Kapitel 11

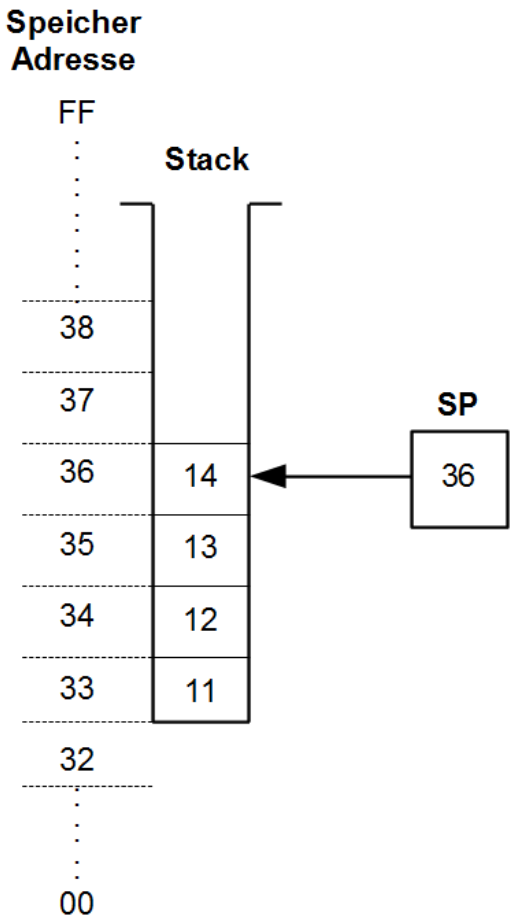
Unterprogramme

Unterprogrammtechnik

- **Funktionen** in der C-Programmierung dienen dem Zweck,
  1. ein größeres Programm übersichtlicher zu strukturieren,
  2. eine mehrfach gebrauchte Programmfunktion nur einmal im Programm zu haben, sie aber an mehreren Stellen im Programm zu verwenden.
- Die vergleichbare Komponente in der Assemblerprogrammierung ist das **Unterprogramm**.
- Das Unterprogramm ist eine abgeschlossenen Folge von Befehlen innerhalb des Programms.
  - Um ein Unterprogramm an einer bestimmten Stelle im Hauptprogramm zu verwenden, wird es mit einem CALL Befehl aufgerufen.
  - Der Prozessor führt dann die Befehle des Unterprogramms aus.
  - Sobald das Ende des Unterprogramms erreicht ist, macht der Prozessor im Hauptprogramm mit dem Befehl weiter, der auf den CALL Befehl folgt.
  - Der Prozessor speichert bei Ausführung des CALL Befehls die Rückkehradresse auf dem Stack ab.

Stack

- Definition : **Stack** (= Stapel) : **LIFO Queue** (Last In First Out Warteschlange)
  - Beispiel eines Stacks : ein Stapel Blätter
    - Es gibt nur zwei mögliche Operationen :
      - Ein neues Blatt oben auf den Stapel legen.
      - Das oberste Blatt vom Stapel entfernen.
- Der **8051 Stack** ist ein Bereich im (ganzen) internen Datenspeicher, den der Programmierer fest legt.
  - Stack Operationen :
    1. Ein Byte an der ersten freien Stelle im Stackbereich ablegen.
    2. Das als letztes abgelegte Byte wegnehmen.
- Zum Betrieb des Stacks stellt der 8051 Prozessor das SFR **Stack Pointer (SP)** an der Adresse 0x81 zur Verfügung.
  - Der Stack Pointer zeigt immer auf das zuletzt auf dem Stack abgelegte Byte.
  - Beim Speichern eines Bytes in den Stack wird zuerst der Wert im StackPointer um 1 erhöht und dann das Byte an diese Adresse geschrieben.
  - Beim Auslesen wird das Byte von der Adresse gelesen, auf die der Stackpointer gerade zeigt, und anschließend der Stackpointer um 1 vermindert.



Stack (Forts.)

- Der Programmierer legt den **Anfang des Stackbereichs** fest (im Beispiel oben Adresse 0x33),
  - indem er am Anfang des Programms den Wert des Stack Pointers auf die gewünschte Adresse im internen Datenspeicher setzt (im Beispiel oben auf 0x32).
    - Der Stackbereich wird zunächst im Datenspeicher reserviert (z.B.: `STACK DS 40`),
    - und dann der Stackpointer auf den Anfang des Bereiches gesetzt (z.B.: `MOV SP,#STACK-1`).
- Im Reset-Vorgang wird der Stackpointer auf den **Anfangswert 7** initialisiert.
  - d.h. er zeigt auf das letzte Byte der Registerbank 0;
  - Solange das Programm den StackPointer nicht selbst initialisiert, beginnt der Stackbereich also direkt hinter der Registerbank 0.
- Die Größe des benutzten Stackbereichs ändert sich während der Laufzeit.
  - Der Stackbereich muss groß genug sein, dass immer alle zu speichernden Daten hinein passen.
  - Es liegt in der Verantwortung des Programmierers, sicher zu stellen, dass
    - beim Schreiben in den Stackbereich keine anderen Daten überschrieben werden,
    - der Stackbereich nicht das Ende des internen Datenspeichers überschreitet,
    - nicht mehr aber auch nicht weniger Daten aus dem Stack ausgelesen werden, als vorher hinein geschrieben wurden.
- Verwendung des Stacks
  - Als kurzzeitiger Zwischenspeicher.
  - Zur Sicherung der Rücksprungadresse bei Unterprogrammaufrufen und Interrupts.
  - Zur Sicherung essentieller Daten beim Aufruf von Unterroutinen und bei Interrupts.

Stack-Befehle

- **PUSH dadr**
  1. inkrementiert den StackPointer *SP ← SP + 1*
  2. kopiert das von **dadr** adressierte Byte im internen Datenspeicher an die Speicherstelle im Stackbereich, die der StackPointer jetzt adressiert. *(SP) ← (dadr)*
- **POP dadr**
  1. kopiert das von StackPointer adressierte Byte im Stackbereich an die von **dadr** adressierte Speicherstelle im internen Datenspeicher. *(dadr) ← (SP)*
  2. dekrementiert den StackPointer *SP ← SP - 1*

- Da die Befehle PUSH und POP eine **interne Datenspeicheradresse** als Operand verlangen,
  - kann der Akkumulator nur über seine SFR Adresse 0xE0 bzw. sein SFR Symbol **ACC** adressiert werden
    - also **PUSH ACC**, nicht PUSH A.
  - kann ein Register nur über seine Datenspeicheradresse adressiert werden :
    - also **PUSH AR0** , …. **PUSH AR7**, nicht PUSH R0, … PUSH R7.
    - Adressen im PUSH/POP Befehl :
      - 0x00 ... 0x07 für ein Register in Register Bank 0,
      - 0x08 ... 0x0F für ein Register in Register Bank 1, usw.

Zur Erinnerung :

- Die Registerangabe in einem Maschinenbefehl ist Teil des OpCpde-Bytes (Bits 2 … 0)
  z.B. Assemblerbefehl MOV A,R2 → Maschinenbefehl 1110 1010

Stack-Befehle (Forts.)

- In alten Zeiten, als der 8051 nur eine Registerbank hatte, wurden als interne Datenspeicheradressen für die Register R0 bis R7 die Symbole **AR0 ... AR7** (absolute Adresse von Rx) eingeführt.
  - Aus Kompatibilitätsgründen soll das weiterhin gelten.
- Da es jedoch jetzt vier Registerbänke gibt, muss der Assembler wissen, welche Registerbank gerade aktiv ist.
- Die nachfolgenden Befehle aktivieren **während der Laufzeit** die Registerbank 1 uns sprechen dann R2 an.

```
MOV    PSW,#0x08     ;aktiviere Register Bank 1        PSW :        0000 1000
MOV    A,R2          ;Maschinenbefehl : 1110 1010      R2 :              010
PUSH   AR2           ;Maschinenbefehl : 0xC0 0A        Speicheradr.:  0000 1010
```

- Der Assembler muss jedoch **bereits zur Assemblierzeit** wissen, dass Bank 1 aktiv ist, um die Adresse im PUSH Befehl richtig setzen zu können.
- Der Programmierer benutzt den Pseudobefehl USING, um dem Assembler anzugeben, an welchen Stellen im Programm die Benutzung einer bestimmten Registerbank beginnt.

```
USING 1              ;ab hier wird Registerbank 1 verwendet
MOV    PSW,#0x08     ;aktiviere Register Bank 1
MOV    A,R2          ;Maschinenbefehl : 1110 1010
PUSH   AR2           ;Maschinenbefehl : 0xC0 0A
…..
…..
USING 2              ;ab hier wird Registerbank 2 verwendet
```

- Der Pseudobefehl **USING** (USING 0, USING 1, USING 2, oder USING 3) spezifiziert die Registerbank, die für die nachfolgenden Befehle gültig ist.
  - Diese Spezifikation dient nur dazu, dass der Assembler beim Auftreten eines Symbols AR0 … AR7 die interne Datenspeicheradresse für das Register der spezifizierten Registerbank einsetzt.
  - Ein USING Pseudobefehl ist für alle Befehle bis zum nächsten USING Pseudobefehl bzw. bis zum Ende des Programms gültig.
- Gibt es keine USING Spezifikation in einem Programm, verwendet der Assembler ausschließlich die Registerbank 0.

Übungsaufgabe AR3 :

Addieren Sie die beiden 4 Byte langen Binärzahlen bei Op1 und Op2 und legen Sie das Ergebnis bei Erg ab !

Hinweis : Speichern Sie den Wert von Op1 zuerst in den Stack und benutzen Sie R0 und R1 zur indirekten Adressierung von Op2 und Erg während der byteweisen Addition !

Unterprogramm-Befehle

- **LCALL adr16**
  1. Rettet die Adresse des auf den LCALL folgenden Befehls (2 Bytes) auf den Stack.
  2. Führt einen Sprung zur absoluten Programmspeicheradresse adr16, der Anfangsadresse des Unterprogramms, aus.
- **ACALL adr11**
  - Wird äußerst selten benutzt. Analog zum AJMP Befehl.
- **RET**
  - Holt zwei Bytes vom Stack und lädt sie in den Befehlszähler (PC).
    - Dies entspricht einem Sprung zu der Adresse, die bei der Ausführung des Call Befehls auf den Stack gerettet wurde.
    - Das Programm wird also nach Ausführung des Unterprogramms mit dem auf den Call Befehl folgenden Befehl fortgesetzt.

LCALL adr16

(PC) ← (PC) + 3
(SP) ← (SP) + 1
((SP)) ← (PC LOW)
(SP) ← (SP) + 1
((SP)) ← (PC HIGH)
(PC) ← adr16

RET

(PC) ← (PC) + 1
(PC HIGH) ← ((SP))
(SP) ← (SP) – 1
(PC LOW) ← ((SP))
(SP) ← (SP) – 1

- Das Unterprogramm schiebt sich sozusagen an der Stelle des Call Befehls in das Hauptprogramm.
- Die Speicherung der Returnadresse im Stack, erlaubt den **rekursiven Aufruf** von Unterprogrammen.

- Das Unterprogramm muss eventuell Speicherelemente verwenden, in denen für das Hauptprogramm relevante Informationen stehen.
  - Insbesondere Akkumulator, PSW und Register.
  - Damit diese Informationen nicht verloren gehen, sind im Unterprogramm zusätzliche Befehle einzufügen, die diese Informationen
    - direkt nach dem Aufruf des Unterprogramms auf den Stack retten,
    - direkt vor dem Ende des Unterprogramms wieder zurück stellen.
- Um Fehler möglichst zu vermeiden, wird dringend empfohlen, **die Schnittstelle zu Unterprogrammen akribisch zu dokumentieren**.
  Anzugeben sind :
  - Symbol zum Aufruf des Unterprogramms (Name des Unterprogramms)
  - Funktionsbeschreibung
  - Input-Parameter (Typ und ggf. Adresse)
  - Output-Parameter (Typ und ggf. Adresse)
  - Die vom Unterprogramm zerstörten Elemente

  Siehe auch das folgende Beispiel

Beispiel 1 : Addition von zwei 4 Byte Werten als Unterprogramm

Hauptprogramm

```
:          :
:          :
MOV        Op1,....     ;Lade Werte in Op1 ....
:          :
:          :
LCALL      Add4By       ;Rufe Unterprogramm
                        ;auf
MOV        ...,Erg      ;Verwerte das Ergebnis
:          :
:          :
```

Unterprogramm Add4By

Funktion : Addiert zwei 4 Byte lange Binärzahlen
Input : 4 Bytes an der Adresse Op1,
4 Bytes an der Adresse Op2
Output : 4 Bytes an der Adresse Erg
Zerstört : Akkumulator

```
Add4By:
           PUSH   PSW
           PUSH   AR0          ;Rette zu erhaltende Werte
           PUSH   AR1
           PUSH   Op1
           PUSH   Op1+1        ;Op1 auf den Stack
           PUSH   Op1+2        ;MSB zuerst, LSB zuletzt
           PUSH   Op1+3

           MOV    R0,#Op2+3    ;R0 auf das LSB von Op2
           MOV    R1,#Erg+3    ;R1 auf das LSB von Erg
           CLR    CY
Loop:      POP    ACC          ;Hole Op1 Byte,
           ADDC   A,@R0
           MOV    @R1,A
           DEC    R0
           DEC    R1
           CJNE   R1,#Erg-1,Loop    ;Durchlaufe Schleife 4 mal

           POP    AR1
           POP    AR0          ;Stelle zu erhaltende Werte zurück
           POP    PSW
           RET                 ;Kehre zum Hauptprog. zurück
```

Unterprogramm-Parameter

- Beim Aufruf eines Unterprogramms kann das Hauptprogramm Werte zur Verfügung stellen, die das Unterprogramm benutzt, und das Unterprogramm kann Ergebniswerte für das Hauptprogramm liefern.
  - Vergleiche Argumentübergabe bei C-Funktionen.
  - Diese Werte können von Aufruf zu Aufruf unterschiedlich sein.
- Argumentübergabe in 8051 Programmen kann erfolgen
  - in gemeinsam bekannten Speicherstellen (siehe Beispiel oben)
  - in Registern (siehe folgendes Beispiel)
  - auch gemischte Argumentübergabe möglich

Beispiel 2 : Addition von zwei 4 Byte Werten als Unterprogramm

Hauptprogramm

```
        :           :
        :           :
        MOV         R0,#Operand1    ;Lade Adresse von Op1
        MOV         R1,#Operand2    ;Lade Adresse von Op2
        MOV         R2,#Ergebnis    ;Lade Adresse von Erg

        LCALL       Add4By          ;Rufe Unterprogramm auf
        MOV         ...,Erg         ;Verwerte das Ergebnis
        :

        :
```

Unterprogramm Add4By

Funktion : Addiert zwei 4 Byte lange Binärzahlen

Input : R0 = Adresse des ersten Operanden, Wert des Operanden
R1 = Adresse des zweiten Operanden, Wert des Operanden
R2 = Adresse des Ergebnisses

Output : An der Adresse in R2 = Ergebnis

Zerstört : Akkumulator, PSW

```
Add4By:  PUSH   AR0          ;Rette zu erhaltende Werte
         PUSH   AR1
         PUSH   AR3

         MOV    R3,#4
PushOp1: MOV    A,@R0
         PUSH   ACC          ;Op1 auf den Stack
         INC    R0
         DJNZ   R3,PushOp1

         MOV    A,R1
         ADD    A,#4         ;+4, weil DEC vor ADD
         MOV    R1,A         ;R1 zeigt hinter Operand 2
         MOV    A,R2
         ADD    A,#4
         MOV    R0,A         ;R0 zeigt hinter Ergebnis
Loop:    DEC    R0
         DEC    R1
         POP    ACC          ;Hole Op1 Byte, (LSB zuerst, MSB zuletzt)
         ADDC   A,@R1
         MOV    @R0,A

         CJNE   R0,2,Loop    ;Durchlaufe die Schleife 4 mal
                             ;was bedeutet die '2' in diesem Befehl ?
         POP    AR3          ;Stelle zu erhaltende Werte zurück
         POP    AR1
         POP    AR0

         RET                 ;Kehre zum Hauptprogramm zurück
```

Interrupt Routinen

Ein Interrupt ist ein von Hardware initiierter Unterprogrammaufruf.

(An dieser Stelle wird nur der Mechanismus beschrieben, wie eine Routine ausgeführt wird, die auf einen Interrupt reagiert. Die eigentliche Besprechung von Interrupts erfolgt später in diesem Dokument.)

- In einem Computersystem gibt es zuweilen außergewöhnliche Situationen, in denen bestimmte Routinen ausgeführt werden müssen. Diese Routinen kümmern sich dann um diese speziellen Situationen.

  Beispiele :

  - Eine E/A-Operation in einer peripheren Einheit wird beendet. Eine Routine sollte das Programm, das die Operation ursprünglich angestoßen hat, darüber informieren.
  - Es passiert ein Speicherzugriff zu einer ungültigen Adresse. Eine Fehlerbehandlungsroutine sollte sich darum kümmern.

- All diese außergewöhnlichen Situationen im laufenden Programm permanent abzufragen, würde eine Menge Performance kosten.

  - (Die Methode, in einer Programmschleife das Auftreten eines Ereignisses abzuwarten, nennt man **Polling**. Polling ist z. B. bei Testprogrammen für E/A-Geräte eine häufig verwendete Methode).

- Die Lösung für diese Problematik ist der **Interrupt**-Mechanismus.

  - Das Auftreten des außergewöhnlichen Ereignisses aktiviert eine Interrupt-Anforderung (**Interrupt Request**).
  - Wenn die Interrupt-Logik im Prozessor entsprechend konditioniert ist (wenn Interrupts **enabled** sind), wird die eigentliche Unterbrechung (**der Interrupt**) durchgeführt.
  - Zu diesem Zweck rettet das Steuerwerk am Ende des gerade ausgeführten Befehls den Befehlszähler auf den Stack und verzweigt zur **Interrupt Service Routine (ISR)**.
    - Dieser Vorgang ist analog zum Aufruf eines Unterprogramms.

- Interrupt Service Routine
  - Im Fall eines **Unterprogrammaufrufs** ist die Anfangsadresse der aufgerufenen Routine der Operand im **CALL** Befehl.
  - Im Falle eines **Interrupts** ist die Anfangsadresse der aufgerufenen Routine eine **fest verdrahtete absolute** Programmspeicheradresse.
  - Am Ende der Interrupt Service Routine erfolgt die Rückkehr ins unterbrochene Programm mit dem Befehl **RETI.**
    - Analog zum RET Befehl bei einem Unterprogrammaufruf.
    - Zusätzlich zum Laden der Returnadresse in den PC setzt der RETI Befehl die Indikatoren im Steuerwerk zurück, die angezeigt haben, dass die gerade ausgeführten Befehle Teil einer ISR sind.
      - Dadurch kann ein neuer (während der Ausführung der ISR blockierter) Interrupt prozessiert werden
  - Da nicht voraussehbar ist, an welcher Stelle das Programm unterbrochen wird, muss die Interrupt Service Routine die Inhalte aller Resourcen, die sie selbst verwendet, zu Beginn auf den Stack retten und am Ende wieder zurückstellen.

Makros

- Ein Makro dient dazu, häufiger auftretende Befehlssequenzen an allen notwendigen Stellen ins Programm einzufügen.
  - Die Befehlssequenz in der **Makrodefinition**, wird nur einmal (wie ein Unterprogramm) im Programmcode aufgeführt.
  - An jeder Stelle im Programm, an der diese Befehlssequenz gebraucht wird, erfolgt ein **Makroaufruf**.
    - D.h. der Assembler fügt die Befehlssequenz an diesen Stellen ins Programm ein.
    - Im Unterschied zum Unterprogramm sind die Befehle der Befehlssequenz dann mehrfach vorhanden.
- Im Prinzip erspart ein Makro lediglich Schreibarbeit.
- Die Makrobefehle MACRO und ENDM identifizieren den Beginn und das Ende einer Makrodefinition.
- Das Symbol vor dem MACRO Pseudobefehl ist der Name, mit dem das Makro aufgerufen wird.

- **Beispiel** : Löschen eines 10 Byte langen Anzeigefeldes
  - Makrodefinition :

```
LoeFeld:  MACRO
          LOCAL   Loop
          MOV     R0,#Feld
Loop:     MOV     @R0,#0x20          ;Leerzeichen einsetzen
          INC     R0
          CJNE    R0,#Feld+10,Loop
          ENDM
```

  - Makroaufruf :

```
          :
          LoeFeld
          :
```

  - Makroexpansion :

```
          :
          MOV     R0,#Feld
??0000:   MOV     @R0,#20H       ;Leerzeichen einsetzen
          INC     R0
          CJNE    R0,#Feld+10,??0000
          :
```

- Wenn der Assembler im obigen Beispiel den Makrocode unverändert expandieren würde, wäre bei mehrfachem Aufruf das Symbol Loop mehrfach vorhanden, was einen Fehler zur Folge hätte.
  - Der Macrobefehl LOCAL identifiziert das darauf folgende Symbol als lokales Symbol.
  - Der Makroassembler ersetzt dieses Symbol bei jedem Makroaufruf durch ein anderes selbst erfundenes Symbol (??0000, ??0001, ...).

Parameter

- In einem Makro können auch Parameter verwendet werden.
  - Die Parameter in der Makrodefinition werden bei der Expansion durch die Argumente des Makroaufrufs ersetzt.
    - Positionelle Ersetzung : Parameter 1 wird durch Argument 1 ersetzt, Parameter 2 durch Argument 2, usw.
- **Beispiel** : Kopieren von Zeichenketten mit variablen Längen
  - Makrodefinition :

```
CopyStr:
        MACRO   Src,Dst,Cnt
        LOCAL   Label
        MOV     R2,#Cnt     ;Länge
        MOV     R1,#Src     ;Quelle
        MOV     R0,#Dst     ;Ziel
Label:
        MOV     A,@R1
        MOV     @R0,A       ;kopiere Zeichen
        INC     R0
        INC     R1
        DJNZ    R2,Label
        ENDM
```

  - Makroexpansion :

```
        :
        :
        MOV     R2,#8       ;Länge
        MOV     R1,#Orig    ;Quelle
        MOV     R0,#Ziel    ;Ziel
??0000:
        MOV     A,@R1
        MOV     @R0,A       ;kopiere Zeichen
        INC     R0
        INC     R1
        DJNZ    ??0000
        :
```

  - Makroaufruf :

```
        :
        CopyStr Orig, Ziel, 8
        :
```

Gemeinsame Benutzung von Makro und Unterprogramm

- **Ausgangssituation :** An vielen Stellen im Hauptprogramm soll eine Gleitkomma-Addition durchgeführt werden.

Hauptprogramm

```
…….
AddGKZ   G1, G2,Erg1          ;Makroaufruf
…….
AddGKZ   G3, G4,Erg3          ;Makroaufruf
.......
```

Makrodefinition

AddGKZ:

```
MACRO    Src1,Src2,Dest
PUSH     AR0
PUSH     AR1
PUSH     AR2

MOV      R0,#Src1
MOV      R1,#Src2
MOV      R2,#Dest
LCALL    UPAddGKZ

POP      AR2
POP      AR1
POP      AR0
ENDM
```

Unterprogramm *UPAddGKZ*

```
Funktion  : Addiert zwei Gleitkommazahlen
Input     : R0 = Adresse des ersten Operanden,
            R1 = Adresse des zweiten Operanden,
            R2 = Adresse des Ergebnisses
Output    : An der Adresse in R2 = Ergebnis
Zerstört  : R0, R1, R2

UPAddGKZ:   ……..
```

Übungsaufgabe UP1:

Schreiben Sie ein Makro + Unterprogramm, das zwei 16 Bit Binärzahlen addiert (AddInt ErgOp1,Op2)

Lösung zu Übungsaufgabe

Übungsaufgabe UP1 :

```
;Hauptprogramm
        …….
        AddInt    Zähler1,Zähler2     ;Makroaufruf
        JC        Fehler
        …….
;Makrodefinition
AddInt: MACRO     ErgOp1,Op2
        PUSH      AR0
        PUSH      AR1
        MOV       R0,#ErgOp1
        MOV       R1,#Op2
        LCALL     UPAddInt
        POP       AR1
        POP       AR0
        ENDM
```

```
;Unterprogramm UPAddInt
;Funktion  : Addiert zwei Integerzahlen
;Input     : R0 = Adresse des ersten Operanden,
;            R1 = Adresse des zweiten Operanden,
;Output    : Ergebnis der Addition an der Adresse in R0
;            Carry Flag = Carry für Integer-Addition
;Zerstört  : R0, R1, PSW


UPAddInt:
        PUSH    ACC
        INC     R0          ;Zeige auf LSB
        INC     R1
        MOV     A,@R0
        ADD     A,@R1       Addiere LSB Bytes
        MOV     @R0,A
        DEC     R0          ;Zeige auf MSB
        DEC     R1
        MOV     A,@R0
        ADDC    A,@R1       Addiere MSB Bytes
        MOV     @R0,A
        POP     ACC
        RET
```