Codegenerierung

- Der Code wird nacheinander für jede Prozedur gesondert erzeugt.
- Code wird innerhalb von Block für statement generiert.
- Ist der Code für eine Prozedur generiert, kann er in die Ausgabedatei geschrieben werden.
- Die Codegenerierung erfolgt durch die Routinen, die vom Parser aufgerufen werden, wenn Bögen akzeptiert worden sind.
- Der vorgestellte Compiler generiert Code für eine virtuelle Maschine. Er wird auf den nächsten Seite vorgestellt.

Codegenerierung

- Vor der eigentlichen Codegenerierung ist der Befehl `entryProc(Codelen,ProcIdx,VarLen)` zu generieren, dies erfolgt in dem Nil-Bogen vor statement. CodeLen bleibt dabei zunächst 0, VarLen ist dem SpzzVar zu entnehmen.
- Man könnte den Entryproc-Befehl auch am Anfang des Codepuffers fest codieren und die Parameter am Prozedurende eintragen, dann könnte man auf den Nil-Bogen (Bl13) ev. verzichten.

```
puValVrLocl,/*00 (short Displ)  [Kellern Wert lokale  Variable]             */
puValVrMain,/*01 (short Displ)  [Kellern Wert Main    Variable]             */
puValVrGlob,/*02 (short Displ,short Proc)  [Kellern Wert globale Variable]  */
puAdrVrLocl,/*03 (short Displ)  [Kellern Adresse lokale  Variable]          */
puAdrVrMain,/*04 (short Displ)  [Kellern Adresse Main    Variable]          */
puAdrVrGlob,/*05 (short Displ,short Proc) [Kellern Adresse globale Variable]*/
puConst    ,/*06 (short Index)  [Kellern einer Konstanten]                  */
storeVal   ,/*07 ()           [Speichern Wert -> Adresse, beides aus Keller]*/
putVal     ,/*08 ()           [Ausgabe eines Wertes aus Keller nach stdout] */
getVal     ,/*09 ()   [Eingabe eines Wertes von  stdin -> Addr. im Keller ] */
/*--- arithmetische Befehle ---*/
vzMinus    ,/*0A ()           [Vorzeichen -]                                */
odd        ,/*0B ()           [ungerade -> 0/1]                             */
  /*--- binaere Operatoren kellern 2 Operanden aus und das Ergebnis ein ----*/
OpAdd      ,/*0C ()           [Addition]                                    */
OpSub      ,/*0D ()           [Subtraktion ]                                */
OpMult     ,/*0E ()           [Multiplikation ]                             */
OpDiv      ,/*0F ()           [Division ]                                   */
cmpEQ      ,/*10 ()           [Vergleich = -> 0/1]                          */
cmpNE      ,/*11 ()           [Vergleich # -> 0/1]                          */
cmpLT      ,/*12 ()           [Vergleich < -> 0/1]                          */
cmpGT      ,/*13 ()           [Vergleich > -> 0/1]                          */
cmpLE      ,/*14 ()           [Vergleich <=-> 0/1]                          */
cmpGE      ,/*15 ()           [Vergleich >=-> 0/1]                          */
/*--- Sprungbefehle ---*/
call       ,/*16 (short ProzNr) [Prozeduraufruf]                            */
retProc    ,/*17 ()           [Ruecksprung]                                 */
jmp        ,/*18 (short RelAdr) [SPZZ innerhalb der Funktion]               */
jnot       ,/*19 (short RelAdr) [SPZZ innerhalb der Funkt.,Beding.aus Keller]*/
entryProc  ,/*1A (short lenCode,short ProcIdx,short lenVar)                 */
putStrg    ,/*1B (char[]) (Zusaetzlich, gehoert nicht zu PL/0)              */
EndOfCode   /*1C */
```

Funktionen zur Codegenerierung

```
int code( char OpCode, …);
```

Befehle haben 0, 1, 2 oder 3 Parameter.

Parameter sind alle vom Typ short (2 Byte).

Operationscodes sind 1 Byte groß.

Die Parameter werden in der Byteorder little endian (intel) gespeichert.

Soll der Compiler portabel sein (und das sollte er), muss eine Funktion zum Schreiben der Parameter gebaut werden.

Achtung in java werden int-werte im bigendian Format geschrieben!

Funktionen zum Schreiben der Befehlsparameter in der geforderten Byteorder

```
/*---------------------------*/
void wr2ToCode(short x)
{
  *pCode++=(unsigned char)(x & 0xff);
  *pCode++=(unsigned char)(x >> 8);
}

void wr2ToCodeAtP(short x,char*pD)
{
  * pD   =(unsigned char)(x & 0xff);
  *(pD+1)=(unsigned char)(x >> 8);
}
```

Schreibt am aktuellen Programmcounter

Schreibt an der Übergebenen Stelle

```
int code(tCode Code,...)
{
  va_list ap;
  short sarg;

  if (pCode-vCode+MAX_LEN_OF_CODE>=LenCode)
  // Ueberwachung des Zwischencodegenerierungspuffers
  {
    char* xCode=realloc(vCode,(LenCode+=1024));
          if (xCode==NULL) Error(ENoMem);
    pCode=xCode+(pCode-vCode);
    vCode=xCode;
  }
  *pCode++=(char)Code;
  va_start(ap,Code);
```

Schreibt Befehl
Mit 0, 1, 2 oder 3
Parametern in den
Codeausgabepuffer

```
  switch (Code)
  {
    /* Befehle mit 3 Parametern */
    case entryProc:
                sarg=va_arg(ap,int);
                wr2ToCode(sarg);
    /* Befehle mit 2 Parametern */
    case puValVrGlob:
    case puAdrVrGlob:
                sarg=va_arg(ap,int);
                wr2ToCode(sarg);
    /* Befehle mit 1 Parameter */
    case puValVrMain:
    case puAdrVrMain:
    case puValVrLocl:
    case puAdrVrLocl:
    case puConst:
    case jmp :
    case jnot:
    case call:
                sarg=va_arg(ap,int);
                wr2ToCode(sarg);
                Break;
    /* ohne Parameter */
    default     : break;
 }
  va_end  (ap);
  return OK;
}
```

Variablen zur Codegenerierung

- Prozedurnummer der aktuellen Prozedur
- Codeausgabebereich (mit Füllstand durch Pointer oder Index)
- Konstantenblock
- Datenstrukturen der Namensliste

Anmerkung zu Push-Befehlen

- Es gibt zwei Gruppen von Push-Befehlen:
  - PushVal: kellert den Wert einer Variablen im Stack
  - PushAdr: Kellert die Adresse einer Variablen im Stack
- Befehle beider Gruppen gibt es in drei Varianten:
  - local: Die Variable ist eine Variable der gerade aktuellen Prozedur.
  - main: Die Variable ist eine Variable des Hauptprogramms.
  - Global: Die Variable ist eine Variable einer umgebenden Prozedur. Hier ist die zusätzliche Angabe der Prozerdurnummer der Prozedur, zu der die Variable gehört, notwendig.

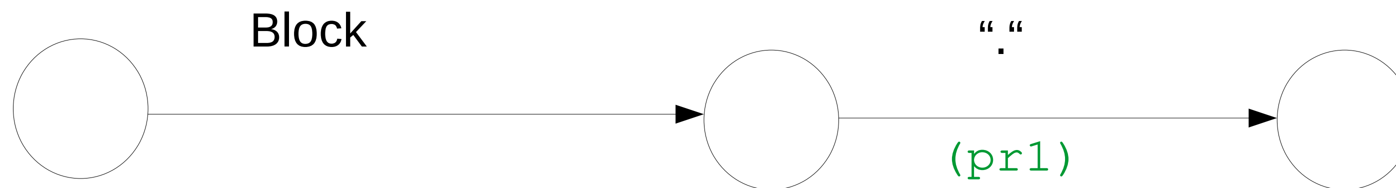
Codegenerierungsroutinen

- Auf den nachfolgenden Seiten werden die Syntaxgraphen gezeigt und an welchen Stellen Aktionen zur Codegenrierung sinnvoll angelegt werden.
- Es wird in Stichpunkten die Funktionalität dieser Rotinen dargelegt.
- Wie die Routinen zur Namensliste werden auch diese Routinen durch den Parser aufgerufen. Ihre Adresse ist in die Funktionspointer in den Graphenbeschreibungen einzutragen.

programm

Nur eine Aktion, wenn die Compilierung bis hierhin gekommen ist.

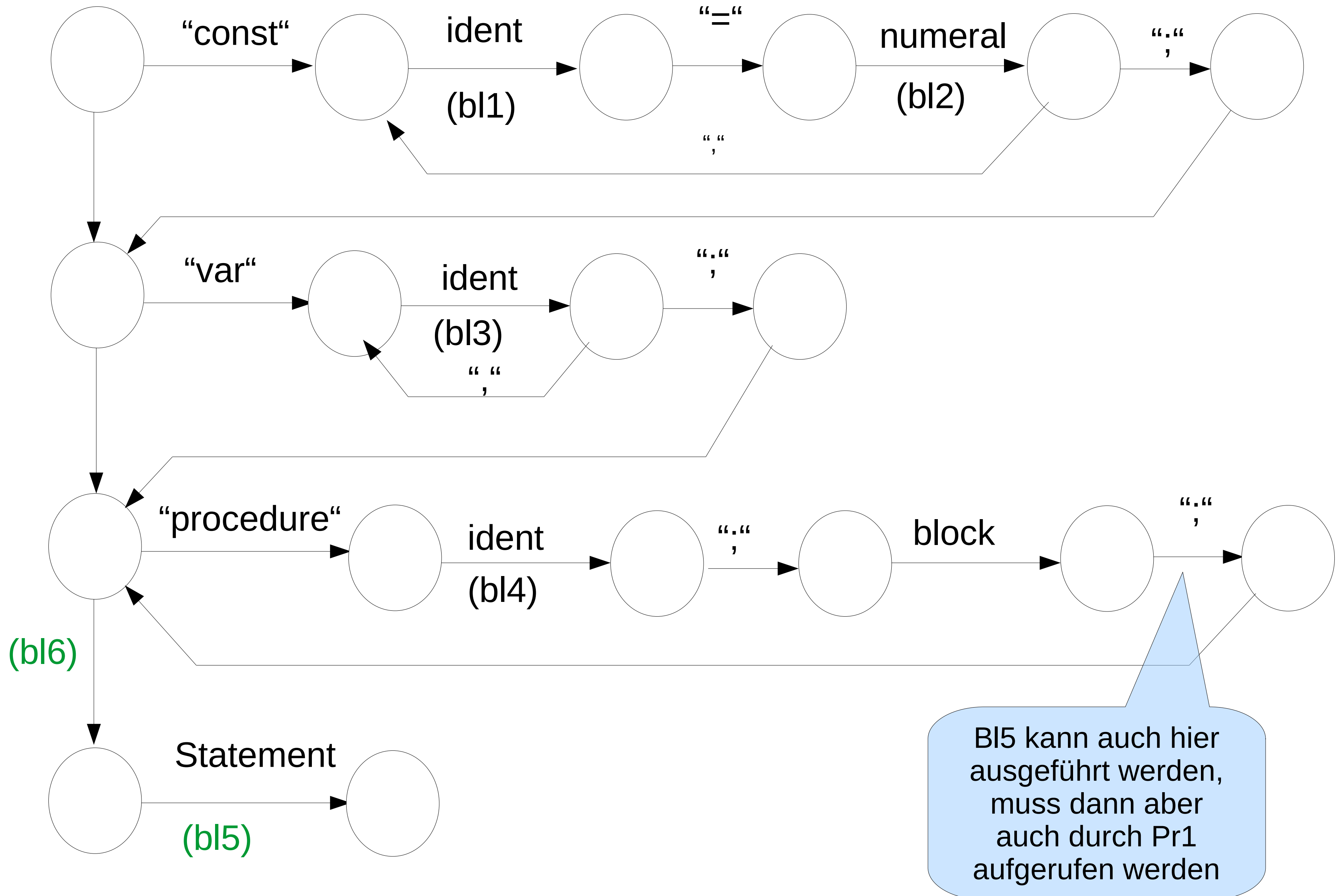
Abschlussarbeiten



pr1 (Endebehandlung):

- Aufruf von bl5 (Endebehandlung von Prozeduren), wenn bl5 bei ';' und nicht bei statement augerufen wurde
- Schreiben des Konstantenblocks in das Codefile
- Shreiben der Anzahl der Prozeduren in das Codefile am Anfang

block



bl1(Konstantenbezeichner):
lokale Suche nach dem Bezeichner
gefunden -> Fehlerbehandlung
nicht gefunden -> Bezeichner anlegen
bl2 (Konstantenwert):
Konstantenbeschreibung anlegen
Suche nach Konstante im Konstantenblock
gefunden -> Index der Konstanten eintragen in Konstantenbeschreibung
Konstante anlegen im Konstantenblock und Index der Konstanten eintragen in Konstantenbeschreibung
In letzten Bezeichner Zeiger auf Konstante eintragen

Diese Routinen wurden schon
Bei der Namensliste behandelt

bl3 (Variablenbezeichner):
lokale Suche nach dem Bezeichner
gefunden -> Fehlerbehandlung
nicht gefunden -> Bezeichner anlegen
Variablenbeschreibung anlegen und Pointer in Bezeichner eintragen
Relativadresse ermitteln aus SpzzVar, SpzzVar um 4 erhöhen
(Virtuelle Maschine arbeitet mit 4 Byte langen long-Werten)

bl4(Prozedurbezeichner):

lokale Suche nach dem Bezeichner
  gefunden -> Fehlerbehandlung
  nicht gefunden -> Bezeichner anlegen

Prozedurbeschreibung anlegen

Pointer auf Parent-Prozedur eintragen

Pointer auf Prozedurbeschreibung in letzten Bezeichner eintragen

Neue Prozedur ist jetzt aktuelle Prozedur

bl5 (Ende der Prozedurvereinbarung):

Codegenerierung: `retProc`

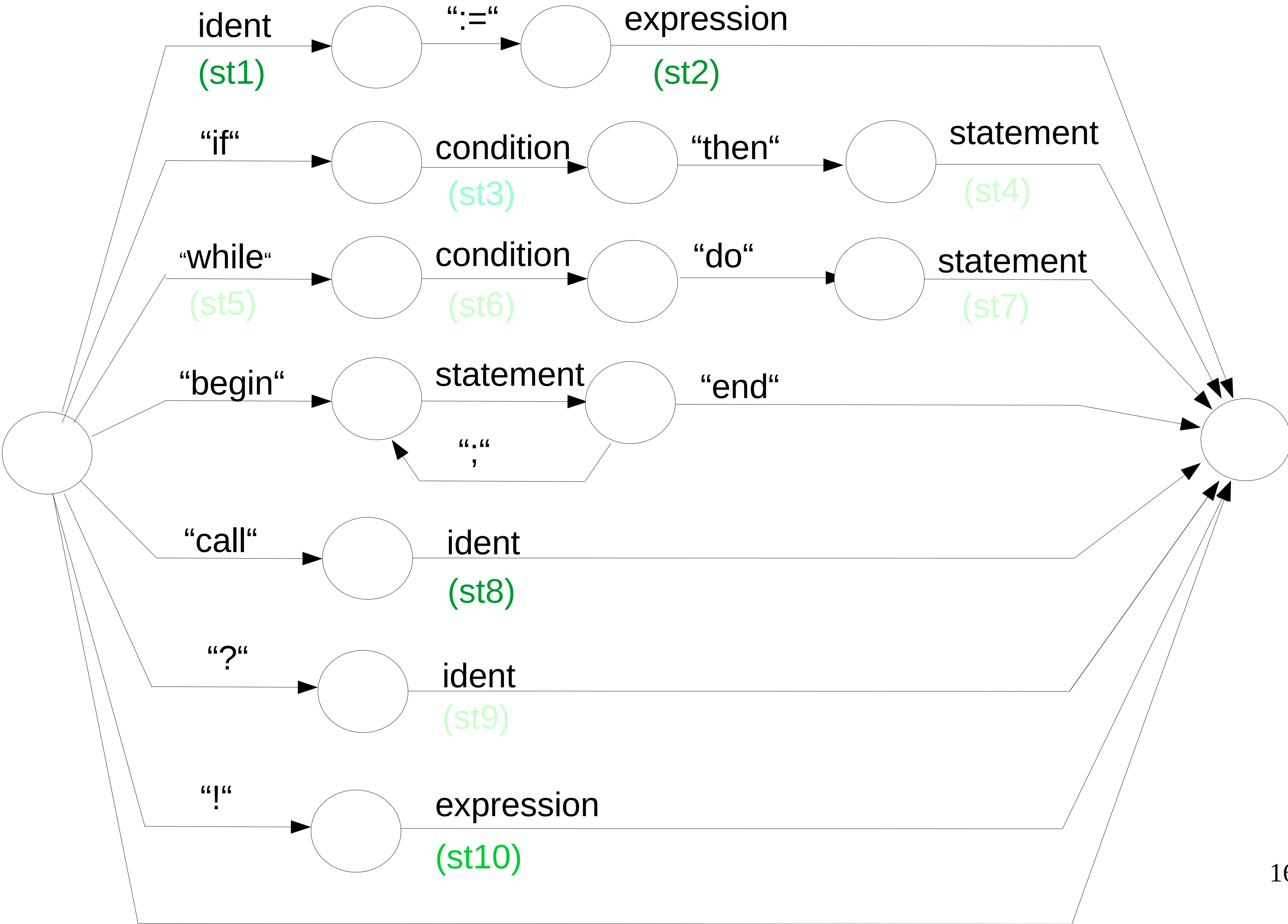
Codelänge in den Befehl `entryProc` als 1. Parameter nachtragen

Code aus dem Codepuffer in die Ausgabedatei schreiben (anfügen)

Namensliste mit allen Konstanten-, Variablen- und Prozedurbeschreibungen auflösen; die Prozedur selbst muss noch erhalten bleiben

bl6(Beginn des Anweisungsteils):
Hier muss ggf. ein Nilbogen eingefügt werden, um diese semantische Aktion an dieser Stelle ausführen zu können!
Sie Rotinen werden immer nach der Akteptanz des Bogens ausgeführt. Diese Routiner muss aber vor Staement ausgeführt werden, deshalb wurde hier ein NIL-Bogen eingeführt.
Codeausgabepuffer initialisieren
Codegenerierung: entryProc mit en Parametern CodeLen, IdxProc, VarLen mit CodeLen zunächst 0, IdxProc mit pCurrProc->Idx, und VarLen aus SpzzVar generieren.

statement



Zuweisung

st1(Linke Seite der Zuweisung):

Bezeichner global suchen
nicht gefunden -> Fehlerbehandlung
gefunden -> ok.
Bezeichnet der Bezeichner eine Variable?
Nein, eine Konstante oder Prozedur -> Fehlerbehandlung
ja -> ok,
Codegenerierung :

Bezeichner gefunden	Code	Parameter
Local	`PushAdrVarLocal`	Relativadresse
Im Hauptprogramm	`PushAdrVarMain`	Relativadresse
In umgebender Prozedur	`PushAdrVarGlobal`	Relativadresse, Prozedurnummer

st2 (Rechte Seite der Zuweisung):

Im Stack steht nun die Adresse der Zielvariable und der Wert des fertig berechneten Ausdrucks.
Codegenerierung : storeVal

st9 Eingabe:

Bezeichner global suchen:
nicht gefunden -> Fehlerbehandlung
gefunden -> ok.
Bezeichnet der Bezeichner eine Variable?
Nein, eine Konstante oder Prozedur -> Fehlerbehandlung
ja -> ok,
Codegenerierung :

Bezeichner gfunden	Code	Parameter
Local	`PushAdrVarLocal`	Relativadresse
Im Hauptprogramm	`PushAdrVarMain`	Relativadresse
In umgebender Prozedur	`PushAdrVarGlobal`	Relativadresse, Prozedurnummer

Codegenerierung : getVal

st10 Ausgabe:

Auszugebender Wert steht im Stack.
Codegenerierung: putVal

procedure call

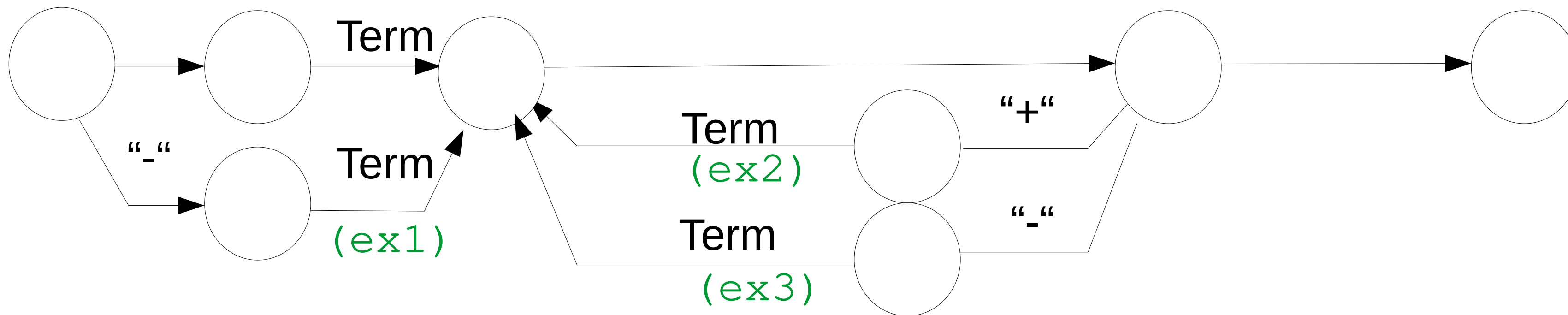
st8 Prozeduraufruf:

Bezeichner global suchen
 Nicht gefunden -> Fehlerbehandlung
 Gefunden -> ok.

Bezeichnet der Bezeichner eine Procedure?
 Nein, eine Konstante oder Prozedur -> Fehlerbehandlung
 Ja -> ok

Codegenerierung call procedurenumber

expression



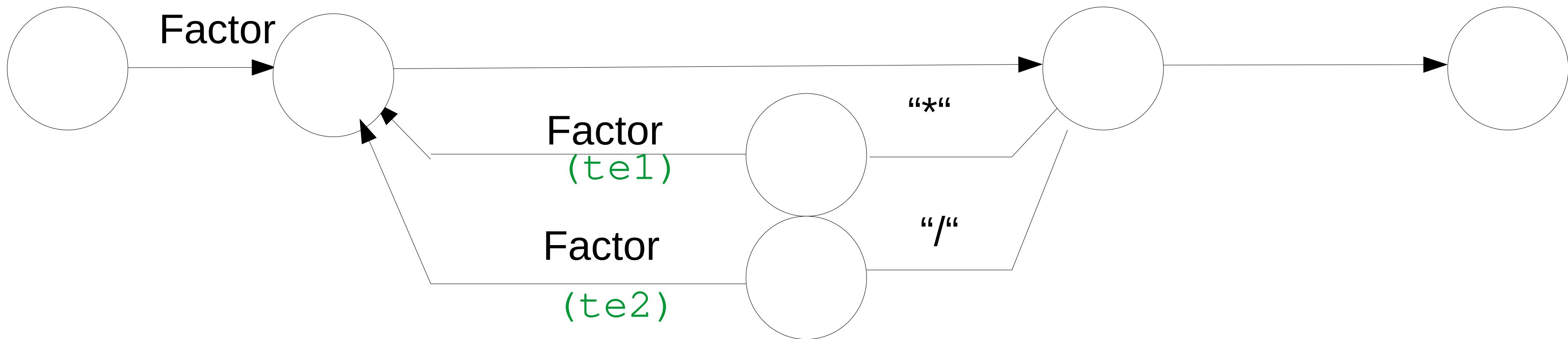
ex1 (negatives Vorzeichen)
- Codegenerierung `vzMinus`

ex2 (add)
- Codegenerierung opAdd

ex3 (sub)
Codegenerierung `opSub`

Anmerkung:
Es werden hier nur die additiven Operatoren generiert. Der Code zum Kellern der Operanden wurde bereits innerhalb von Term→Faktor erzeugt.

term

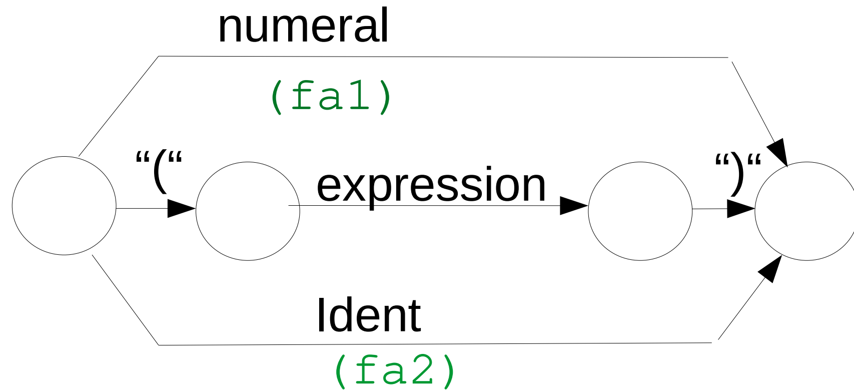


te1 (mul)
Codegenerierung `opMul`

te2 (div)
Codegenerierung `opDiv`

Anmerkung:
Es werden hier nur die Multiplikativen Operatoren generiert. Der Code zum Kellern der Operanden wurde bereits innerhalb von Faktor erzeugt.

factor

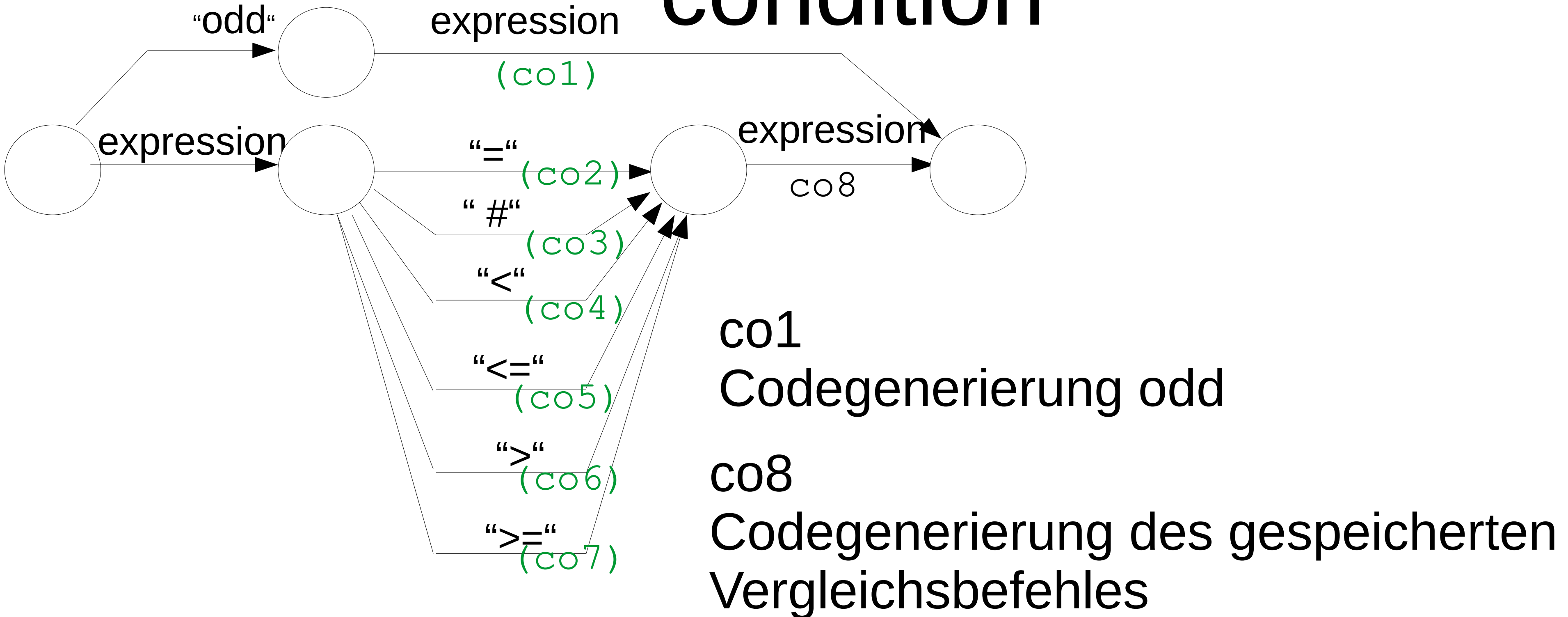


fa1 (Numeral):
suchen der Konstante
ggf. anlegen der Konstanten, wenn nicht gefunden (unbenannte Konstante)
Codegenerierung
puConst (ConstIndex)

fa2 (Ident):
Bezeichner global suchen
nicht gefunden -> Fehlerbehandlung
gefunden -> ok.
Bezeichnet den Namen eine Variable oder Konstante?
Nein, eine Prozedur -> Fehlerbehandlung
ja -> ok,
Codegenerierung :

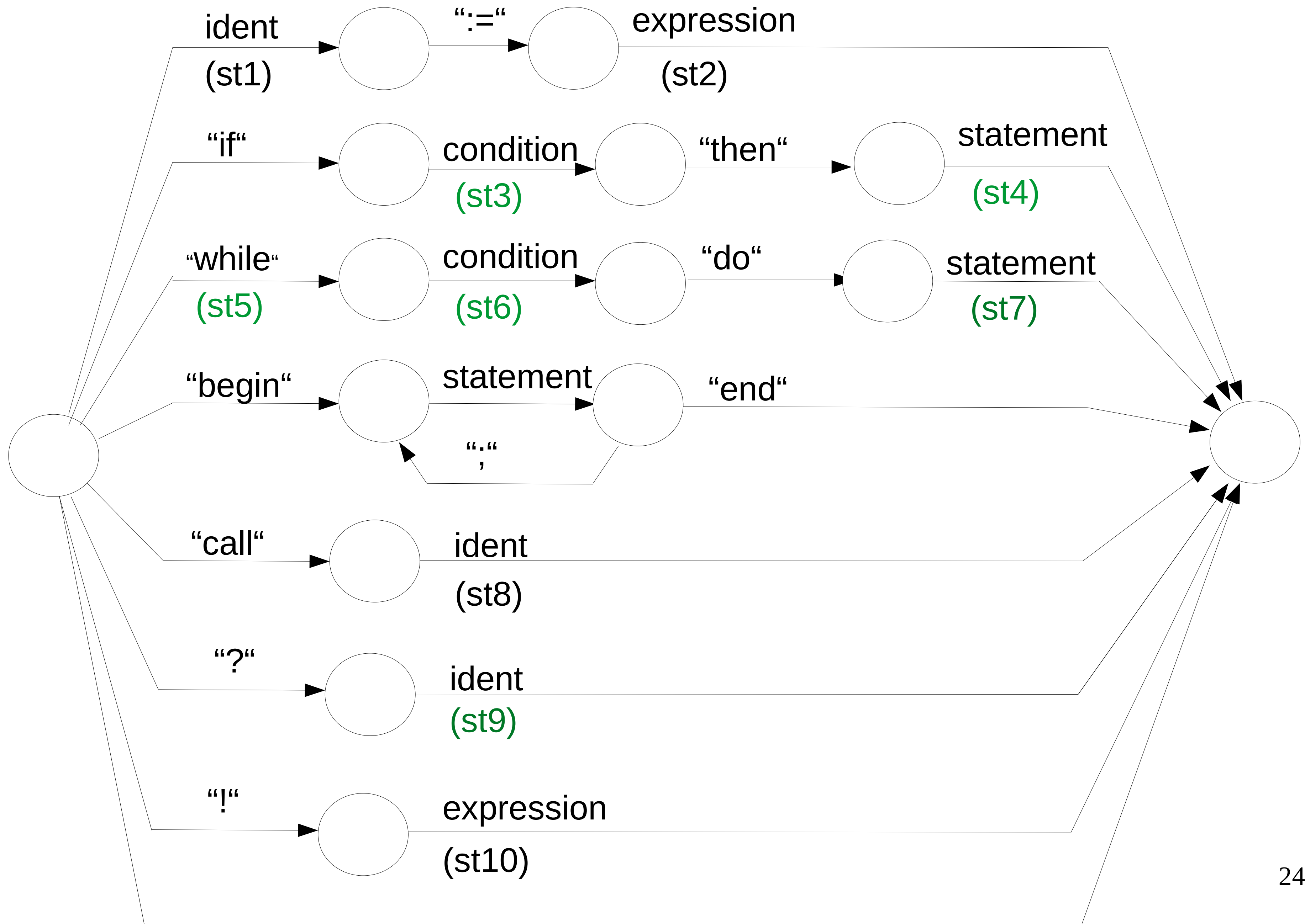
Bezeichner gefunden	Code	Parameter
LovalVar	puValVrLocl	displ
Main Var	puValVrMain	displ
Global Var	puValVrGlob	displ, ProcedureNr
Konstante	puConst	index

condition



co2 – co7 (Vergleichsoperator)
der später zu generierende Code für den Vergleichsoperator wird in einer einfachen Variable gespeichert. Dies ist hier möglich, da expression keinen Vergleich enthalten kann. Anderenfalls wäre ein Umbau der Syntaxbeschreibung, ähnlich expression notwendig, oder die Operatoren müssen in einem gesonderten Stack verwaltet werden.

Statement



Labels

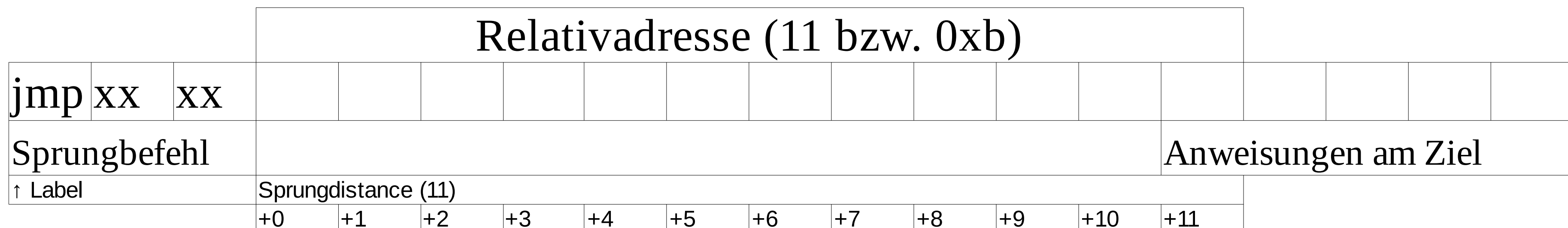
- Labels sind Konstrukte der Codegenerierungsroutinen , in denen der aktuelle Stand des Schreibzeigers in den Codeausgabebereich zwischengespeichert wird.
- Labels werden für die Codegenerierung der bedingten (if) und der Schleifenanweisung (while) benötigt.
- Labels werden in einem Keller (Liste vorn einfügen, vorn entnehmen) verwaltet.

```
typedef
struct tLABL
{
  tKz Kz;
  short iJmp;
}tLabl;
```

Die Labelwerte sollten relativ zum Codepuferanfang als Index gespeichert werden.

Jump-Befehle

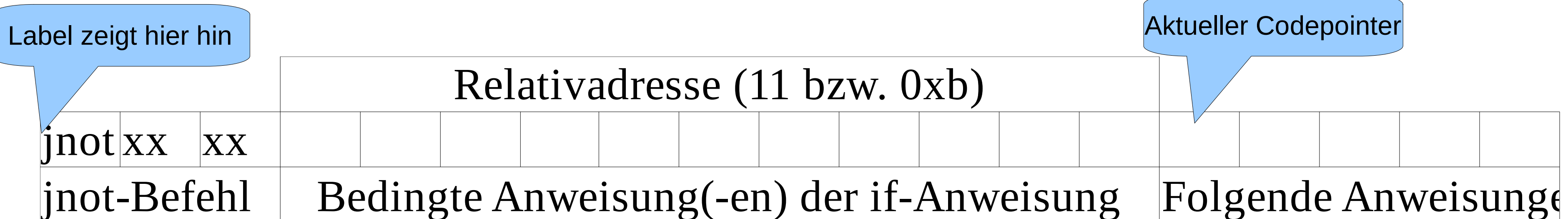
- Die Sprungbefehle jmp und jnot arbeiten mit Relativadressen
- Die als Operand angegebene Sprungdistance wird zum aktuellen Instructionpointer addiert.
- Dabei ist zu beachten, dass der aktuerlle Instructionpointer zu diesem Zeitpunkt genau hinter dem Sprungbefehl steht und bereits auf den nächsten befehl zeigt, da der Sprungbefehl ja bereits komplett gelesen ist.



conditional statement

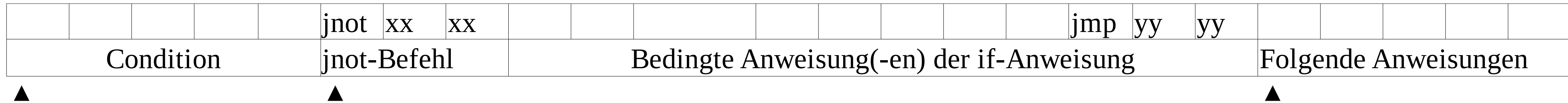
st3 (if, nach Condition)
Generieren eines Labels, es zeigt auf den nächsten freien Speicherplatz des Codeausgabepuffers.
Codegenerierung jnot mit einer vorläufigen Relativadresse 0

st4 (if, nach Statement)
Label auskellern
Relativadresse berechnen (akt. Codezeiger – CodePos in Label -3).
Minus 3, wenn das Label auf den jnot-Befehl zeigt.
(Es ist hilfreich, sich hier die Arbeitsweise von jmp /jnot zu verdeutlichen. Die als Parameter des jmp-Befehls übergebene Relativadresse wird zum aktuellen Instructionpointer, der zu dieser Zeit hinter den jnot-Befehl zeigt, addiert und in den Instructionpointer geschrieben.)



Die Relativadresse in der Skizze würde 11 (0xb) betragen
Relativadresse in jmp-Befehl eintragen.

loop statement



st5 (while)
Generieren eines Labels für Rücksprung am Schleifenende (linke Markierung).

st6 (while, nach Condition)
Generieren eines Labels, es zeigt auf den nächsten freien Speicherplatz des Codeausgabepuffers (mittlereMarkierung)
Codegenerierung jnot mit einer vorläufigen Relativadresse 0

st7 (while, nach Statement)
Label auskellern
Relativadresse berechnen, so ähnlich, wie bei st4, jedoch müssen noch 3 Byte für den jmp-Befehl am Ende der while-Anweisung eingerechnet werden (zu der berechneneten Relativadresse muss die Länge des jmp-Befehls addiert werden addiert werden)
Label (aus st5) auskellern und jmp-Befehl generieren. Die Relativadresse muss so berechnet werden, dass der Sprung bei dem 1. Befehl von Condition landet.

Beispiel, kompletter Code

```
var a,fac;

Procedure p1;
 var b;
 begin
  b := a;
  a := a-1;
  if a>1 then
       call p1;
  fac := fac*b
 end;

begin
  ?a;
  fac := 1;
  call p1;
  !fac
end.
```

```
EntryProc          0032,0001,0004
PushAdrVarLocal    0000
PushValVarMain     0000
StoreVal
PushAdrVarMain     0000
PushValVarMain     0000
PushConst          0000
Sub
StoreVal
PushValVarMain     0000
PushConst          0000
CmpGreaterThen
JmpNot             0003
Call               0001
PushAdrVarMain     0004
PushValVarMain     0004
PushValVarLocal    0000
Mul
StoreVal
ReturnProc
```

```
EntryProc          001A,0000,0008
PushAdrVarMain     0000
GetVal
PushAdrVarMain     0004
PushConst          0000
StoreVal
Call               0001
PushValVarMain     0004
PutVal
ReturnProc
```

Const 0000:0001

- Nachfolgende Folien geben eine Empfehlung zur Reihenfolge der Bearbeitung bei der Programmierung der Codeerzeugung.
- Die Reihenfolge orientiert sich an der Testbarkeit von Beispielen.
- Bereits nach der Implementation weniger Befehle, sollte sich das Programm

  !5.

  compilieren und mittels der bereitgestellten virtuellen Maschine ausführen lassen.

Reihenfolge

Factor (fa1), Block (bl6, bl5), Statement (st10), Pogramm (pr1)

PL0	Code

`!5.`	`0000: 1A EntryProc      000C,0000,0000 <-- Procedure`
	`0007: 06 PushConst      0000`
	`000A: 08 PutVal`
	`000B: 17 ReturnProc`
	`Const 0000:0005`

Expression, Term

PL0	Code

`const c=1;`
`!5+c.`
	`0000: 1A EntryProc      0010,0000,0000 <-- Procedure`
	`0007: 06 PushConst      0001`
	`000A: 06 PushConst      0000`
	`000D: 0C Add`
	`000E: 08 PutVal`
	`000F: 17 ReturnProc`
	`Const 0000:0001`
	`Const 0001:0005`

PL0	Code

`const c=2;`
`!5+c*3.`
	`0000: 1A EntryProc      0014,0000,0000 <-- Procedure`
	`0007: 06 PushConst      0001`
	`000A: 06 PushConst      0000`
	`000D: 06 PushConst      0002`
	`0010: 0E Mul`
	`0011: 0C Add`
	`0012: 08 PutVal`
	`0013: 17 ReturnProc`
	`Const 0000:0002`
	`Const 0001:0005`
	`Const 0002:0003`

Weitere Beispiele testen

Statement Assignment

PL0	Code
const c=2;	0000: 1A EntryProc 001F,0000,0004 <-- Procedure
var a;	0007: 04 PushAdrVarMain 0000
begin	000A: 06 PushConst 0000
a:=2*c;	000D: 06 PushConst 0000
!5+c*a	0010: 0E Mul
end.	0011: 07 StoreVal
	0012: 06 PushConst 0001
	0015: 06 PushConst 0000
	0018: 01 PushValVarMain 0000
	001B: 0E Mul
	001C: 0C Add
	001D: 08 PutVal
	001E: 17 ReturnProc
	Const 0000:0002
	Const 0001:0005

Weitere Beispiele testen

Statement input

PL0	Code
const c=2;	0000: 1A EntryProc 0018,0000,0004 <-- Procedure
var a;	0007: 04 PushAdrVarMain 0000
begin	000A: 09 GetVal
?a;	000B: 01 PushValVarMain 0000
!a*a+c	000E: 01 PushValVarMain 0000
end.	0011: 0E Mul
	0012: 06 PushConst 0000
	0015: 0C Add
	0016: 08 PutVal
	0017: 17 ReturnProc
	Const 0000:0002

Weitere Beispiele testen

Statement Conditional

PL0	Code
const c=2;	0000: 1A EntryProc 002C,0000,000C <-- Procedure
var a,b,m;	0007: 04 PushAdrVarMain 0000
begin	000A: 09 GetVal
?a;	000B: 04 PushAdrVarMain 0004
?b;	000E: 09 GetVal
m:=a;	000F: 04 PushAdrVarMain 0008
if b>m then	0012: 01 PushValVarMain 0000
m:=b;	0015: 07 StoreVal
!m	0016: 01 PushValVarMain 0004
end.	0019: 01 PushValVarMain 0008
	001C: 13 CmpGreaterThen
	001D: 19 JmpNot 0007
	0020: 04 PushAdrVarMain 0008
	0023: 01 PushValVarMain 0004
	0026: 07 StoreVal
	0027: 01 PushValVarMain 0008
	002A: 08 PutVal
	002B: 17 ReturnProc
	Const 0000:0002

Weitere Beispiele testen

Statement Procedure Call

PL0	Code
const c=2;	0000: 1A EntryProc 0024,0001,0000 <-- Procedure
var a,b,m;	0007: 04 PushAdrVarMain 0008
procedure p;	000A: 01 PushValVarMain 0000
begin	000D: 07 StoreVal
m:=a;	000E: 01 PushValVarMain 0004
if b>m then	0011: 01 PushValVarMain 0008
m:=b;	0014: 13 CmpGreaterThen
!m	0015: 19 JmpNot 0007
end;	0018: 04 PushAdrVarMain 0008
begin	001B: 01 PushValVarMain 0004
?a;	001E: 07 StoreVal
?b;	001F: 01 PushValVarMain 0008
call p	0022: 08 PutVal
end.	0023: 17 ReturnProc
	0024: 1A EntryProc 0013,0000,000C <-- Procedure
	002B: 04 PushAdrVarMain 0000
	002E: 09 GetVal
	002F: 04 PushAdrVarMain 0004
	0032: 09 GetVal
	0033: 16 Call 0001
	0036: 17 ReturnProc
	Const 0000:0002

Procedure Call mit lokaler Variable

PL0

```
const c=2;
var a,b,m;
procedure p;
  var x;
  begin
  x:=a;
  if b>x then
       x:=b;
  m:=x
  end;
begin
  ?a;
  ?b;
  call p;
  !m
end.
```

Code

```
0000: 1A EntryProc            0027,0001,0004 <-- Procedure
0007: 03 PushAdrVarLocal      0000
000A: 01 PushValVarMain       0000
000D: 07 StoreVal
000E: 01 PushValVarMain       0004
0011: 00 PushValVarLocal      0000
0014: 13 CmpGreaterThen
0015: 19 JmpNot               0007
0018: 03 PushAdrVarLocal      0000
001B: 01 PushValVarMain       0004
001E: 07 StoreVal
001F: 04 PushAdrVarMain       0008
0022: 00 PushValVarLocal      0000
0025: 07 StoreVal
0026: 17 ReturnProc
0027: 1A EntryProc            0017,0000,000C <-- Procedure
002E: 04 PushAdrVarMain       0000
0031: 09 GetVal
0032: 04 PushAdrVarMain       0004
0035: 09 GetVal
0036: 16 Call                 0001
0039: 01 PushValVarMain       0008
003C: 08 PutVal
003D: 17 ReturnProc
Const 0000:0002
```

Procedure Call mit globaler Variable

PL0

```
const c=2;
var a,b,m;
procedure p;
  var x;
  begin
  x:=a;
  if b>x then
        x:=b;
  m:=x
  end;
begin
  ?a;
  ?b;
  call p;
  !m
end.
```

Code

```
0000: 1A EntryProc                    002F,0002,0000 <-- Procedure
0007: 05 PushAdrVarGobal   0000, 0001
000C: 01 PushValVarMain     0000
000F: 07 StoreVal
0010: 01 PushValVarMain      0004
0013: 02 PushValVarGobal    0000,0001
0018: 13 CmpGreaterThen
0019: 19 JmpNot                        0009
001C: 05 PushAdrVarGobal   0000, 0001
0021: 01 PushValVarMain      0004
0024: 07 StoreVal
0025: 04 PushAdrVarMain      0008
0028: 02 PushValVarGobal     0000,0001
002D: 07 StoreVal
002E: 17 ReturnProc
002F: 1A EntryProc                     000B,0001,0004 <--
Procedure
0036: 16 Call                               0002
0039: 17 ReturnProc
003A: 1A EntryProc                     0017,0000,000C <--
Procedure
0041: 04 PushAdrVarMain       0000
0044: 09 GetVal
0045: 04 PushAdrVarMain       0004
0048: 09 GetVal
0049: 16 Call                               0001
004C: 01 PushValVarMain       0008
004F: 08 PutVal
0050: 17 ReturnProc
Const 0000:0002
```

Statement while

PL0	Code

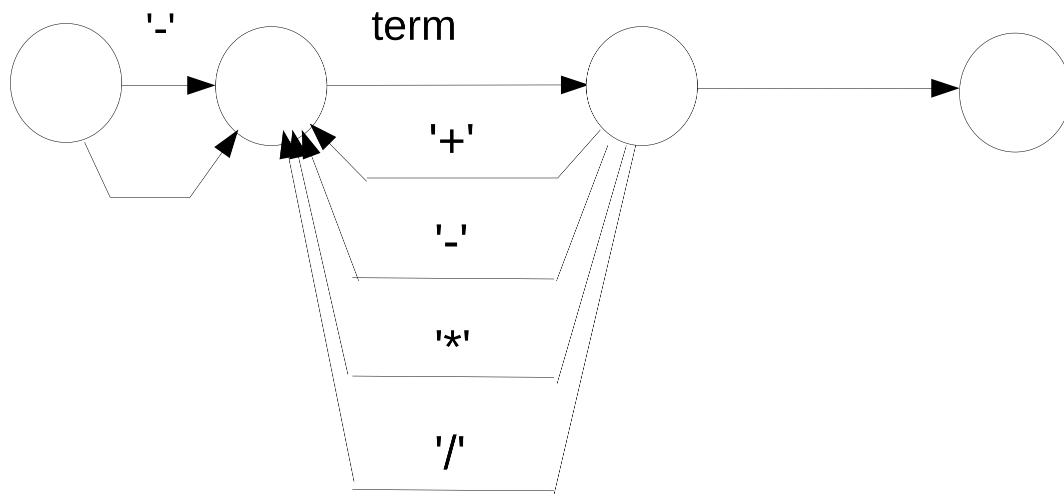
const c=10;
var i;
begin
  i:=0;
  while i<c do
  begin
    !i;
    i:=i+1
  end
end.
	0000: 1A EntryProc 002B,0000,0004 <-- Procedure
	0007: 04 PushAdrVarMain 0000
	000A: 06 PushConst 0001
	000D: 07 StoreVal
	000E: 01 PushValVarMain 0000
	0011: 06 PushConst 0000
	0014: 12 CmpLessThen
	0015: 19 JmpNot 0012
	0018: 01 PushValVarMain 0000
	001B: 08 PutVal
	001C: 04 PushAdrVarMain 0000
	001F: 01 PushValVarMain 0000
	0022: 06 PushConst 0002
	0025: 0C Add
	0026: 07 StoreVal
	0027: 18 Jmp FFE4
	002A: 17 ReturnProc
	Const 0000:000A
	Const 0001:0000
	Const 0002:0001

Alternative Möglichkeit zur Implementation von Expressions

(nur zur weiterführenden Information, nicht zu implementieren)

- Häufige rekursive Aufrufe innerhalb von Expression bedingen eine relativ langsame Ausführung des Compilers.
- Man kann hier auch ein anderes Verfahren einsetzen, in dem man die Graphen umgestaltet und die Routinen dazu neu fasst.
- Ein gängiges Verfahren besteht darin, den Operatoren Prioritäten zuzuordnen und sie entsprechend Ihrer Priorität zu bewerten (Code zu generieren) oder sie zu kellern.

Operatorprioritäten (precedence rules)



Operator	Priorität
- (unär)	3
*	2
/	2
+	1
-	1

Verfahren:

Operanden werden durch Generierung der Push-Befehle unverändert behandelt.

Operatoren werden gekellert.

Hat der aktuelle Operator eine kleinere Priorität als der oberste Operator im Stack, so wird dieser ausgekellert und sein Code generiert

Dies wiederholt sich, solange der aktuelle Operator eine kleinere Priorität als der oberste Operator im Stack hat.

Der Stack wird mit einem Startoperator (Priorität 0) initialisiert.

Ergebnis ist eine Ausdrucksberechnung nach umgekehrt polnischer Notation

Beispiel: 2+5*4-6/2

$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern geben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Push 2

$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern ge-
ben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Push 2

+ (1)					
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern ge-
ben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Push 2

Push 5

+ (1)					
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern geben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Push 2

Push 5

+ (1)	+ (1)				
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern ge-
ben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Push 2

Push 5

	* (2)				
+ (1)	+ (1)				
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern ge-
ben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Push 2

Push 5

Push 4

	* (2)				
+ (1)	+ (1)				
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern geben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Push 2

Push 5

Push 4

- (1) hat geringere Priorität als * (2) →
Auskellern !

	* (2)				
+ (1)	+ (1)				
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern ge-
ben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Push 2

Push 5

Push 4

Mul

- (1) hat geringere Priorität als * (2) →
Auskellern !

	* (2)				
+ (1)	+ (1)				
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern geben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Push 2

Push 5

Push 4

Mul

Add

- (1) hat geringere Priorität als * (2) → Auskellern !

	* (2)				
+ (1)	+ (1)				
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern geben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Push 2

Push 5

Push 4

Mul

Add

	* (2)				
+ (1)	+ (1)				
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern ge-
ben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Push 2

Push 5

Push 4

Mul

Add

	* (2)				
+ (1)	+ (1)	- (1)			
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern geben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Push 2

Push 5

Push 4

Mul

Add

Push 6

	* (2)				
+ (1)	+ (1)	- (1)			
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern geben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Push 2

Push 5

Push 4

Mul

Add

Push 6

	* (2)				
+ (1)	+ (1)	- (1)	- (1)		
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern geben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Push 2

Push 5

Push 4

Mul

Add

Push 6

	* (2)		/ (2)		
+ (1)	+ (1)	- (1)	- (1)		
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern ge-
ben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Push 2

Push 5

Push 4

Mul

Add

Push 6

Push 2

	* (2)		/ (2)		
+ (1)	+ (1)	- (1)	- (1)		
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern ge-
ben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Ende des Ausdrucks:
Alles auskellern

Push 2

Push 5

Push 4

Mul

Add

Push 6

Push 2

	* (2)		/ (2)		
+ (1)	+ (1)	- (1)	- (1)		
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Die Werte in runden Klammern geben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Ende des Ausdrucks:
Alles auskellern

	* (2)		/ (2)		
+ (1)	+ (1)	- (1)	- (1)		
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Push 2
Push 5
Push 4
Mul
Add
Push 6
Push 2
Div

Die Werte in runden Klammern geben die Priorität der Operatoren an.

Beispiel: 2+5*4-6/2

Ende des Ausdrucks:
Alles auskellern

	* (2)		/ (2)		
+ (1)	+ (1)	- (1)	- (1)		
$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)	$ (0)

Push 2
Push 5
Push 4
Mul
Add
Push 6
Push 2
Div
Sub

Die Werte in runden Klammern geben die Priorität der Operatoren an.

Im PL/0 Compiler:

```
tBog gExpr[]=
{
/* 0*/ {BgSy,{(unsigned long)'+'     }, Ex2,  3, 1},/*(0)---'+'--->(1)*/
/* 1*/ {BgSy,{(unsigned long)'-'     }, Ex1 , 3, 2},/* +----'-'--->(1)*/
/* 2*/ {BgNl,{(unsigned long)0       }, Ex2,  3, 0},/* +---------->(1)*/
/* 3*/ {BgGr,{(unsigned long)iFact   }, NULL, 4, 0},/*(1)---fact-->(2)*/
/* 4*/ {BgSy,{(unsigned long)'+'     }, Ex4 , 3, 5},/*(2)----'+'-->(1)*/
/* 5*/ {BgSy,{(unsigned long)'-'     }, Ex5 , 3, 6},/* +-----'-'-->(1)*/
/* 6*/ {BgSy,{(unsigned long)'*'     }, Ex6 , 3, 7},/* +-----'*'-->(1)*/
/* 7*/ {BgSy,{(unsigned long)'/'     }, Ex7 , 3, 8},/* +-----'/'-->(1)*/
/* 8*/ {BgNl,{(unsigned long)0       }, Ex8,  9, 0},/*(2)--------->(3)*/
/* 9*/ {BgEn,{(unsigned long)0       }, NULL, 0, 0} /*(2)------->(ENDE)*/
};
```

```
int Ex4 (void)
/*(2)----'+'---->(1)*/
{
   tnode* ptmp;
   while((ptmp=opread())->p>=10)
   {
     code(ptmp->op);
     oppop();
   }
   return oppush(OpAdd);
}
```

```
int Ex8(void) /*(2)------->(3)*/
{
  // Auskellern bis OP==0
  tnode* ptmp;
  while (((ptmp=opread())->op)!=0)
  {
    code(ptmp->op);
    oppop();
  }
  oppop();
  Return OK;
}
```

Operatorenstack
(einfach verkettete Liste)

```
typedef struct t_node
{
  struct t_node * nxt;
  char op;
  char p;
}tnode;
tnode * pStack=0;

int oppush(char op) // Operatinscode kellern
{
  tnode* ptmp;
  ptmp=malloc(sizeof(tnode));
  if(ptmp)
  {
    switch(op)
    {
      case vzMinus: ptmp->p=30; break;
      case OpMult:
      case OpDiv :   ptmp->p=20; break;
      case OpAdd:
      case OpSub:   ptmp->p=10; break;
      case 0        :   ptmp->p=  0; break;
    }
    ptmp->op=op;
    ptmp->nxt=pStack;
    pStack=ptmp;
  }
  return ptmp?1:0;
}
```

```
// Operatinscode auskellern
{
void oppop ()
  tnode* ptmp;
  if(pStack)
  {
    ptmp=pStack;
    pStack=pStack->nxt;
    free(ptmp);
  }
}
// obersten Operatinscode lesen
tnode* opread()
{
  if(pStack) return pStack;
  else       return NULL;
}
```