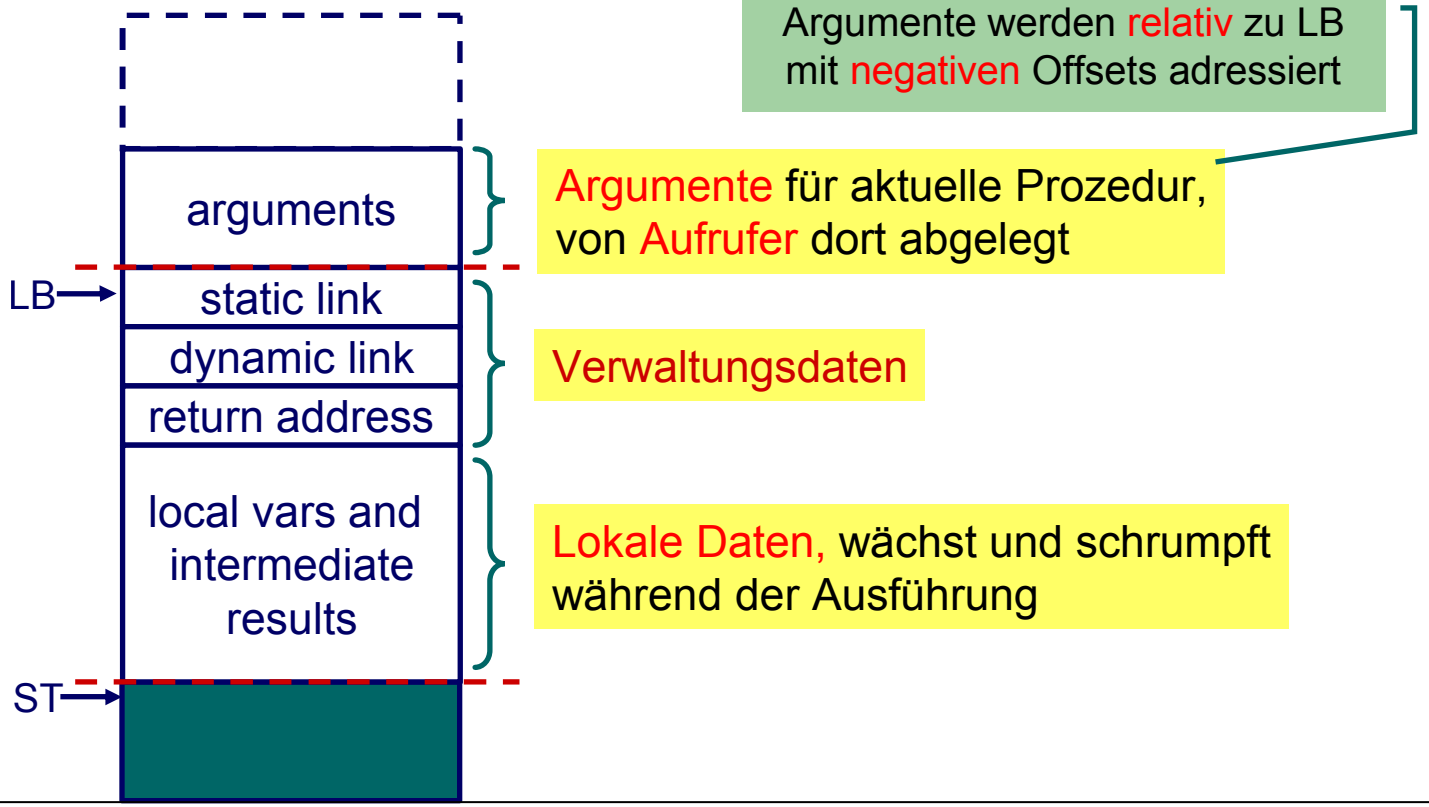
- Verschachtelte Block-Struktur
- Lokale Variablen (adressiert über `+offset[LB]`)
- Parameter (adressiert über `-offset[LB]`)
- Nicht-lokale Variablen (adressiert über `+offset[`*reg*`]`)
  - *reg* ist statisches Verkettungsregister `L1`, `L2`, ...

➥Viele verschiedene zu verwaltende Entitäten

Stack-Verwaltung 3

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Wichtigste Struktur der Laufzeitumgebung: Stack Frame



Adressierung von Variablen 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Jetzt alle Spielarten berücksichtigen

- Jede Prozedur ist auf bestimmter Schachtelungstiefe definiert
- Speichere zu jeder Variablen die Schachtelungstiefe der umschließenden Prozedur
  - Globale Variablen haben dabei die Tiefe 0
- Verwalte Offsets jetzt je Schachtelungstiefe

```
let var a: array 8 of Integer;
    var b: Char;
    proc foo() ~
       let var c: Integer;
           var d: Integer;
           proc bar() ~
              let var e: Integer;
              in ... d:=
       in ... d:=
in ...
```

var	size	address
a	8	(0,0)
b	1	(0,8)
c	1	(1,3)
d	1	(1,4)
e	1	(2,3)

`4[L1]`

`4[LB]`

Laufzeitadressen von Variablen nun von Kontext abhängig!

Adressierung von Variablen 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Bisher:

fetch [I] =	`LOAD(s)`	`d[SB]`	*where d is address bound to* `I` *and s = size(type of I)*

~~*fetch* [I] = `LOAD(s)` `d[SB]` *whe*~~
~~*and*~~

Nun komplizierter:

fetch [I] =	`LOAD(s)`	`d[r]`	*s = size(type of* `I`*)* *(level, d) is declaration address of* `I` *if (level == 0) then r =* `SB` *elif (level == currentLevel) then r =* `LB` *else r =* `L`*(currentLevel – level)*

Handhabung im Code-Generator 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Bei Besuch einer Deklaration abspeichern
  - Offset innerhalb des Frames
  - Schachtelungsebene des Frames
- Angaben ersetzen nun `Short` Parameter

```
public class Frame {
  public byte level;
  public byte displacement;
}
```

Handhabung im Code-Generator 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Jetzt Verwaltung des belegten Speicherplatzes je Ebene

```
public class EntityAddress {
   public byte  level;
   public short displacement;
}
```

```
public abstract class RuntimeEntity {
   public short size;
   ...
}

public class UnknownValue extends RuntimeEntity {

   public EntityAddress address;
   ...

public class KnownAddress extends RuntimeEntity {

   public EntityAddress address;
   ...
}
```

Handhabung im Code-Generator 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Adressvergabe und Eintragen in den DAST

elaborate [*var I :T*] = PUSH s *where s = size of T*

```
public Object visitVarDecl(VarDecl decl, Object arg) {
   Frame frame = (Frame)arg;
   short s     = shortValueOf(decl.T.visit(this, null));
   decl.entity = new KnownAddress(s, frame.level,
                                     frame.displacement);
   emit(Instruction.PUSHop, 0, 0, s);
   return new Short(s);
}
```

- Schachtelungstiefe `level` erhöhen bei Besuch von Prozedurdeklaration
- Offset `displacement` erhöhen bei Besuch von Var/Const-Deklaration

Handhabung im Code-Generator 3

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Zugriff auf bekannte Werte, Variablen und unbekannte Werte

fetch [*I*] = LOAD(s) d[r]

s = size(type of I)
(level, d) is address of I
if (level == 0) then r = SB
elif (level == currentLevel) then r = LB
else r = L(currentLevel – level)

```
public Object encodeFetch(Vname name, Frame frame, short s) {
   RuntimeEntity entity =
      (RuntimeEntity) name.visit(this, null);
   if (entity instanceof KnownValue) {
      short v = ((KnownValue entity).value;
      emit(Instruction.LOADLop, 0, 0, v);
   } else {
      EntityAddress address =
           (entity instanceof UnknownValue) ?
               ((UnknownValue)entity).address :
               ((KnownAddress)entity).address;
      emit(Instruction.LOADop, s,
           displayRegister(frame.level, address.level),
           address.displacement);
   }
}
```

Frame der aktuellen Prozedur

Einfache Berechnung des Basisregisters der Frame von **name**.

Prozeduren und Funktionen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Einfachster Fall: Globale Prozeduren, keine Parameter, kein Ergebnis

Declaration	::=	...	
	|	`proc` Identifier `()` ~ Command	ProcDecl
Command	::=	...	
	|	Identifier `()`	CallCmd

elaborate [`proc I ()~` C]

```
=       JUMP      g
    e:  execute [C]
        RETURN(0) 0
    g:
```

execute [`I()`]

```
=  CALL(SB) e
```

e ist Startadresse der Prozedur `I`

Globale Funktionen identisch bis auf Rückgabewert mit Größe <> 0

Verschachtelte Unterprogramme 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Bei Aufruf von Y statische Verkettung auf umschliessende Prozedur X.
➥Gleiches Vorgehen wie bei lokalen Variablen

```
execute [I()]
        = CALL(r) e     (level, e) is routine bound to I
                        if (level == 0) then r = SB
                        elif (level == currentLevel) then r = LB
                        else r = L(currentLevel – level)
```

Speichere Startadressen von Prozeduren und Funktionen als Paar (level, start address) in Klasse **KnownRoutine**, einer Subklasse von **RuntimeEntity**, ab.

Verschachtelte Unterprogramme 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Behandlung des Prozeduraufrufes

execute [I ()]
= CALL(r) e — *(level, e) is routine bound to* I
if (level == 0) then r = SB
elif (level == currentLevel) then r = LB
else r = L*(currentLevel – level)*

```
public Object visitCallCmd(CallCmd cmd, Object arg) {
   Frame frame   = (Frame)arg;

   EntityAddress address =
      ((KnownRoutine) cmd.I.decl.entity).address;

   emit(Instruction.CALLop, s,
        displayRegister(frame.level, address.level),
        address.displacement);
}
```

Verweis auf Prozedurdeklaration ist gespeichert im `decl`-Feld des für das CallCmd verwendeten Bezeichners

Behandlung der Deklaration

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

elaborate [proc I () ~ C] =

```
        JUMP      g
e:      execute [C]
        RETURN(0) 0
g:
```

```
public Object visitProcDecl(ProcDecl decl, Object arg) {
   Frame outerFrame = (Frame)arg;

   short j = nextInstrAddr;
   emit(Instruction.JUMPop, 0, Instruction.CBr, 0);

   short e = nextInstrAddr;
   decl.I.entity    = new KnownRoutine(outerFrame.level, e);
   Frame localFrame = new Frame(outerFrame.level+1, 3);

   decl.C.visit(this, localFrame);
   emit(Instruction.RETURNop, 0, 0, 0);

   short g = nextInstrAddr;
   code[j].d = g;
   return new Short(0);
}
```

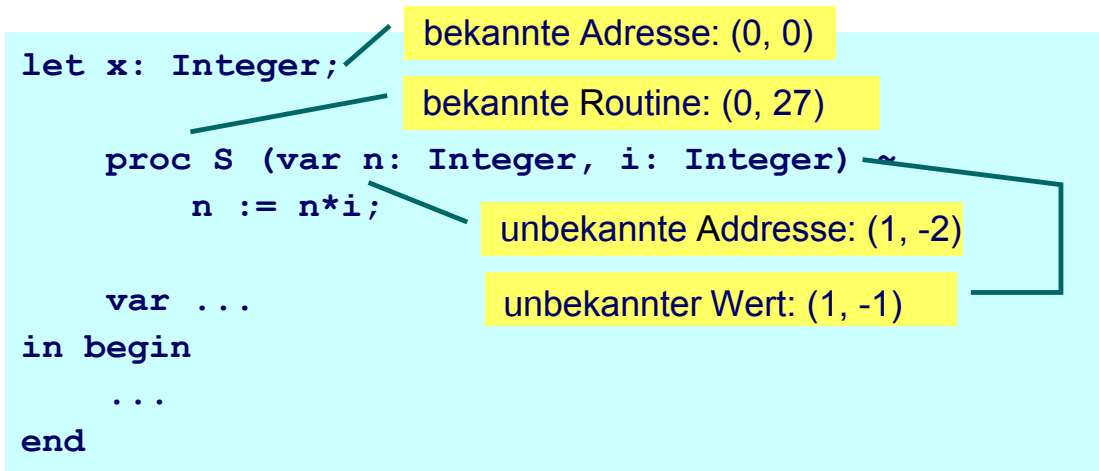
Offset der ersten lokalen Variable

Nachtragen der Sprungadresse

Behandlung von Parametern 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Aufrufer legt aktuelle Parameter auf Stack
- Gerufener greift mit negativem Offset via `LB` auf Parameter zu
- Wertparameter: Handhabung als unbekannter Wert
- Variablenparameter: Handhabung als unbekannte Adresse



Behandlung von Parametern 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
Declaration ::= ...
            |   proc Identifier (Formal) ~ Command ProcDecl

Command     ::= ...
            |   Identifier (Actual)                CallCmd
Formal      ::= Identifier : TypeDenoter
            |   var Identifier : TypeDenoter
Actual      ::= Expression
            |   var Vname
```

Hier vereinfacht: Nur ein Parameter

execute [I(AP)]
= *pass-argument* [AP]
CALL(SB) e

pass-argument [E]
= *evaluate* [E]

pass-argument [var V]
= *fetch-address* [V]

wobei *fetch-address* Code zur Bestimmung der Adresse einer Variablen ausgibt

Behandlung von Parametern 3

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Variablenparameter

- werden mit der `UnknownAddress` Subklasse von `RuntimeEntity` behandelt
- Die `fetch` und `assign`-Schablonen müssen erweitert werden

```
fetch [I] =   // KnownValue, KnownAddress  Fälle nicht gezeigt
              ...
              LOAD(1)   d[r]      if I is bound to an UnknownAddress
              LOADI(s)            where
                                    s = size(type of I)
                                    (level, d) is address of I
                                    if (level == 0) then r = SB
                                    elif (level == currentLevel) then r = LB
                                    else r = L(currentLevel – level)
```

d wird negativ sein

nicht möglich!

Auch innere Prozeduren können auf formale Parameter zugreifen!

Zusammenfassung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

- Code-Selektion, -Funktionen, -Schablonen
- Implementierung als Visitor
- Zugriff auf bekannte/unbekannte Werte/Adressen
- Adressvergabe
  - Statische Blockstruktur
  - Dynamisch auf Stack
- Prozeduren
  - Deklaration
  - Parameterübergabe