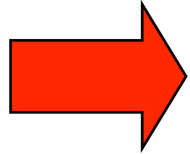
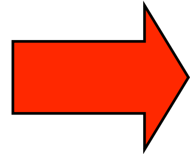
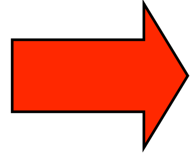
Prozessornahe Programmiertechniken

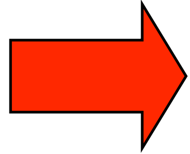
Otto-von-Guericke-Universität Magdeburg

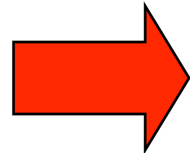
Prozessornahe Programmiertechniken


Variablen und Zuweisungen


Datenstrukturen und Zeiger


Kontrollstruktur-Muster


Positionsunabhängiger Code


Unterprogrammtechniken

Variablen und Zuweisungen

```
C Programmsegment:
..
uint8_t a, b, c;          /*Deklaration des Bedarfs an Speicherplatz  */
                          /*vom Datentyp z.B. unsigned integer, 8 Bit */
..
..
a = b + c;                /* addiere b und c und speichere das Resultat in a */
```

In imperativen Sprachen ist "a = b + c" *kein mathematischer Ausdruck*, sondern eine Vorschrift, wie mit Inhalten von Speicherplätzen umzugehen ist!

Fragen:

- wo befinden sich die Operanden ?

- welcher Operator wird angewendet?

- wo wird das Ergebnis gespeichert?

```
C Programmsegment:
..
uint8_t a, b, c;          /*Deklaration des Bedarfs an Speicherplatz   */
                          /*vom Datentyp z.B. unsigned integer, 8 Bit  */
..
..
a = b + c;                /* addiere b und c und speichere das Resultat in a */
```

a, b, und c sind *Variablen*, die im Rechner durch *Speicherplätze* repräsentiert sind, die entsprechende Werte enthalten.

Dieser Bedarf an Speicherplätzen wird durch die *Deklaration* "int a, b, c;" spezifiziert. Der Compiler wird dieses Konstrukt in Anweisungen übersetzen, die:

1. Für die Variablen a, b,und c entsprechende Speicherplätze oder Register reservieren. Durch die Deklaration der Datentypen ist die Größe der Speicherworte festgelegt.

2. Die entsprechende Operation (gemäß den Datentypen) durchführen.

3. Das Resultat auf einem spezifizierten Speicherplatz ablegen. Daher bezeichnet "=" nicht Gleichheit sondern ist die Zuweisung "←".

Variablen und Zuweisungen

a ← b + c

Ein Compiler würde für die 6809 folgende Assemblersequenz erzeugen und Reservierungen vornehmen.

```
..
..
Start          LDA var-b        /*lade den Wert in var-b in den Accumulator
               ADD var-c        /*addiere den Wert var-c (aus dem Speicher)
               STA var-a        /* speichere das Resultat auf Speicherplatz var-c
..
..
..
var-a     RMB
var-b     RMB
var-c     RMB
```

Falls man einen Operanden nach der Addition nicht mehr benötigt, kann er mit dem Resultat überschrieben werden, z.B. b ← b+c. Das spart Speicherplatz und zeigt nochmal deutlich, dass "=" ein Zuweisung bezeichnet.

Variablen und Zuweisungen

```
C-Programm
"simple_add_char.c"

static char a, b, c;
int main()
{
a=b+c;
}
```

(globale) Variablen werden im Speicher angelegt. Für ein "char" wird 1 Byte reserviert.

```
GAS LISTING simple_add_char.s

 1                              .file           "simple_add_char.c"
 2                              .version        "01.01"
 3              gcc2_compiled.:
 4              .text
 5                              .align 16
 6              .globl main
 7                              .type            main,@function
 8              main:
 9 0000 55                                      pushl %ebp
10 0001 89E5                                    movl %esp,%ebp
11 0003 A0010000                                movb b,%al
11      00
12 0008 8A150200                                movb c,%dl
12      0000
13 000e 88C1                                    movb %al,%cl
14 0010 00D1                                    addb %dl,%cl
15 0012 880D0000                                movb %cl,a
15      0000
16              .L2:
17 0018 89EC                                    movl %ebp,%esp
18 001a 5D                                      popl %ebp
19 001b C3                                      ret
20              .Lfe1:
21                              .size            main,.Lfe1-main
22                              .local          a
23                              .comm           a,1,1
24                              .local          b
25                              .comm           b,1,1
26                              .local          c
27                              .comm           c,1,1
28 001c 8D742600                .ident          "GCC: (GNU) 2.95.3 20010315 (SuSE)"

DEFINED SYMBOLS
                            *ABS*:00000000 simple_add_char.c
  simple_add_char.s:3       .text:00000000 gcc2_compiled.
  simple_add_char.s:8       .text:00000000 main
  simple_add_char.s:23       .bss:00000001 b
  simple_add_char.s:25       .bss:00000002 c
                             .bss:00000000 a

NO UNDEFINED SYMBOLS
```

Variablen und Zuweisungen

```
C-Programm
"simple_add_int.c"

static int a, b, c;
int main()
{
a=b+c;
}
```

(globale) Variablen werden im Speicher angelegt. Für ein "int" werden 4 Byte reserviert.

```
GAS LISTING simple_add_int.s

 1                              .file           "simple_add_int.c"
 2                              .version        "01.01"
 3              gcc2_compiled.:
 4              .text
 5                              .align 16
 6              .globl main
 7                              .type            main,@function
 8              main:
 9 0000 55                                      pushl %ebp
10 0001 89E5                                    movl %esp,%ebp
11 0003 A1040000                                movl b,%eax
11      00
12 0008 8B150800                                movl c,%edx
12      0000
13 000e 8D0C02                                  leal (%edx,%eax),%ecx
14 0011 890D0000                                movl %ecx,a
14      0000
15              .L2:
16 0017 89EC                                    movl %ebp,%esp
17 0019 5D                                      popl %ebp
18 001a C3                                      ret
19              .Lfe1:
20                              .size            main,.Lfe1-main
21                              .local          a
22                              .comm           a,4,4
23                              .local          b
24                              .comm           b,4,4
25                              .local          c
26                              .comm           c,4,4
27 001b 908D7426                .ident          "GCC: (GNU) 2.95.3 20010315 (SuSE)"
27      00

DEFINED SYMBOLS
                    *ABS*:00000000 simple_add_int.c
  simple_add_int.s:3      .text:00000000 gcc2_compiled.
  simple_add_int.s:8      .text:00000000 main
  simple_add_int.s:24      .bss:00000004 b
  simple_add_int.s:26      .bss:00000008 c
  simple_add_int.s:22      .bss:00000000 a

NO UNDEFINED SYMBOLS
```

Variablen und Zuweisungen

2-Adress-Befehle
z.B. 68K oder Pentium

Code Sequenz:

```
ld r2, b
ld r3, c
mv r1, r2
add r1, r3
st a, r1
```

3 Adress-Befehle
RISC-CPUs wie Sparc, MIPS, Alpha, ARM, .

Code Sequenz:

```
ld r2, b
ld r3, c
add r1, r2, r3
st a, r1
```

r2 und/oder r3 die Quellregister und r1 das Zielregister. a, b, und c sind Speicherplätze.

Fazit: Das Programmstatement "a = b + c" ist kein mathematisch oder logischer Ausdruck, sondern a, b, und c sind Container für Daten und "=" ist die Zuweisung des Resultat-Containers.Die Architektur des Rechners beeinflusst in erheblichem Maß die Umsetzung.

Zeiger und Vektoren (Pointer und Arrays)

Motivierendes Beispiel: Vertauschen von Werten in einer Liste.

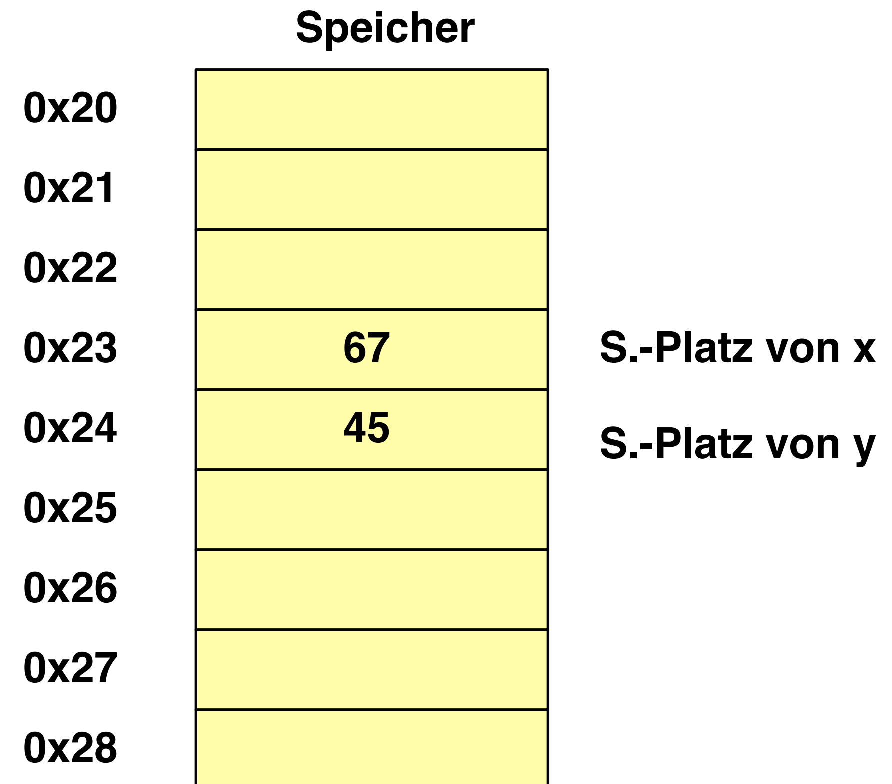
Swap-Funktion soll Inhalte beliebiger Listenplätze vertauschen.

swap(x,y); ?

Was sollen die Übergabe-Parameter x und y spezifizieren? Eine Funktion kann nur Werte (keine Adressen) übergeben.

Wie kann die Funktion die Argumente des aufrufenden Programms ändern?

1. **Lösung x und y sind globale Variablen.**
2. **Lösung das aufrufende Programm übergibt die Zeiger auf x und y.**



Zeiger und Vektoren (Pointer und Arrays)

Das Konzept des Pointers

C-Notation: `pointer_auf_x = &x /*Deklaration einer Zeigervariablen */`

Der Adress-Operator "&" liefert die Adresse einer Variablen. &x liefert daher die Speicheradresse der Variablen x und NICHT den Wert der Variablen x!

Das Statement weist diese Adresse der Zeigervariablen "pointer_auf_x" zu.

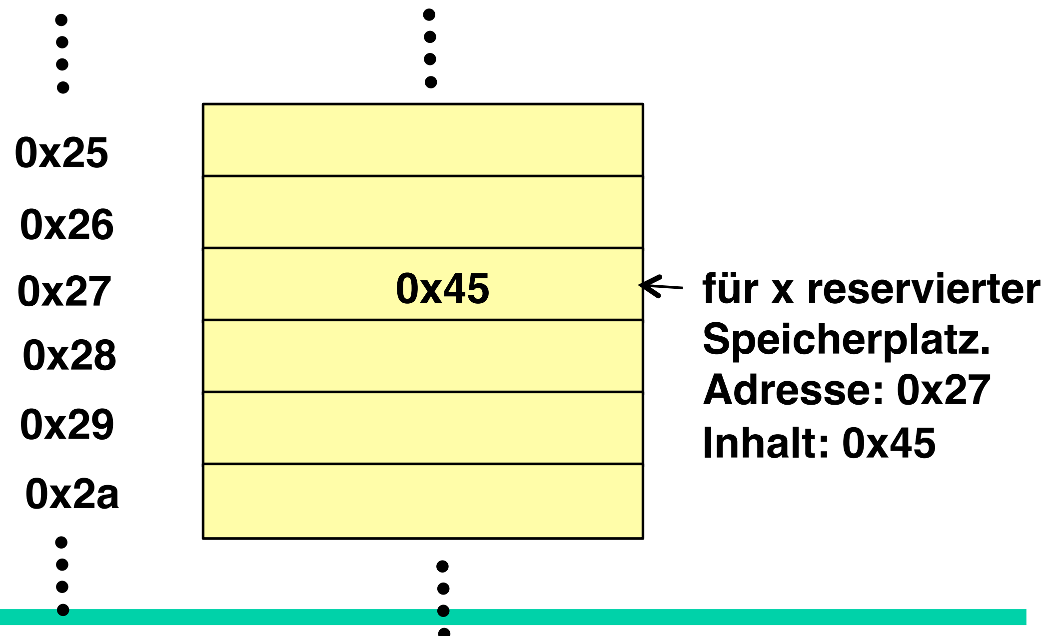
Beispiel:

Das C-Statement:

wert_von_x = x weist der Variablen wert_von_x den Wert "0x45" zu.

Das Statement:

pointer_auf_x = &x weist der Variablen pointer_auf_x den Wert 0x27 zu.



Zeiger und Vektoren (Pointer und Arrays)

**Frage: Wenn ich die Adresse &x einer Variablen habe,
wie greife ich dann auf ihren Wert zu?**

Verweis-Operator "`*`":

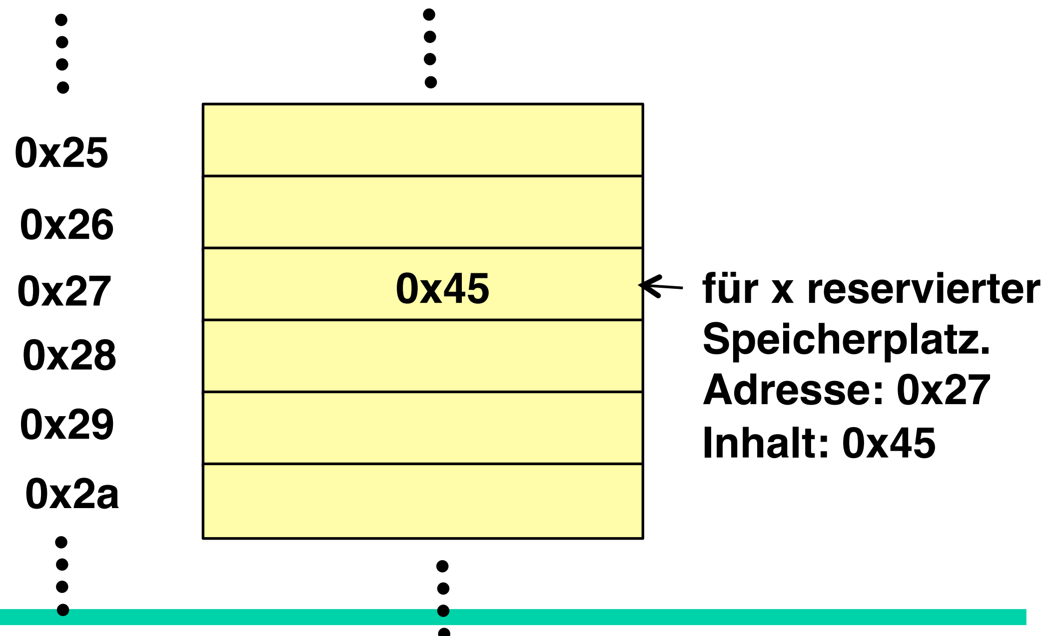
Mit `y= *pointer_auf_x` wird y der Wert auf den "`pointer_auf_x`" zeigt, zugewiesen.

Beispiel:

Das C-Statement:

```
pointer_auf_x   = &x
y = *pointer_auf_x
```

ist äquivalent zu `y = x`



Zeiger und Vektoren (Pointer und Arrays)

Motivierendes Beispiel: Vertauschen von Werten in einer Liste.

```
swap (&a, &b);

.
.
.

swap(px, py)
int *px, *py;
{
     int temp;
     temp = *px;
     *px = *py;
     *py = temp;
}
```

als Pointer definiert

Speicher

Adresse	Inhalt	
0x20		
0x21		
0x22		
0x23	67	S.-Platz von x
0x24	45	S.-Platz von y
0x25		
0x26		
0x27		
0x28		

Zeiger und Vektoren (Pointer und Arrays)

int a[10]

(Intel IA-32!)

	0	1	2	3	
x+0	a[1]	a[1]	a[1]	a[1]	x+3
x+4	a[2]	a[2]	a[2]	a[2]	x+7
x+8	a[3]	a[3]	a[3]	a[3]	x+11
x+12	a[4]	a[4]	a[4]	a[4]	x+15
x+16	a[5]	a[5]	a[5]	a[5]	x+19
x+20	a[6]	a[6]	a[6]	a[6]	x+23
x+24	a[7]	a[7]	a[7]	a[7]	x+27
x+28	a[8]	a[8]	a[8]	a[8]	x+31
x+32	a[9]	a[9]	a[9]	a[9]	x+35
x+36	a[10]	a[10]	a[10]	a[10]	x+39

Zeiger und Vektoren (Pointer und Arrays)

Umsetzung durch die Rechnerarchitektur:

	0	1	2	3	
x+0	a[1]	a[1]	a[1]	a[1]	x+3
x+4	a[2]	a[2]	a[2]	a[2]	x+7
x+8	a[3]	a[3]	a[3]	a[3]	x+11
x+12	a[4]	a[4]	a[4]	a[4]	x+15
x+16	a[5]	a[5]	a[5]	a[5]	x+19
x+20	a[6]	a[6]	a[6]	a[6]	x+23
x+24	a[7]	a[7]	a[7]	a[7]	x+27
x+28	a[8]	a[8]	a[8]	a[8]	x+31
x+32	a[9]	a[9]	a[9]	a[9]	x+35
x+36	a[10]	a[10]	a[10]	a[10]	x+39

Indexregister oder Speicherwort (bei indirekter Adressierung)

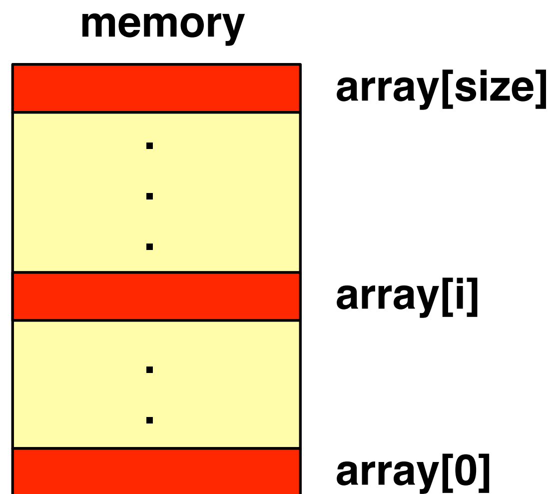
Basisadresse

Adressierung über Basis + Offset

Bei mehrdimensionalen Arrays kann die Adressierung über mehrere Indexregister, feste Offsets usw. erfolgen.

Zeiger vs. Vektoren (Pointer vs. Arrays)

Programm zum Beschreiben des Arrays mit "0".



Version 1: Array und Index

```
clear(int array[], int size)
{
   int i;
   for (i=0; i < size; i += 1)
        array[i] = 0;
}
```

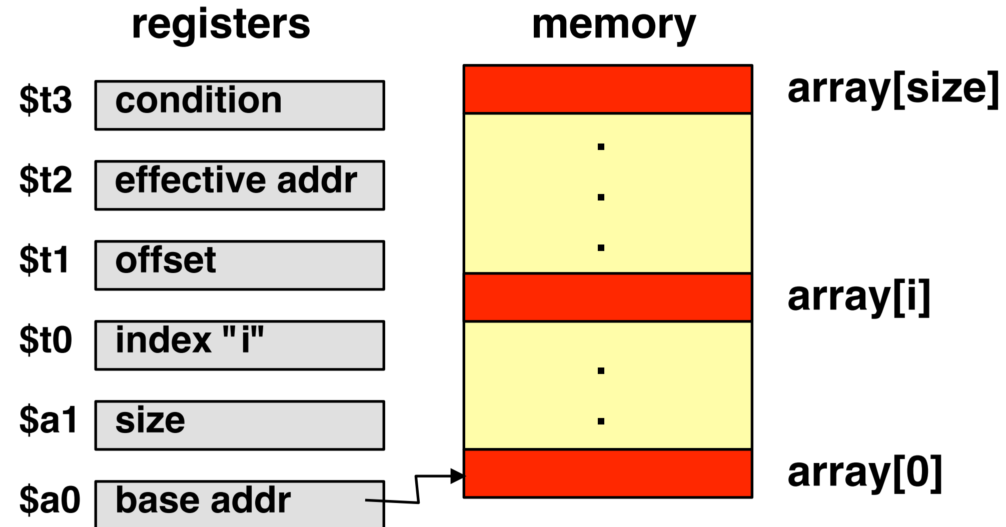
Version 2: Array und Pointer

```
clear(int *array[], int size)
{
   int *p;
   for (p = &array[0]; p < &array[size];
         p = p+1)
        *p = 0;
}
```

Zeiger vs. Vektoren (Pointer vs. Arrays)

1. Version:
Speicheradresse wird innerhalb der Schleife durch Addition von Basis+Offset berechnet.

Schritte:
1. Berechne Index
2. Skaliere Index
3. Addiere Basis
4. Greife auf Speierwort zu



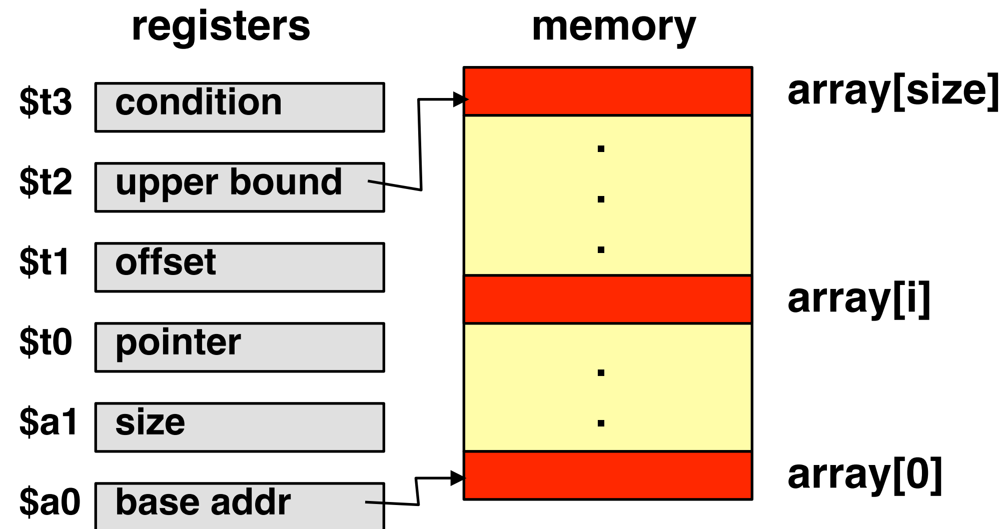

```
        mv    $t0, $zero        /* t0 ← 0, setzte Index auf "0"
loop    sll   $t1, $t0, 2       /* t1 ← t0 * 4, skaliere mit 4, d.h. umrechnen in Byte-Adresse
        add   $t2, $a0, $t1     /* t2 ← a0 + t1, addiere Offset zur Basisadresse, Resultat nach t2
        sw    $zero, 0 ($t2)    /* speichere "zero" auf Adresse, die in t2 steht mit Offset "0".
        addi  $t0, $t0, 1       /* t0 ← t0 + 1, inkrementiere "index"
        slt   $t3, $t0, $a1     /* vergleiche mit"size", if index < size then $t3← 1
        bne   $t3, $zero, loop  /* if t3≠0 then goto loop, else continue with next instruction
        ...
        ...
```

Zeiger vs. Vektoren (Pointer vs. Arrays)

2. Version:

Pointer enthält direkt die Adresse des aktuellen Elements und wird direkt manipuliert.

Skalierung wird nicht in der Schleife durchgeführt.




```
        mv    $t0, $a0          /* t0 ← Setze Pointer auf Basisadresse
        sll   $t1, $a1, 2       /* t1 ← size * 4 (max. byte offset)
        add   $t2, $a0, $t1     /* t2 ← base addr + max offset (obere Grenze)
loop    sw    $zero, 0($t0)     /* [t0] ← 0
        addi  $t0, $t0, 4       /* t0 ← t0 + 4, addiere Byte-Offset zum Pointer
        slt   $t3, $t0, $t2     /* vergleiche obere Grenze mit Pointer
        bne   $t3, $zero, loop  /* if t0 < t2 then goto loop, else continue with next instruction
        ...
        ...
```

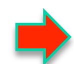
Structures

Speicherlayout

```
struct my_date{
int day;
int hoj;
long ssjcb;
char month;
int year;
long dsbb;
}
```

(Intel IA-32!)

	0	1	2	3
x+0	day	day	day	day
x+4	hoj	hoj	hoj	hoj
x+8	ssjcb	ssjcb	ssjcb	ssjcb
x+12	ssjcb	ssjcb	ssjcb	ssjcb
x+16				month
x+20	year	year	year	year
x+24	dsbb	dsbb	dsbb	dsbb
x+28	dsbb	dsbb	dsbb	dsbb

 Strukturen werden im Speicher angelegt

Die Elemente werden meist auf Wortgrenzen angeordnet (alignment)

Der Compiler kann mit festem Offset die Elemente der Struktur adressieren

Kontrollstrukturen

Kontrollstruktur-Muster:

- IF . . . THEN . . .ELSE
- FOR   K= I TO N DO
- WHILE . . . DO
- REPEAT . . . UNTIL
- CASE OF . . .

Muster für Kontrollstrukturen

IF <Bedingung> THEN <Aktion>

Assembler Umsetzung:

```
CMP    a, b          a: Register A,B,D,S,U,X,Y    b:Speicheradresse
Bxx    EXIT          Branch on Condition
       •
       •             Aktion
       •
EXIT   Continue
```

Wahl der Sprungbedingung

IF <Bedingung> THEN <Aktion>

```
CMP    a, b        a: Register A,B,D,S,U,X,Y    b:Speicheradresse
Bxx    EXIT        Branch on Condition FALSE
       •
       •           Aktion
       •
EXIT   Continue
```

Bedingung	mit Vorz.	ohne Vorz.	Branch Mnemonic Bxx	
a = b	x	x	BNE	signed values
a ≠ b	x	x	BEQ	
a > b	x		BLE	
a ≥ b	x		BLT	
a < b	x		BGE	
a ≤ b	x		BGT	
a > b		x	BLS	unsigned values
a ≥ b		x	BLO	
a < b		x	BHS	
a ≤ b		x	BHI	

Muster für Kontrollstrukturen

IF a<b THEN aktion1 ELSE aktion2

Assembler Umsetzung:

```
            CMP    a,b
            BGE    aktion2
             •
             •            Ausführung
             •            von aktion1
            BRA    EXIT
aktion2      •
             •            Ausführung
             •            von aktion2
  EXIT
```

Muster für Kontrollstrukturen

WHILE a>b DO aktion

Assembler Umsetzung:

```
REPEAT   CMP   a,b
         BLE   EXIT
          •
          •              Ausführung
          •              von aktion
         BRA   REPEAT
EXIT
```

Alternative Umsetzung:

```
          •
          •
         BRA   COMP
REPEAT
          •
          •              Ausführung
          •              von aktion
COMP     CMP   a,b
         BGT   REPEAT
```

Muster für Kontrollstrukturen

REPEAT aktion UNTIL a=b

Assembler Umsetzung:

```
REPEAT
                .
                .                    Ausführung
            LDB     a                von aktion

            CMPB    b
            BNE     REPEAT
EXIT
```

```
            LDB     a
REPEAT
                .
                .                    Ausführung
                                     von aktion

            CMPB    b
            BNE     REPEAT
EXIT
```

Muster für Kontrollstrukturen

FOR K = I TO J DO aktion

Assembler Umsetzung:

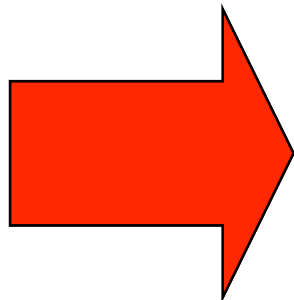
```
            LDB     #I
REPEAT
             .
             .              Ausführung
             .              von aktion
            INCB
            CMPB    #(J+1)
            BNE     REPEAT
EXIT
```

FOR k=i TO j DO body

Fragen??

darf i=j sein?   wird die Schleife dann ein Mal oder kein Mal durchlaufen?
darf i>j sein?   wird ein Wert mit Vorzeichen richtig behandelt?
darf i=j=0 sein?

Darf jeder Programmierer seine eigene FOR-Schleifen-Semantik programmieren?
Wie ist eine FOR-Schleife in einer Hochsprache definiert?



PASCAL
ISO/IEC 7185, Second Edition vom 15.10.90
Revision of ISO 7185 von 1983

PASCAL Definition der FOR-Schleife

for v:= e1 to e2 do body

shall be equivalent to

```
begin
temp1 := e1;
temp2 := e2;
if temp1 <= temp2
    begin
    v := temp1;
    body;
    while v <> temp2 do        /* v≠ temp2
        begin
        v:= succ(v);           /* v :=v+1
        body
        end
     end
end
```

for v:= e1 downto e2 do body

shall be equivalent to

```
begin
temp1 := e1;
temp2 := e2;
if temp1 >= temp2
    begin
    v := temp1;
    body;
    while v <> temp2 do        /* v≠ temp2
        begin
        v:= pred(v);           /*  v :=v-1
        body
        end
     end
end
```

Assembler-Realisierung der Schleife: FOR k= i TO k DO body

```
Test      LDA     tmp_1             (tmp_1 := i) Überprüfen der Gültigkeit der Schleifenparam.
          CMPA    tmp_2             (tmp_2 := k)
          BHI     invalid           Unsigned
//        (BGT    invalid)          Signed

//        (LDA    tmp_1)            im vorliegenden Fall liegt tmp_1 schon in A

loop      CMPA    tmp_2
          BEQ     exit
          ADDA    incv              bzw. INCA, wenn um „1“ erhöht wird
          •
          •
          •
          BRA     loop
exit      •
          •

tmp_1     RMB     1                 Schleifenparam. werden dyn. berechnet
tmp_2     RMB     1
incv      RMB     1

// tmp_1  FCB     i                 Schleifenparam. werden statisch festgelegt
// tmp_2  FCB     k
// incv   FCB     increment constant
```

Kontrollstrukturen Zusammenfassung:

IF a<b THEN aktion1 ELSE aktion2

```
        CMP     a,b
        BGE     aktion2
         •
         •                 Ausführung
         •                 von aktion1
        BRA     EXIT
aktion2  •
         •                 Ausführung
         •                 von aktion2
EXIT
```

WHILE a>b DO aktion

```
REPEAT          CMP     a,b
        BLE     EXIT
         •
         •                 Ausführung
         •                 von aktion
        BRA     REPEAT
EXIT
```

FOR K = I TO J DO aktion

```
        LDB     #i
REPEAT
         •
         •                 Ausführung
         •                 von aktion
        INCB
        CMPB    #(j+1)
        BNE     REPEAT
EXIT
```

REPEAT aktion UNTIL a=b

```
REPEAT
         •
         •                 Ausführung
         •                 von aktion
        CMP     a,b
        BNE     REPEAT
EXIT
```

Kontrollstrukturen: Case (Switch) Statement

CASE k (k ≤ N)

I =0	aktion0
I =1	aktion1
I =2	aktion2
I =3	aktion3
	.
	.
I=N	aktionN

Assembler-Repräsentation

```
aktion0  FDB    hh
                ll
aktion1  FDB    hh
                ll
aktion2  FDB    hh
                ll
aktion3  FDB    hh
                ll
```

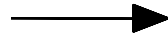
B enthält den CASE Index : k

```
          CMPB   #N           gültige Eingabe ?
          BHI    EXEPTION
          ASLB                Berechng .d. Offsets in die Tabelle (ein Eintrag:2Byte)
          LDX    #aktion0
          ABX                 Addiere Offset in B zu X
          JMP    [ ,X]        Springe indirekt zum Anfang des Progr.-Teils "aktion k"
EXEPTION
```

Kontrollstrukturen: Case (Switch) Statement

CASE k (k ≤ N)

I =0	aktion0
I =1	aktion1
I =2	aktion2
I =3	aktion3
	.
	.
I =N	aktionN



Assembler-Repräsentation

```
aktion0  FDB    hh
                ll
aktion1  FDB    hh
                ll
aktion2  FDB    hh
                ll
aktion3  FDB    hh
                ll
```

B enthält den CASE Index : x

```
          CMPB    #N              gültige Eingabe ?
          BHI     EXEPTION
          ASLB                    Berechng .d. Offsets in die Tabelle (ein Eintrag:2Byte)
          LEAX    aktion0 ,PCR    Lade Indexregister mit Anfang d. Tabelle relativ zum PC
          JMP      [B  ,X]        Springe indirekt zum Anfang des Progr.-Teils "aktion3"
                                  (B wird Acc.Offset  automatisch zu X addiert)
EXEPTION
```

Hier wird die Tabelle relativ zum Programmzähler adressiert. Außerdem wird beim Sprung der automatische Accumulator Index ausgenutzt.

Kontrollstrukturen Zusammenfassung:

IF a<b THEN aktion1 ELSE aktion2

```
            CMP     a,b
            BGE     aktion2
             •
             •              Ausführung
             •              von aktion1
            BRA     EXIT
aktion2      •
             •              Ausführung
             •              von aktion2
EXIT
```

WHILE a>b DO aktion

```
REPEAT              CMP     a,b
            BLE     EXIT
             •
             •              Ausführung
             •              von aktion
            BRA     REPEAT
EXIT
```

FOR K = I TO J DO aktion

```
            LDB     #i
REPEAT
             •
             •              Ausführung
             •              von aktion
            INCB
            CMPB    #(j+1)
            BNE     REPEAT
EXIT
```

REPEAT aktion UNTIL a=b

```
REPEAT
             •
             •              Ausführung
             •              von aktion
            CMP     a,b
            BNE     REPEAT
EXIT
```

Prozessornahe Programmiertechniken

Positionsunabhängiger Code:

- Relative Adressierung
  - Sprünge
  - Programmzähler-relative Adressierung
- Dynamische Zuordnung von temporärem Speicher durch Nutzung des System Stacks

Positionsunabhängiger Code

Positionsunabhängiger Code:
- **Ziele**
- **Mechanismen**

Ziele und Vorteile positionsunabhängigen Codes:

★ **Freie Verschiebbarkeit im Speicher**

★ **Nutzung von Objekt-Code Bibliotheken**

★ **Unabhängige Assemblierung**

Positionsunabhängiger Code

Positionsunabhängiger Code:
- **Ziele**
- **Mechanismen**

Mechanismen zur Unterstützung positionsunabhängigen Codes:

- **Relative Sprünge**
- **Adressierung von Speicher durch “Konstante Distanz“ vom Programmzähler**
- **Nutzung des Hardware-Stacks als temporären Speicher**

Die Instruktion : LEA (Register) - Load Effective Address

- unterstützt arithmetische Operationen auf den Adreßregistern X,Y,S,U

LEAX, LEAY, LEAS, LEAU lädt nicht den Operanden, auf den die Adresse zeigt, sondern die Adresse selbst !

Beisp.:

```
•    LEAX     1,X       Increment X
•    LEAY    -1,Y       Decrement Y
•    LEAU  $ABCD,U      Addiere $ABCD zum U-SP
•    LEAX     0,PC      äqu. zu TFR    PC,X
```

- unterstützt positionsunabhängigen Code

Beisp.:

```
Addr.   OPCODE      OP-Addr.  Mnemonic

0100    30    8D    0109      START   LEAX   TABLE ,PCR
0104    A6    80              LOOP    LDA    ,X+
0106
                                        .
                                        .

020D                          Table   FCC    /table of whatever/
```

Der Anfang von "Table" hat einen Versatz von $10D vom START.
Der Assembler berechnet die Distanz $109, da er den Versatz vom um 4 incrementierten PC berücksichtigt. Durch die Asemblerdirektive "PCR" wird der Befehl "LEAX TABLE,PCR" vom Assembler in "LEAX offset,PC "d.h. 30 8D 01 09 übersetzt.

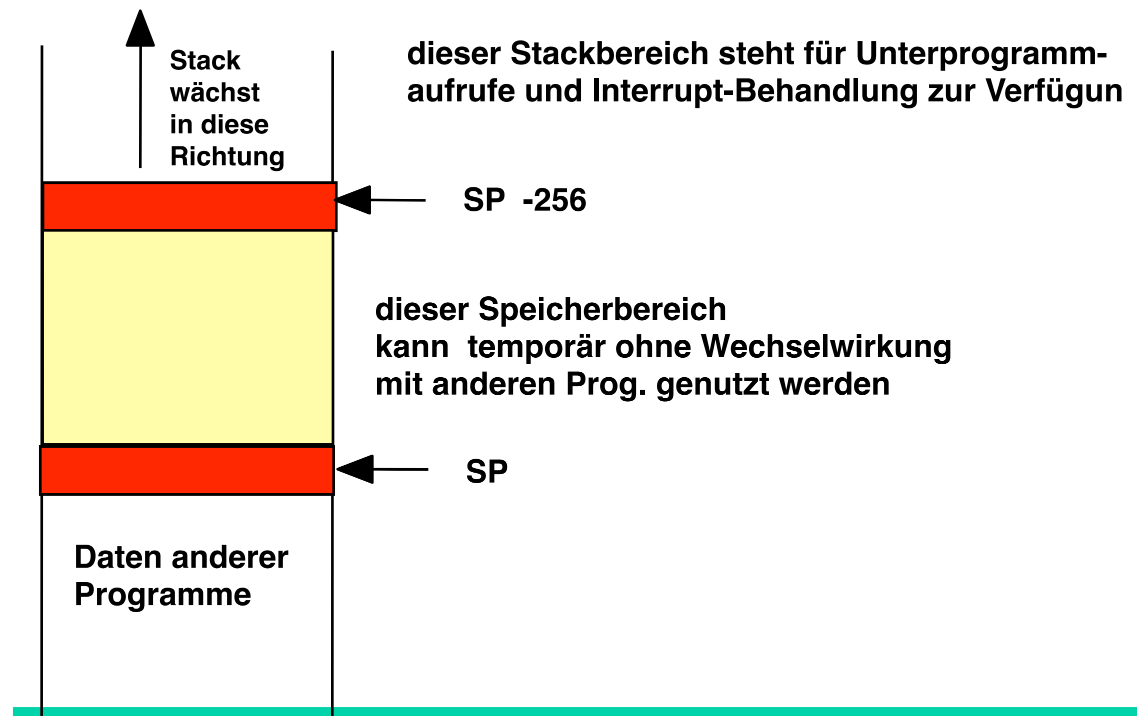
Nutzung des System Stacks als temporärer Speicher

Statische Zuordnung: (static allocation)	**Speicher wird fest reserviert, z.B. durch die Assemblerdirektiven : RMB, FCC, FCB, etc. Dieser Speicher kann während der Programmlaufzeit nicht (ohne Gefahr) anderweitig genutzt werden. Auch wenn das entpr. Programm nicht aktiv ist, ist es gefährlich, diesen Speicherbereich zu benutzen, da ein Aktivieren des Programms die dort abgelegten Daten anderer Programme überschreibt.**
Dyn. Zuordnung: (dynamic allocation)	**Speicher wird während der Laufzeit genutzt und dann wieder freigegeben. Die Nutzung zertört keine Daten von anderen Programmen.**

Stack als temporärer, dyn. zugeordneter Speicher:

```
LEAS    -256,S    reserviert den Speicher

LEAS     256,S    gibt den Speicher frei
```



Prozessornahe Programmiertechniken

Unterprogrammtechniken:

- Unterprogrammaufruf
- Abspeichern des aktuellen Programmstatus
- Parameter Übertragung
- Rekursive Aufrufe (re-entrant Code)

Unterprogrammtechniken

- Generell
- Unterprogrammaufruf
- Abspeichern des aktuellen Programmstatus
- Parameter Übertragung
- Rekursive Aufrufe (reentrant Code)

Unterprogramme, Subroutinen, Funktionen

Ziele:

- Wiederverwendung von Programmen oder Programmstücken
- Reduzierung des Speicherbedarfs durch Code-Sharing
- Modulare Strukturierung nach funktionalen Gesichtspunkten
- Verbesserung der Testbarkeit
- Unterprogrammbibliotheken

Architektur- Unterstützung beim Unterprogramm-Aufruf:

- **Automatische Speicherung der Rücksprungadresse**
- **Mögliche Speicherung von Teilen oder des gesamten Prozessorstatus (Register)**
- **Unterstützung bei der Isolierung von aufrufendem und aufgerufenen Programm**
- **Unterstützung bei der Parameterübergabe**
- **Automatische Rückkehr an die entprechende Stelle im aufrufenden Programm**
- **Unterstützung rekursiver Unterprogrammaufrufe**

Generelle Form:

Haupt-Programm

```
        .
        .
        .
        JSR     FUNCT       Unterprogrammaufruf (PC wird automatisch gesp.)
        next_Instr          Rücksprungadresse
        .
        .
```

Unter-Programm

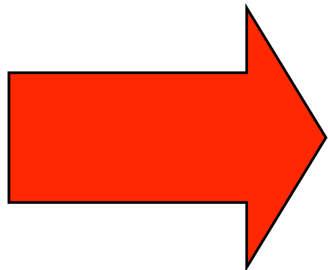
```
FUNCT   PSHS                Save Registers
        RegLst              specified in the Postbyte of PSHS Instruction
        .
        .
        PULS                Restore Registers
        RegLst              specified in the Postbyte of PULS Instruction
        RTS                 Return from Subroutine to next_Instr
```

Unterprogrammtechniken

- Unterprogrammaufruf
- Abspeichern des aktuellen Programmstatus
- Parameter Übertragung (Parameter Passing)
- Rekursive Aufrufe (reentrant Code)

Abspeichern des Prozessorzustands

Abspeichern lokaler Variablen



Der Stack ist die bevorzugte Speicherstruktur zur “Rettung“ des Programmstatus, da er Positionsunabhängigkeit und Schachtelung unterstützt

Unterprogrammtechniken

- Unterprogrammaufruf
- Abspeichern des aktuellen Programmstatus
- Parameter Übertragung (Parameter Passing)
- Rekursive Aufrufe (reentrant Code)

- **Grundsätzliche Möglichkeiten der Parameter Übertragung**
  - Call-by-value (einzige Option für C)
  - Call-by-name

- **Speicherstruktur für die Übertragung von Parametern:**
  - Register
  - Parameter in einem gemeinsamen Speicherbereich
  - Parameter Liste nach dem Unterprogrammaufruf
  - Stack

Problem: Positionsunabhängigkeit, Schachtelung von Unterprogrammen (rekursive UP)

Unterprogrammtechniken

Ausführung einer Mehrbyte-Addition in einem Unterprogramm:
Parameterübergabe: Zeiger in Registern, statisch, implizites Wissen über gemeinsam benutzten Speicherbereich

Adresse	Wert	
0048 :	C3	Op.1
0049 :	A7	
004A :	5B	
004B :	2F	
004C :	B8	Op.2
004D :	35	
004E :	DF	
004F :	14	
0050 :	7B	Erg.
0051 :	DD	
0052 :	3A	
0053 :	44	

Organisation der Daten im Speicher

Initialisierung

```
        LDX     #$48
        LDY     #$4C
        LDU     #$50
        LDB     #4
```

Ausführung

```
MPADD   ANDCC   #%11111110
ADBYTE  LDA     ,X+
        ADCA    ,Y+
        STA     ,U+
        DECB
        BNE     ADBYTE
        RTS
```

UP

Ausführung einer Mehrbyte-Addition in einem Unterprogramm:
Parameterübergabe: Zeiger in Registern (statisch)

Adresse	Inhalt	
0048 :	C3	Op.1
0049 :	A7	
004A :	5B	
004B :	2F	
004C :	B8	Op.2
004D :	35	
004E :	DF	
004F :	14	
0050 :	7B	Erg.
0051 :	DD	
0052 :	3A	
0053 :	44	

Organisation der Daten im Speicher

```
Summand_1   EQU $48
Summand_2   EQU $4C
Summe       EQU $50
Anzahl_Bytes EQU  4
    .
    .
            LDX     Summand_1
            LDY     Summand_2
            LDU     Summe
            LDB     Anzahl_Bytes
            JSR     MPADD
    .
    .
MPADD       ANDCC   #%11111110
ADBYTE      LDA     ,X+
            ADCA    ,Y+
            STA     ,U+
            DECB
            BNE     ADBYTE
            RTS
```

Initialisierung: LDX … JSR MPADD

Ausführung: MPADD … RTS (UP)

Ausführung einer Mehrbyte-Addition in einem Unterprogramm: Parameterübergabe: Zeiger in Registern (dynamisch)

Adresse	Inhalt	
0048 :	C3	Op.1
0049 :	A7	Op.1
004A :	5B	Op.1
004B :	2F	Op.1
004C :	B8	Op.2
004D :	35	Op.2
004E :	DF	Op.2
004F :	14	Op.2
0050 :	7B	Erg.
0051 :	DD	Erg.
0052 :	3A	Erg.
0053 :	44	Erg.

Organisation der Daten im Speicher

Initialisierung

```
        LDX     Summand_1
        LDY     Summand_2
        LDU     Summe
        LDB     Anzahl_Bytes
        JSR     MPADD
         .
         .
Summand_1       RMB     2
Summand_2       RMB     2
Summe           RMB     2
```

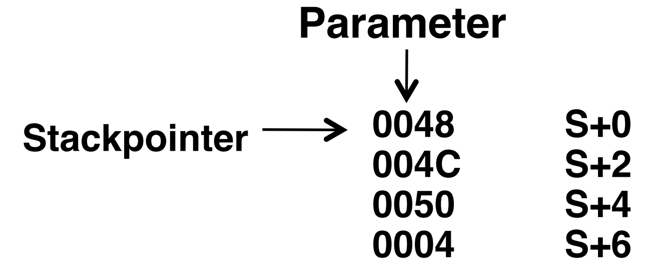
Ausführung

```
MPADD           ANDCC   #%11111110
ADBYTE          LDA     ,X+
                ADCA    ,Y+
                STA     ,U+
                DECB
                BNE     ADBYTE
                RTS
```

UP

Ausführung einer Mehrbyte-Addition in einem Unterprogramm:

Parameterübergabe auf dem Stack (dynamisch)



Adresse	Inhalt	
0048 :	C3	Op.1
0049 :	A7	
004A :	5B	
004B :	2F	
004C :	B8	Op.2
004D :	35	
004E :	DF	
004F :	14	
0050 :	7B	Erg.
0051 :	DD	
0052 :	3A	
0053 :	44	

Organisation der Daten im Speicher

Initialisierung

Ausführung

```
MPADD   LEAX    0 ,S
        LEAY    2 ,S
        LEAU    4 ,S
        LDB     6 ,S

        ANDCC   #%11111110
ADBYTE  LDA     ,X+
        ADCA    ,Y+
        STA     ,U+
        DECB
        BNE     ADBYTE
        RTS
```

UP

v: Versatz zum Stackpointer

Unterprogrammtechniken

- Unterprogrammaufruf
- Abspeichern des aktuellen Programmstatus
- Parameter Übertragung (Parameter Passing)
- Rekursive Aufrufe (re-entrant Code)

Schachtelung von Unterprogrammen erfordert:

- **Abspeichern des Programm-Status und der Rücksprungadressen in geordneter Weise**
- **Dynamische Zuordnung von temporärem Speicherplatz**
- **Übergabe der Parameter auf dem Stack**

Stack-Frame

Evaluations Stack Bereich

SP

Register Status beim Aufruf

temporäre Daten werden durch negativen Versatz zum FP adressiert

temporärer dynamischer Speicherbereich

aktueller Stack-Frame

FP

letzter FP

PC

Parameter werden durch positiven Versatz zum FP adressiert

Parameter Übergabe Bereich

Vorhergehender Stack-Frame

SP: Stack-Pointer
FP: Frame-Pointer

Beispiel für den Aufbau eines Prozedur-Rahmens (Stack-Frame)

```
#include "stdio.h"

int main()
{
int a, b, c;
b=3;
c=5;
a=b+c;
printf("%d\n",a);
}
```

```
GAS LISTING simple_add_int.s
...
...
 11                    main:
Vorbereiten des Stack-frames:
 12 0000 55                        pushl %ebp
 13 0001 89E5                      movl %esp,%ebp
 14 0003 83EC18                    subl $24,%esp

Bereitstellen der Parameter und Ausführen der Operation:
 15 0006 C745F803 000000           movl $3,-8(%ebp)
 16 000d C745F405 000000           movl $5,-12(%ebp)
 17 0014 8B45F8                    movl -8(%ebp),%eax
 18 0017 8B55F4                    movl -12(%ebp),%edx
 19 001a 8D0C02                    leal (%edx,%eax),%ecx

Bereitstellen der Parameter für "printf":
 20 001d 894DFC                    movl %ecx,-4(%ebp)
 21 0020 83C4F8                    addl $-8,%esp
 22 0023 8B45FC                    movl -4(%ebp),%eax
 23 0026 50                        pushl %eax
 24 0027 68000000 00               pushl $.LC0
 25 002c E8FCFFFF FF               call printf
 26 0031 83C410                    addl $16,%esp

Wiederherstellen des ursprünglichen Stack-frames:
 27                    .L2:
 28 0034 89EC                      movl %ebp,%esp
 29 0036 5D                        popl %ebp
 30 0037 C3                        ret
```

Unterprogrammtechniken

Beispiel: Berechnung der Fakultätsfunktion: $n!$ für $n \leq 5$

Diese Einschränkung wurde gemacht, weil bei größeren n eine aufwendige Mehrbyte-Multiplikation erforderlich wäre, was hier nicht Gegenstand des Problems ist.

Def. : $0! = 1,$
$n! = n \cdot (n-1)!$

Funktion FACT ist rekursiv definiert:

FACT(0) =1,
FACT(N) = N FACT(N-1)

Unterprogrammtechniken

Rekursives C - Programm zur Berechnung der Fakultät

```
main ()
{
    printf ("die Fakultät von 5 ist: %d\n", fact (5));
}

int fact (int n)
{
    if (n < 1)
       return (1);

    else
      return (n * fact (n-1));
}
```

Rekursives Assembler - Programm zur Berechnung der Fakultätsfunktion

N: Parameter der Funktion FACT (N) S
F: Funktionswert S-1

```
        LEAX   ,S       Speichern des Stackpointers in Register X ( äquivalent zu : TFR   S,X )
        LEAS   1,S      Zuordnung eines temporären Speicherplatzes F  auf dem Stack
        LDA    #1       Initialisiere F mit 1
        STA    1 ,X
        LDA    ,X       Lade den Parameter N vom Stack
        INCA            Erhöhe um 1, um korrekte Abbruchbedingung zu erzeugen
        BSR    FACT     Springe zum Unterprogramm FACT
        LDA    1 ,X     “Retten“ des Ergebnisses in A
        LEAS   ,X       Freigeben des temporären Speicherplatzes auf dem Stack
END     • • •

FACT    DECA            Decrementiere N
        BLE    RET      IF (N-1) ≤ 0 THEN RETURN
        PSHS   A        Speichere das aktuelle N des Unterprogramms auf dem Stack
        BSR    FACT     Rufe FACT zur Berechnung des nächsten N auf
        PULS   B        Lade ein N vom Stack nach B
        LDA    1 ,X     Lade das bisherige Produkt von F nach A
        MUL             A•B
        STB    1 ,X     Speichere das Produkt (LSByte von Acc D) in F
RET     RTS
```

Unterprogrammtechniken

	Stack	
SP →	PC (5)	
	N = 1	
	PC (4)	
	N = 2	
	PC (3)	
	N = 3	
	PC (2)	
	N = 4	
	PC (1)	
	N = 5	
	PC (0)	
	1	TEMP
X →	5	Parameter N

```
        LEAX    ,S
        LEAS    1,S
        LDA     #1
        STA     1,X
        LDA     ,X
        INCA
        BSR     FACT
        LDA     1 ,X
        LEAS    ,X
END     • • •

FACT    DECA
        BLE     RET
        PSHS    A
        BSR     FACT
        PULS    B
        LDA     1 ,X
        MUL
        STB     1 ,X
RET     RTS
```

Unterprogrammtechniken

```
        LEAX    ,S
        LEAS    1,S
        LDA     #1
        STA     1,X
        LDA     ,X
        INCA
        BSR     FACT
        LDA     1 ,X
        LEAS    ,X
END     • • •


FACT    DECA
        BLE     RET
        PSHS    A
        BSR     FACT
        PULS    B
        LDA     1 ,X
        MUL
        STB     1 ,X
RET     RTS
```

LINK — Link and Allocate (M68000 Family) — LINK

Operation: SP – 4 → SP; An → (SP); SP → An; SP + d_n → SP

Assembler Syntax: LINK An, # < displacement >

Attributes: Size = (Word, Long*)

*MC68020, MC68030, MC68040 and CPU32 only.

Description: Pushes the contents of the specified address register onto the stack. Then loads the updated stack pointer into the address register. Finally, adds the displacement value to the stack pointer. For word-size operation, the displacement is the sign-extended word following the operation word. For long size operation, the displacement is the long word following the operation word. The address register occupies one long word on the stack. The user should specify a negative displacement in order to allocate stack area.

Condition Codes:

Not affected.

Instruction Format:

WORD

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	0	REGISTER		
WORD DISPLACEMENT															

Instruction Format:

LONG

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	REGISTER		
HIGH-ORDER DISPLACEMENT															
LOW-ORDER DISPLACEMENT															

UNLK **Unlink (M68000 Family)** UNLK

Operation: An $\rightarrow$ SP; (SP) $\rightarrow$ An; SP + 4 $\rightarrow$ SP

Assembler Syntax: UNLK An

Attributes: Unsized

Description: Loads the stack pointer from the specified address register, then loads the address register with the long word pulled from the top of the stack.

Condition Codes:

Not affected.

Instruction Format:

15	14	13	12	11	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	0	1	1	REGISTER		

Instruction Field:

Register field—Specifies the address register for the instruction.

Motorola 68K Architektur: Stack Verwaltung bei Unterprogrammsprüngen

link: Link and Allocate

SP ← SP- 4	Dekrementieren des SP
SP ← An	Speichern des alten FP
An ← SP	Inhalt des SP wird neuer FP
SP ← SP + d	Allokation von Speicher d: negativer Versatz

MC 6809 Realisierung

```
PSHS      X
LEAX     ,S
LEAS   -d, S

PSHS    Register Liste
```

ulnk: Unlink

SP ← An	FP wird neuer SP
An ← [SP]	alter FP wird neuer FP
SP ← SP + 4	SP zeigt auf Adr. vor Link

MC 6809 Realisierung

```
PULS      Register Liste


TFR       X, S
LDX         , S
LEAS      2 , S
RTS
```

Lernziele

- Verständnis für die Unterstützung der Systemprogrammierung durch die Prozessorarchitektur.
- Grundlegende Daten- und Kontrollstrukturen und ihre Abbildung auf Assemblerebene:
  - Zuweisung, Arrays und Structures
  - Kontrollstrukturen
- Unterstützung positionsunabhängiger Adressierungsmethoden
- Unterprogrammtechniken:
  - Prozedurstatus
  - Parameterübergabe
  - Aufbau eines Prozedurrahmens auf dem Stack
  - Rekursive (und wiedereintrittsfähige (re-entrant)) Programme