Einführung in den Compilerbau

Code-Generierung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

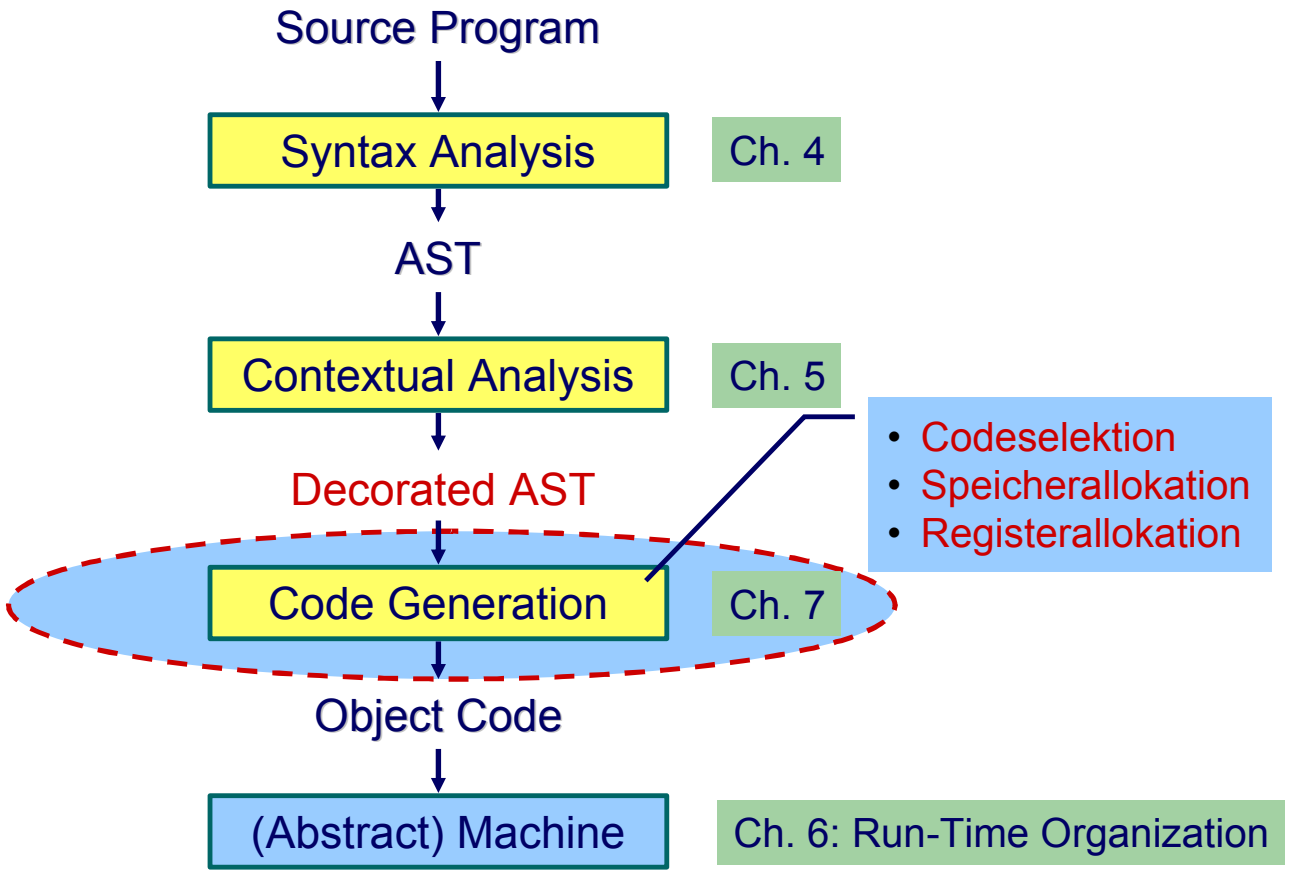
WS 2017/18

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

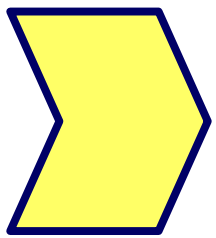
➥Schwierig allgemein zu formulieren

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

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

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

$$\textit{execute}\ [V := E]$$

$$= \quad \textit{evaluate}\ [E]$$

$$\textit{assign}\ [V]$$

Code-Schablone: Bedingte Anweisung

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

$$
\begin{array}{lll}
\multicolumn{3}{l}{\textit{execute}\,[\texttt{if}\ E\ \texttt{then}\ C_1\ \texttt{else}\ C_2]} \\
= & \textit{evaluate}\,[E] & \\
 & \texttt{JUMPIF(0)} & \texttt{Lelse} \\
 & \textit{execute}\,[C_1] & \\
 & \texttt{JUMP} & \texttt{Lfi} \\
\texttt{Lelse:} & \textit{execute}\,[C_2] & \\
\texttt{Lfi:} & &
\end{array}
$$

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

```
execute [let D in C]
    =                    elaborate [D]
                         execute [C]
                         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
- Achtung: Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird der Code hier etwas vereinfacht dargestellt
- Der vollständigen Code-Generator steht als Teil des Triangle-Compilers auf der Website der Vorlesung zur Verfügung

Repräsentation vom TAM-Instruktionen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
public class Instruction {                                    package TAM;
  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 final static int
    LOADop = 0, LOADAop = 1, LOADIop = 2, ...; // op-codes (Table C.2)
  public final static int
    CBr = 0, CTr = 1, PBr = 2, ...; // register numbers (Table C.1)

  public final static int maxCodeSize = 32767 - maxPrimitives;
  public static Instruction[] code = new Instruction[maxCodeSize];
}

public class Interpreter { ... }
```

Erzeugen vom TAM-Instruktionen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

```
public class Encoder {
  ... // visitor classes

  // Appends an instruction to the object code.
  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 int nextInstrAddr;
}
```

```
package Triangle.CodeGenerator;
```

Code-Generierung via Visitor 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Beispiel: Generiere Code für gesamtes Programm

```
public class Encoder {
  ...
  private class ProgramEncoder
                extends VisitorBase<Void, Void> {

    public Void visitProgram(Program ast, Void __) {
      ast.C.visit(commandEncoder, null);
      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 {
  ...
  private void encodeFetch(Vname v, int valSize, ...) {
    // as specified by the fetch code template
  }

  private void encodeStore(Vname v, int valSize, ...) {
    // as specified by the store/assign code template
  }
}
```

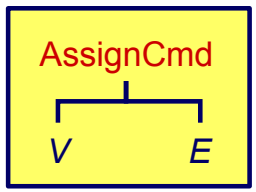
... aber nicht in einem Visitor, sondern für Visitor benutzbar.

Beispiel Benutzung von VName 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Ziel einer Zuweisung

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




```
public class Encoder {
  ...
  private class CommandEncoder extends VisitorBase<Void, Void> {
    public Void visitAssignCommand(AssignCommand ast, Void __) {
      int valSize = ast.E.visit(expressionEncoder, null);
      encodeStore(ast.V, valSize);
      return null;
    }
    ...
  }
}
```

Beispiel Benutzung von VName 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Innerhalb eines Ausdrucks

```
public class Encoder {
  ...
  private class ExpressionEncoder extends VisitorBase<Void, Void> {
    public Void visitVnameExpression(VnameExpression ast, Void __) {
      int valSize = ast.type.visit(typeEncoder, null);
      encodeFetch(ast.V, valSize);
      return null;
    }
    ...
  }
}
```

Einfache Ausdrücke

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Integer-Literale

```
public class Encoder {
  ...
  private class ExpressionEncoder extends VisitorBase<Void, Void> {
    public Void visitIntegerExpression(IntegerExpression ast, Void __) {
      emit(Machine.LOADLop, 0, 0, Integer.parseInt(ast.IL.spelling));
      return null;
    }
    ...
  }
}
```

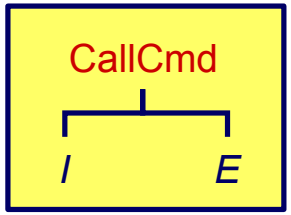
Prozeduraufruf

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Vereinfacht für Mini-Triangle

- Nur primitive Funktionen
- Mit maximal einem Parameter

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



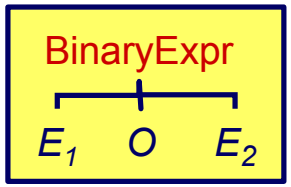

```
// CommandEncoder
public Void visitCallCmd(CallCmd cmd, Void __) {
  cmd.E.visit(expressionEncoder, null);
  int p = // Adresse der primitiven Routine zu cmd.I
  emit(Machine.CALLop, Machine.SBr, Machine.PBr, p);
  return null;
}
```

Binärer Operator

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Gleicher Mechanismus wie Prozeduraufruf

$$\begin{aligned} evaluate\,[E_1\ op\ E_2] = {} & evaluate\,[E_1] \\ & evaluate\,[E_2] \\ & \texttt{CALL p} \end{aligned}$$




```
// ExpressionEncoder
public Void visitBinaryExpression(BinaryExpression ast, Void __) {
  ast.E1.visit(expressionEncoder, null);
  ast.E2.visit(expressionEncoder, null);
  ast.O.visit(terminalEncoder, null);
  return null;
}

// TerminalEncoder
public Void visitOperator(Operator op, Void __) {
  int displacement = // Addresse fuer primitive Routine
  emit(Machine.CALLop, Machine.SBr, Machine.PBr, displacement);
  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:
```

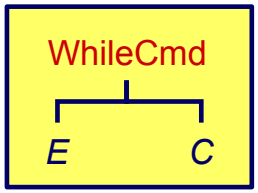
➥"Nachbessern" bereits generierten Codes (*backpatching*)

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:
```




```
// CommandEncoder
public Void visitWhileCommand(WhileCommand cmd, Void __) {
  int lwhile = nextInstrAddr;
  cmd.E.visit(expressionEncoder, null);
  int jump2end = nextInstrAddr;
  emit(Machine.JUMPIFop, 0, Machine.CBr, 0);
  cmd.C.visit(commandEncoder, null);
  emit(Machine.JUMPop, 0, Machine.CBr, lwhile);
  int lend = nextInstrAddr;
  code[jump2end].d = lend;
}
```

Backpatching

Beispiel Backpatching 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Doppeltes Backpatching bei Verzweigung (if/then/else)

```
// CommandEncoder
public Void visitIfCommand(IfCommand cmd, Void __) {
  ast.E.visit(expressionEncoder, null);
  int jumpifAddr = nextInstrAddr;
  emit(Machine.JUMPIFop,
       Machine.falseRep,
       Machine.CBr, 0);

  ast.C1.visit(commandEncoder, null);
  int jumpAddr = nextInstrAddr;
  emit(Machine.JUMPop, 0, Machine.CBr, 0);
  patch(jumpifAddr, nextInstrAddr);

  ast.C2.visit(commandEncoder, null);
  patch(jumpAddr, nextInstrAddr);
  return null;
}
```

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

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

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

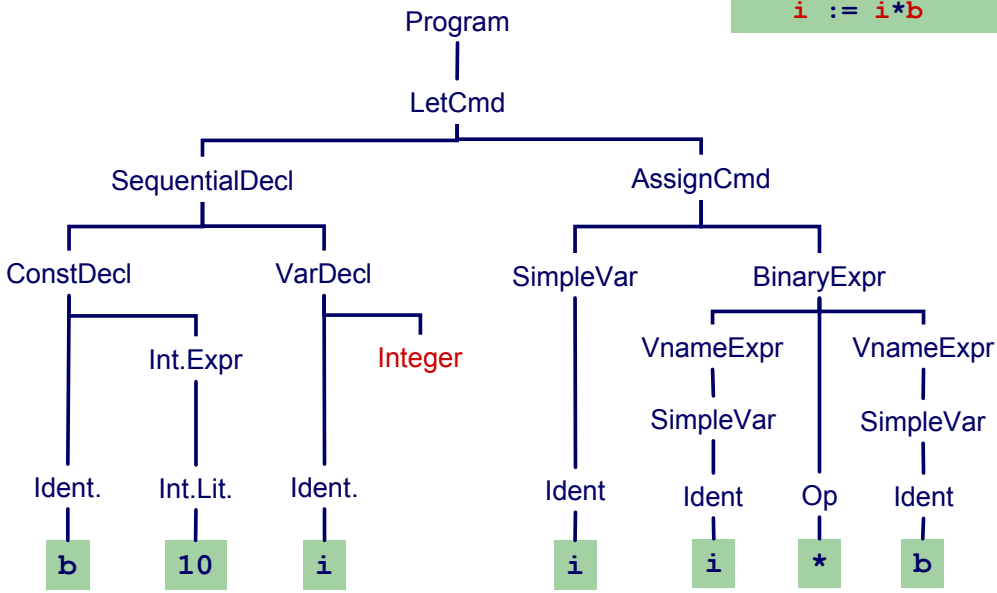
```
fetch [V]    =    LOAD(1)  d[SB]
```

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

Beispiel Konstanten und Variablen

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

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



.


```
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 int size;
  ...
}
public class KnownValue extends RuntimeEntity {
  public int value;
  ...
}
public class UnknownValue extends RuntimeEntity {
  public int address;
  ...
}
public class KnownAddress extends RuntimeEntity {
  public int 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 der relevanten Teil-Visitors (z.B. ExpressionEncoder)
  - Verwende Parameter `Integer arg` zur Eingabe des aktuell belegten Speicherplatzes
  - Verwende Funktionsergebnis zur Rückgabe des zusätzlich benötigten Speicherplatzes

```
private class ExpressionEncoder extends VisitorBase<Integer, Integer> {
  public Integer visitXYZ(XYZ xyz, Integer arg) { ... }
}
```

`Integer`-Wert mit zusätzlich benötigtem Platz

`Integer`-Wert mit bisher benötigtem Platz

Verwaltung der Daten im Visitor 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Allgemeines Schema

Weitergabe der bisherigen Belegung in `gs`

```
public Integer visit...Expression(..., Integer gs) {
  ...
}
```

➥Ist auch nächste freie Adresse!

Weitergabe der Erhöhung des Speicherbedarfs im Ergebnis

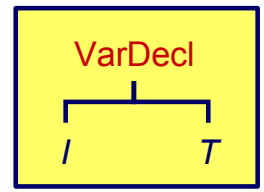
```
public Integer visit...Declaration(..., Integer gs) {
  ...
  gs += moreMemRequired;
  ...
  return moreMemRequired;
}
```

Verwaltung der Daten im Visitor 2

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Elaboriere Variablendeklaration

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




```
public Integer visitVarDeclaration(VarDeclaration decl,
    Integer gs) {
  int s = decl.T.visit(typeEncoder, null);
  decl.entity = new KnownAddress(s, gs);
  emit(Machine.PUSHop, 0, 0, s);
  return s;
}
```

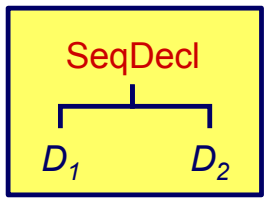
Merke die *Größe* und *Adresse* der Variablen

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 Integer visitSequentialDeclaration(SequentialDeclaration
    decl, Integer gs) {
  int s1 = decl.D1.visit(entityEncoder, gs);
  int s2 = decl.D2.visit(entityEncoder, gs+s1);
  return 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 Void visitLetCommand(LetCommand cmd, Integer gs) {
  int s = ast.D.visit(entityEncoder, gs);
  ast.C.visit(commandEncoder, gs+s);
  if (s > 0)
    emit(Machine.POPop, 0, 0, s);
  return null;
}
```

Beispiel Speicherverwaltung im Visitor

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

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

```
public Integer visitSequentialDeclaration(
    SequentialDeclaration decl, Integer gs) {
  int s1 = decl.D1.visit(entityEncoder, gs);
  int s2 = decl.D2.visit(entityEncoder, gs+s1);
  return s1+s2;
}
```

.

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)*

```
private void encodeFetch(Vname name, int s) (
  RuntimeEntity entity = name.visit(vnameEncoder, null);

  entity.visit(new RuntimeEntityVisitorBase<Void, Void> {
    public Void visitKnownValue(KnownValue ent, Void __) {
      emit(Machine.LOADLop, 0, 0, ent.value /* v */);            return null;
    }
    public Void visitUnknownValue(UnknownValue ent, Void __) {
      emit(Machine.LOADop, s, Machine.SBr, ent.address /* d */); return null;
    }
    public Void visitKnownAddress(KnownAddress ent, Void __) {
      emit(Machine.LOADop, s, Machine.SBr, ent.address /* d */); return null;
    }
  }, null);
}
```

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

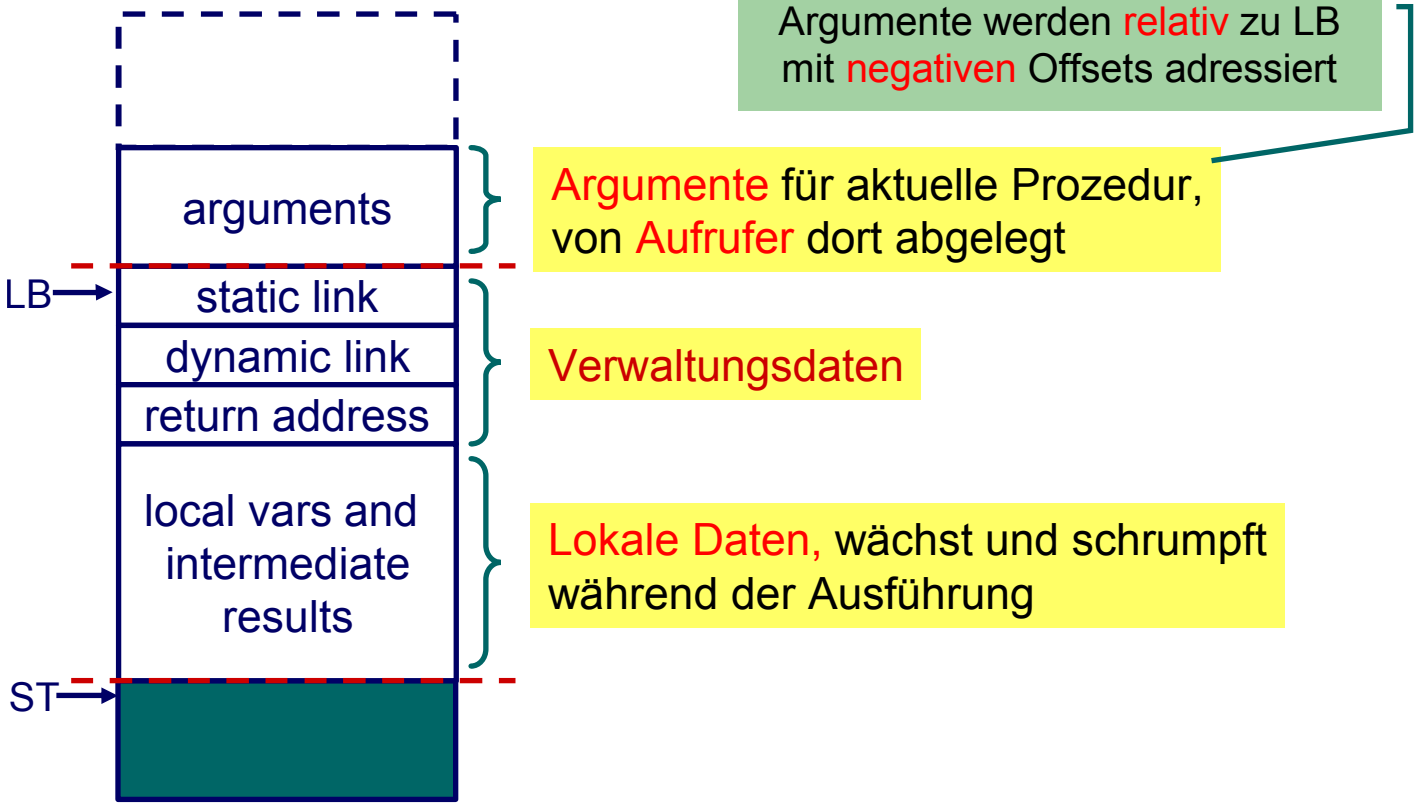
- Verschachtelte Block-Struktur
- Lokale Variablen (adressiert über `+offset[LB]`)
- Parameter (adressiert über `-offset[LB]`)
- Nicht-lokale Variablen (adressiert über `+offset[`*reg*`]`)
  - *reg* ist statisches Verkettungsregister `L1`, `L2`, ...

➥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] *where d is address bound to* I *and s = size(type of I)*~~

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 `Integer` Parameter

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

Handhabung im Code-Generator 1

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DARMSTADT

Jetzt Verwaltung des belegten Speicherplatzes je Ebene

```
public class ObjectAddress {
  int level;
  int displacement;
}

public abstract class RuntimeEntity {
  int size;
  ...
}

public class UnknownValue extends RuntimeEntity {
  ObjectAddress address;
  ...
}

public class KnownAddress extends RuntimeEntity {
  ObjectAddress 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 Integer visitVarDeclaration(VarDeclaration decl, Frame frame) {
  int s = decl.T.visit(typeEncoder, null);
  decl.entity = new KnownAddress(s, frame.level,
                                 frame.displacement);
  emit(Machine.PUSHop, 0, 0, s);
  return 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)*

```
private void encodeFetch(Vname name, Frame frame, int s) {
  RuntimeEntity entity = name.visit(vnameEncoder, null);

  entity.visit(new RuntimeEntityVisitorBase<Void, Void> {
    public Void visitKnownValue(KnownValue ent, Void __) { /* wie bisher */ }
    public Void visitUnknownValue(UnknownValue ent, Void __) {
      ObjectAddress address = ent.address;
      emit(Machine.LOADop, s,
           displayRegister(frame.level, address.level)
           address.displacment);
      return null;
    }
    public Void visitKnownAddress(KnownAddress ent, Void __) { /* analog */ }
  }, null);
}
```

Frame der aktuellen Prozedur

Einfache Berechnung des Basisregisters des Frames 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 Void visitCallCommand(CallCommand ast, Frame frame) {
  // ... visit cmd.I ...
  ObjectAddress address = ((KnownRoutine) cmd.I.decl.entity).address;

  emit(Machine.CALLop, s
       displayRegister(frame.level, address.level),
       address.displacement);

  return null;
}
```

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 Integer visitProcDeclaration(ProcDeclaration decl, Frame outerFrame) {
  int j = nextInstrAddr;

  emit(Machine.JUMPop, 0, Machine.CBr, 0);

  int e = nextInstrAddr;
  decl.I.entity = new KnownRoutine(outerFrame.level, e);
  Frame localFrame = new Frame(outerFrame.level + 1, Machine.linkDataSize);

  decl.C.visit(commandEncoder, localFrame);
  emit(Machine.RETURNop, 0, 0, 0);

  int g = nextInstrAddr;
  patch(j, g);
  return 0;
}
```

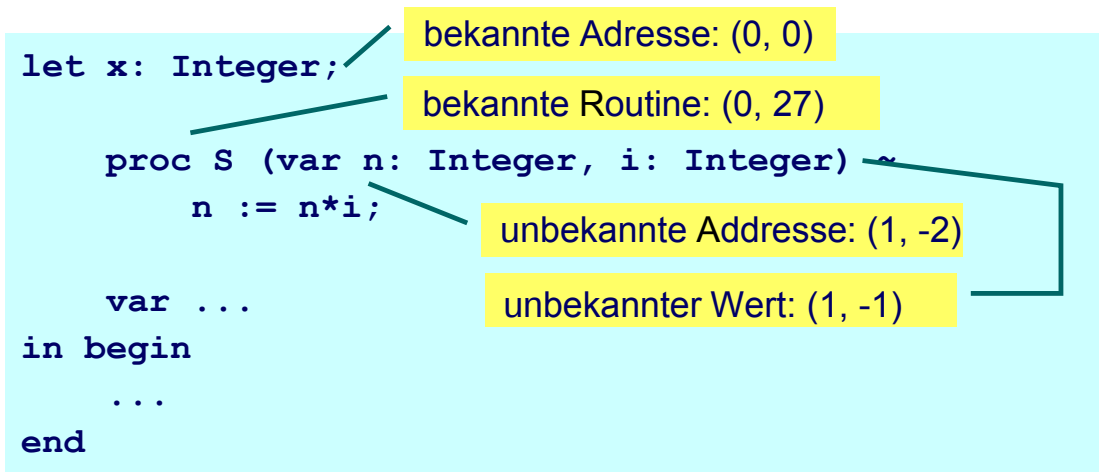
Offset der ersten lokalen Variable

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]
LOADI(s)
```

if I is bound to an UnknownAddress
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