Virtuelle Maschine in der Informatik

- Eine virtuelle Maschine ist ein Rechner, der physisch nicht existiert. Seine Bestandteile werden durch ein Programm realisiert, das alle Bestandteile eines physischen Rechners nachbildet.

  - Register
  - Speicher
  - Steuerschleife
  - Befehlssatz

Dreiadressmaschine

Eine beispielsweise arithmetische Operation wird durch einen Befehl mit 3 Parametern realisiert, den beiden Operanden und dem Ziel, auf dem das Ergebnis der Operation abgelegt wird. Zwischenergebnisse komplexer Ausdrücke werden in temporären Variablen abgelegt.

Erg ← Op1 + Op2

Erg ← Op1 - Op2

Erg ← Op1 * Op2

Erg ← Op1 / Op2

Erg ← Op1 & Op2

...

Zweiadressmaschine

ähnlich der Dreiadressmaschine, jedoch überschreibt das Ergebnis einen der beiden Operanden, so dass der 3. Parameter entfällt.

Op1 ← Op1 + Op2

Op1 ← Op1 - Op2

Op1 ← Op1 * Op2

Op1 ← Op1 / Op2

Op1 ← Op1 & Op2

...

Beispiel ASM x86:

```
xor    eax,eax
add    esi,eax ; Summe
shl    al,3
```

Einadressmaschine

Alle Operationen werden mit einem Akkumulatorregister ausgeführt, das den jeweils 1. Operanden enthält

Load Operand

Akkumulator += Operand

Akkumulator -= Operand

Akkumulator &= Operand

….

Store Destination

Stackmaschine

Operanden und Ergebnisse werden auf einem Kellerspeicher abgelegt. Auch die Variablen der Prozeduren werden im Keller angelegt. Sie werden durch eine Relativadresse, die relativ zum Anfang des Variablenbereiches (Adresse der 1. Variablen) gebildet wird, adressiert.

Push op1

Push op2

Add

Push op3

Mul

….

(op1+op2)*op3

Die virtuelle Maschine der LV basiert auf einer Stackmaschine

Befehlssatz

- Befehle zum Datentransport (push, pop, store)
- Arithmetische Befehle (add, sub, cmp,...)
- Sprungbefehle(jmp, call, jnot, …)
- Befehle zur Programmorganisation (entryproc)
- I/O-befehle

```
typedef enum TCODE
{
  /*--- Kellerbefehle ---*/
  puValVrLocl,/*00 (int Displ)  [Kellern Wert lokale  Variable]              */
  puValVrMain,/*01 (int Displ)  [Kellern Wert Main    Variable]              */
  puValVrGlob,/*02 (int Proc,int Displ)  [Kellern Wert globale Variable]     */
  puAdrVrLocl,/*03 (int Displ)  [Kellern Adresse lokale  Variable]           */
  puAdrVrMain,/*04 (int Displ)  [Kellern Adresse Main    Variable]   */
  puAdrVrGlob,/*05 (int Displ,int Proc)  [Kellern Adresse globale Variable]
*/
  puConst    ,/*06 (int 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 -> 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 (int ProzNr) [Prozeduraufruf]                                      */
  retProc    ,/*17 ()           [Ruecksprung]                                         */
  jmp        ,/*18 (int RelAdr) [SPZZ innerhalb der Funktion]                         */
  jnot       ,/*19 (int RelAdr) [SPZZ innerhalb der Funkt.,Beding.aus Keller]         */
  entryProc  ,/*1A (int lenCode, int ProcIdx, lenVAr)                                 */
  putStrg    ,/*1B (char[])                                                          */
  pop        ,/*1C */
  swap       ,/*1D               Austausch Adressse gegen Wert                       */
  EndOfCode  ,/*1E */
  put        ,/*1F Wert und Port vom Stack*/
  get        ,/*20 Adr  und Port vom Stack*/
  OpAddAddr   /*21 add 64bitAddress + 32 bit Offset                                  */
}tCode;
```

```
typedef enum TCODE
{
  /*--- Kellerbefehle ---*/
  puValVrLocl,/*00 (int Displ)  [Kellern Wert lokale  Variable]              */
  puValVrMain,/*01 (int Displ)  [Kellern Wert Main    Variable]              */
  puValVrGlob,/*02 (int Proc,int Displ)  [Kellern Wert globale Variable]     */
  puAdrVrLocl,/*03 (int Displ)  [Kellern Adresse lokale  Variable]           */
  puAdrVrMain,/*04 (int Displ,int Proc)  [Kellern Adresse Main    Variable]  */
  puAdrVrGlob,/*05 (int Displ)  [Kellern Adresse globale Variable]           */
  puConst    ,/*06 (int 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 -> 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 (int ProzNr) [Prozeduraufruf]                               */
  retProc    ,/*17 ()           [Ruecksprung]                                  */
  jmp        ,/*18 (int RelAdr) [SPZZ innerhalb der Funktion]                  */
  jnot       ,/*19 (int RelAdr) [SPZZ innerhalb der Funkt.,Beding.aus Keller] */
  entryProc  ,/*1A (int lenVar,int ProcIdx)[???]                               */
  putStrg    ,/*1B (char[])                                                    */
  EndOfCode   /*1E */
}tCode;
```

Arbeitsweise der Stackmaschine

PL/0:

```
const c=3;
var   a,b;
begin
  ?b;
  a:=B*10+c;
  !a
end
.
```

```
Code:

Procedure
00000000: 1A EntryProc          001F,0000,0008
00000007: 04 PushAdrVarMain     0004
0000000A: 09 GetVal

0000000B: 04 PushAdrVarMain     0000
0000000E: 01 PushValVarMain     0004
00000011: 06 PushConst          0001
00000014: 0E Mul
00000015: 06 PushConst          0000
00000018: 0C Add
00000019: 07 StoreVal
0000001A: 01 PushValVarMain     0000

0000001D: 08 PutVal
0000001E: 17 ReturnProc
Const 0000:0003
Const 0001:0010
```

Adresse Variable B

Adresse Variable A

Wert Variable B

Ablegen des Ergebnisses

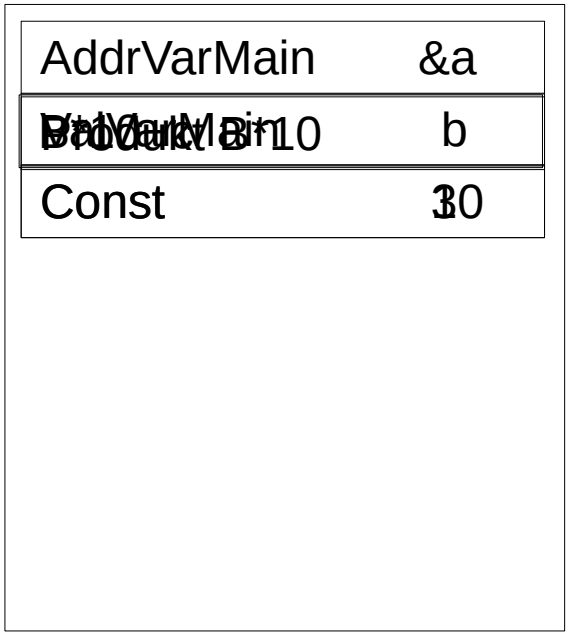
Code:

```
Procedure
00000000: 1A EntryProc          001F,0000,0008
00000007: 04 PushAdrVarMain     0004
0000000A: 09 GetVal

0000000B: 04 PushAdrVarMain     0000
0000000E: 01 PushValVarMain     0004
00000011: 06 PushConst          0001
00000014: 0E Mul
00000015: 06 PushConst          0000
00000018: 0C Add
00000019: 07 StoreVal
0000001A: 01 PushValVarMain     0000

0000001D: 08 PutVal
0000001E: 17 ReturnProc
Const 0000:0003
Const 0001:0010
```

```
const c=3;
var   a,b;
begin
  ?b;
  a:=B*10+c;
  !a
end
.
```



Datenstrukturen der VM

- Speicherbereich für den Stack: Wird beim Start der VM angelegt, während der Programmabarbeitung überwacht und bei Bedarf vergrößert.
- Speicherbereich für den Code und die Konstanten: Wird beim Laden des Zwischencodefiles angelegt.
- Prozedurtabelle: wird nach dem Laden des Zwischencodefiles angelegt. Sie enthält die Anfangsadressen der Prozeduren sowie zunächst leere Felder für die Anfangsadressen der Variablenbereiche (Stackframes der Prozeduren), diese Einträge werden durch `entryProc` beim Aufruf der Prozedur belegt.
- Die Einträge der Prozedurtabelle sind nach Prozedurnummer aufsteigend geordnet, so dass die Prozedurtabelle durch die Prozedurnummer indiziert werden kann.

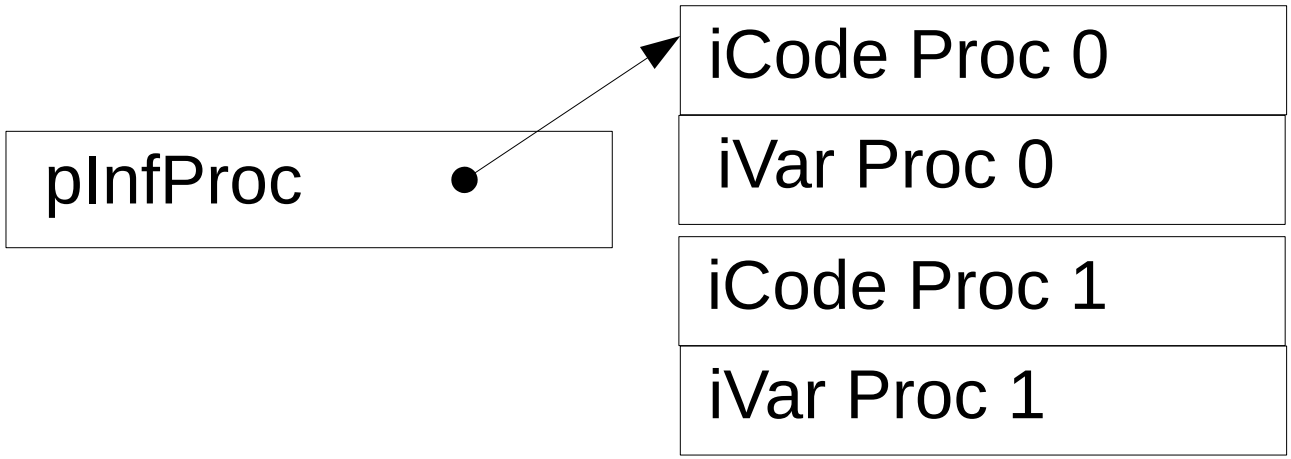
Register der VM

Register	*Variable der VM*
ProgrammCounter	`pC`
StackPointer	`pS`
KonstantenPointer	`pConst`
Aktuelle Prozedur	`iCProc`

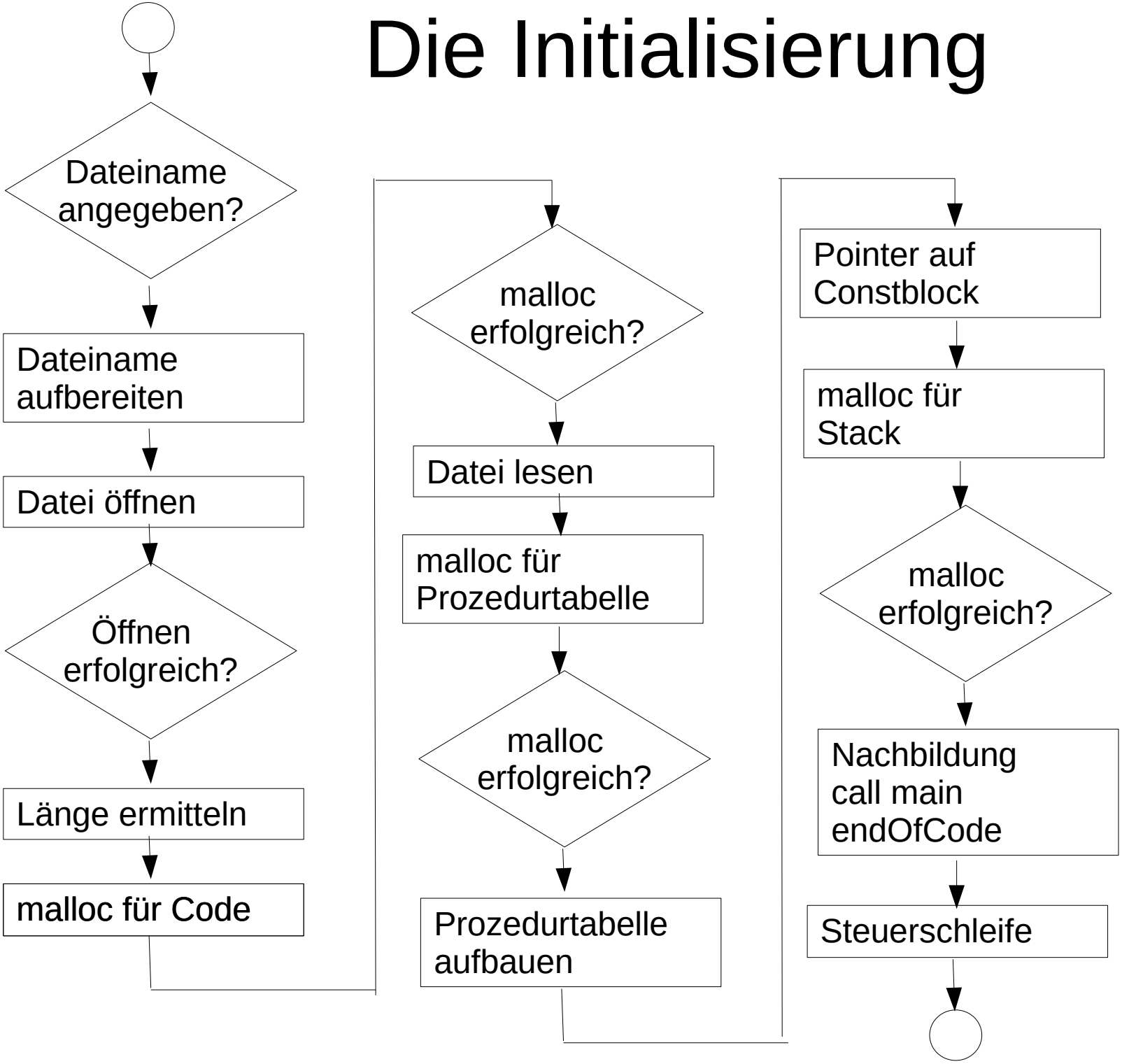
Pointer auf Prozedurtabe	`pInfProc`

Prozedurtabelle

- Enthält für jede Prozedur 2 Einträge (Pointer)
  - Startadresse des Codes (Adresse von EntryProc der Prozedur), wird beim Programmladen eingetragen
  - Adresse des Variablenbereiches der Prozedur(index bezgl. Stackanfang) (Index der Variablen mit Offset 0), wird bei Prozeduraufruf zur Laufzeit eingetragen
- Tabelle wird durch die Prozedurnummer indiziert

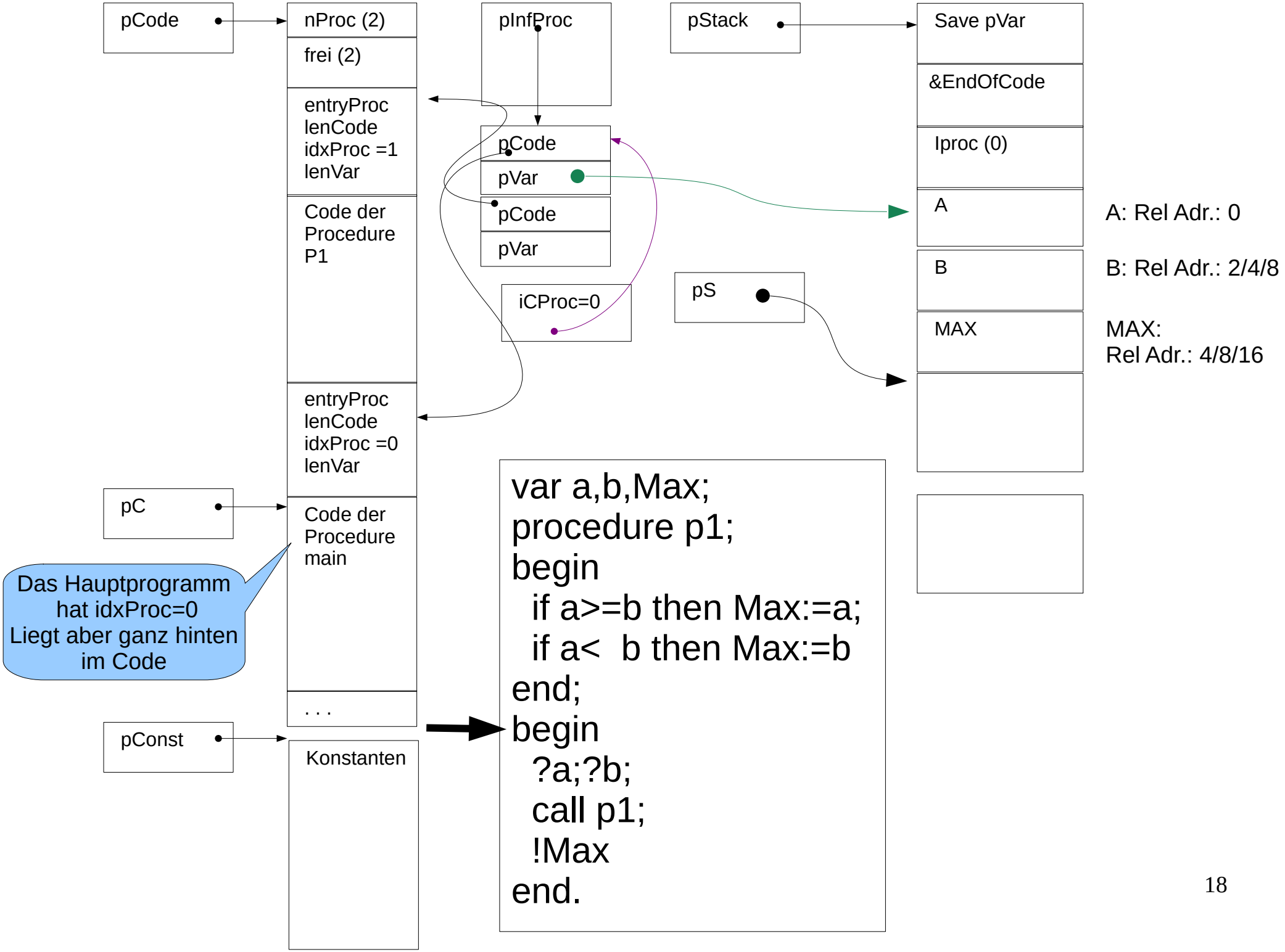


Die Initialisierung



Datenstruktur der virtuellen Maschine

- Die nachfolgende Folie zeigt für das angegebene Beispiel zum Zeitpunkt des Pfeils die Datenstruktur während der Programmausführung.
- Für die Variablen a, b, und Max ist Speicherplatz im Stack reserviert.
- Der Stackpointer pS zeigt hinter die Variablen a, b, und Max des Hauptprogramms.


pCode
nProc (2)
frei (2)
entryProc
lenCode
idxProc =1
lenVar
Code der
Procedure
P1
entryProc
lenCode
idxProc =0
lenVar
Code der
Procedure
main
. . .
pConst
Konstanten
pC
Das Hauptprogramm
hat idxProc=0
Liegt aber ganz hinten
im Code
pInfProc
pCode
pVar
pCode
pVar
iCProc=0
pStack
Save pVar
&EndOfCode
Iproc (0)
A
B
MAX
pS
A: Rel Adr.: 0
B: Rel Adr.: 2/4/8
MAX:
Rel Adr.: 4/8/16
var a,b,Max;
procedure p1;
begin
if a>=b then Max:=a;
if a< b then Max:=b
end;
begin
?a;?b;
call p1;
!Max
end.

Die Steuerschleife I

```
typedef int (*fx)(void);

fx vx[]={
          FcpuValVrLocl, FcpuValVrMain,
          FcpuValVrGlob, FcpuAdrVrLocl,
          FcpuAdrVrMain, FcpuAdrVrGlob,
          FcpuConst,     FcstoreVal,
          FcputVal,      FcgetVal,
          FcvzMinus,     Fcodd,
          FcOpAdd,       FcOpSub,
          FcOpMult,      FcOpDiv,
          FccmpEQ,       FccmpNE,
          FccmpLT,       FccmpGT,
          FccmpLE,       FccmpGE,
          Fccall,        FcRetProc,
          Fcjmp,         Fcjnot,
          FcEntryProc,   FcputStrg,
          Fpop,          Fswap,
          FcEndOfCode,   Fcput,
          Fcget
         };
```

```
while (!Ende)
{
   vx[*pC++]();
}
```

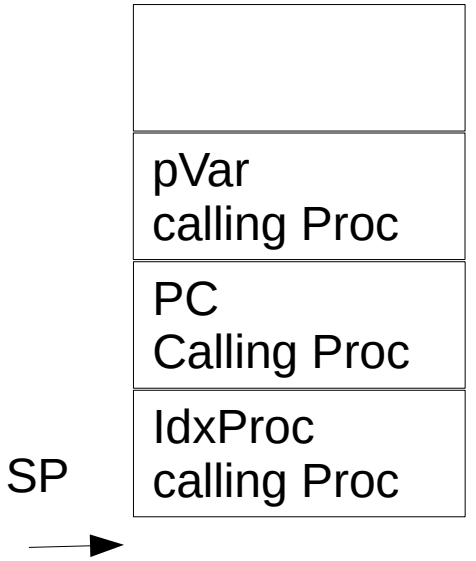
Setzt Ende auf true

Steuerschleife II

```
while (!Ende)
{
  switch (*pC++)
  {
 case puValVrLocl:FcpuValVrLocl(); break;
 case puValVrMain:FcpuValVrMain(); break;
 case puValVrGlob:FcpuValVrGlob(); break;
 case puAdrVrLocl:FcpuAdrVrLocl(); break;
 case puAdrVrMain:FcpuAdrVrMain(); break;
 case puAdrVrGlob:FcpuAdrVrGlob(); break;
 case puConst    :FcpuConst();     break;
 case storeVal   :FcstoreVal();    break;
 case putVal     :FcputVal();      break;
 case getVal     :FcgetVal();      break;
 case vzMinus    :FcvzMinus();     break;
 case odd        :Fcodd();         break;
 case OpAdd      :FcOpAdd();       break;
 case OpSub      :FcOpSub();       break;
 case OpMult     :FcOpMult();      break;
 case OpDiv      :FcOpDiv();       break;
. . .
 case pop        :Fpop();          break;
 case swap       :Fswap();         break;
 case EndOfCode  :FcEndOfCode();   break;
 case put        :Fcput();         break;
 case get        :Fcget();         break;
  }
}
```

Prozeduraufruf

- Call PrNr
  - Kellern des Zeigers (relativ) auf Variablenbereich der rufenden Prozedur aus der Prozedurtabelle.
  - Kellern des aktuellen Befehlszählers (zeigt jetzt hinter call)
  - Kellern der Prozedurnr. der rufenden Procedure
  - Ausführen des Sprunges durch Eintragen der Adresse des Befehls entryProc der aufzurufenden Prozedur aus der Prozedurtabelle in den Programmcounter.

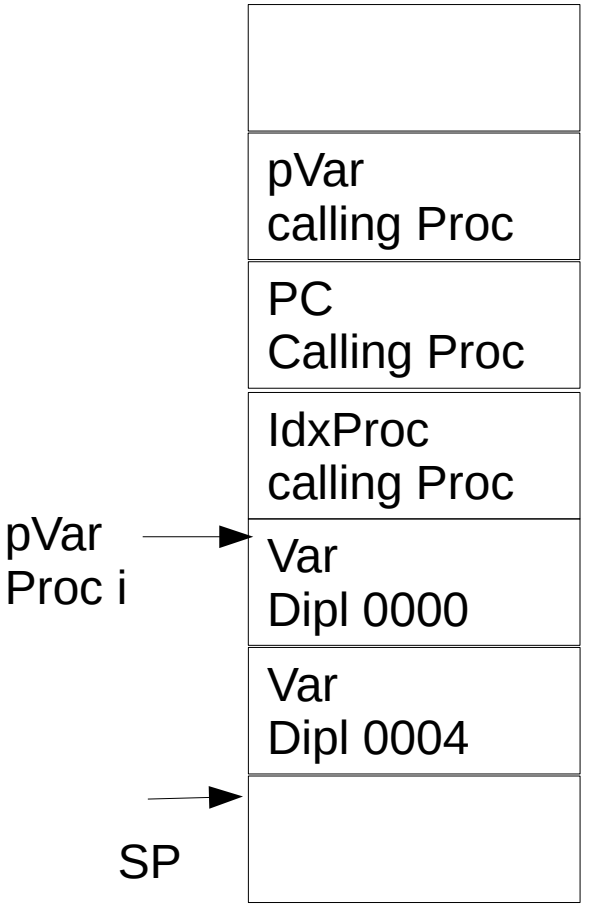


```
int Fccall(void)
{
  int ProcNr;
  ProcNr=gtSrtPar(ipc);ipc+=2;
  pushd((pInfProc[iCProc].iFrame));
  pushd(ipc);
  ipc=pInfProc[ProcNr].iCode;
  pushd(iCProc);
  return OK;
}
```

Nr. der rufenden Prozedur

```
int FcRetProc(void)
{
  isp=pInfProc[iCProc].iFrame;
  iCProc                    =popd();
  ipc                       =popd();
  pInfProc[iCProc].iFrame=popd();
  return OK;
}
```

- EntryProc
  - Setzen der aktuellen Prozedur
  - Einrichten des Variablenbereiches im Stack
  - Setzen des Zeigers auf Variablen-bereich in der Prozedurtabelle
- Die Verwaltung der Variablenbe-reiche über die Prozedurtabelle ermöglicht den rekursiven Proze-duraufruf, wobei immer der richti-ge Satz von Variablen benutzt wird.



```
/*--- Entry Procedure */
int FcEntryProc(void)
{
  short lVar;
// skip length of code
  ipc+=2;
  iCProc=gtSrtPar(ipc);ipc+=2;
  lVar  =gtSrtPar(ipc);ipc+=2;

//idex to current frame in stack
  pInfProc[iCProc].iFrame= isp;

//new stackpointer
  isp+=lVar;
  return OK;
}
```

Beispiel Rekursion

Rekusion mit globaler Variable

```
var x;
  procedure r;
  var a;

   procedure p;
   !a;

  begin
    if x<5 then
    begin
     x:=x+1;
     a:=x;
     call p;
     call r;
     call p
    end
  end;
begin
  x:=0;
  call r
end.
```

```
$ r64 rec
1
2
3
4
5
5
4
3
2
1
```

Berechnung der Fakultät

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

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

Fakultät mit Parameter

(Parameter sind in PL0 eigentlich nicht vorgesehen)

```
var x,y;
  procedure facult(a);
  begin
    if a-1>1 then call facult(a-1);
    y:=y*a
  end;
begin
  ?x;
  y:=1;
  call facult(x);
  !y;
  !"\n"
end.
```

Implementation von Prozedurparametern

- Die Werte der Übergabeparameter werden gekellert.
- Danach erst folgt der call.
- Aus der Prozedur werden die Parameter wie lokale Variable erreicht .
- Sie haben negative Relativadressen.

```
var a;
  procedure p1(x1,x2);
  begin
    !x1;
    !x2
  end;
  Procedure p2;
  !a;
begin
  ?a;
  call p1(a+1,77);
  call p2
end.
```