

Grundlagen der Systemnahen Programmierung in C (GSPiC)

Teil C Systemnahe Softwareentwicklung

Daniel Lohmann

Lehrstuhl für Informatik 4
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Wintersemester 2012

http://www4.cs.fau.de/Lehre/WS12/V_GSPiC

Softwareentwurf

- Softwareentwurf: Grundsätzliche Überlegungen über die Struktur eines Programms **vor** Beginn der Programmierung
 - Ziel: Zerlegung des Problems in beherrschbare Einheiten
- Es gibt eine Vielzahl von Softwareentwurfs-Methoden
 - Objektorientierter Entwurf [↔ GDI, IV]
 - Stand der Kunst
 - Dekomposition in Klassen und Objekte
 - An Programmiersprachen wie C++ oder Java ausgelegt
 - Top-Down-Entwurf / **Funktionale Dekomposition**
 - Bis Mitte der 80er Jahre fast ausschließlich verwendet
 - Dekomposition in Funktionen und Funktionsaufrufe
 - An Programmiersprachen wie Fortran, Cobol, Pascal oder C orientiert

Systemnahe Software wird oft (noch) mit **Funktionaler Dekomposition** entworfen und entwickelt.

Überblick: Teil C Systemnahe Softwareentwicklung

12 Programmstruktur und Module

13 Zeiger und Felder

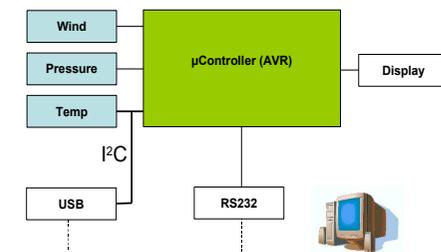
14 μ C-Systemarchitektur

15 Nebenläufigkeit

16 Speicherorganisation

Beispiel-Projekt: Eine Wetterstation

- Typisches eingebettetes System
 - Mehrere **Sensoren**
 - Wind
 - Luftdruck
 - Temperatur
 - Mehrere **Aktoren** (hier: Ausgabegeräte)
 - LCD-Anzeige
 - PC über RS232
 - PC über USB
 - Sensoren und Aktoren an den μ C angebunden über verschiedene **Bussysteme**
 - I²C
 - RS232

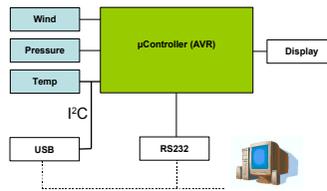


Wie sieht die **funktionale Dekomposition** der Software aus?

Funktionale Dekomposition: Beispiel

Funktionale Dekomposition der Wetterstation (Auszug):

1. Sensordaten lesen
 - 1.1 Temperatursensor lesen
 - 1.1.1 I²C-Datenübertragung initiieren
 - 1.1.2 Daten vom I²C-Bus lesen
 - 1.2 Drucksensor lesen
 - 1.3 Windsensor lesen
2. Daten aufbereiten (z. B. glätten)
3. Daten ausgeben
 - 3.1 Daten über RS232 versenden
 - 3.1.1 Baudrate und Parität festlegen (einmalig)
 - 3.1.2 Daten schreiben
 - 3.2 LCD-Display aktualisieren
4. Warten und ab Schritt 1 wiederholen

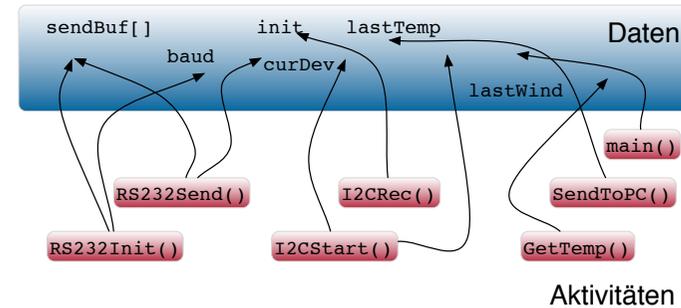


12-Module: 2012-07-03



Funktionale Dekomposition: Probleme

- Erzielte Gliederung betrachtet nur die Struktur der **Aktivitäten**, nicht jedoch die die Struktur der **Daten**
- Gefahr: Funktionen arbeiten „wild“ auf einer Unmenge schlecht strukturierter Daten ~ mangelhafte Trennung der Belange



12-Module: 2012-07-03



Funktionale Dekomposition: Probleme

- Erzielte Gliederung betrachtet nur die Struktur der **Aktivitäten**, nicht jedoch die die Struktur der **Daten**
- Gefahr: Funktionen arbeiten „wild“ auf einer Unmenge schlecht strukturierter Daten ~ mangelhafte Trennung der Belange

Prinzip der Trennung der Belange

Dinge, die **nichts miteinander** zu tun haben, sind auch **getrennt** unterzubringen!

Trennung der Belange (*Separation of Concerns*) ist ein **Fundamentalprinzip** der Informatik (wie auch jeder anderen Ingenieursdisziplin).

12-Module: 2012-07-03



Zugriff auf Daten (Variablen)

- Variablen haben ↔ 10-1
 - Sichtbarkeit (*Scope*) „Wer kann auf die Variable zugreifen?“
 - Lebensdauer „Wie lange steht der Speicher zur Verfügung?“
- Wird festgelegt durch Position (Pos) und Speicherklasse (SK)

Pos	SK	↔	Sichtbarkeit	Lebensdauer
Lokal	keine, auto	→	Blockende	Blockende
	static	→	Blockende	Programmstart → Programmende
Global	keine	→	unbeschränkt	Programmstart → Programmende
	static	→	modulweit	Programmstart → Programmende

```
int a = 0;           // a: global
static int b = 47;  // b: local to module

void f() {
    auto int a = b;  // a: local to function (auto optional)
                    // destroyed at end of block
    static int c = 11; // c: local to function, not destroyed
}
```

12-Module: 2012-07-03



Zugriff auf Daten (Variablen) (Forts.)

- Sichtbarkeit und Lebensdauer sollten **restriktiv** ausgelegt werden
 - Sichtbarkeit so **beschränkt wie möglich!**
 - Überraschende Zugriffe „von außen“ ausschließen (Fehlersuche)
 - Implementierungsdetails verbergen (Black-Box-Prinzip, *information hiding*)
 - Lebensdauer so **kurz wie möglich**
 - Speicherplatz sparen
 - Insbesondere wichtig auf μ -Controller-Plattformen

↔ 1-3

Konsequenz: Globale Variablen vermeiden!

- Globale Variablen sind überall sichtbar
- Globale Variablen belegen Speicher über die gesamte Programmlaufzeit

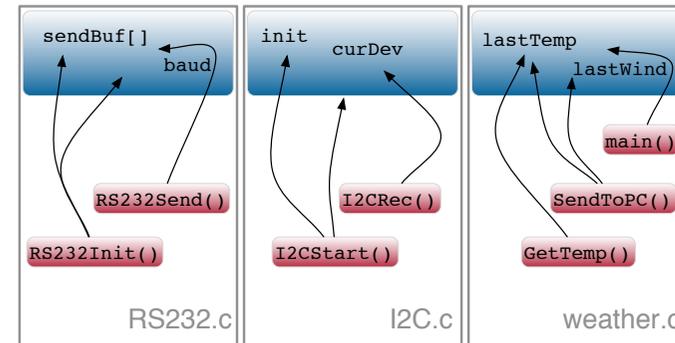
Regel: Variablen erhalten stets die **geringstmögliche Sichtbarkeit und Lebensdauer**

12-Module: 2012-07-03



Lösung: Modularisierung

- Separation jeweils zusammengehöriger **Daten** und **Funktionen** in übergeordnete Einheiten ~ **Module**



12-Module: 2012-07-03



Was ist ein Modul?

- **Modul** := (<Menge von Funktionen>, (↔ „class“ in Java)
<Menge von Daten>,
<Schnittstelle>)
- Module sind größere Programmbausteine ↔ 9-1
 - Problemorientierte Zusammenfassung von Funktionen und Daten
~ Trennung der Belange
 - Ermöglichen die einfache Wiederverwendung von Komponenten
 - Ermöglichen den einfachen Austausch von Komponenten
 - Verbergen Implementierungsdetails (**Black-Box**-Prinzip)
~ Zugriff erfolgt ausschließlich über die Modulschnittstelle

Modul → Abstraktion

↔ 4-1

- Die Schnittstelle eines Moduls **abstrahiert**
 - Von der tatsächlichen Implementierung der Funktionen
 - Von der internen Darstellung und Verwendung von Daten

12-Module: 2012-07-03



Module in C

[≠ Java]

- In C ist das Modulkonzept nicht Bestandteil der Sprache, ↔ 3-13
sondern rein **idiomatisch** (über **Konventionen**) realisiert
 - Modulschnittstelle ↔ .h-Datei (enthält Deklarationen ↔ 9-7)
 - Modulimplementierung ↔ .c-Datei (enthält Definitionen ↔ 9-3)
 - Modulverwendung ↔ #include <Modul.h>

```
void RS232Init( uint16_t br );
void RS232Send( char ch );
...
#include <RS232.h>
static uint16_t baud = 2400;
static char sendBuf[16];
...
void RS232Init( uint16_t br ) {
    ...
    baud = br;
}
void RS232Send( char ch ) {
    sendBuf[...] = ch;
    ...
}
```

RS232.h: Schnittstelle / Vertrag (öffentl.)
Deklaration der bereitgestellten Funktionen (und ggf. Daten)

RS232.c: Implementierung (nicht öffentl.)
Definition der bereitgestellten Funktionen (und ggf. Daten)
Ggf. modulinterne Hilfsfunktionen und Daten (static)
Inklusion der eigenen Schnittstelle stellt sicher, dass der Vertrag eingehalten wird

12-Module: 2012-07-03



Module in C – Export [≠ Java]

- Ein C-Modul **exportiert** eine Menge von definierten **Symbolen**
 - Alle Funktionen und globalen Variablen (→ „public“ in Java)
 - Export kann mit **static** unterbunden werden (→ „private“ in Java) (→ Einschränkung der Sichtbarkeit → 12-5)
- Export erfolgt beim Übersetzungsvorgang (.c-Datei → .o-Datei)



Quelldatei (foo.c)

```

uint16_t a;
// public
static uint16_t b;
// private

void f(void) // public
{ ... }
static void g(int) // private
{ ... }
  
```

Objektdatei (foo.o)

Symbole **a** und **f** werden exportiert.
Symbole **b** und **g** sind **static** definiert und werden deshalb nicht exportiert.

12-Module: 2012-07-03



Module in C – Import [≠ Java]

- Ein C-Modul **importiert** eine Menge nicht-definierter **Symbole**
 - Funktionen und globale Variablen, die verwendet werden, im Modul selber jedoch nicht definiert sind
 - Werden beim Übersetzen als **unaufgelöst** markiert

Quelldatei (bar.c)

```

extern uint16_t a;
// declare
void f(void); // declare

void main() { // public
  a = 0x4711; // use
  f(); // use
}
  
```

Objektdatei (bar.o)

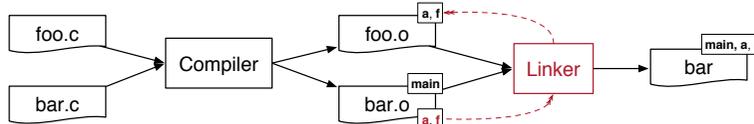
Symbol **main** wird exportiert.
Symbole **a** und **f** sind **unaufgelöst**.

12-Module: 2012-07-03



Module in C – Import (Forts.) [≠ Java]

- Die eigentliche Auflösung erfolgt durch den **Linker** (↔ GDI, VI-158)



Linken ist **nicht typsicher!**

- Typinformationen sind in Objektdateien nicht mehr vorhanden
- Auflösung durch den Linker erfolgt **ausschließlich** über die **Symbolnamen** (Bezeichner)
- ~ Typsicherheit muss beim **Übersetzen** sichergestellt werden
- ~ Einheitliche Deklarationen durch gemeinsame Header-Datei

12-Module: 2012-07-03



Module in C – Header [≠ Java]

- Elemente aus fremden Modulen müssen **deklariert** werden
 - Funktionen durch normale Deklaration (→ 9-7)
 - Globale Variablen durch **extern**

```

extern uint16_t a;
          
```

Das **extern** unterscheidet eine Variablendeklaration von einer Variablendefinition.
- Die Deklarationen erfolgen sinnvollerweise in einer **Header-Datei**, die von der Modulentwicklerin bereitgestellt wird
 - Schnittstelle des Moduls (→ „interface“ in Java)
 - Exportierte Funktionen des Moduls
 - Exportierte globale Variablen des Moduls
 - Modulspezifische Konstanten, Typen, Makros
 - Verwendung durch Inklusion (→ „import“ in Java)
 - Wird **auch vom Modul inkludiert**, um Übereinstimmung von Deklarationen und Definitionen sicher zu stellen (→ „implements“ in Java)

12-Module: 2012-07-03



Module in C – Header (Forts.)

[≠Java]

Modulschnittstelle: foo.h

```
// foo.h
#ifndef _F00_H
#define _F00_H

// declarations
extern uint16_t a;
void f(void);

#endif // _F00_H
```

Modulimplementierung foo.c

```
// foo.c
#include <foo.h>

// definitions
uint16_t a;
void f(void){
    ...
}
```

Modulverwendung bar.c
(vergleiche ↔ 12-11)

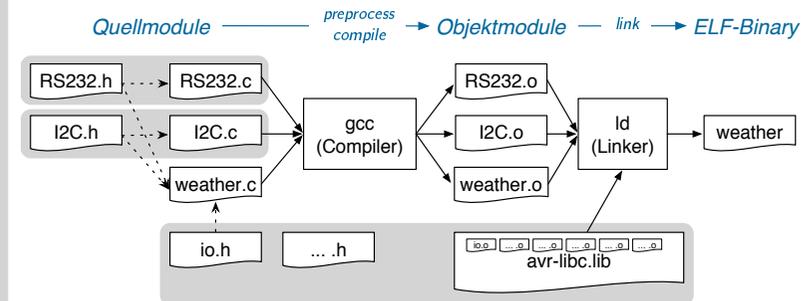
```
// bar.c
extern uint16_t a;
void f(void);
#include <foo.h>

void main() {
    a = 0x4711;
    f();
}
```

12-Module: 2012-07-03



Zurück zum Beispiel: Wetterstation



- Jedes Modul besteht aus Header- und Implementierungsdatei(en)
 - .h-Datei definiert die Schnittstelle
 - .c-Datei implementiert die Schnittstelle, inkludiert .h-Datei, um sicherzustellen, dass Deklaration und Definition übereinstimmen
- Modulverwendung durch Inkludieren der modulspezifischen .h-Datei
- Das Ganze funktioniert entsprechend bei Bibliotheken

12-Module: 2012-07-03



Zusammenfassung

- Prinzip der Trennung der Belange ~ Modularisierung
 - Wiederverwendung und Austausch wohldefinierter Komponenten
 - Verbergen von Implementierungsdetails
- In C ist das Modulkonzept nicht Bestandteil der Sprache, sondern **idiomatisch** durch Konventionen realisiert
 - Modulschnittstelle → .h-Datei (enthält Deklarationen)
 - Modulimplementierung → .c-Datei (enthält Definitionen)
 - Modulverwendung → #include <Modul.h>
 - **private** Symbole → als **static** definieren
- Die eigentliche Zusammenfügung erfolgt durch den **Linker**
 - Auflösung erfolgt ausschließlich über Symbolnamen
~ **Linken ist nicht typsicher!**
 - Typsicherheit muss beim Übersetzen sichergestellt werden
~ durch gemeinsame Header-Datei

12-Module: 2012-07-03



Überblick: Teil C Systemnahe Softwareentwicklung

12 Programmstruktur und Module

13 Zeiger und Felder

14 µC-Systemarchitektur

15 Nebenläufigkeit

16 Speicherorganisation

V_GSPiC_handout



Einordnung: Zeiger (Pointer)

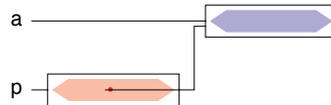
- **Literal: 'a'**
Darstellung eines Wertes

'a' ≡ 0110 0001

- **Variable: char a;**
Behälter für einen Wert



- **Zeiger-Variable: char *p = &a;**
Behälter für eine Referenz auf eine Variable



13-Zeiger: 2012-04-18



Zeiger (Pointer)

- Eine Zeigervariable (*Pointer*) enthält als Wert die **Adresse** einer anderen Variablen
 - Ein Zeiger verweist auf eine Variable (im Speicher)
 - Über die Adresse kann man **indirekt** auf die Zielvariable (ihren Speicher) zugreifen
- Daraus resultiert die große Bedeutung von Zeigern in C
 - Funktionen können Variablen des Aufrufers verändern (call-by-reference) ↔ 9-5
 - Speicher lässt sich direkt ansprechen
 - Effizientere Programme
- Aber auch viele Probleme!
 - Programmstruktur wird unübersichtlicher (welche Funktion kann auf welche Variablen zugreifen?)
 - Zeiger sind die **häufigste Fehlerquelle** in C-Programmen!

„Effizienz durch Maschinennähe“ ↔ 3-14

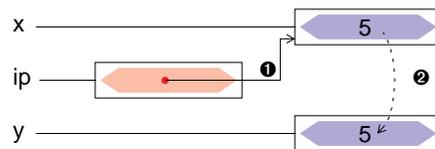
13-Zeiger: 2012-04-18



Definition von Zeigervariablen

- **Zeigervariable** := Behälter für Verweise (↪ Adresse)
- Syntax (Definition): `Typ * Bezeichner ;`
- Beispiel

```
int x = 5;
int *ip;
int y;
ip = &x; ①
y = *ip; ②
```



13-Zeiger: 2012-04-18



Adress- und Verweisoperatoren

- Adressoperator: **&x** Der unäre &-Operator liefert die **Referenz** (↪ Adresse im Speicher) der Variablen **x**.
- Verweisoperator: ***y** Der unäre *-Operator liefert die **Zielvariable** (↪ Speicherzelle / Behälter), auf die der Zeiger **y** verweist (Dereferenzierung).
- Es gilt: **(*(&x)) ≡ x** Der Verweisoperator ist die Umkehroperation des Adressoperators.

Achtung: Verwirrungsgefahr (Ich seh überall Sterne **)**

Das *-Symbol hat in C verschiedene Bedeutungen, **je nach Kontext**

1. Multiplikation (binär): `x * y` in Ausdrücken
2. Typmodifizierer: `uint8_t *p1, *p2` in Definitionen und `typedef char* CPTR` Deklarationen
3. Verweis (unär): `x = *p1` in Ausdrücken

Insbesondere 2. und 3. führen zu Verwirrung

~* wird fälschlicherweise für ein Bestandteil des Bezeichners gehalten.

13-Zeiger: 2012-04-18



Zeiger als Funktionsargumente

- Parameter werden in C immer *by-value* übergeben ↔ 9-5
 - Parameterwerte werden in lokale Variablen der aufgerufenen Funktion kopiert
 - Aufgerufene Funktion kann tatsächliche Parameter des Aufrufers nicht ändern
- Das gilt auch für Zeiger (Verweise) [↔ GDI, II-89]
 - Aufgerufene Funktion erhält eine Kopie des Adressverweises
 - Mit Hilfe des *-Operators kann darüber jedoch auf die Zielvariable zugegriffen werden und diese verändert werden

~ Call-by-reference

13-Zeiger: 2012-04-18



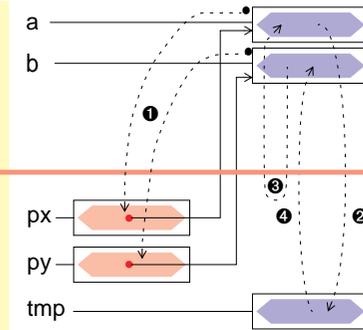
Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

- Beispiel (Gesamtüberblick)

```
void swap (int *, int *);
int main() {
    int a=47, b=11;
    ...
    swap(&a, &b); ❶
    ...
}

void swap (int *px, int *py)
{
    int tmp;

    tmp = *px; ❷
    *px = *py; ❸
    *py = tmp; ❹
}
```



13-Zeiger: 2012-04-18



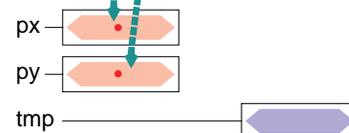
Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

- Beispiel (Einzelschritte)

```
void swap (int *, int *);
int main() {
    int a=47, b=11;
    ...
    swap(&a, &b); ❶
    ...
}
```



```
void swap (int *px, int *py)
{
    int tmp;
```



13-Zeiger: 2012-04-18



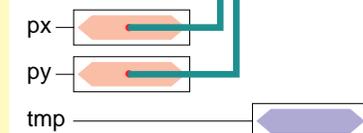
Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

- Beispiel (Einzelschritte)

```
void swap (int *, int *);
int main() {
    int a=47, b=11;
    ...
    swap(&a, &b);
    ...
}
```



```
void swap (int *px, int *py)
{
    int tmp;
```



13-Zeiger: 2012-04-18



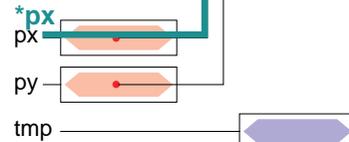
Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

Beispiel (Einzelschritte)

```
void swap (int *, int *);
int main() {
    int a=47, b=11;
    ...
    swap(&a, &b);
}
```



```
void swap (int *px, int *py)
{
    int tmp;
    tmp = *px; ②
```



13-Zeiger: 2012-04-18



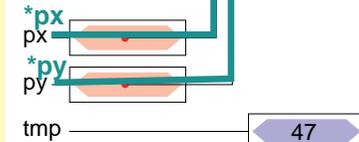
Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

Beispiel (Einzelschritte)

```
void swap (int *, int *);
int main() {
    int a=47, b=11;
    ...
    swap(&a, &b);
}
```



```
void swap (int *px, int *py)
{
    int tmp;
    tmp = *px; ②
    *px = *py; ③
    *py = tmp; ④
```



13-Zeiger: 2012-04-18



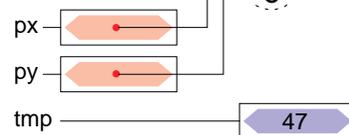
Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

Beispiel (Einzelschritte)

```
void swap (int *, int *);
int main() {
    int a=47, b=11;
    ...
    swap(&a, &b);
}
```



```
void swap (int *px, int *py)
{
    int tmp;
    tmp = *px; ②
    *px = *py; ③
    *py = tmp; ④
```



13-Zeiger: 2012-04-18



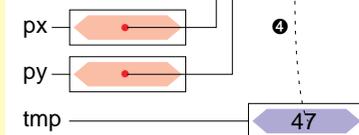
Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

Beispiel (Einzelschritte)

```
void swap (int *, int *);
int main() {
    int a=47, b=11;
    ...
    swap(&a, &b);
}
```



```
void swap (int *px, int *py)
{
    int tmp;
    tmp = *px; ②
    *px = *py; ③
    *py = tmp; ④
}
```



13-Zeiger: 2012-04-18



Einordnung: Felder (Arrays) [≈ Java]

- **Feldvariable** := Behälter für eine Reihe von Werten desselben Typs
- Syntax (Definition): `Typ Bezeichner [IntAusdruck] ;`
 - *Typ* Typ der Werte [=Java]
 - *Bezeichner* Name der Feldvariablen [=Java]
 - *IntAusdruck* **Konstanter** Ganzzahl-Ausdruck, definiert die Feldgröße (→ Anzahl der Elemente). [≠Java]
Ab **C99** darf *IntAusdruck* bei `auto`-Feldern auch **variabel** (d. h. beliebig, aber fest) sein.

Beispiele:

```
static uint8_t LEDs[ 8*2 ]; // constant, fixed array size
void f( int n ) {
    auto char a[ NUM_LEDS * 2]; // constant, fixed array size
    auto char b[ n ]; // C99: variable, fixed array size
}
```

13-Zeiger: 2012-04-18



Feldinitialisierung

- Wie andere Variablen auch, kann ein Feld bei Definition eine **initiale Wertzuweisung** erhalten

```
uint8_t LEDs[4] = { RED0, YELLOW0, GREEN0, BLUE0 };
int prim[5] = { 1, 2, 3, 5, 7 };
```

- Werden zu wenig Initialisierungselemente angegeben, so werden die restlichen Elemente **mit 0 initialisiert**

```
uint8_t LEDs[4] = { RED0 }; // => { RED0, 0, 0, 0 }
int prim[5] = { 1, 2, 3 }; // => { 1, 2, 3, 0, 0 }
```

- Wird die explizite Dimensionierung ausgelassen, so bestimmt die **Anzahl** der Initialisierungselemente die Feldgröße

```
uint8_t LEDs[] = { RED0, YELLOW0, GREEN0, BLUE0 };
int prim[] = { 1, 2, 3, 5, 7 };
```

13-Zeiger: 2012-04-18



Feldzugriff

- Syntax: `Feld [IntAusdruck]` [=Java]
 - Wobei $0 \leq \text{IntAusdruck} < n$ für $n = \text{Feldgröße}$
 - **Achtung:** Feldindex wird nicht überprüft [≠Java]
→ häufige Fehlerquelle in C-Programmen

Beispiel

```
uint8_t LEDs[] = { RED0, YELLOW0, GREEN0, BLUE0 };
LEDs[ 3 ] = BLUE1;
for( uint8_t i = 0; i < 4; ++i ) {
    sb_led_on( LEDs[ i ] );
}
LEDs[ 4 ] = GREEN1; // UNDEFINED!!!
```



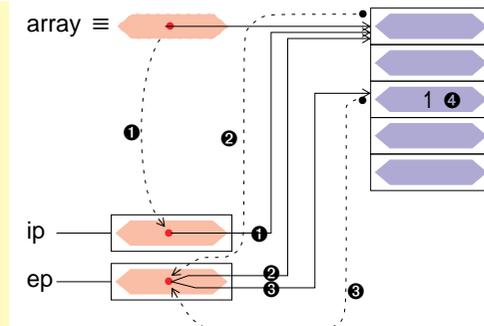
13-Zeiger: 2012-04-18



Felder sind Zeiger

- Ein Feldbezeichner ist **syntaktisch äquivalent** zu einem konstanten Zeiger auf das erste Element des Feldes: `array ≡ &array[0]`
 - Ein Alias – kein Behälter ~ Wert kann nicht verändert werden
 - Über einen so ermittelten Zeiger ist ein indirekter Feldzugriff möglich
- Beispiel (Gesamtüberblick)

```
int array[5];
int *ip = array; ①
int *ep;
ep = &array[0]; ②
ep = &array[2]; ③
*ep = 1; ④
```



13-Zeiger: 2012-04-18



Felder sind Zeiger

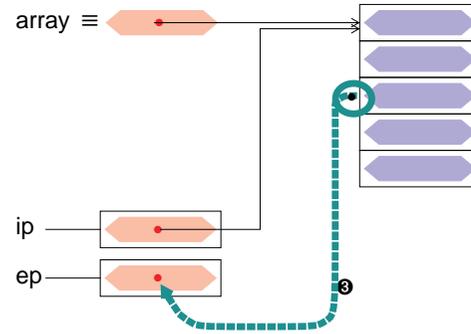
- Ein Feldbezeichner ist **syntaktisch äquivalent** zu einem konstanten Zeiger auf das erste Element des Feldes: `array ≡ &array[0]`
 - Ein Alias – kein Behälter \rightsquigarrow Wert kann nicht verändert werden
 - Über einen so ermittelten Zeiger ist ein indirekter Feldzugriff möglich
- Beispiel (Einzelschritte)

```
int array[5];

int *ip = array; ①

int *ep;
ep = &array[0]; ②

ep = &array[2]; ③
```



Felder sind Zeiger

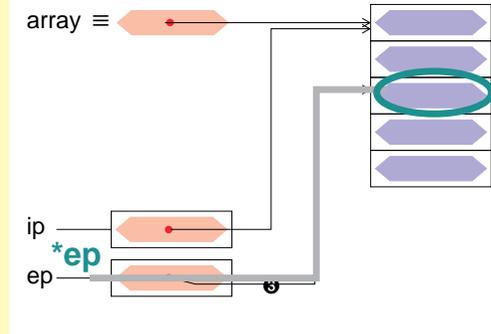
- Ein Feldbezeichner ist **syntaktisch äquivalent** zu einem konstanten Zeiger auf das erste Element des Feldes: `array ≡ &array[0]`
 - Ein Alias – kein Behälter \rightsquigarrow Wert kann nicht verändert werden
 - Über einen so ermittelten Zeiger ist ein indirekter Feldzugriff möglich
- Beispiel (Einzelschritte)

```
int array[5];

int *ip = array; ①

int *ep;
ep = &array[0]; ②

ep = &array[2]; ③
```



```
*ep = 1; ④
```



Zeiger sind Felder

- Ein Feldbezeichner ist **syntaktisch äquivalent** zu einem konstanten Zeiger auf das erste Element des Feldes: `array ≡ &array[0]`
- Diese Beziehung gilt in beide Richtungen: `*array ≡ array[0]`
 - Ein Zeiger kann wie ein Feld verwendet werden
 - Insbesondere kann der `[]`-Operator angewandt werden \leftrightarrow 13-9
- Beispiel (vgl. \leftrightarrow 13-9)

```
uint8_t LEDs[] = { RED0, YELLOW0, GREEN0, BLUE0 };

LEDs[ 3 ] = BLUE1;
uint8_t *p = LEDs;
for( uint8_t i = 0; i < 4; ++i ) {
    sb_led_on( p[ i ] );
}
```

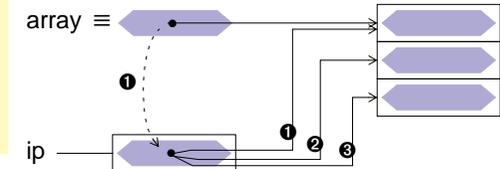


Rechnen mit Zeigern

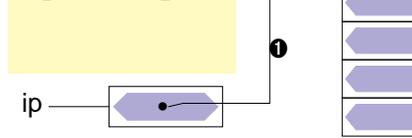
- Im Unterschied zu einem Feldbezeichner ist eine **Zeigervariable** ein Behälter \rightsquigarrow Ihr Wert ist veränderbar
- Neben einfachen Zuweisungen ist dabei auch **Arithmetik** möglich

```
int array[3];
int *ip = array; ①

ip++; ②
ip++; ③
```



```
int array[5];
ip = array; ①
```



$(ip+3) \equiv \&ip[3]$

Bei der Zeigerarithmetik wird immer die Größe des Objekttyps mit berücksichtigt.



Zeigerarithmetik – Operationen

- Arithmetische Operationen
 - ++ Prä-/Postinkrement
 - ~ Verschieben auf das nächste Objekt
 - Prä-/Postdekrement
 - ~ Verschieben auf das vorangegangene Objekt
 - +, - Addition / Subtraktion eines `int`-Wertes
 - ~ Ergebniszeiger ist verschoben um n Objekte
 - Subtraktion zweier Zeiger
 - ~ Anzahl der Objekte n zwischen beiden Zeigern (Distanz)
- Vergleichsoperationen: `<`, `<=`, `==`, `>=`, `>`, `!=` ↔ 7-3
 - ~ Zeiger lassen sich wie Ganzzahlen vergleichen und ordnen

13-Zeiger: 2012-04-18



Felder sind Zeiger sind Felder – Zusammenfassung

- In Kombination mit Zeigerarithmetik lässt sich in C jede Feldoperation auf eine äquivalente Zeigeroperation abbilden.
- Für `int i, array[N], *ip = array;` mit $0 \leq i < N$ gilt:

```
array ≡ &array[0] ≡ ip ≡ &ip[0]
*array ≡ array[0] ≡ *ip ≡ ip[0]
*(array + i) ≡ array[i] ≡ *(ip + i) ≡ ip[i]
array++ ≠ ip++
Fehler: array ist konstant!
```
- Umgekehrt können Zeigeroperationen auch durch Feldoperationen dargestellt werden.
Der Feldbezeichner kann aber **nicht verändert** werden.

13-Zeiger: 2012-04-18



Felder als Funktionsparameter

- Felder werden in C **immer** als Zeiger übergeben [=Java]
 - ~ *Call-by-reference*
- ```
static uint8_t LEDs[] = {RED0, YELLOW1};

void enlight(uint8_t *array, unsigned n) {
 for(unsigned i = 0; i < n; ++i)
 sb_led_on(array[i]);
}

void main() {
 enlight(LEDs, 2);
 uint8_t moreLEDs[] = {YELLOW0, BLUE0, BLUE1};
 enlight(moreLEDs, 3);
}
```
- 
- Informationen über die Feldgröße gehen dabei verloren!
    - Die Feldgröße muss explizit als Parameter mit übergeben werden
    - In manchen Fällen kann sie auch in der Funktion berechnet werden (z. B. bei Strings durch Suche nach dem abschließenden `NUL`-Zeichen)

13-Zeiger: 2012-04-18



## Felder als Funktionsparameter (Forts.)

- Felder werden in C **immer** als Zeiger übergeben [=Java]
    - ~ *Call-by-reference*
  - Wird der Parameter als `const` deklariert, so kann die Funktion die Feldelemente **nicht verändern** [≠Java] → Guter Stil!
- ```
void enlight( const uint8_t *array, unsigned n ) {
    ...
}
```
- Um anzuzeigen, dass ein Feld (und kein „Zeiger auf Variable“) erwartet wird, ist auch folgende äquivalente Syntax möglich:

```
void enlight( const uint8_t array[], unsigned n ) {
    ...
}
```
 - **Achtung:** Das gilt so nur bei Deklaration eines Funktionsparameters
 - Bei Variablendefinitionen hat `array[]` eine **völlig andere** Bedeutung (Feldgröße aus Initialisierungsliste ermitteln, ↔ 13-8)

13-Zeiger: 2012-04-18



Felder als Funktionsparameter (Forts.)

- Die Funktion `int strlen(const char *)` aus der Standardbibliothek liefert die Anzahl der Zeichen im übergebenen String

```
void main() {  
    ...  
    const char *string = "hallo"; // string is array of char  
    sb_7seg_showNumber( strlen(string) );  
    ...  
}
```

Dabei gilt: "hallo" ≡ `h a l l o \0` ↔ 6-13

- Implementierungsvarianten

Variante 1: Feld-Syntax

```
int strlen( const char s[] ) {  
    int n=0;  
    while( s[n] != 0 )  
        n++;  
    return n;  
}
```

Variante 2: Zeiger-Syntax

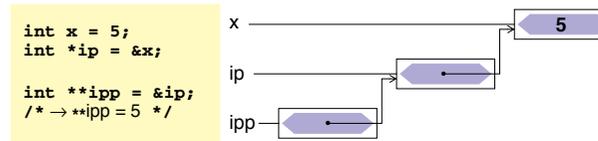
```
int strlen( const char *s ) {  
    const char *end = s;  
    while( *end )  
        end++;  
    return end - s;  
}
```

13-Zeiger: 2012-04-18



Zeiger auf Zeiger

- Ein Zeiger kann auch auf eine Zeigervariable verweisen



- Wird vor allem bei der Parameterübergabe an Funktionen benötigt
 - Zeigerparameter *call-by-reference* übergeben (z. B. `swap()`-Funktion für Zeiger)
 - Ein Feld von Zeigern übergeben

13-Zeiger: 2012-04-18



Zeiger auf Funktionen

- Ein Zeiger kann auch auf eine Funktion verweisen
 - Damit lassen sich Funktionen an Funktionen übergeben
↳ Funktionen höherer Ordnung
- Beispiel

```
// invokes job() every second  
void doPeriodically( void (*job)(void) ) {  
    while( 1 ) {  
        job(); // invoke job  
        for( volatile uint16_t i = 0; i < 0xffff; ++i )  
            ; // wait a second  
    }  
}  
  
void blink( void ) {  
    sb_led_toggle( RED0 );  
}  
  
void main() {  
    doPeriodically( blink ); // pass blink() as parameter  
}
```

13-Zeiger: 2012-04-18



Zeiger auf Funktionen (Forts.)

- Syntax (Definition): `Typ (* Bezeichner)(FormaleParamopt);` (sehr ähnlich zur Syntax von Funktionsdeklarationen) ↔ 9-3
 - Typ* Rückgabtyp der *Funktionen*, auf die dieser Zeiger verweisen kann
 - Bezeichner* Name des *Funktionszeigers*
 - FormaleParam_{opt}* Formale Parameter der *Funktionen*, auf die dieser Zeiger verweisen kann: *Typ₁, ..., Typ_n*
- Ein Funktionszeiger wird genau wie eine Funktion verwendet
 - Aufruf mit *Bezeichner* (*TatParam*) ↔ 9-4
 - Adress- (&) und Verweisoperator (*) werden nicht benötigt ↔ 13-4
 - Ein Funktionsbezeichner ist ein konstanter Funktionszeiger

```
void blink( uint8_t which ) { sb_led_toggle( which ); }  
  
void main() {  
    void (*myfun)(uint8_t); // myfun is pointer to function  
    myfun = blink; // blink is constant pointer to function  
    myfun( RED0 ); // invoke blink() via function pointer  
    blink( RED0 ); // invoke blink()  
}
```

13-Zeiger: 2012-04-18



Zeiger auf Funktionen (Forts.)

- Funktionszeiger werden oft für **Rückruffunktionen** (*Callbacks*) zur Zustellung asynchroner Ereignisse verwendet (→ „Listener“ in Java)

```
// Example: asynchronous button events with libspicboard
#include <avr/interrupt.h> // for sei()
#include <7seg.h> // for sb_7seg_showNumber()
#include <button.h> // for button stuff

// callback handler for button events (invoked on interrupt level)
void onButton( BUTTON b, BUTTONEVENT e ) {
    static int8_t count = 1;
    sb_7seg_showNumber( count++ ); // show no of button presses
    if( count > 99 ) count = 1; // reset at 100
}

void main() {
    sb_button_registerListener( // register callback
        BUTTON0, BTNPPRESSED, // for this button and events
        onButton // invoke this function
    );
    sei(); // enable interrupts (necessary!)
    while( 1 ) ; // wait forever
}
```

Zusammenfassung

- Ein Zeiger verweist auf eine Variable im Speicher
 - Möglichkeit des **indirekten** Zugriffs auf den Wert
 - Grundlage für die Implementierung von *call-by-reference* in C
 - Grundlage für die Implementierung von Feldern
 - Wichtiges Element der **Maschinennähe** von C
 - **Häufigste Fehlerursache in C-Programmen**
- Die syntaktischen Möglichkeiten sind vielfältig (und verwirrend)
 - Typmodifizierer *, Adressoperator &, Verweisoperator *
 - Zeigerarithmetik mit +, -, ++ und --
 - syntaktische Äquivalenz zu Feldern ([] Operator)
- Zeiger können auch auf Funktionen verweisen
 - Übergeben von Funktionen an Funktionen
 - Prinzip der Rückruffunktion

Überblick: Teil C Systemnahe Softwareentwicklung

12 Programmstruktur und Module

13 Zeiger und Felder

14 μ C-Systemarchitektur

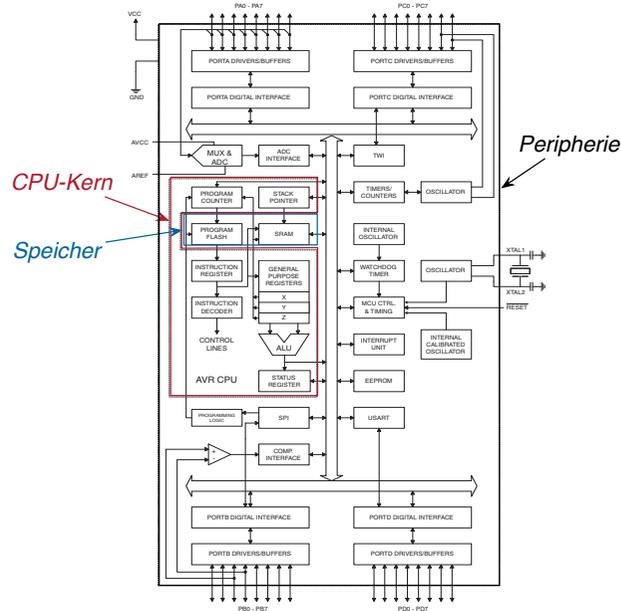
15 Nebenläufigkeit

16 Speicherorganisation

Was ist ein μ -Controller?

- **μ -Controller** := Prozessor + Speicher + Peripherie
 - Faktisch ein Ein-Chip-Computersystem → SoC (*System-on-a-Chip*)
 - Häufig verwendbar ohne zusätzliche externe Bausteine, wie z. B. Taktgeneratoren und Speicher → kostengünstiges Systemdesign
- Wesentliches Merkmal ist die (reichlich) enthaltene Peripherie
 - Timer/Counter (Zeiten/Ereignisse messen und zählen)
 - Ports (digitale Ein-/Ausgabe), A/D-Wandler (analoge Eingabe)
 - PWM-Generatoren (pseudo-analoge Ausgabe)
 - Bus-Systeme: SPI, RS-232, CAN, Ethernet, MLI, I²C, ...
 - ...
- Die Abgrenzungen sind fließend: Prozessor \longleftrightarrow μ C \longleftrightarrow SoC
 - AMD64-CPU's haben ebenfalls eingebaute Timer, Speicher (Caches), ...
 - Einige μ C erreichen die Geschwindigkeit „großer Prozessoren“

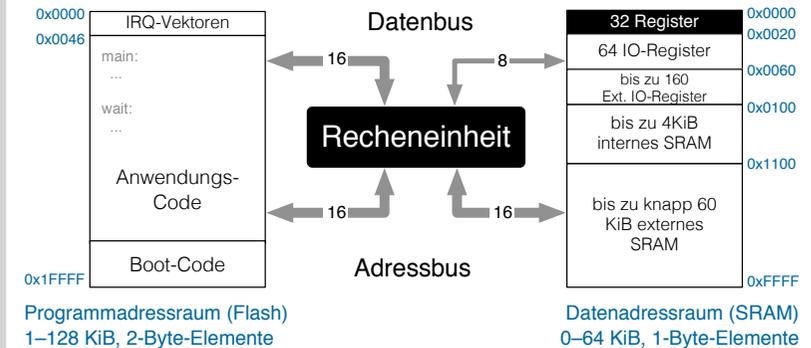
Beispiel ATmega32: Blockschaltbild



14-MC: 2012-06-08



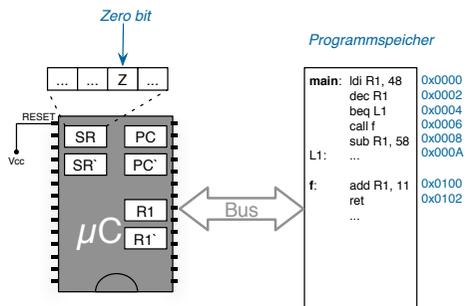
Beispiel ATmega-Familie: CPU-Architektur



14-MC: 2012-06-08



Wie arbeitet ein Prozessor?

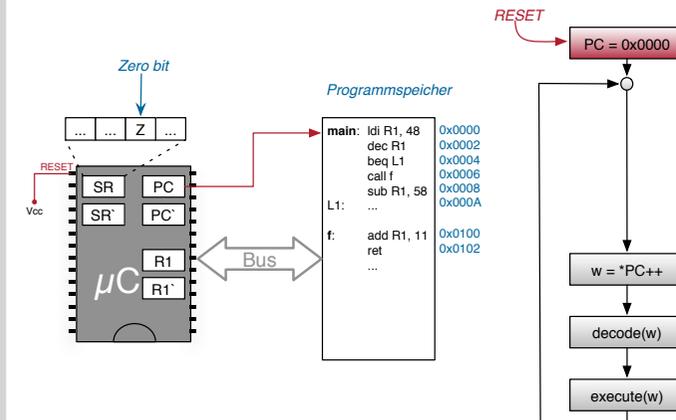


- Hier am Beispiel eines sehr einfachen Pseudoprocessors
 - Nur zwei Vielzweckregister (R1 und R2)
 - Programmzähler (PC) und Statusregister (SR) (+ „Schattenkopien“)
 - Kein Datenspeicher, kein Stapel ~ Programm arbeitet nur auf Registern

14-MC: 2012-06-08



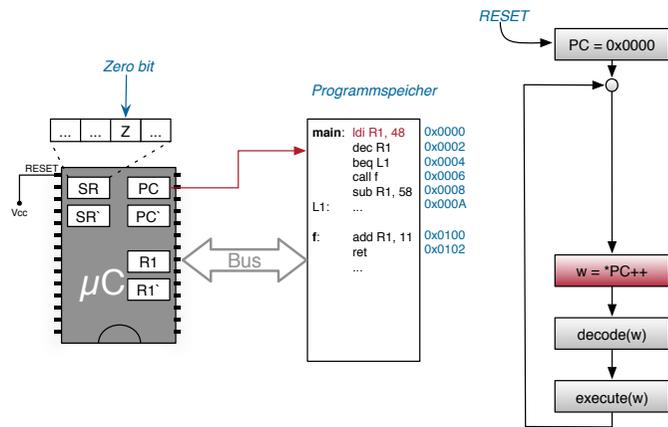
Wie arbeitet ein Prozessor?



14-MC: 2012-06-08



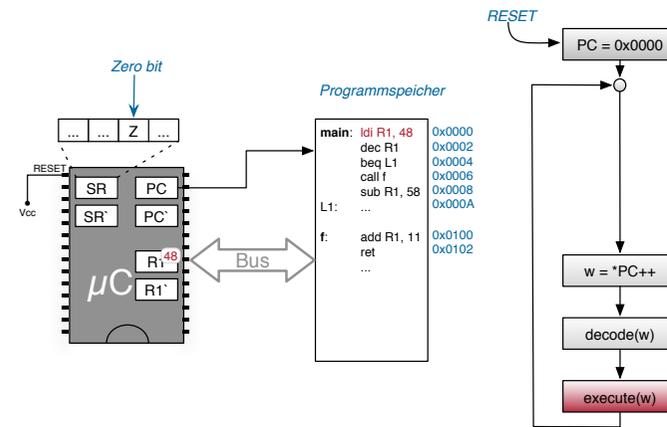
Wie arbeitet ein Prozessor?



14-MC: 2012-06-08



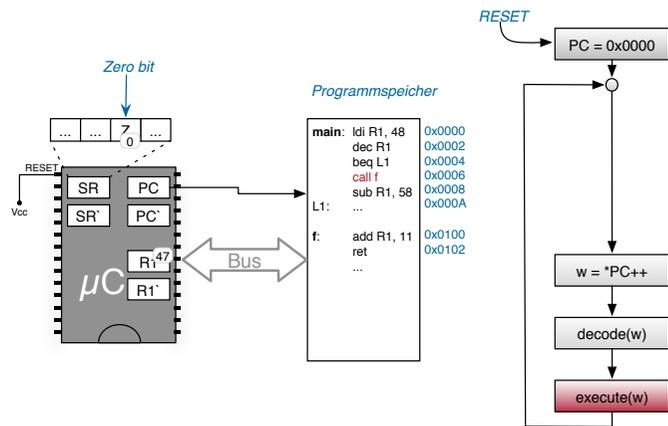
Wie arbeitet ein Prozessor?



14-MC: 2012-06-08



Wie arbeitet ein Prozessor?

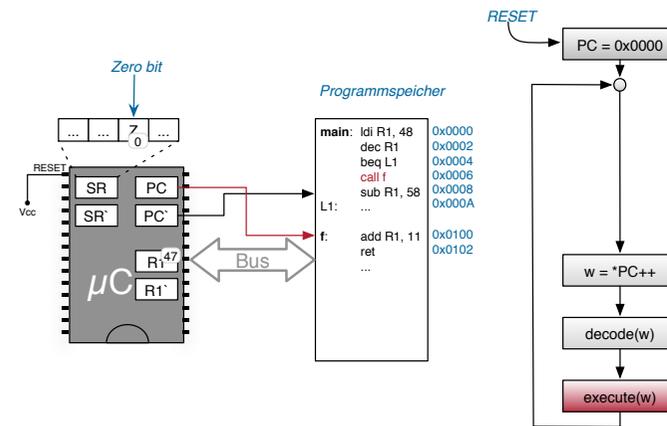


14-MC: 2012-06-08



w: dec <R> R = 1 if (R = 0) Z = 1 else Z = 0	w: beq <lab> if (Z) PC = lab	w: call <func> PC = PC PC = func
--	--	---

Wie arbeitet ein Prozessor?

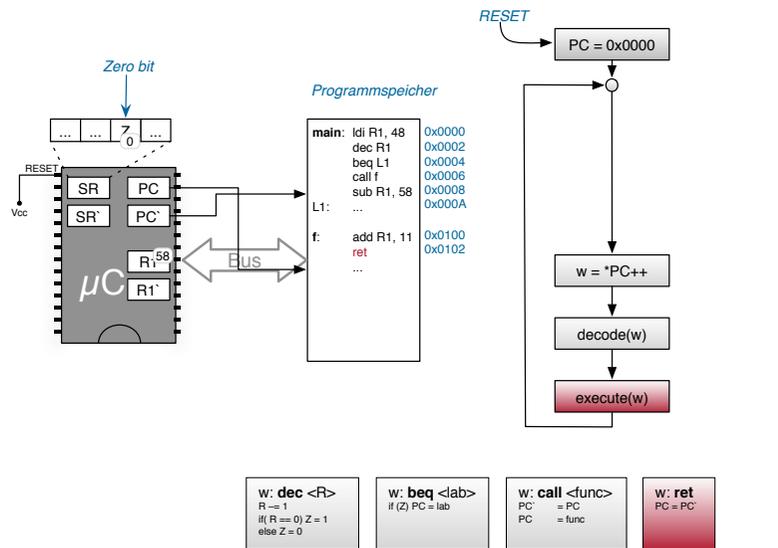


14-MC: 2012-06-08



w: dec <R> R = 1 if (R = 0) Z = 1 else Z = 0	w: beq <lab> if (Z) PC = lab	w: call <func> PC = PC PC = func
--	--	---

Wie arbeitet ein Prozessor?



Peripheriegeräte

- **Peripheriegerät:** Hardwarekomponente, die sich „außerhalb“ der Zentraleinheit eines Computers befindet
 - Traditionell (PC): Tastatur, Bildschirm, ... (→ physisch „außerhalb“)
 - Allgemeiner: Hardwarefunktionen, die nicht direkt im Befehlssatz des Prozessors abgebildet sind (→ logisch „außerhalb“)
- Peripheriebausteine werden über **I/O-Register** angesprochen
 - Kontrollregister: Befehle an / Zustand der Peripherie wird durch **Bitmuster** kodiert (z. B. DDRD beim ATmega)
 - Datenregister: Dienen dem eigentlichen Datenaustausch (z. B. PORTD, PIND beim ATmega)
 - Register sind häufig für entweder nur Lesezugriffe (*read-only*) oder nur Schreibzugriffe (*write-only*) zugelassen

Peripheriegeräte: Beispiele

- Auswahl von typischen Peripheriegeräten in einem µ-Controller
 - Timer/Counter: Zählregister, die mit konfigurierbarer Frequenz (Timer) oder durch externe Signale (Counter) erhöht werden und bei konfigurierbarem Zählwert einen Interrupt auslösen.
 - Watchdog-Timer: Timer, der regelmäßig neu beschrieben werden muss oder sonst einen RESET auslöst („Totmannknopf“).
 - (A)synchrone serielle Schnittstelle: Bausteine zur seriellen (bitweisen) Übertragung von Daten mit synchronem (z. B. RS-232) oder asynchronem (z. B. I²C) Protokoll.
 - A/D-Wandler: Bausteine zur momentweisen oder kontinuierlichen Diskretisierung von Spannungswerten (z. B. 0–5V → 10-Bit-Zahl).
 - PWM-Generatoren: Bausteine zur Generierung von pulsweiten-modulierten Signalen (pseudo-analoge Ausgabe).
 - Ports: Gruppen von üblicherweise 8 Anschlüssen, die auf GND oder Vcc gesetzt werden können oder deren Zustand abgefragt werden kann. → 14-12

Peripheriegeräte – Register

- Es gibt verschiedene Architekturen für den Zugriff auf I/O-Register
 - Memory-mapped: Register sind in den Adressraum eingebettet; der Zugriff erfolgt über die Speicherbefehle des Prozessors (*load, store*)
 - Port-basiert: Register sind in einem eigenen I/O-Adressraum organisiert; der Zugriff erfolgt über spezielle *in-* und *out-*Befehle
- Die Registeradressen stehen in der Hardware-Dokumentation

Address	Name	Bit 7	Bit 6	Bit 5	Bit 4	Bit 3	Bit 2	Bit 1	Bit 0	Page
\$3F (\$F)	SREG	1	T	H	S	V	N	Z	C	8
\$3E (\$E)	SPL	-	-	-	-	SP11	SP10	SP9	SP8	11
\$3D (\$D)	SPL	SP7	SP6	SP5	SP4	SP3	SP2	SP1	SP0	11
\$3C (\$C)	OCR0	Timer/Counter0 Output Compare Register								86
\$12 (\$2)	PORTD	PORTD7	PORTD6	PORTD5	PORTD4	PORTD3	PORTD2	PORTD1	PORTD0	67
\$11 (\$1)	DDRD	DD07	DD06	DD05	DD04	DD03	DD02	DD01	DD00	67
\$10 (\$0)	PIND	PIND7	PIND6	PIND5	PIND4	PIND3	PIND2	PIND1	PIND0	68

[1, S. 334]

Peripheriegeräte – Register (Forts.)

- Memory-mapped Register ermöglichen einen komfortablen Zugriff
 - Register → Speicher → Variable
 - Alle C-Operatoren stehen direkt zur Verfügung (z. B. PORTD++)
- Syntaktisch wird der Zugriff oft durch Makros erleichtert:

```
#define PORTD ( * (volatile uint8_t*)( 0x12 ) )
```

Adresse: int
 Adresse: volatile uint8_t* (Cast → 7-17)
 Wert: volatile uint8_t (Dereferenzierung → 15-4)

PORTD ist damit (syntaktisch) äquivalent zu einer volatile uint8_t-Variablen, die an Adresse 0x12 liegt

- Beispiel

```
#define PORTD (*(volatile uint8_t*)(0x12))
PORTD |= (1<<7); // set D.7
uint8_t *pReg = &PORTD; // get pointer to PORTD
*pReg &= ~(1<<7); // use pointer to clear D.7
```

Registerzugriff und Nebenläufigkeit

- Peripheriegeräte arbeiten **nebenläufig** zur Software
 - Wert in einem Hardwareregister kann sich **jederzeit ändern**
- Dies widerspricht einer Annahme des Compilers
 - Variablenzugriffe erfolgen **nur** durch die aktuell ausgeführte Funktion
 - Variablen können in Registern zwischengespeichert werden

<pre>// C code #define PIND (*(uint8_t*)(0x10)) void foo(void) { ... if(!(PIND & 0x2)) { // button0 pressed ... } if(!(PIND & 0x4)) { // button 1 pressed ... } }</pre>	<pre>// Resulting assembly code foo: lds r24, 0x0010 // PIND->r24 sbrc r24, 1 // test bit 1 rjmp L1 // button0 pressed ... L1: sbrc r24, 2 // test bit 2 rjmp L2 ... L2: ret</pre>
---	--

PIND wird nicht erneut aus dem Speicher geladen. Der Compiler nimmt an, dass der Wert in r24 aktuell ist.

Der volatile-Typmodifizierer

- Lösung:** Variable **volatile** („flüchtig, unbeständig“) deklarieren
 - Compiler hält Variable nur so kurz wie möglich im Register
 - Wert wird unmittelbar vor Verwendung gelesen
 - Wert wird unmittelbar nach Veränderung zurückgeschrieben

<pre>// C code #define PIND \ (*(volatile uint8_t*)(0x10)) void foo(void) { ... if(!(PIND & 0x2)) { // button0 pressed ... } if(!(PIND & 0x4)) { // button 1 pressed ... } }</pre>	<pre>// Resulting assembly code foo: lds r24, 0x0010 // PIND->r24 sbrc r24, 1 // test bit 1 rjmp L1 // button0 pressed ... L1: lds r24, 0x0010 // PIND->r24 sbrc r24, 2 // test bit 2 rjmp L2 ... L2: ret</pre>
--	---

PIND ist volatile und wird deshalb vor dem Test erneut aus dem Speicher geladen.

Der volatile-Typmodifizierer (Forts.)

- Die **volatile**-Semantik verhindert viele Code-Optimierungen (insbesondere das Entfernen von **scheinbar unnützem Code**)
- Kann ausgenutzt werden, um aktives Warten zu implementieren:

<pre>// C code void wait(void){ for(uint16_t i = 0; i<0xffff;) i++; }</pre>	<pre>// Resulting assembly code wait: // compiler has optimized // "nonsensical" loop away ret</pre>
--	--

Achtung: volatile → \$\$\$

Die Verwendung von **volatile** verursacht erhebliche **Kosten**

- Werte können nicht mehr in Registern gehalten werden
- Viele Code-Optimierungen können nicht durchgeführt werden

Regel: **volatile** wird nur in **begründeten Fällen** verwendet

Peripheriegeräte: Ports

- **Port** := Gruppe von (üblicherweise 8) digitalen Ein-/Ausgängen
 - Digitaler Ausgang: Bitwert \mapsto Spannungspegel an μ C-Pin
 - Digitaler Eingang: Spannungspegel an μ C-Pin \mapsto Bitwert
 - Externer Interrupt: Spannungspegel an μ C-Pin \mapsto Bitwert (bei Pegelwechsel) \leadsto Prozessor führt Interruptprogramm aus
- Die Funktion ist üblicherweise pro Pin konfigurierbar
 - Eingang
 - Ausgang
 - Externer Interrupt (nur bei bestimmten Eingängen)
 - Alternative Funktion (Pin wird von anderem Gerät verwendet)

14-MC: 2012-06-08



Beispiel ATmega32: Port/Pin-Belegung

PDIP			
(XCK/T0) PB0	1	40	PA0 (ADC0)
(T1) PB1	2	39	PA1 (ADC1)
(INT2/AIN0) PB2	3	38	PA2 (ADC2)
(OC0/AIN1) PB3	4	37	PA3 (ADC3)
(SS) PB4	5	36	PA4 (ADC4)
(MOSI) PB5	6	35	PA5 (ADC5)
(MISO) PB6	7	34	PA6 (ADC6)
(SCK) PB7	8	33	PA7 (ADC7)
RESET	9	32	AREF
VCC	10	31	GND
GND	11	30	AVCC
XTAL2	12	29	PC7 (TOSC2)
XTAL1	13	28	PC6 (TOSC1)
(RXD) PD0	14	27	PC5 (TDI)
(TXD) PD1	15	26	PC4 (TDO)
(INT0) PD2	16	25	PC3 (TMS)
(INT1) PD3	17	24	PC2 (TCK)
(OC1B) PD4	18	23	PC1 (SDA)
(OC1A) PD5	19	22	PC0 (SCL)
(ICP1) PD6	20	21	PD7 (OC2)

Aus **Kostengründen** ist nahezu jeder Pin **doppelt belegt**, die Konfiguration der gewünschten Funktion erfolgt durch die **Software**.

Beim **SPiCboard** werden z. B. **Pins 39-40 als ADCs konfiguriert**, um Poti und Photosensor anzuschließen.
PORTA steht daher **nicht zur Verfügung**.

14-MC: 2012-06-08



Beispiel ATmega32: Port-Register

- Pro Port x sind drei Register definiert (Beispiel für $x = D$)
 - **DDRx** **Data Direction Register:** Legt für jeden Pin i fest, ob er als Eingang (Bit $i=0$) oder als Ausgang (Bit $i=1$) verwendet wird.

7	6	5	4	3	2	1	0
DDD7	DDD6	DDD5	DDD4	DDD3	DDD2	DDD1	DDD0
R/W							
 - **PORTx** **Data Register:** Ist Pin i als Ausgang konfiguriert, so legt Bit i den Pegel fest (0=GND sink, 1=Vcc source). Ist Pin i als Eingang konfiguriert, so aktiviert Bit i den internen Pull-Up-Widerstand (1=aktiv).

7	6	5	4	3	2	1	0
PORTD7	PORTD6	PORTD5	PORTD4	PORTD3	PORTD2	PORTD1	PORTD0
R/W							
 - **PINx** **Input Register:** Bit i repräsentiert den Pegel an Pin i (1=*high*, 0=*low*), unabhängig von der Konfiguration als Ein-/Ausgang.

7	6	5	4	3	2	1	0
PIND7	PIND6	PIND5	PIND4	PIND3	PIND2	PIND1	PIND0
R	R	R	R	R	R	R	R
- Verwendungsbeispiele: \leftrightarrow 3-5 und \leftrightarrow 3-8 [1, S. 66]

14-MC: 2012-06-08



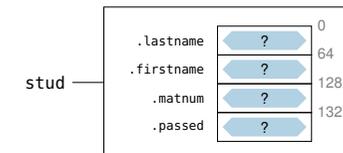
Strukturen: Motivation

- Jeder Port wird durch *drei* globale Variablen verwaltet
 - Es wäre besser diese **zusammen zu fassen**
 - „problembezogene Abstraktionen“ \leftrightarrow 4-1
 - „Trennung der Belange“ \leftrightarrow 12-4
- Dies geht in C mit **Verbundtypen** (Strukturen)

```
// Structure declaration
struct Student {
    char lastname[64];
    char firstname[64];
    long matnum;
    int passed;
};

// Variable definition
struct Student stud;
```

Ein **Strukturtyp** fasst eine Menge von Daten zu einem gemeinsamen Typ zusammen.
Die Datenelemente werden **hintereinander** im Speicher abgelegt.



14-MC: 2012-06-08



Strukturen: Variablendefinition und -initialisierung

- Analog zu einem Array kann eine Strukturvariable bei Definition elementweise initialisiert werden ↔ 13-8

```
struct Student {
    char lastname[64];
    char firstname[64];
    long matnum;
    int passed;
};
```

```
struct Student stud = { "Meier", "Hans",
                        4711, 0 };
```

Die Initialisierer werden nur über ihre Reihenfolge, nicht über ihren Bezeichner zugewiesen.
 ~ Potentielle Fehlerquelle bei Änderungen!

- Analog zur Definition von `enum`-Typen kann man mit `typedef` die Verwendung vereinfachen ↔ 6-8

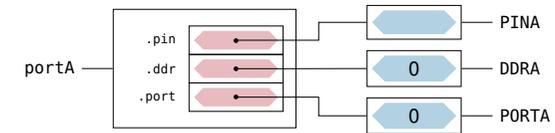
```
typedef struct {
    volatile uint8_t *pin;
    volatile uint8_t *ddr;
    volatile uint8_t *port;
} port_t;
```

```
port_t portA = { &PINA, &DDRA, &PORTA };
port_t portD = { &PIND, &DDRD, &PORTD };
```

14-MC: 2012-06-08



Strukturen: Elementzugriff



- Auf Strukturelemente wird mit dem `.`-Operator zugegriffen [≈ Java]

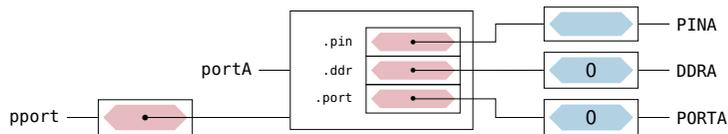
```
port_t portA = { &PINA, &DDRA, &PORTA };
*portA.port = 0; // clear all pins
*portA.ddr = 0xff; // set all to input
```

Beachte: `.` hat eine höhere Priorität als `*`

14-MC: 2012-06-08



Strukturen: Elementzugriff



- Bei einem Zeiger auf eine Struktur würde Klammerung benötigt

```
port_t * pport = &portA; // p --> portA
```

```
*(pport).port = 0; // clear all pins
*(pport).ddr = 0xff; // set all to output
```

- Mit dem `->`-Operator lässt sich dies vereinfachen `s->m` ≡ `(*s).m`

```
port_t * pport = &portA; // p --> portA
```

```
*pport->port = 0; // clear all pins
*pport->ddr = 0xff; // set all to output
```

-> hat ebenfalls eine höhere Priorität als *****

14-MC: 2012-06-08



Strukturen als Funktionsparameter

- Im Gegensatz zu Arrays werden Strukturen *by-value* übergeben

```
void initPort( port_t p ){
    *p.port = 0; // clear all pins
    *p.ddr = 0xff; // set all to output

    p.port = &PORTD; // no effect, p is local variable
}
```

```
void main(){ initPort( portA ); ... }
```

- Bei größeren Strukturen wird das **sehr ineffizient**
 - Z. B. Student (↔ 14-15): Jedes mal 134 Byte allozieren und kopieren
 - Besser man übergibt einen Zeiger auf eine konstante Struktur

```
void initPort( const port_t *p ){
    *p->port = 0; // clear all pins
    *p->ddr = 0xff; // set all to output

    // p->port = &PORTD; compile-time error, *p is const!
}
```

```
void main(){ initPort( &portA ); ... }
```

14-MC: 2012-06-08



Bit-Strukturen: Bitfelder

- Strukturelemente können auf Bit-Granularität festgelegt werden
 - Der Compiler fasst Bitfelder zu passenden Ganzzahltypen zusammen
 - Nützlich, um auf einzelne Bit-Bereiche eines Registers zuzugreifen

Beispiel

- MCUCR **MCU Control Register:** Steuert Power-Management-Funktionen und Auslöser für externe Interrupt-Quellen INT0 und INT1. [1, S. 36+69]

7	6	5	4	3	2	1	0
SE	SM2	SM1	SM0	ISC11	ISC10	ISC01	ISC00
R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W	R/W

```
typedef struct {
    uint8_t ISC0 : 2; // bit 0-1: interrupt sense control INT0
    uint8_t ISC1 : 2; // bit 2-3: interrupt sense control INT1
    uint8_t SM   : 3; // bit 4-6: sleep mode to enter on sleep
    uint8_t SE   : 1; // bit 7 : sleep enable
} MCUCR_t;
```

14-MC: 2012-06-08



Unions

- In einer Struktur liegen die Elemente **hintereinander** im Speicher, in einer Union hingegen **übereinander**
 - Wert im Speicher lässt sich verschieden (Typ)-interpretieren
 - Nützlich für bitweise Typ-Casts
- Beispiel

```
void main(){
    union {
        uint16_t val;
        uint8_t  bytes[2];
    } u;

    u.val = 0x4711;

    // show high-byte
    sb_7seg_showHexNumber( u.bytes[1] );
    ...
    // show low-byte
    sb_7seg_showHexNumber( u.bytes[0] );
    ...
}
```



47

11

14-MC: 2012-06-08



Unions und Bit-Strukturen: Anwendungsbeispiel

- Unions werden oft mit Bit-Feldern kombiniert, um ein Register wahlweise „im Ganzen“ oder bitweise ansprechen zu können

```
typedef union {
    volatile uint8_t reg; // complete register
    volatile struct {
        uint8_t ISC0 : 2; // components
        uint8_t ISC1 : 2;
        uint8_t SM   : 3;
        uint8_t SE   : 1;
    };
} MCUCR_t;

void foo( void ) {
    MCUCR_t *mcucr = (MCUCR_t *) (0x35);
    uint8_t oldval = mcucr->reg; // save register
    ...
    mcucr->ISC0 = 2; // use register
    mcucr->SE   = 1; // ...
    ...
    mcucr->reg = oldval; // restore register
}
```

14-MC: 2012-06-08



Überblick: Teil C Systemnahe Softwareentwicklung

12 Programmstruktur und Module

13 Zeiger und Felder

14 µC-Systemarchitektur

15 Nebenläufigkeit

16 Speicherorganisation

V_GSPiC_handout



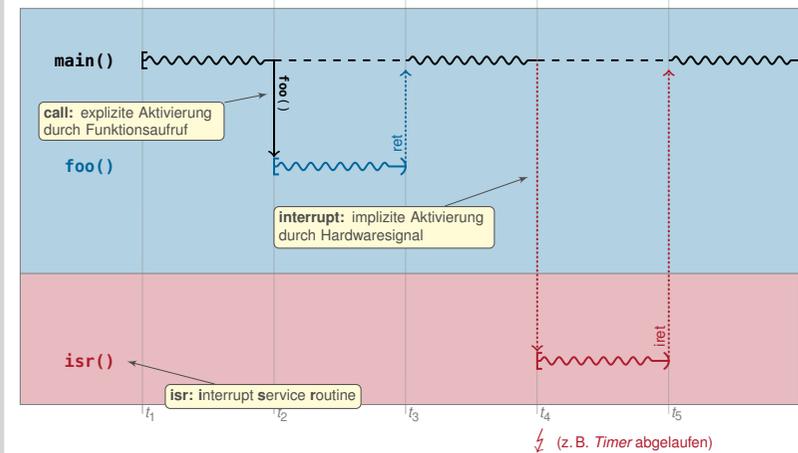
Ereignisbehandlung

- Bei einem **Peripheriegerät** tritt ein Ereignis (⚡) auf ↔ 14-5
 - Signal an einem Port-Pin wechselt von *low* auf *high*
 - Ein *Timer* ist abgelaufen
 - Ein A/D-Wandler hat einen neuen Wert vorliegen
 - ...
- Wie bekommt das Programm das (nebenläufige) Ereignis mit?
- Zwei alternative Verfahren
 - Polling:** Das **Programm** überprüft den Zustand regelmäßig und ruft ggf. eine Bearbeitungsfunktion auf.
 - Interrupt:** Gerät „meldet“ sich beim **Prozessor**, der daraufhin in eine Bearbeitungsfunktion verzweigt.

15-IRQ: 2012-06-27



Interrupt ↦ Funktionsaufruf „von außen“



15-IRQ: 2012-06-27



Polling vs. Interrupts – Vor- und Nachteile

- Polling** (↔ „Periodisches / zeitgesteuertes System“)
 - Ereignisbearbeitung erfolgt **synchron** zum Programmablauf
 - Ereigniserkennung über das Programm „verstreut“ (Trennung der Belange)
 - Hochfrequentes Pollen \rightsquigarrow hohe Prozessorlast \rightsquigarrow **hoher Energieverbrauch**
 - + Implizite Datenkonsistenz durch festen, sequentiellen Programmablauf
 - + Programmverhalten gut vorhersagbar
- Interrupts** (↔ „Ereignisgesteuertes System“)
 - Ereignisbearbeitung erfolgt **asynchron** zum Programmablauf
 - + Ereignisbearbeitung kann im Programmtext gut separiert werden
 - + Prozessor wird nur beansprucht, wenn Ereignis tatsächlich eintritt
 - Höhere Komplexität durch Nebenläufigkeit \rightsquigarrow Synchronisation erforderlich
 - Programmverhalten **schwer vorhersagbar**

Beide Verfahren bieten spezifische Vor- und Nachteile
 \rightsquigarrow Auswahl anhand des konkreten Anwendungsszenarios

15-IRQ: 2012-06-27



Interruptsperrn

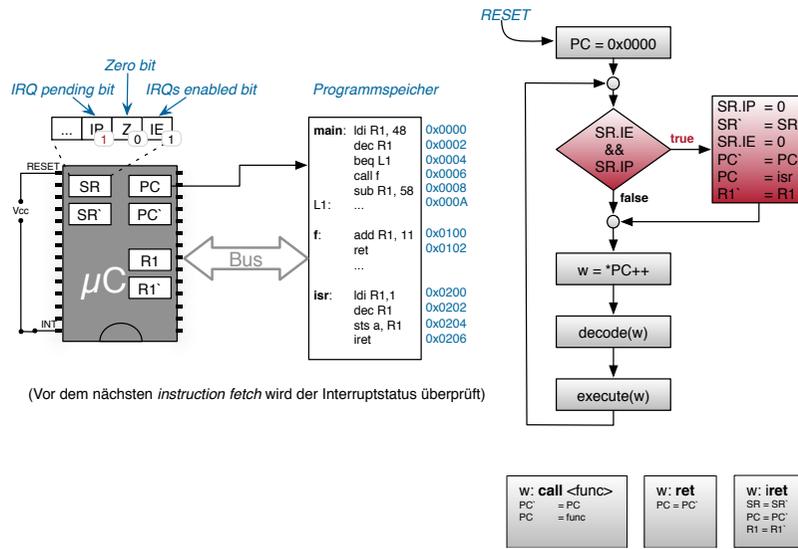
- Zustellung von Interrupts kann softwareseitig **gesperrt** werden
 - Wird benötigt zur **Synchronisation** mit ISRs
 - Einzelne ISR: Bit in gerätespezifischem Steuerregister
 - Alle ISRs: Bit (**IE**, *Interrupt Enable*) im Statusregister der CPU
- Auflaufende IRQs werden (üblicherweise) gepuffert
 - Maximal einer pro Quelle!
 - Bei längeren Sperrzeiten können IRQs verloren gehen!**
- Das IE-Bit wird beeinflusst durch:
 - Prozessor-Befehle: `cli: IE←0` (*clear interrupt*, IRQs gesperrt)
 - `sei: IE←1` (*set interrupt*, IRQs erlaubt)
 - Nach einem RESET: IE=0 \rightsquigarrow IRQs sind zu Beginn des Hauptprogramms gesperrt
 - Bei Betreten einer ISR: IE=0 \rightsquigarrow IRQs sind während der Interruptbearbeitung gesperrt

IRQ ↦ *Interrupt ReQuest*

15-IRQ: 2012-06-27

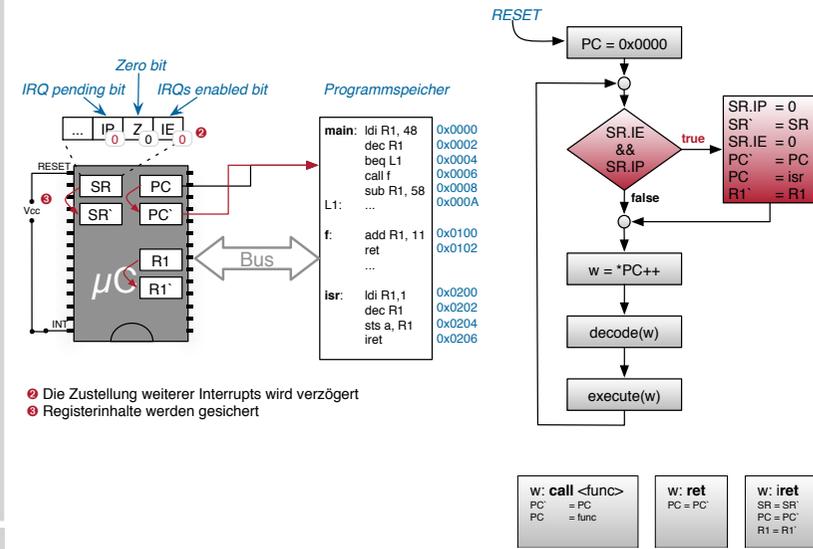


Ablauf eines Interrupts – Details



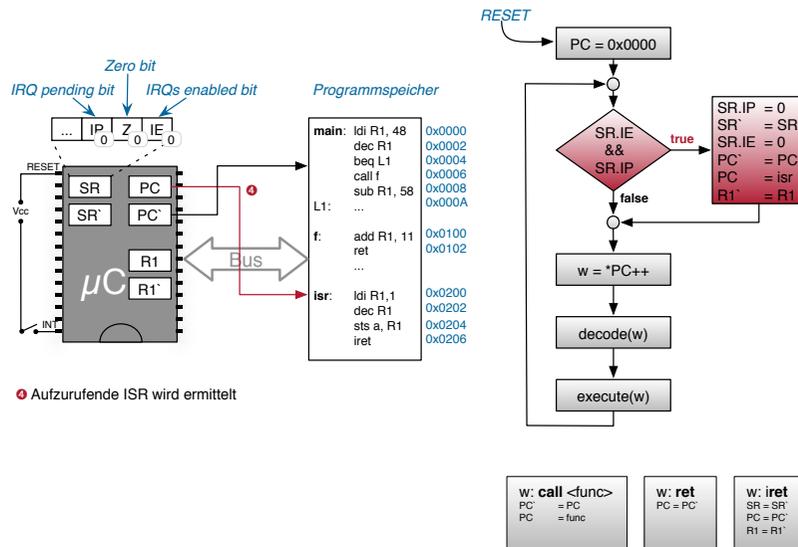
15-IRQ: 2012-06-27

Ablauf eines Interrupts – Details



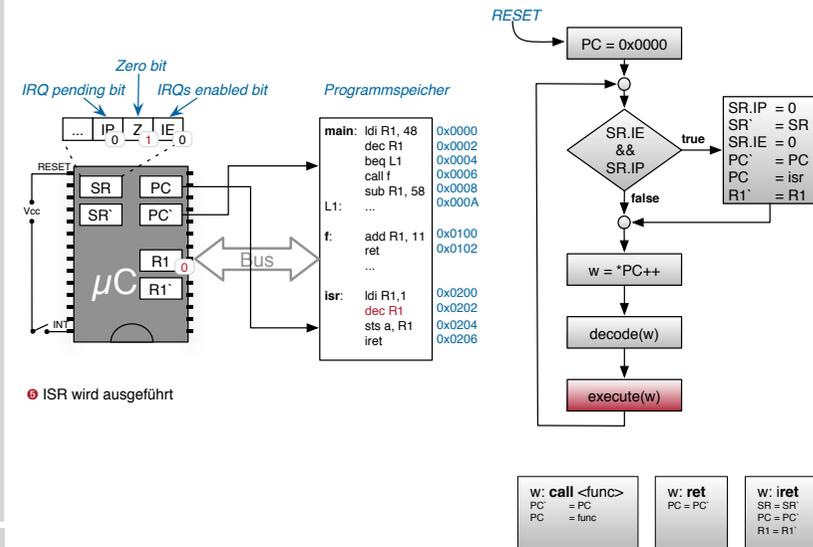
15-IRQ: 2012-06-27

Ablauf eines Interrupts – Details



15-IRQ: 2012-06-27

Ablauf eines Interrupts – Details



15-IRQ: 2012-06-27

Externe Interrupts: Verwendung

Schritt 1: Installation der Interrupt-Service-Routine

- ISR in Hochsprache \rightsquigarrow Registerinhalte sichern und wiederherstellen
- Unterstützung durch die avrlibc: Makro ISR(SOURCE_vect) (Modul avr/interrupt.h)

```
#include <avr/interrupt.h>
#include <avr/io.h>

ISR( INT1_vect ) { // invoked for every INT1 IRQ
    static uint8_t counter = 0;
    sb_7seg_showNumber( counter++ );
    if( counter == 100 ) counter = 0;
}

void main() {
    ... // setup
}
```

15-IRQ: 2012-06-27



Externe Interrupts: Verwendung (Forts.)

Schritt 2: Konfigurieren der Interrupt-Steuerung

- Steuerregister dem Wunsch entsprechend initialisieren
- Unterstützung durch die avrlibc: Makros für Bit-Indizes (Modul avr/interrupt.h und avr/io.h)

```
...
void main() {
    DDRD &= ~(1<<PD3); // PD3: input with pull-up
    PORTD |= (1<<PD3);
    MCUCR &= ~(1<<ISC10 | 1<<ISC11); // INT1: IRQ on level=low
    GICR |= (1<<INT1); // INT1: enable
    ...
    sei(); // global IRQ enable
    ...
}
```

Schritt 3: Interrupts global zulassen

- Nach Abschluss der Geräteinitialisierung
- Unterstützung durch die avrlibc: Befehl sei() (Modul avr/interrupt.h)

15-IRQ: 2012-06-27



Externe Interrupts: Verwendung (Forts.)

Schritt 4: Wenn nichts zu tun, den Stromsparmodus betreten

- Die sleep-Instruktion hält die CPU an, bis ein IRQ eintrifft
 - In diesem Zustand wird nur sehr wenig Strom verbraucht
- Unterstützung durch die avrlibc (Modul avr/sleep.h):
 - sleep_enable() / sleep_disable(): Sleep-Modus erlauben / verbieten
 - sleep_cpu(): Sleep-Modus betreten



```
#include <avr/sleep.h>
...
void main() {
    ...
    sei(); // global IRQ enable
    while(1) {
        sleep_enable();
        sleep_cpu(); // wait for IRQ
        sleep_disable();
    }
}
```

Atmel empfiehlt die Verwendung von sleep_enable() und sleep_disable() in dieser Form, um das Risiko eines „versehentlichen“ Betretens des Sleep-Zustands (z. B. durch Programmierfehler oder Bit-Kipper in der Hardware) zu minimieren.

15-IRQ: 2012-06-27



Nebenläufigkeit

Definition: Nebenläufigkeit

Zwei Programmausführungen A und B sind nebenläufig ($A|B$), wenn für einzelne Instruktionen a aus A und b aus B nicht feststeht, ob a oder b tatsächlich zuerst ausgeführt wird (a, b oder b, a).

Nebenläufigkeit tritt auf durch

- Interrupts
 - \rightsquigarrow IRQs können ein Programm an „beliebiger Stelle“ unterbrechen
- Echt-parallele Abläufe (durch die Hardware)
 - \rightsquigarrow andere CPU / Peripherie greift „jederzeit“ auf den Speicher zu
- Quasi-parallele Abläufe (z. B. Fäden in einem Betriebssystem)
 - \rightsquigarrow Betriebssystem kann „jederzeit“ den Prozessor entziehen

Problem: Nebenläufige Zugriffe auf gemeinsamen Zustand

15-IRQ: 2012-06-27



Nebenläufigkeitsprobleme

■ Szenario

- Eine Lichtschranke am Parkhauseingang soll Fahrzeuge zählen
- Alle 60 Sekunden wird der Wert an den Sicherheitsdienst übermittelt

```
static volatile uint16_t cars; // photo sensor is connected
                               // to INT2
void main() {
    while(1) {
        waitsec( 60 );
        send( cars );
        cars = 0;
    }
}
ISR(INT2_vect){
    cars++;
}
```

■ Wo ist hier das Problem?

- Sowohl main() als auch ISR **lesen und schreiben** cars
~> Potentielle *Lost-Update*-Anomalie
- Größe der Variable cars **übersteigt die Registerbreite**
~> Potentielle *Read-Write*-Anomalie

Nebenläufigkeitsprobleme (Forts.)

■ Wo sind hier die Probleme?

- **Lost-Update**: Sowohl main() als auch ISR lesen und schreiben cars
- **Read-Write**: Größe der Variable cars übersteigt die Registerbreite

■ Wird oft erst auf der **Assemblerebene** deutlich

```
void main() {
    ...
    send( cars );
    cars = 0;
}
// photosensor is connected
// to INT2
ISR(INT2_vect){
    cars++;
}

main:
...
lds r24,cars
lds r25,cars+1
rcall send
sts cars+1, __zero_reg__
sts cars, __zero_reg__
...

INT2_vect:
...
; save regs
lds r24,cars ; load cars.lo
lds r25,cars+1 ; load cars.hi
adiw r24,1 ; add (16 bit)
sts cars+1,r25 ; store cars.hi
sts cars,r24 ; store cars.lo
...
; restore regs
```

Nebenläufigkeitsprobleme: *Lost-Update*-Anomalie

```
main:
...
lds r24,cars
lds r25,cars+1
rcall send
sts cars+1, __zero_reg__
sts cars, __zero_reg__
...

INT2_vect:
...
; save regs
lds r24,cars
lds r25,cars+1
adiw r24,1
sts cars+1,r25
sts cars,r24
...
; restore regs
```

■ Sei cars=5 und an **dieser Stelle** tritt der IRQ (⚡) auf

- main hat den Wert von cars (5) bereits in Register gelesen (Register → lokale Variable)
- INT2_vect wird ausgeführt
 - Register werden gerettet
 - cars wird inkrementiert ~> cars=6
 - Register werden wiederhergestellt
- main übergibt den **veralteten Wert** von cars (5) an send
- main nullt cars ~> **1 Auto ist „verloren“ gegangen**

Nebenläufigkeitsprobleme: *Read-Write*-Anomalie

```
main:
...
lds r24,cars
lds r25,cars+1
rcall send
sts cars+1, __zero_reg__
sts cars, __zero_reg__
...

INT2_vect:
...
; save regs
lds r24,cars
lds r25,cars+1
adiw r24,1
sts cars+1,r25
sts cars,r24
...
; restore regs
```

■ Sei cars=255 und an **dieser Stelle** tritt der IRQ (⚡) auf

- main hat bereits cars=255 Autos mit send gemeldet
- main hat bereits das **High-Byte** von cars genullt
~> cars=255, cars.lo=255, cars.hi=0
- INT2_vect wird ausgeführt
~> cars wird gelesen und inkrementiert, **Überlauf ins High-Byte**
~> cars=256, cars.lo=0, cars.hi=1
- main nullt das **Low-Byte** von cars
~> cars=256, cars.lo=0, cars.hi=1
~> Beim nächsten send werden **255 Autos zu viel gemeldet**

Interruptsperrn: Datenflussanomalien verhindern

```
void main() {
    while(1) {
        waitsec( 60 );
        cli();
        send( cars );
        cars = 0;
        sei();
    }
}
```

- Wo genau ist das **kritische Gebiet**?
 - Lesen von cars und Nullen von cars müssen atomar ausgeführt werden
 - Dies kann hier mit **Interruptsperrn** erreicht werden
 - ISR unterbricht main, aber nie umgekehrt ~ asymmetrische Synchronisation
 - Achtung: Interruptsperrn sollten **so kurz wie möglich** sein
 - Wie lange braucht die Funktion send hier?
 - Kann man send aus dem kritischen Gebiet herausziehen?

Nebenläufigkeitsprobleme (Forts.)

- Szenario, Teil 2 (Funktion waitsec())
 - Eine Lichtschranke am Parkhauseingang soll Fahrzeuge zählen
 - Alle 60 Sekunden wird der Wert an den Sicherheitsdienst übermittelt

```
void waitsec( uint8_t sec ) {
    ... // setup timer
    sleep_enable();
    event = 0;
    while( !event ) { // wait for event
        sleep_cpu(); // until next irq
    }
    sleep_disable();
}
```

```
static volatile int8_t event;
// TIMER1 ISR
// triggers when
// waitsec() expires
ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
    event = 1;
}
```

- Wo ist hier das Problem?
 - **Test, ob nichts zu tun ist**, gefolgt von **Schlafen, bis etwas zu tun ist**
~ Potenzielle *Lost-Wakeup*-Anomalie

Nebenläufigkeitsprobleme: *Lost-Wakeup*-Anomalie

```
void waitsec( uint8_t sec ) {
    ... // setup timer
    sleep_enable();
    event = 0;
    while( !event ) {
        sleep_cpu();
    }
    sleep_disable();
}
```

```
static volatile int8_t event;
// TIMER1 ISR
// triggers when
// waitsec() expires
ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
    event = 1;
}
```

- Angenommen, an **dieser Stelle** tritt der Timer-IRQ (⚡) auf
 - waitsec hat bereits festgestellt, dass event **nicht gesetzt** ist
 - ISR wird ausgeführt ~ event **wird gesetzt**
 - Obwohl event gesetzt ist, wird der **Schlafzustand betreten**
~ Falls kein weiterer IRQ kommt, **Dornröschenschlaf**



Lost-Wakeup: Dornröschenschlaf verhindern

```
1 void waitsec( uint8_t sec ) {
2     ... // setup timer
3     sleep_enable();
4     event = 0;
5     cli();
6     while( !event ) {
7         sei();
8         sleep_cpu();
9         cli();
10    }
11    sei();
12    sleep_disable();
13 }
```

```
static volatile int8_t event;
// TIMER1 ISR
// triggers when
// waitsec() expires
ISR(TIMER1_COMPA_vect) {
    event = 1;
}
```

- Wo genau ist das **kritische Gebiet**?
 - Test auf Vorbedingung und Betreten des Schlafzustands (Kann man das durch Interruptsperrn absichern?)
 - Problem: Vor sleep_cpu() müssen IRQs freigegeben werden!
 - Funktioniert dank spezieller Hardwareunterstützung:
~ Befehlssequenz sei, sleep wird von der CPU **atomar** ausgeführt

Zusammenfassung

- Interruptbearbeitung erfolgt **asynchron** zum Programmablauf
 - Unerwartet \leadsto Zustandssicherung im Interrupt-Handler erforderlich
 - Quelle von Nebenläufigkeit \leadsto **Synchronisation erforderlich**
- Synchronisationsmaßnahmen
 - Gemeinsame Zustandsvariablen als **volatile** deklarieren (immer)
 - Zustellung von Interrupts sperren: **cli**, **sei** (bei nichtatomaren Zugriffen, die mehr als einen Maschinenbefehl erfordern)
 - Bei längeren Sperrzeiten können IRQs verloren gehen!
- Nebenläufigkeit durch Interrupts ist eine **sehr große Fehlerquelle**
 - *Lost-Update* und *Lost-Wakeup* Probleme
 - indeterministisch \leadsto durch Testen schwer zu fassen
- Wichtig zur Beherrschbarkeit: **Modularisierung** \leftrightarrow 12-7
 - Interrupthandler und Zugriffsfunktionen auf gemeinsamen Zustand (**static** Variablen!) in eigenem Modul kapseln.

Überblick: Teil C Systemnahe Softwareentwicklung

12 Programmstruktur und Module

13 Zeiger und Felder

14 μ C-Systemarchitektur

15 Nebenläufigkeit

16 Speicherorganisation

Speicherorganisation

```
int a;           // a: global, uninitialized
int b = 1;      // b: global, initialized
const int c = 2; // c: global, const

void main() {
    static int s = 3; // s: local, static, initialized
    int x, y;        // x: local, auto; y: local, auto
    char* p = malloc( 100 ); // p: local, auto; *p: heap (100 byte)
}
```

Wo kommt der Speicher für diese Variablen her?

- **Statische Allokation** – Reservierung beim Übersetzen / Linken
 - Betrifft globale und modullokale Variablen, sowie den Code
 - Allokation durch Platzierung in einer **Sektion**
- | | | |
|---------|--|--------|
| .text | – enthält den Programmcode | main() |
| .bss | – enthält alle uninitialisierten / mit 0 initialisierten Variablen | a |
| .data | – enthält alle initialisierten Variablen | b,s |
| .rodata | – enthält alle initialisierten unveränderlichen Variablen | c |
- **Dynamische Allokation** – Reservierung zur Laufzeit
 - Betrifft lokale Variablen und explizit angeforderten Speicher
- | | | |
|-------|--|-------|
| Stack | – enthält alle aktuell gültigen lokalen Variablen | x,y,p |
| Heap | – enthält explizit mit malloc() angeforderte Speicherbereiche | *p |

Speicherorganisation auf einem μ C

```
int a;           // a: global, uninitialized
int b = 1;      // b: global, initialized
const int c = 2; // c: global, const

void main() {
    static int s = 3; // s: local, static, initialized
    int x, y;        // x: local, auto; y: local, auto
    char* p = malloc( 100 ); // p: local, auto; *p: heap (100 byte)
}
```

compile / link Quellprogramm

Symbol Table	<a>
.data	s=3 b=1
.rodata	c=2
.text	main
...	
ELF Header	

ELF-Binary

Beim Übersetzen und Linken werden die Programmelemente in entsprechenden Sektionen der ELF-Datei zusammen gefasst. Informationen zur Größe der .bss-Sektion landen ebenfalls in .rodata.

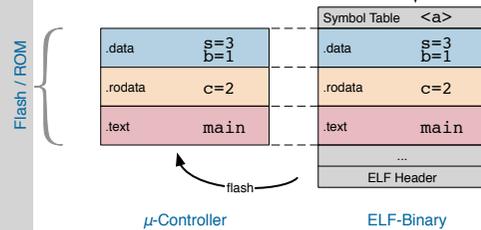
Speicherorganisation auf einem μC

```

int a;           // a: global, uninitialized
int b = 1;      // b: global, initialized
const int c = 2; // c: global, const

void main() {
    static int s = 3; // s: local, static, initialized
    int x, y;        // x: local, auto; y: local, auto
    char* p = malloc( 100 ); // p: local, auto; *p: heap (100 byte)
}
    
```

compile / link Quellprogramm



Zur Installation auf dem μC werden .text und .[ro]data in den Flash-Speicher des μC geladen.

16-Speicher: 2012-01-19



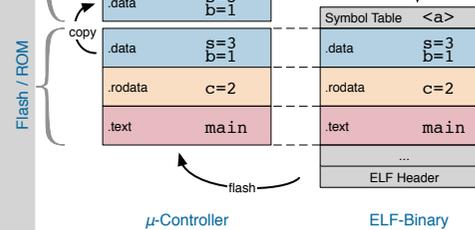
Speicherorganisation auf einem μC

```

int a;           // a: global, uninitialized
int b = 1;      // b: global, initialized
const int c = 2; // c: global, const

void main() {
    static int s = 3; // s: local, static, initialized
    int x, y;        // x: local, auto; y: local, auto
    char* p = malloc( 100 ); // p: local, auto; *p: heap (100 byte)
}
    
```

compile / link Quellprogramm



Beim Systemstart wird das .bss-Segment im RAM angelegt und mit 0 initialisiert, das .data-Segment wird aus dem Flash ins RAM kopiert. Das verbleibende RAM wird für den Stack und (falls vorhanden) den Heap verwendet.

16-Speicher: 2012-01-19



Verfügt die Architektur über keinen Daten-Flashspeicher (beim ATmega der Fall \leftrightarrow 14-3), so werden konstante Variablen ebenfalls in .data abgelegt (und belegen zur Laufzeit RAM).

Dynamische Speicherallokation: Heap

- **Heap** := Vom Programm explizit verwalteter RAM-Speicher
 - Lebensdauer ist unabhängig von der Programmstruktur
- Anforderung und Wiederfreigabe über zwei Basisoperationen
 - `void* malloc(size_t n)` fordert einen Speicherblock der Größe n an; Rückgabe bei Fehler: 0-Zeiger (NULL)
 - `void free(void* pmem)` gibt einen zuvor mit `malloc()` angeforderten Speicherblock vollständig wieder frei
- Beispiel

```

#include <stdlib.h>
int* intArray( uint16_t n ) { // alloc int[n] array
    return (int*) malloc( n * sizeof int );
}

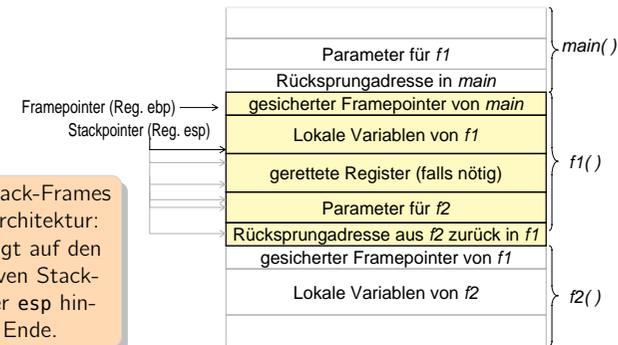
void main() {
    int* array = intArray(100); // alloc memory for 100 ints
    if( array ) { // malloc() returns NULL on failure
        ... // if succeeded, use array
        array[99] = 4711;
        free( array ); // free allocated block (** IMPORTANT! **)
    }
}
    
```

16-Speicher: 2012-01-19



Dynamische Speicherallokation: Stack \leftrightarrow GDI, V-50

- Lokale Variablen, Funktionsparameter und Rücksprungadressen werden vom Übersetzer auf dem **Stack** (Stapel, Keller) verwaltet
 - Prozessorregister `[e]sp` zeigt immer auf den nächsten freien Eintrag
 - Stack „wächst“ (architekturabhängig) „von oben nach unten“
- Die Verwaltung erfolgt in Form von **Stack-Frames**

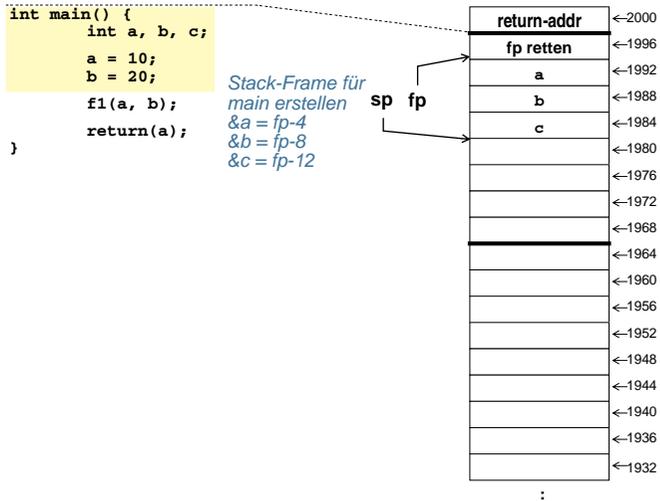


Aufbau eines Stack-Frames auf der IA-32-Architektur: Register `ebp` zeigt auf den Beginn des aktiven Stack-Frames; Register `esp` hinter das aktuelle Ende.

16-Speicher: 2012-01-19

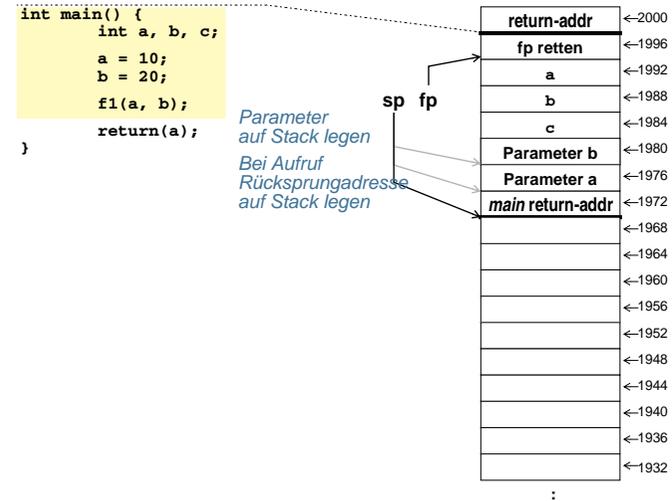


Stack-Aufbau bei Funktionsaufrufen



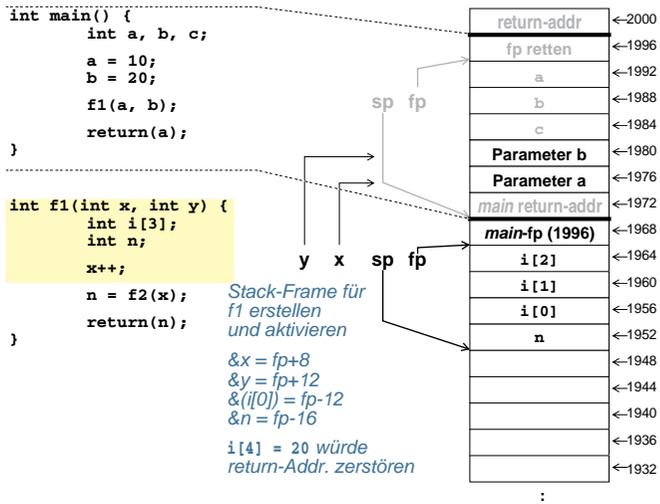
Beispiel hier für 32-Bit-Architektur (4-Byte ints), main() wurde soeben betreten

Stack-Aufbau bei Funktionsaufrufen



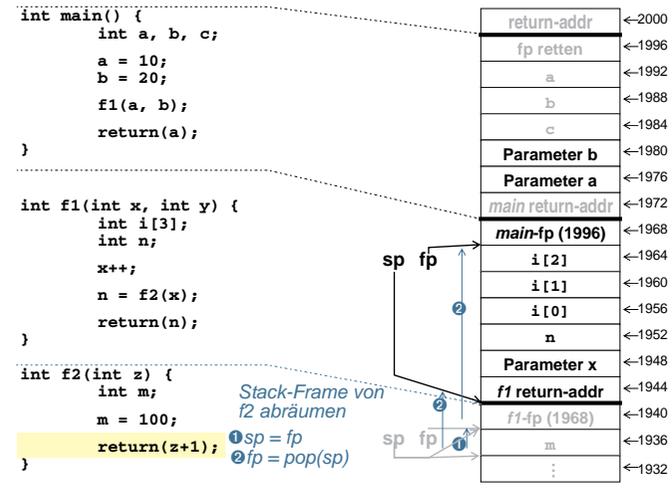
main() bereitet den Aufruf von f1(int, int) vor

Stack-Aufbau bei Funktionsaufrufen



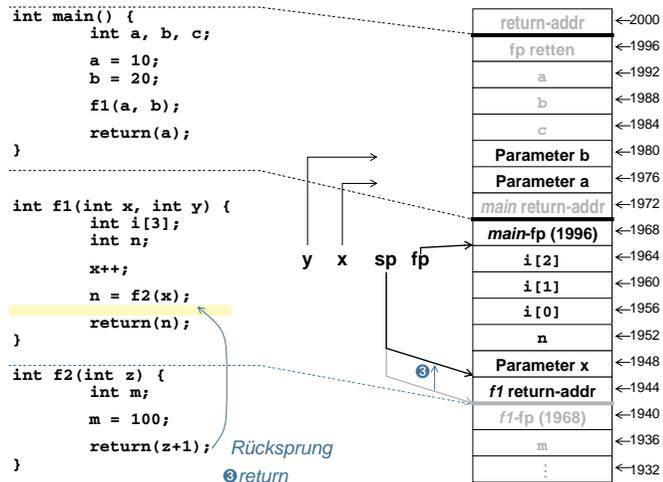
f1() wurde soeben betreten

Stack-Aufbau bei Funktionsaufrufen



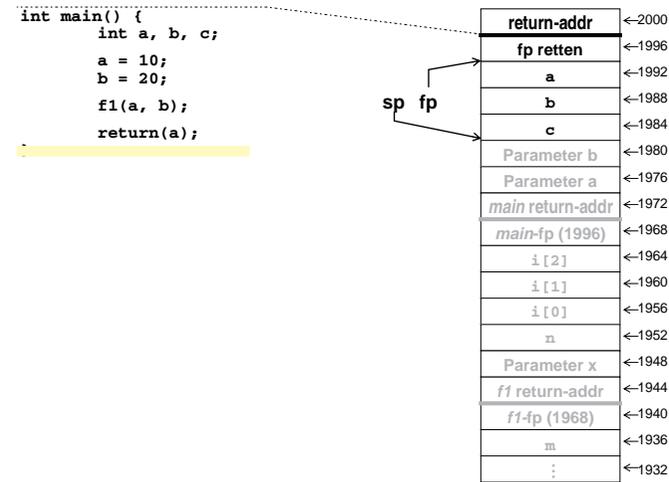
f2() bereitet die Terminierung vor (wurde von f1() aufgerufen und ausgeführt)

Stack-Aufbau bei Funktionsaufrufen



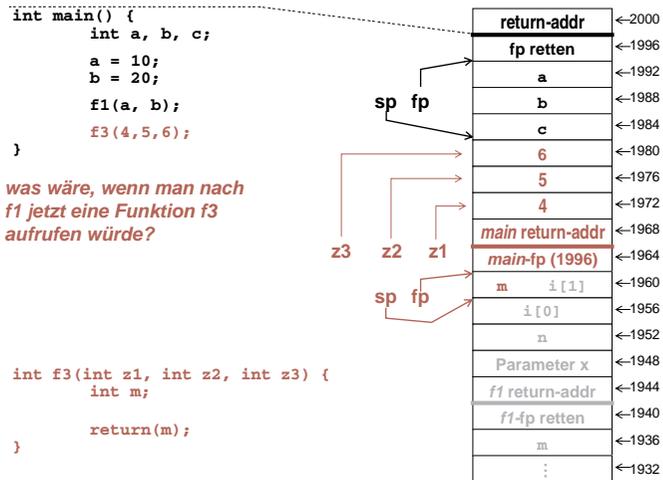
f2() wird verlassen

Stack-Aufbau bei Funktionsaufrufen



zurück in main()

Stack-Aufbau bei Funktionsaufrufen



was wäre, wenn man nach f1 jetzt eine Funktion f3 aufrufen würde?

m wird nicht initialisiert ~ „erbt“ alten Wert vom Stapel

Statische versus dynamische Allokation

- Bei der **µC-Entwicklung** wird **statische Allokation** bevorzugt
 - Vorteil:** Speicherplatzbedarf ist bereits nach dem Übersetzen / Linken exakt bekannt (kann z. B. mit `size` ausgegeben werden)
 - Speicherprobleme frühzeitig erkennbar (Speicher ist knapp! ↔ 1-3)

```

lohmanna@fai48a:~$ size sections.avr
text  data  bss  dec  hex filename
682   10    6   698  2ba sections.avr
    
```

Sektionsgrößen des Programms von ↔ 16-1

- Speicher möglichst durch **static**-Variablen anfordern
 - Regel der geringstmöglichen Sichtbarkeit beachten ↔ 12-6
 - Regel der geringstmöglichen Lebensdauer „sinnvoll“ anwenden
- Ein Heap ist **verhältnismäßig teuer** ~ wird möglichst vermieden
 - Zusätzliche Speicherkosten durch Verwaltungsstrukturen und Code
 - Speicherbedarf zur Laufzeit schlecht abschätzbar
 - Risiko von Programmierfehlern und Speicherlecks