



# Rechnerarchitektur, Foliensatz 4

## Ergänzungen

G. Kemnitz

Institut für Informatik, TU Clausthal (RA-F4.pdf)  
16. Januar 2020



Konstanten  
Multiplikation  
Division

Gleitkommazahlen  
Rekursion  
Aufgaben



## Konstanten



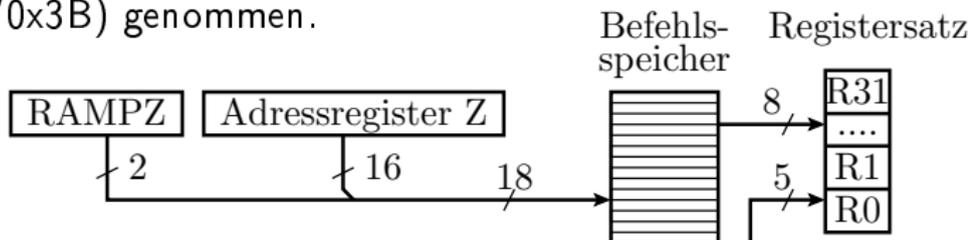
## Speichern von Konstanten

Konstanten, die auch nach Neueinschalten des Prozessors noch vorhanden sein sollen, z.B. der Text »Hallo Welt« in

```
uint8_t a[] = "Hallo_Welt";  
int main(){...}
```

werden im Programmspeicher abgelegt und beim Programmstart in den Datenspeicher kopiert.

Die Adressierung des 256 kByte-Befehlsspeichers erfolgt indirekt mit einer 18-Bit Adresse. Die niederwertigen 16 Adressbits werden aus Register Z und die oberste 2 Bit aus EA-Register RAMPZ (Adresse 0x5B/0x3B) genommen.

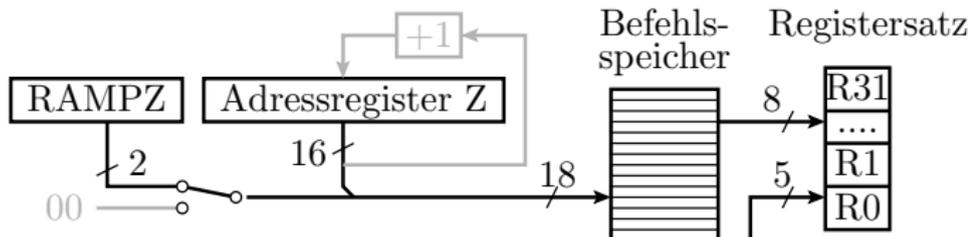




# 1. Konstanten

Befehlsvariationen:

- höchste Adressbits 00 statt der Bits RAMPZ(1:0)
- mit Post-Inkrement



Operation	TZ	Op.-Code	Assembler
$Rd := p(Z)$	3	1001 000d dddd 0100	<code>lpm Rd, Z</code>
$Rd := p(Z); Z := Z+1$	3	1001 000d dddd 0101	<code>lpm Rd, Z+</code>
$Rd := p(RAMPZ:Z)$	3	1001 000d dddd 0110	<code>elpm Rd, Z</code>
$Rd := p(RAMPZ:Z); Z:=Z+1$	3	1001 000d dddd 0111	<code>elpm Rd, Z+</code>

(p(..) – Programmspeicherinhalt von ..)



# 1. Konstanten

Beim Übersetzen des Programms schreibt der Compiler die Zeichenkettenkonstante »Hallo Welt« hinter die Endlosschleife des Startup-Codes ab Adresse 0xA1:

```

11  uint8_t a[] = "Hallo Welt";
12  uint8_t b[10];
13  int main(void){
14      uint8_t *p1=a;
15      uint8_t *p2=b;
16      while (*p1){
17          *(p2++) = *(p1++);
      }
  }

```

Zeichenkettenkonstante	dissassembliert	als Ascii-Text
000000A1 48.61	ORI R20,0x18	Ha
000000A2 6c.6c	ORI R22,0xCC	ll
000000A3 6f.20	AND R6,R15	o
000000A4 57.65	ORI R21,0x57	We
000000A5 6c.74	ANDI R22,0x4C	lt
000000A6 00.00	NOP	\0

Der Disassembler kann Zeichenketten nicht von Programmcode unterscheiden.



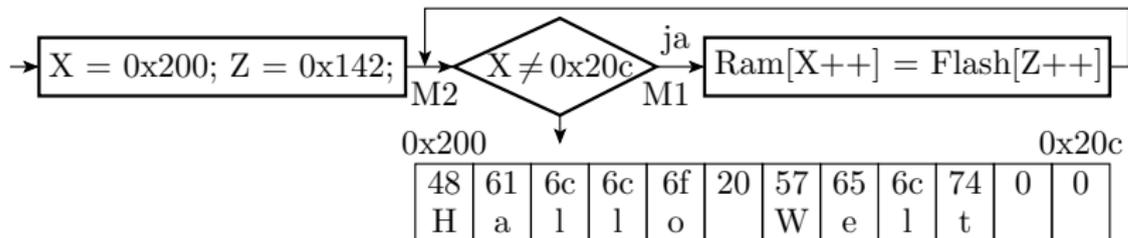
# 1. Konstanten

Im Startup-Code vor »main():

```

//0x007A  LDI R17,0x02  ; r17 := 0x02
//0x007B  LDI R26,0x00  ;
//0x007C  LDI R27,0x02  ; r27:r26(X) := 0x0200
//0x007D  LDI R30,0x42  ;
//0x007E  LDI R31,0x01  ; r31:r30(Z) := 0x0142
//0x007F  LDI R16,0x00  ;
//0x0080  OUT 0x3B,R16  ; RAMPZ := 0x00
//0x0081  RJMP PC+0x03  ; springe zu M2
M1://0x82  ELPM R0,Z+    ; r0 := p(Z); Z := Z+1
//0x0083  ST X+,r0     ; *(X) := r0; X := X+1
M2://0x84  CPI R26,0x0C ;
//0x0085  CPC R27,R17  ; ? r27:r26-0x020C
//0x0086  BRNE PC-0x04 ; wenn ≠0, springe zu M1

```





# 1. Konstanten

Das mit

```
uint8_t b[10];
```

vereinbarte Feld, das der Compiler ab Adresse 0x20C platziert hat, wird mit Nullen initialisiert:

```
//0x0087  LDI R18,0x02    ; r18 := 2
//0x0088  LDI R26,0x0C    ; r27:r26(X) := 0x020C
//0x0089  LDI R27,0x02    ;
//0x008A  RJMP PC+0x02   ; spring zu M2
M1://0x8B  ST X+,R1      ; *(X) := 0; X := X+1
M2://0x8C  CPI R26,0x16  ;
//0x008D  CPC R27,R18   ; ?: r27:r26-0x0216
//0x008E  BRNE PC-0x03  ; wenn ≠0, springe zu M1
//0x008F  RCALL PC+0x03 ; Aufruf von main()
//0x0090  RJMP PC+0x09  ; Sprung hinter main()
//0x0091  RJMP PC-0x91  ; Neustart
int main(void){
//0x0092  LDS R24,0x0200;
```



# Multiplikation



### Multiplikation vorzeichenfreier Binärzahlen

$$\begin{array}{r}
 (a_3 \cdot 2^3 + a_2 \cdot 2^2 + a_1 \cdot 2^1 + a_0 \cdot 2^0) \cdot (b_3 \cdot 2^3 + b_2 \cdot 2^2 + b_1 \cdot 2^1 + b_0 \cdot 2^0) = \\
 \hline
 \begin{array}{r}
 a_3b_0 \cdot 2^3 + a_2b_0 \cdot 2^2 + a_1b_0 \cdot 2^1 + a_0b_0 \cdot 2^0 \\
 a_3b_1 \cdot 2^4 + a_2b_1 \cdot 2^3 + a_1b_1 \cdot 2^2 + a_0b_1 \cdot 2^1 \\
 a_3b_2 \cdot 2^5 + a_2b_2 \cdot 2^4 + a_1b_2 \cdot 2^3 + a_0b_2 \cdot 2^2 \\
 a_3b_3 \cdot 2^6 + a_2b_3 \cdot 2^5 + a_1b_3 \cdot 2^4 + a_0b_3 \cdot 2^3
 \end{array} \\
 \hline
 \begin{array}{cccccccc}
 p_7 & p_6 & & p_5 & & p_4 & & p_3 & & p_2 & & p_1 & & p_0
 \end{array}
 \end{array}$$

Eine  $n \times n$ -Bit-Multiplikation ist nachbildbar aus:

- $n \times n$  1-Bit-Multiplikationen (UND-Verknüpfungen) und
- zeilen- und spaltenweisen Additionen mit Halb- und Volladdierern.

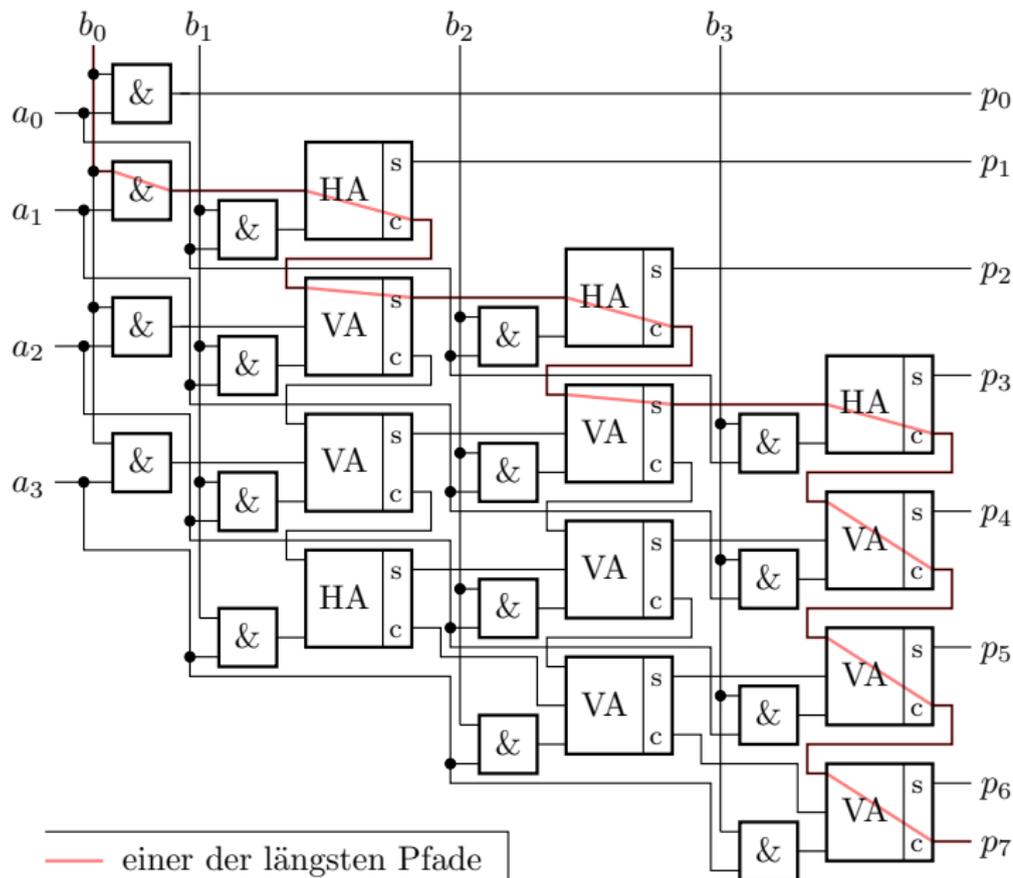
Das kleinste Produkt ist  $0 \cdot 0 = 0$ . Das größte Produkt ist

$$(2^n - 1)^2 = 2^{2n} - 2 \cdot 2^n + 1$$

und benötigt  $2n$ -Bit Ergebnisregister (Doppelregister).



## 2. Multiplikation





## 2. Multiplikation

- Der Schaltungsaufwand eines  $n \times n$ -Bit Multiplizierers wächst mit  $n^2$ .
- Die Verzögerungszeit entlang des längsten Datenpfades, bis das Ergebnis garantiert fertig gebildet ist, wächst nur mit  $n$ .
- Ein  $n \times n$ -Bit-Matrixmultiplizierer hat etwa die 2...3-fache Verzögerung eines normalen  $n$ -Bit-Addierers.
- Prozessoren haben deshalb oft einen Multiplizierer, der eine Multiplikation in einem oder wenigen Takten ausführt<sup>1</sup>.

---

ATmega-Multiplikationsbefehl für vorzeichenfreie Zahlen:

Operation	Op.-Code	Assembler
R1:R0 := Rd · Rr	1001 11rd dddd rrrr	mul Rd, Rr

Wählbare Operandenregister. Das höherwertige Ergebnisbyte wird immer in r1 und das niederwertige in r0 gespeichert.

<sup>1</sup>Bei der Division wächst auch die Verzögerungszeit mit dem Quadrat der Bitanzahl. Deshalb sind HW-Dividierer unüblich.



### Nachbildung 16-Bit- durch 8-Bit Multiplikationen

Zerlegung der Operanden und des Ergebnisses in Polynome von einzelnen Bytes  $a_i, b_i, \dots$  :

$$a_3 \cdot 2^{24} + a_2 \cdot 2^{16} + a_1 \cdot 2^8 + a_0 = (b_1 \cdot 2^8 + b_0) \cdot (c_1 \cdot 2^8 + c_0)$$

Berechnung der Ergebnisbytes:

$$a_0 = L(b_0 \cdot c_0)$$

$$a_2^* a_1 = H(b_0 \cdot c_0) + L(b_1 \cdot c_0) + L(b_0 \cdot c_1)$$

$$a_3^* a_2 = a_2 + H(b_1 \cdot c_0) + H(b_0 \cdot c_1) + L(b_1 \cdot c_1)$$

$$a_3 = a_3 + H(b_1 \cdot c_1)$$

- $H/L(\dots)$  – höher-/niederwertiges Produktbyte.
- $a_i^*$  : Zweites Byte zur Aufnahme der Überträge.



### Dissassemblierte 16×16-Bit-Multiplikation

```
#include <avr/io.h>
uint16_t a=0x2573, b=0x7FA6;
uint32_t p;
int main(){
    p = a * b;
    // 0x0096  LDS  R20,0x0200 ; r20 := a.Byte0 (AL)
    // 0x0098  LDS  R21,0x0201 ; r21 := a.Byte1 (AH)
    // 0x009A  LDS  R18,0x0202 ; r18 := b.Byte0 (BL)
    // 0x009C  LDS  R19,0x0203 ; r19 := b.Byte1 (BH)
    // <r27:r24 = r21:r20 * r19:r18>
    // 0x00A8  STS  0x0204,R24 ; p.Byte0 := r24
    // 0x00AA  STS  0x0205,R25 ; p.Byte1 := r25
    // 0x00AC  STS  0x0206,R26 ; p.Byte2 := r26
    // 0x00AE  STS  0x0207,R27 ; p.Byte3 := r27
}
```



### Übersetzung der eigentlichen Multiplikation

```
// 0x009E   MUL  R20 ,R18   ; r1:r0 = AL*BL
// 0x009F   MOVW R24 ,R0   ; r24 = L(AL*BL) (p.Byte0)
//                               ; r25 = H(AL*BL)
// 0x00A0   MUL  R20 ,R19   ; r1:r0 = AL*BH
// 0x00A1   ADD  R25 ,R0   ; r25 = H(AL*BL)+L(AL*BH)
// 0x00A2   MUL  R21 ,R18   ; r1:r0 = AH*BL
// 0x00A3   ADD  R25 ,R0   ; r25 = H(AL*BL)+L(AL*BH)
//                               ;       + L(AH*BL) (p.Byte1)
// 0x00A4   CLR  R1       ; r1 = 0
// 0x00A5   MOVW R24 ,R24   ; kein erkennbarer Sinn
// 0x00A6   LDI  R26 ,0x00   ; P.Byte3 = 0
// 0x00A7   LDI  R27 ,0x00   ; P.Byte4 = 0
```

p.Byte0 und p.Byte1 werden richtig berechnet und p.Byte2 und p.Byte3 werden auf null gesetzt. Bytes auf 0.

Bug oder Feature? / Fehler oder spezifizierte Sollfunktion?



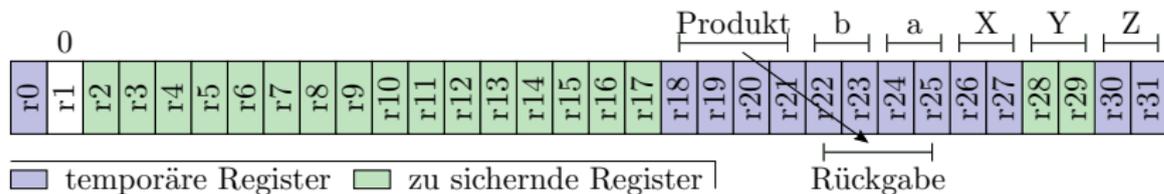
### UP für 4 Byte-Produkt (wenige Befehle mehr)

```
uint32_t mult_u16_u32(uint16_t a, uint16_t b);

mult_u16_u32: ; Marke für Funktionsaufruf
    mul r24,r22 ; r1:r0    = AL*BL
    movw r18,r0 ; r19:r18 = AL*BL
    mul r25,r23 ; r1:r0    = AH*BH
    movw r20,r0 ; r21:r20 = AH*BH
    mul r24,r23 ; r1:r0    = AL*BH
    add r19,r0  ; r19      = H(AL*BL)+L(AL*BH)
    adc r20,r1  ; r20      = L(AH*BH)+H(AL*BH)+c
    clr r1      ; r1       = 0
    adc r21,r1  ; r21      = H(AH*BH)+c
    mul r25,r22 ; r1:r0    = AH*BL
    add r19,r0  ; r19     = H(AL*BL)+L(AL*BH)+L(AH*BL)
    ...        ;
    ret        ; Rücksprung
```



## 2. Multiplikation



- Von rechts beginnen werden die ersten 18 Aufrufparameterbytes in den Registern r25:r8 übergeben.
- Die Rückgabe erfolgt in den Registern r25:r8.

```
mult_u16_u32:
```

```
...
```

```
adc r20,r1 ; r20 = L(AH*BH)+H(AL*BH)+
;          + H(AH*BL)+c
```

```
clr r1 ; r1 = 0
```

```
adc r21,r1 ; r21 = H(AH*BH) + Überträge
```

```
movw r22,r18 ; p (R25..r22) = (r21..r18)
```

```
movw r24,r20 ;
```

```
ret
```



### Multiplikation vorzeichenbehafteter Zahlen

Im Gegensatz zur Addition und Subtraktion geänderter Algorithmus:

$$\begin{aligned}
 (A - a_{n-1} \cdot 2^n) \cdot (B - b_{n-1} \cdot 2^n) &= A \cdot B + (a_{n-1} \cdot b_{n-1} \cdot 2^{2n})^* \\
 &\quad - (A \cdot b_{n-1} + B \cdot a_{n-1}) \cdot 2^n
 \end{aligned}$$

(\* – mit  $2n$ -Bits nicht darstellbar). Zusätzliche bedingte Subtraktion der um  $n$  Bit linksverschobenen Faktoren vom »vorzeichenfreien« Produkt, wenn das jeweils andere Vorzeichenbit eins ist.

AVR-Befehle zur Multiplikation von vorzeichenbehafteter Zahlen<sup>2</sup>:

Operation	Op.-Code	Assembler
$R1:R0 := R_d^{(s)} \cdot R_r^{(s)}$	1000 0010 dddd rrrr <sup>(1)</sup>	<code>mul s Rd, Rr</code>
$R1:R0 := R_d^{(s)} \cdot R_r^{(u)}$	1000 0011 0ddd 0rrr <sup>(2)</sup>	<code>mul su Rd, Rr</code>

<sup>(u)</sup> vorzeichenfrei (unsigned); <sup>(s)</sup> vorzeichenbehaftet (signed); <sup>(1)</sup> Rd, Rr nur R16 bis R31. <sup>(2)</sup> Rd, Rr nur R16 bis R23.

<sup>2</sup>Die nutzt der Compiler aber nicht unbedingt, siehe Aufgabe 4.2.



# Division



# Division (Compileroptimierung -O1)

```
#include <avr/io.h>
uint16_t a=0x6F, b=0x11, q;
int main(){
    q = a/b;
}

// 0x0092    LDS    R24,0x0202 ; Aufrufparameter a
// 0x0094    LDS    R25,0x0203
// 0x0096    LDS    R22,0x0200 ; Aufrufparameter b
// 0x0098    LDS    R23,0x0201
// 0x009A    RCALL  PC+0x0008; Aufruf der Division
// 0x009B    STS    0x0205,R23 ; q ist Rückgabewert 2
// 0x009D    STS    0x0204,R22 ; was steht in r25:r24?
// 0x009F    LDI    R24,0x00    ;
// 0x00A0    LDI    R25,0x00    ; main() gibt null zurück
// 0x00A1    RET                    ; Rücksprung von main
// 0x00A2    ...                    ; Divisions-UP
```



## Divisions-Unterprogramm

```
// 0x00A2  SUB  R26 ,R26      ; r27:r26 := 0 (Rest)
// 0x00A3  SUB  R27 ,R27      ;
// 0x00A4  LDI  R21 ,0x11     ; r21:=0x11 (Schleifenz.)
// 0x00A5  RJMP PC+0x0008; springe zu M1
M2://0xA6  ROL  R26          ; r27:r26 := 2·(r27:r26)+c
// 0x00A7  ROL  R27          ;
// 0x00A8  CP   R26 ,R22     ; ?: r27:r26-r23:r22
// 0x00A9  CPC  R27 ,R23     ; wenn Differenz negativ,
// 0x00AA  BRCS PC+0x03     ; dann gehe zu M1
// 0x00AB  SUB  R26 ,R22     ; r27:r26 -= r23:r22
// 0x00AC  SBC  R27 ,R23     ;
M1://0xAD  ROL  R24          ; r25:r24 := 2·(r25:r24)+c
// 0x00AE  ROL  R25          ; (c ist neg. Ergebnisbit)
// 0x00AF  DEC  R21          ; r21-- (Schleifenzähler)
// 0x00B0  BRNE PC-0x0A     ; wenn ≠0, springe zu M2
```

16 Schleifendurchläufe zu je etwa 10 Takten (ca. 20  $\mu$ s).



### 3. Division

```
// 0x00B1  COM R24      ; r25:r24 := not(r25:r24)
// 0x00B2  COM R25      ; (q := not(q))
// 0x00B3  MOVW R22,R24  ; r23:r22 := Quotient
// 0x00B4  MOVW R24,R26  ; r25:r24 := Rest
// 0x00B5  RET           ; Rücksprung
```

Das Unterprogramm berechnet für

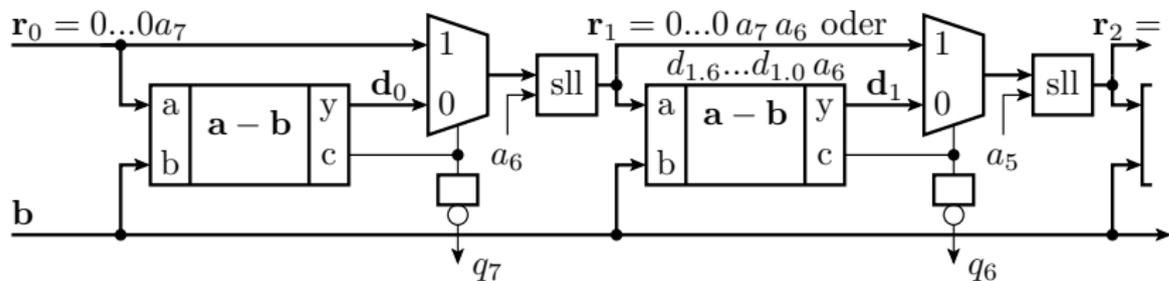
$$\frac{a}{b} = q + \frac{r}{b}$$

den Quotienten  $q = a/b$  und den Divisionsrest  $r = a \% b$ . Algorithmus am Beispiel  $a = 11$  und  $b = 3$ :

Bitnummer	3	2	1	0	Ergebnis
Rest ( $r$ )	1011	1011	1011	0101	<b>r = 0010 (2)</b>
Subtrahend ( $b$ )	-0011	-0011	-0011	-0011	
Differenz	$r < b$	$r < b$	0101	0010	
Quotient	$q_3 = 0$	$q_2 = 0$	$q_1 = 1$	$q_0 = 1$	<b>q = 0011 (3)</b>

## Extrahierter Berechnungsfluss

Bitnummer	3	2	1	0	Ergebnis
Rest ( $r$ )	1011	1011	1011	0101	$r = 0010$ (2)
Subtrahend ( $b$ )	-0011	-0011	-0011	-0011	
Differenz	$r < b$	$r < b$	0101	0010	$q = 0011$ (3)
Quotient	$q_3 = 0$	$q_2 = 0$	$q_1 = 1$	$q_0 = 1$	



Laufzeitbetrachtung:

- Jede Subtraktion für  $q_{i-1}$  muss warten, bis  $q_i$  berechnet ist.
- Rechenwerk mit einem statt  $n$  Sub/Mux ähnlich schnell.
- 1-Schritt-Dividierer im Gegensatz zu Multiplizierern unüblich.



# Gleitkommazahlen



### Festkomma- und Gleitkommazahlen

Zahlenwerte mit Nachkommastellen lassen sich auf dem Rechner als Festkomma- oder Gleitkommazahlen darstellen.

Festkommazahlen haben eine gedachte Skalierungsfaktor und werden mit den arithmetischen Befehlen (Add, Sub, ...) für ganze Zahlen bearbeitet. Probleme:

- Wahl der Anzahl der Vorkommastellen so, dass der Zahlenbereich nicht über- oder unterläuft und
- der Anzahl der Nachkommastellen so, dass die Rundungsfehler vernachlässigbar bleiben.

Bei Gleitkommdarstellung wird der Wert durch Multiplikation mit einer Zweierpotenz so verschoben, dass eine 1 vor dem Komma steht, und die Verschiebung als »Charakteristik« in der Zahlendarstellung gespeichert.



## 4. Gleitkommazahlen

$$v = \frac{s}{t}$$

$s$	$t$	$v$
1 mm	1 $\mu$ s	1000 $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
137 km	10 ms	$1,37 \cdot 10^7 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
3,36 mm	1000 s	$1,36 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}}{\text{s}}$

- Festkommadarstellung:

$s$ in 10 $\mu$ m	$t$ in $\mu$ s	$v$ in $\frac{\mu\text{m}}{\text{s}}$
100	1	$10^9$ (>30 Bit)
$1,37 \cdot 10^{10}$ (>31 Bit)	10 000	$1,37 \cdot 10^{17}$ (>40 Bit)
336	$10^9$ (>30 Bit)	1 mit 36% Rundungsfehler

- Gleitkommadarstellung mit  $1 \leq m < 2$  ( $m$  – normierter Wert):

$s$ in m	$t$ in s	$v$ in $\frac{\text{m}}{\text{s}}$
$1,02 \dots 2^{-10}$	$1,04 \dots 2^{-20}$	$1,95 \dots 2^9$
$1,04 \dots 2^{17}$	$1,28 \dots 2^{-7}$	$1,33 \dots 2^{24}$
$1,72 \dots 2^{-10}$	$1,95 \dots 2^9$	$1,76 \dots 2^{-19}$



### Darstellung von Gleitkommazahlen

Darstellung durch Vorzeichenbit  $s$ , Charakteristik  $c$ , Mantisse  $M$ :

- Normierte Darstellung ( $0 < c < c_{\max}$ ):

$$Z = (-1)^s \cdot (1, M_{-1} \dots M_{-m}) \cdot 2^{c-c_0}$$

( $c_0 - c$ -Wert für Kommaverschiebung null).

- Denormierte Darstellung für  $c = 0$ , Betrag  $|Z| < 2^{-c_0}$ :

$$Z = (-1)^s \cdot (M_0, M_{-1} \dots M_{-m}) \cdot 2^{-c_0}$$

Echte Null:  $c = 0$ ;  $M = 0$

- Sonderwerte  $c = c_{\max}$ :

$$Z = \begin{cases} \infty & \text{für } s = 0 \text{ und } m = 0 \\ -\infty & \text{für } s = 1 \text{ und } m = 0 \\ \text{nan} & \text{für } m \neq 0 \end{cases}$$

(nan, not a number – ungültig;  $\pm\infty$  – WB-Überlauf / -Unterlauf)



## 4. Gleitkommazahlen

Umrechnung in die normierte Gleitkommadarstellung:

- Vorzeichenbit  $s$  und Betrag  $|Z|$  bilden.
- Charakteristik  $c$  so festlegen, dass gilt:

$$1 \leq |Z| \cdot 2^{c_0-c} < 2$$

- Nachkommastellen von  $|Z| \cdot 2^{c_0-c}$  als Mantisse  $M$  übernehmen.

32-Bit-Format »IEEE-754 single«:

Bitvektor		Wert					
31	24 23	16 15	8 7	0	← Bitnummer		
$s$	$c$	$M$					
0	1000001	10010010	00000000	00000000	0	$+1.240000_{16} \cdot 2^{83_{16}-7f_{16}}$	
	$\frac{8}{3}$	$\frac{2}{4}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$\frac{0}{0}$	$= 18,25$	
+	$c = 83_{16}$	$M = 1,240000_{16}$					
1	0111100	1100101	10011101	00001110	0	$-1.CB3A1C_{16} \cdot 2^{79_{16}-7f_{16}}$	
	$\frac{7}{9}$	$\frac{C}{B}$	$\frac{3}{A}$	$\frac{1}{C}$		$\approx -2,8029 \cdot 10^{-2}$	
-	$c = 79_{16}$	$M = 1,CB3A1C_{16}$					
0	0000000	0001100	10111101	00011001	00	$+0,32F464_{16} \cdot 2^{0-7f_{16}}$	
	$\underbrace{\hspace{2cm}}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{F}{4}$	$\frac{6}{4}$	$\frac{4}{4}$	$\approx 1,170 \cdot 10^{-39}$	
	0/denorm.	$M = 0,32F464_{16}$					



### Nutzung von Gleitkommazahlen in C

```

11 float a, b, c;
12 int main(void){
13     a=b*c;
14 }
```

Name	Value	Type
a	-5588,22	float(data)@0x0208
b	14,74	float(data)@0x0200
c	-379,12	float(data)@0x0204

data 0x0200 0a d7 6b 41

data 0x0204 5c 8f bd c3

data 0x0208 d4 a1 ae c5

- Gleitkommazahlen werden unterstützt und ihre Werte sind im Debugger darstellbar.
- Die Byte-Darstellung ist im Speicher einsehbar.
- Die Unterprogramme für Gleitkommaoperationen sind hunderte von Befehlen lang und dauern hunderte von Maschinentakten (Zeitmessung siehe später Foliensatz RA-F6.pdf).
- 32-Bit-Prozessoren haben oft Gleitkommarechenwerke, die Gleitkommaoperationen in wenigen Schritten ausführen.



# Rekursion



### Rekursion

Ein rekursives Programm ruft sich so lange selbst auf, bis eine Abbruchbedingung erreicht ist. Beispiel für einen rekursiv beschreibaren Algorithmus ist die Berechnung der Fakultät:

$$n! = \begin{cases} n \cdot (n - 1)! & n > 1 \\ 1 & \text{sonst} \end{cases}$$

Ein rekursives Programm speichert bei jedem Aufruf von sich selbst die Rücksprungadresse und die zu sichernden Registerinhalte auf den Stack und reserviert Platz für die lokalen Variablen. Gute Demonstration einer tiefen Unterprogrammverschachtelung und einer intensiven Stack-Nutzung.



## Rekursive Rechtsverschiebung

```

11  uint32_t rshift(uint32_t a, uint8_t n){
12      if (n==0) return a;
13      else return rshift(a>>1, n-1);
    }

16  void main(void){
17      uint32_t b=rshift(0x5F317E1A, 5);
    }

```

Die 4-Byte Variable a (r25:r22) wird bei jedem Aufruf halbiert und die Variable n (r20) um eins verringert:

	Name	Value	Type
1. Aufruf	a	0x5f317e1a	uint32_t{registers}@ R25 R24 R23 R22
	n	0x05	uint8_t{registers}@R20
2. Aufruf	a	0x2f98bf0d	uint32_t{registers}@ R25 R24 R23 R22
	n	0x04	uint8_t{registers}@R20
...	...	...	...
5. Aufruf	a	0x05f317e1	uint32_t{registers}@ R25 R24 R23 R22
	n	0x01	uint8_t{registers}@R20



### Das Hauptprogramm

```
00092  LDI R20,0x05   | Variable B mit 5 initialisieren
00093  LDI R22,0x1A   |
00094  LDI R23,0x7E   | Variable a mit
00095  LDI R24,0x31   | 0x5F317E1A
00096  LDI R25,0x5F   | initialisieren
00097  RJMP PC-0x001A | Sprung zum Unterprogramm.
```

- Durch den Ansprung des Unterprogramms ist der Rücksprung vom Unterprogramm gleich der Rücksprung von main() zum Startup-Code (Adresse 0xB7).

Das Unterprogramm beginnt ab Adresse 0x7D:

```
00007D  PUSH R16       | Registerinhalte von r16 und r17
00007E  PUSH R17       | auf den Stack ablegen.
00007F  MOVW R16,R22   | Die Werte der Aufrufvariablen a
000080  MOVW R18,R24   | in die Register r16 bis r19 kopieren.
000081  TST R20        | Test, ob Aufrufparameter b null ist. Wenn ja,
000082  BREQ PC+0x09   | Sprung zu M (Rückgabe r16:r19 unverändert)
```



## 5. Rekursion

00083	LSR R25	
00084	ROR R24	Rechstverschiebung der 4 Bytes der Variablen a.
00085	ROR R23	
00086	ROR R22	
00087	SUBI R20,0x01	b ← b-1
00088	RCALL PC-0x000B	Erneuter Aufruf von sich selbst.
00089	MOVW R16,R22	Rückgabewert in r22 bis r25 in r16 bis r19 kopieren.
0008A	MOVW R18,R24	
M:008B	MOV R22,R16	
0008C	MOV R23,R17	Rückgabe des verschobenen Wertes aus r16:r19 in r22:r25
0008D	MOV R24,R18	
0008E	MOV R25,R19	
0008F	POP R17	Die auf den Stack abgelegten Inhalte zurück in r16 und r17 kopieren.
00090	POP R16	
00091	RET	Rücksprung

Bei jedem Aufruf werden auf den Stack abgelegt:

- die Rücksprungadresse (17 Bit, 3 Bytes)
- die mit push abgelegten Registerinhalte von r16 und r17.



## 5. Rekursion

Beim 5. Stopp am Unterbrechungspunkt liegen auf dem Stack:

- 21FD bis 21FF: Rücksprungadresse zum Startup-Code,
- 5× die Rücksprungadresse zu sich selbst und
- 6× die Registerinhalte von r16 und r17.

```

data 0x21E0  00 00 17 e1
data 0x21E4  00 00 89 f2
data 0x21E8  c3 00 00 89
data 0x21EC  5f 86 00 00
data 0x21F0  89 bf 0d 00
data 0x21F4  00 89 7e 1a
data 0x21F8  00 00 89 00
data 0x21FC  00 00 00 7b

```

---

00 00 7b Rücksprungadresse zum Startup-Code

00 00 89 Rücksprungadresse zum Unterprogramm

 Wert von r16

 Wert von r17



# Aufgaben



### Aufgabe 4.1: Multiplizierunterprogramm

Die nächste Folie zeigt ein Unterprogramm, das aus 16-Bit Faktoren ein 32-Bit-Produkt bildet, ein Hauptprogramm, das dieses mit Beispielzahlen aufruft und das mit `-O1` übersetzte disassemblierte Programm. Das Programm verhält sich nicht wie erwartet.

- 1 In welchen Registern werden die Faktoren übergeben und in welchen Registern erwartet das Hauptprogramm das Ergebnis?
- 2 Bestimmen Sie auf der nächsten Folie die Werte, die nach jeder Anweisung in den Registern stehen und füllen Sie die Tabelle aus.
- 3 Was ist an der Berechnung falsch?





## Lösung

- 1 Übergabe a in r25:r24 und b in r23:r22. Rückgabe in r25:r22.
- 2 Registerwerte:

```

0007D  MOVW R18,R24
0007E  MUL  R22,R18
0007F  MOVW R24,R0
00080  MUL  R22,R19
00081  ADD  R25,R0
00082  MUL  R23,R18
00083  ADD  R25,R0
00084  CLR  R1
00085  MOV  R22,R24
00086  MOV  R23,R25
00087  LDI  R24,0x00
00088  LDI  R25,0x00
00089  RET
    
```

C	r25	r24	r23	r22	r19	r18	r1	r0
	0x34	0x12	0xF1	0x23	0x34	0x12		
							0x02	0x76
	0x02	0x76						
							0x07	0x1C
	0	0x1E						
							0x10	0xF2
	1	0x10						
							0x00	
				0x76				
			0x10					
		0x00						
	0x00							

- 3 In r25:r24 wird 0 statt der Produktbytes zurückgegeben.



### Aufgabe 4.2: Multiplikation mit Vorzeichen

```
11  int8_t b, c;  
12  int16_t a;  
13  void main(void){  
14  } a = b*c;
```

#### Optimierung mit O1

```
00085  LDS R25,0x0200  
00087  LDS R24,0x0201  
00089  MULS R25,R24  
0008A  MOVW R24,R0  
0008B  CLR R1  
0008C  STS 0x0203,R25  
0008E  STS 0x0202,R24  
00090  RET
```

#### Optimierung mit O0

```
0000008C  CLR R21  
0000008D  SBRC R20,7  
0000008E  COM R21  
00000092  CLR R19  
00000093  SBRC R18,7  
00000094  COM R19  
00000095  MUL R20,R18  
00000096  MOVW R24,R0  
00000097  MUL R20,R19  
00000098  ADD R25,R0  
00000099  MUL R21,R18  
0000009A  ADD R25,R0
```

Untersuchung des generierten Codes.



## Lösung für -O0

		r20 := b; r18 := c
0000008C	CLR R21	} vorzeichenbehafte } Erweiterung von b } auf 16 Bit
0000008D	SBRC R20,7	
0000008E	COM R21	
00000092	CLR R19	} vorzeichenbehafte } Erweiterung von c } auf 16 Bit
00000093	SBRC R18,7	
00000094	COM R19	
00000095	MUL R20,R18	; r1:r0 := $b_0 \cdot c_0$
00000096	MOVW R24,R0	; r25:r24 := $b_0 \cdot c_0$
00000097	MUL R20,R19	; r1:r0 := $b_0 \cdot c_1$
00000098	ADD R25,R0	; r25 := $r25 + L(b_0 \cdot c_1)$
00000099	MUL R21,R18	; r1:r0 := $b_1 \cdot c_0$
0000009A	ADD R25,R0	; r25 := $r25 + L(b_1 \cdot c_0)$

- Vorzeichenerweiterung der Operanden auf 16 Bit.
- Die niederwertigen Produktbytes sind bei vorzeichenbehafte und vorzeichenfreier Multiplikation gleich.



### Lösung für -O1

```
00085 LDS R25,0x0200   lade b
00087 LDS R24,0x0201   lade c
00089 MULS R25,R24      vorzeichenbehaftete Multiplikation
0008A MOVW R24,R0       ; r25:r24 := r1:r0
0008B CLR R1
0008C STS 0x0203,R25   } Ergebnis speichern
0008E STS 0x0202,R24   }
00090 RET
```

Während eine  $16 \times 16$  Bit-Unsigned-Multiplikation die führenden 16 Produktbits auf null setzt (siehe Folie/Seite 15), berechnet die  $8 \times 8$  Bit-Signed-Multiplikation ein 2 Byte-Produkt.

Feature oder Bug?



### Aufgabe 4.3: Division

```
11  uint8_t a, b, r, q;  
12  int main(void){  
13      r = a%b; // Berechnung des Divisionsrests  
14      q = a/b; // Berechnung des Quotienten  
15  }
```

Quotient und Divisionsrest werden in C mit unterschiedlichen Operatoren, d.h. in getrennten Anweisungen beschrieben. Unser Compiler berechnet beide Werte mit demselben Unterprogramm:

- Rückgabe Rest in r25:r24 und
- Rückgabe Quotient in r23:r22.

Ruft das übersetzte Programm das Divisionsunterprogramm ein- oder zweimal auf?



## Lösung

```
    r = a%b; // Berechnung des Divisionsrests
0089  LDS R24,0x0202    ; r24 := a
008B  LDS R25,0x0200    ; r25 := b (ohne Sinn)
008D  MOV R22,R25       ; r22 := b
008E  RCALL PC+0x0011   ; Unterprogrammaufruf
008F  MOV R24,R25       ; Divisionsrest in r speichern
0090  STS 0x0201,R24
    q = a/b; // Berechnung des Quotienten
0092  LDS R24,0x0202    ; r24 := a
0094  LDS R25,0x0200    ; r25 := b (ohne Sinn)
0096  MOV R22,R25       ; r22 := b
0097  RCALL PC+0x0008   ; Unterprogrammaufruf
0098  STS 0x0203,R24    ; Quotient in q speichern
009F  SUB R25,R25       ; Beginn Unterprogramm Division
    .....
```

- Das Unterprogramm wird zweimal aufgerufen.

## Aufgabe 4.4: Festkommazahlen

Eine Festkommazahl mit  $n$ -Vorkomma- und  $m$ -Nachkommabits hat den Wert:

$$Z = \sum_{i=-m}^{n-2} b_i \cdot 2^i - b_{n-1} \cdot 2^{n-1} \quad (1)$$

Bestimmen Sie für folgende Werte den nächsten mit »int16\_t«, 12 Vorkomma- und 4 gedachten Nachkommabits darstellbaren Wert:

- 1  $w_1 = 164,4297$
- 2  $w_2 = -418,295$



### Lösung

Bei vier Nachkommabits und »vorzeichenbehaftet« wird im Rechner der  $2^4$ -fache gerundete Wert im Zweierkomplement dargestellt:

$w_i$	$w_i \cdot 2^4$	gerundet	hexadezimal	Zweierkomplement
164,4297	2630,9	2631	0x0a47	0x0a47
-418,295	-6692,7	-6693	-0x1a25	0xe5db



### Aufgabe 4.5: Gleitkommazahlen

Nach Abarbeitung der Anweisung im nachfolgenden C-Programm haben die Variablen die im Debug-Fenster angezeigten Werte:

```
float a;  
float b=14.74;  
float c=-379.12;  
int main(){  
    a = b + c;  
}
```

Name	Value	Type
a	-5588,22	float{data}@0x0208
b	14,74	float{data}@0x0200
c	-379,12	float{data}@0x0204

- Wie bestimmt man im Debugger die Hex-Darstellung dieser Werte und wie lautet diese?
- Wie lauten die Vorzeichenbits  $s$ , die Exponenten  $c - c_0$  (dezimal), die Mantissen  $M^{(6)}$  abgeschnitten nach 6 Nachkommabits und die sich daraus berechnenden Werte:

$$Z^{(6)} = (-1)^s \cdot 2^{c-c_0} \cdot M^{(6)}$$



### Lösung

- Die Hex-Darstellung findet man im Datenspeicher unter den angegebenen Adressen:

```
data 0x0200  0a d7 6b 41
data 0x0204  5c 8f bd c3
data 0x0208  d4 a1 ae c5
```

- Bestandteile und auf 6 Mantissenachkommastellen gerundete Werte:

	Adr.	Hex-Wert	$s$	$c - c_0$	$M^{(6)}$	$Z^{(6)}$
b	0x200	0x416bd70a	0	3	0b1,110101	14,63
c	0x204	0xc3bd8f5c	1	8	0b1,011110	-376
a	0x208	0xc5aea1d4	1	12	0b1,010111	-5568