

# Optimierende Compiler

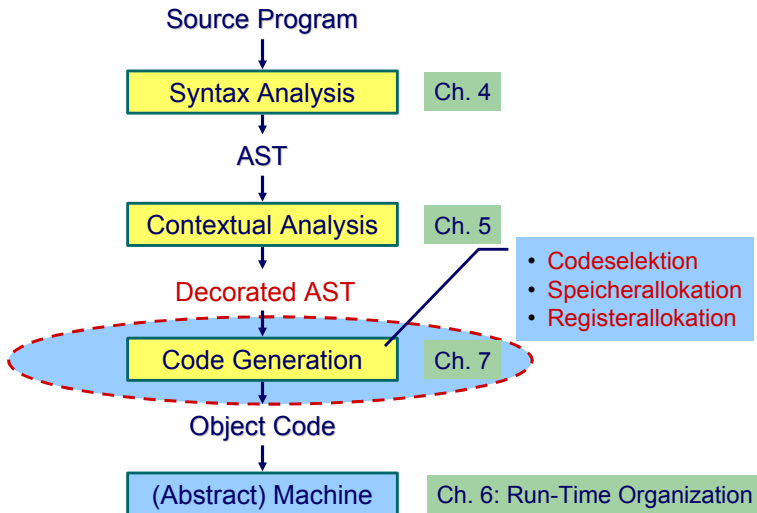
## 5. Code-Generierung

Andreas Koch

FG Eingebettete Systeme und ihre Anwendungen  
Informatik, TU Darmstadt

Sommersemester 2010

- Diese Woche letzte Donnerstagsvorlesungen
- Danach nur noch Dienstagsvorlesungen
- Hochfahren des praktischen Anteils für Praktikum



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

➡ Schwierig allgemein zu formulieren

Codegenerierung befaßt sich mit **Semantik** der Eingabesprache

A. Koch

```
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

## 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!)

- 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-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.



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

Anweisungsfolge  $C1 ; C2$

Semantik: Führe erst  $C1$  aus, dann  $C2$ .

*execute* [[  $C1 ; C2$  ]] =  
*execute*[[ $C1$ ]]  
*execute*[[ $C2$ ]]

Zuweisung  $I := E$

Semantik: Weise Wert von Ausdruck  $E$  and Variable bezeichnet durch  $I$  zu

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

# Beispiel: Code-Funktion 3

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

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

A. Koch

*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

Orientiert sich an Subphrasenstruktur

$$\begin{aligned} f_P [[ \dots Q \dots R \dots ]] = \\ \dots \\ f_Q [[ Q ]] \\ \dots \\ f_R [[ R ]] \\ \dots \end{aligned}$$

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

## Abstrakte Syntax

A. Koch

```
Program ::= Command
Command ::= V-name := Expression
          | Identifier ( Expression )
          | Command ; Command
          | if Expression then Command
            else Command
          | while Expression do Command
          | let Declaration in Command
```

<b>Program</b>	<b>Program</b>
<b>AssignCommand</b>	<b>CallCommand</b>
<b>SequentialCommand</b>	<b>IfCommand</b>
<b>WhileCommand</b>	<b>LetCommand</b>

*run* : Program → Instruction\*  
*execute* : Command → Instruction\*  
*evaluate* : Expression → Instruction\*  
*fetch* : V-name → Instruction\*  
*assign* : V-name → Instruction\*  
*elaborate* : Declaration → Instruction\*

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

*run* [C]  
= *execute* [C]  
HALT



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

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

# Code-Schablone: Bedingte Anweisung

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

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

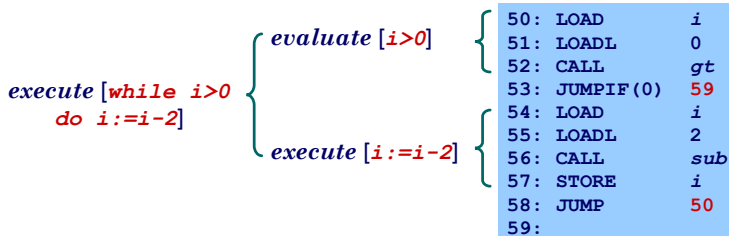
```
execute [let D in C]  
= elaborate [D]  
execute [C]  
POP (0) s
```

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

# Beispiel Code-Schablonen 1

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

A. Koch



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

## Integer-Literal

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

A. Koch

## 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
```

## 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
```



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

A. Koch

```
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), → Inlining.

## 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

## *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

```
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) 2
```

Jetzt kein Speicherzugriff mehr für  $n$  erforderlich.

- 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

```
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, Llr, etc.)
    public int d;    // operand field
}

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

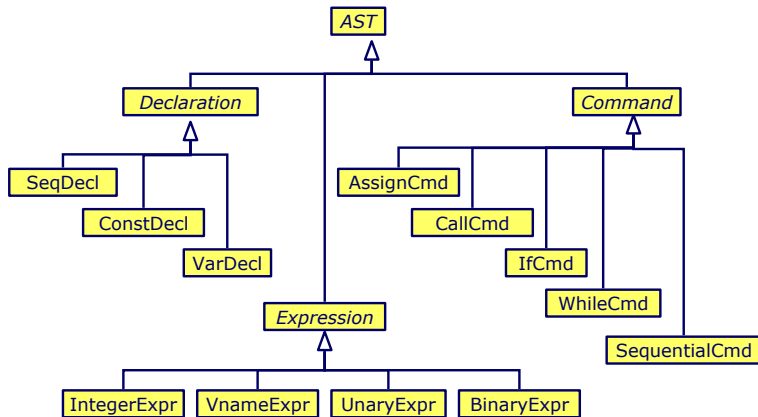
    public static final byte // register numbers (Table C.1)
        CBr = 0, CTr = 1, PBr = 2, Ptr = 3, ...;

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

public class Interpreter {
    ...
}
```

```
public class Encoder extends Visitor {
    package Triangle.CodeGenerator;
    /** 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;
}
```





visit Methoden in jeder konkreten Subklasse von AST

A. Koch

```
public abstract AST() {  
    public abstract Object visit(Visitor v, Object arg);  
}  
public class AssignCmd extends Command {  
    public Object visit(Visitor v, Object arg) {  
        return v.visitAssignCmd(this, arg);  
    }  
}
```

Allgemeines Schema

```
public class XYZ extends ... {  
    public Object visit(Visitor v, Object arg) {  
        return v.visitXYZ(this, arg);  
    }  
}
```

```
public interface Visitor {
    public Object visitProgram
        (Program prog, Object arg);
    ...
    public Object visitAssignCmd
        (AssignCmd cmd, Object arg);
    public Object visitSequentialCmd
        (SequentialCmd cmd, Object arg);
    ...
    public Object visitVnameExpression
        (VnameExpression e, Object arg);
    public Object visitBinaryExpression
        (BinaryExpression e, Object arg);
    ...
}
```

A. Koch

```
public Object visitXYZ
    (XYZ x, Object arg);
```

# Wiederholung Visitor 4

```
public class Checker implements Visitor {
    ...
    public Object visitAssignCmd(AssignCmd cmd, Object arg) {
        Type vType = (Type) cmd.V.visit(this, null);
        Type eType = (Type) cmd.E.visit(this, null);
        if (! cmd.V.variable)
            error: left side is not a variable
        if (! eType.equals(vType))
            error: types are not equivalent
    }
    public Object visitIfCmd(IfCmd cmd, Object arg) {
        Type eType = (Type) cmd.E.visit(this, null);
        if (! eType.equals(Type.bool))
            error: condition is not a boolean
        cmd.C1.visit(this, null);
        cmd.C2.visit(this, null);
        return null;
    }
    ...
}
```

## 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;
    }
    ...
}
```

## Aufgaben der einzelnen Visitor-Methoden bei Code-Generierung

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

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 ...  
    }  
}
```

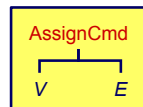
... aber nicht **in** einem Visitor, sondern **für** Visitor benutzbar.

# Beispiel Benutzung von VName 1

Ziel einer Zuweisung

A. Koch

```
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

## Innerhalb eines Ausdrucks

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

## Integer Literale

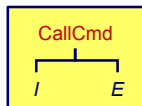
```
public Object visitIntegerExpression(IntegerExpression expr,  
                                     Object arg) {  
    short v = valuation(expr.I.spelling);  
    emit(Instruction.LOADI, (byte) 0, (byte) 0, v);  
    return new Short((short) 1);  
}
```

## Vereinfacht für Mini-Triangle

- Nur primitive Funktionen
- Mit maximal einem Parameter

A. Koch

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

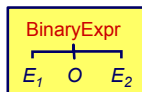


```
public Object visitCallCmd(CallCmd cmd, Object arg) {  
    cmd.E.visit(this, arg);  
    short p = address of primitive routine for name cmd.I  
    emit(Instruction.CALlop,  
         Instruction.SBr,  
         Instruction.PBr, p);  
    return null;  
}
```

Gleicher Mechanismus wie Prozeduraufruf

A. Koch

```
evaluate [ $E_1$  op  $E_2$ ] = evaluate [ $E_1$ ]  
                          evaluate [ $E_2$ ]  
                          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;  
}
```

if/then, while, ...

A. Koch

```
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

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

A. Koch

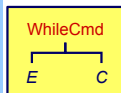
➔ “Nachbessern” bereits generierten Codes (*backpatching*)

- 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

A. Koch

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



```
execute [while E do C] = I
                                I
```

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

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

A. Koch

## 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;  
}
```



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

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

A. Koch

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

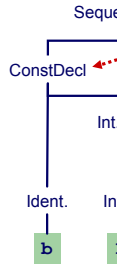
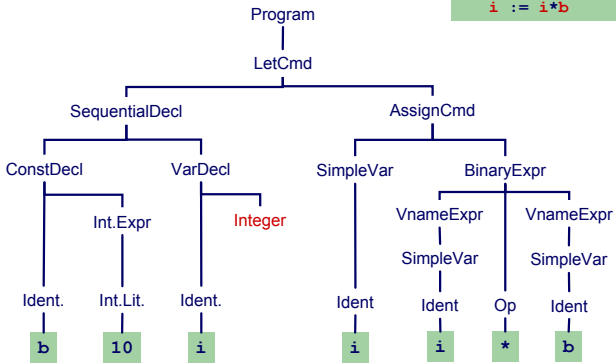
Ziel: Bestimme  $d$  in

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

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

# Beispiel Konstanten und Variablen

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



## 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*

A. Koch

## 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
```

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

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`

## Implementierung des Entitätsdeskriptors durch RuntimeEntity

A. Koch

```
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;
    ...
}
```

Wie mit unbekanntenen 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 unbekanntenen Entität auszulesen

## 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

A. Koch

## 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)



- 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

## Allgemeines Schema

A. Koch

Weitergabe der **bisherigen** Belegung in `gs`

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

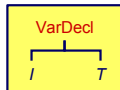
➡ Ist auch nächste **freie** Adresse!

Weitergabe der **Erhöhung** des Speicherbedarfs im Ergebnis

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

## Elaboriere Variablendeklaration

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

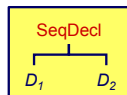


```
public Object visitVarDecl(VarDecl decl, Object arg) {  
    short gs = shortValueOf(arg);  
    short s = shortValueOf(decl.T.visit(this, null));  
    decl.entity = new KnownAddress(s, gs);  
    emit(Instruction.PUSHop, 0, 0, s);  
    return new Short(s);  
}
```

Remember the **size** and **address** of the variable.

## 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);  
}
```

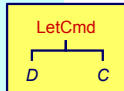
## Führe kompletten `let`-Block aus

A. Koch

```
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.

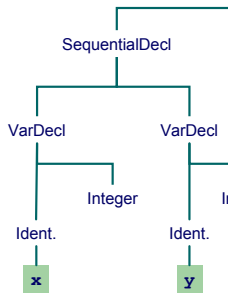
```
public Object visitLetCmd(LetCmd cmd, Object arg) {  
    short gs = shortValueOf(arg);  
    short s = shortValueOf(cmd.D.visit(this, gs));  
    cmd.C.visit(this, new Short(gs+s));  
    if (s > 0)  
        emit(Instruction.POPop, 0, 0, s);  
    return null;  
}
```



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

# Beispiel Speicherverwaltung im Visitor

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



## Bekannte Werte, Variablen und unbekannte Werte

A. Koch

```
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);  
    }  
}
```

## Bisher diskutiert: Mini-Triangle

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



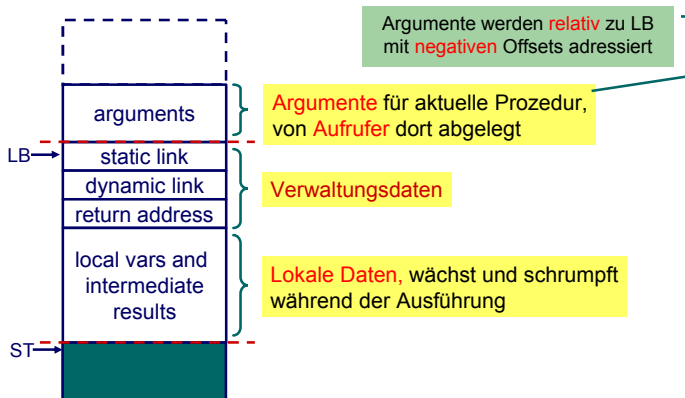
## Nun Erweiterung auf Triangle mit Prozeduren und Funktionen

- 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

## Wichtigste Struktur der Laufzeitumgebung: Stack Frame

A. Koch



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

A. Koch

```
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]

**Laufzeitadressen** von Variablen  
nun von **Kontext** abhängig!

4 [LB]

Bisher:

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

~~$fetch [I] = LOAD(s) \quad d[SB]$  wh  
an~~

Nun komplizierter:

$fetch [I] = LOAD(s) \quad d[r]$   $s = size(type\ of\ I)$   
 $(level, d)$  is declaration address of  $I$   
if  $(level == 0)$  then  $r = SB$   
elif  $(level == currentLevel)$  then  $r = LB$   
else  $r = I(currentLevel - level)$

- 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 size;  
}
```

## Jetzt Verwaltung des belegten Speicherplatzes je Ebene

A. Koch

```
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;  
    ...  
}
```

## Adressvergabe und Eintragen in den DAST

A. Koch

```
elaborate [var l : 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

## Zugriff auf bekannte Werte, Variablen und unbekannte Werte

A. Koch

```
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.



## Start der Code-Generierung mit Stack-Verwaltung

```
public void encode(Program prog) {  
    Frame globalFrame = new Frame(0, 0);  
    prog.visit(this, globalFrame);  
}
```

Einfachster Fall: **Globale** Prozeduren, keine Parameter, kein Ergebnis

A. Koch

```
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

Bei Aufruf von  $Y$  statische Verkettung auf umschliessende Prozedur  $X$ .

A. Koch

➔ 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.

## Behandlung des Funktionsaufrufes

A. Koch

*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

```
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);

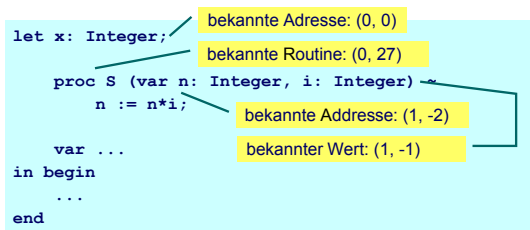
    short g = nextInstrAddr;
    code[j].d = g;
    return new Short(0);
}
```

Offset der ersten lokalen Variable

Nachtragen der Sprungadresse

- **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**

A. Koch



# Behandlung von Parametern 2

Declaration	::= ...   <code>proc</code> Identifier ( <b>Formal</b> ) ~ CommandProcDecl
Command	::= ...   Identifier ( <b>Actual</b> ) CallCmd
<b>Formal</b>	::= Identifier : TypeDenoter   <code>var</code> Identifier : TypeDenoter
<b>Actual</b>	::= Expression   <code>var</code> 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

## Variablenparameter

A. Koch

- 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!



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