

# Systemnahe Programmierung in C (SPiC)

## Teil C Systemnahe Softwareentwicklung

**Jürgen Kleinöder, Daniel Lohmann**

Lehrstuhl für Informatik 4  
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität  
Erlangen-Nürnberg

Sommersemester 2015

[http://www4.cs.fau.de/Lehre/SS15/V\\_SPiC](http://www4.cs.fau.de/Lehre/SS15/V_SPiC)



# Überblick: Teil C Systemnahe Softwareentwicklung

**12 Programmstruktur und Module**

**13 Zeiger und Felder**

**14  $\mu$ C-Systemarchitektur**



- 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, 06]
    - 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.



# Beispiel-Projekt: Eine Wetterstation

## ■ Typisches eingebettetes System

### ■ Mehrere Sensoren

- Wind
- Luftdruck
- Temperatur

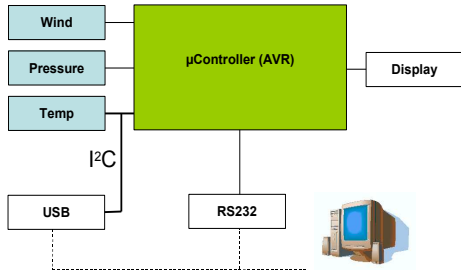
### ■ Mehrere Aktoren (hier: Ausgabegeräte)

- LCD-Anzeige
- PC über RS232
- PC über USB

### ■ Sensoren und Aktoren an den $\mu C$ angebunden über verschiedene Bussysteme

- I<sup>2</sup>C
- RS232

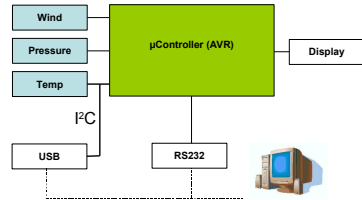
Wie sieht die **funktionale Dekomposition** der Software aus?



# Funktionale Dekomposition: Beispiel

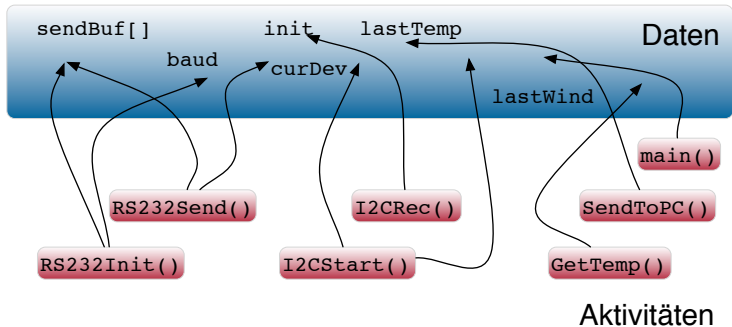
## Funktionale Dekomposition der Wetterstation (Auszug):

1. Sensordaten lesen
  - 1.1 Temperatursensor lesen
    - 1.1.1 I<sup>2</sup>C-Datenübertragung initiieren
    - 1.1.2 Daten vom I<sup>2</sup>C-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



# 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  $\rightsquigarrow$  mangelhafte Trennung der Belange



- 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  $\rightsquigarrow$  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).



# 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	<i>keine</i> , <b>auto</b>		Definition → Blockende	Definition → Blockende
	<b>static</b>		Definition → Blockende	Programmstart → Programmende
Global	<i>keine</i>		unbeschränkt	Programmstart → Programmende
	<b>static</b>		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
}
```



- 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  $\mu$ -Controller-Plattformen

↔ 1-4

## **Konsequenz:** Globale Variablen vermeiden!

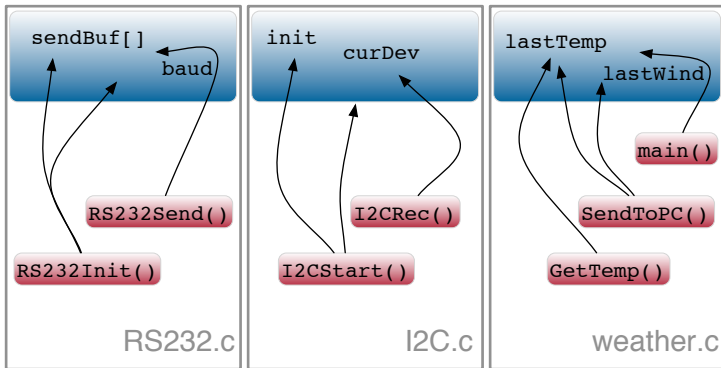
- Globale Variablen sind überall sichtbar
- Globale Variablen belegen Speicher über die gesamte Programmlaufzeit

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



# Lösung: Modularisierung

- Separation jeweils zusammengehöriger **Daten** und **Funktionen** in übergeordnete Einheiten  $\rightsquigarrow$  **Module**



# Was ist ein Modul?

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

## Modul $\mapsto$ Abstraktion

$\leftrightarrow$  4-1

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



- In C ist das Modulkonzept nicht Bestandteil der Sprache, sondern rein **idiomatisch** (über **Konventionen**) realisiert ↔ 3-12
  - 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 );
...
```

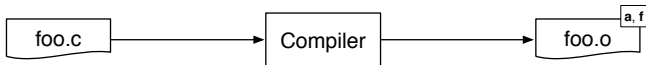
**RS232.h: Schnittstelle / Vertrag (öffentl.)**  
 Deklaration der bereitgestellten Funktionen (und ggf. Daten)

```
#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.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



- 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.



- 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**)

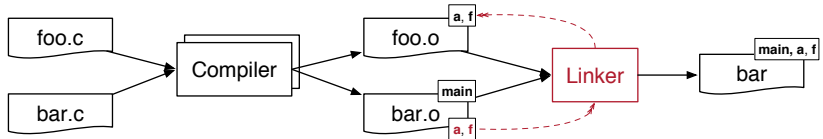
```
extern uint16_t a;  
// declare  
void f(void);      // declare  
  
void main() {      // public  
    a = 0x4711;    // use  
    f();           // use  
}
```

## Objektdatei (**bar.o**)

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



- Die eigentliche Auflösung erfolgt durch den **Linker**



## 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



- Elemente aus fremden Modulen müssen deklariert werden

- Funktionen durch normale Deklaration

↔ 9-7

```
void f(void);
```

- 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)



## 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

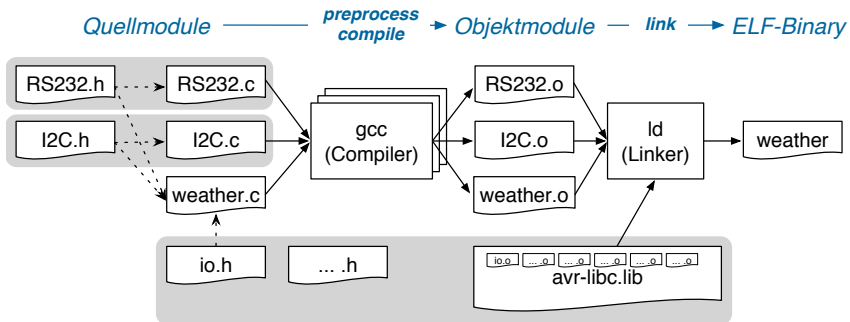
(vergleiche ↔ 12-11)

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

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



# 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



# Zusammenfassung

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



# Überblick: Teil C Systemnahe Softwareentwicklung

12 Programmstruktur und Module


**13 Zeiger und Felder**

**14  $\mu$ C-Systemarchitektur**



# Einordnung: Zeiger (*Pointer*)

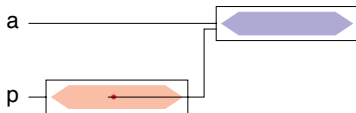
- **Literal:** 'a'  
Darstellung eines Wertes

'a'  $\equiv$  

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



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



# 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*)
  - 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!

↪ 9-5

„Effizienz durch  
Maschinennähe“

↪ 3-13



# Definition von Zeigervariablen

- **Zeigervariable** := Behälter für Verweise ( $\mapsto$  Adresse)
- Syntax (Definition):  $Typ * Bezeichner ;$
- Beispiel

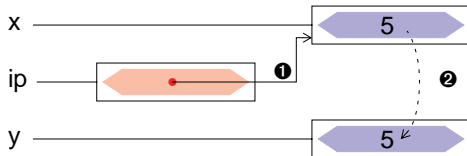
```
int x = 5;
```

```
int *ip;
```

```
int y;
```

```
ip = &x; ❶
```

```
y = *ip; ❷
```



# Adress- und Verweisoperatoren

- Adressoperator:     **&x**     Der unäre **&**-Operator liefert die **Referenz** ( $\mapsto$  Adresse im Speicher) der Variablen **x**.
- Verweisoperator:   **\*y**     Der unäre **\***-Operator liefert die **Zielvariable** ( $\mapsto$  Speicherzelle / Behälter), auf die der Zeiger **y** verweist (Dereferenzierung).
- Es gilt:     **(\*(&x))  $\equiv$  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

$\leadsto$  **\*** wird fälschlicherweise für ein Bestandteil des Bezeichners gehalten.



# 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, 04-26]
  - Aufgerufene Funktion erhält eine Kopie des Adressverweises
  - Mit Hilfe des \*-Operators kann darüber jedoch auf die Zielvariable zugegriffen werden und diese verändert werden

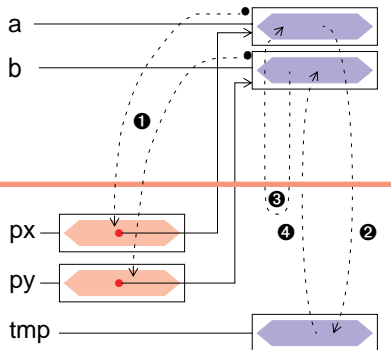
↪ **Call-by-reference**



## ■ Beispiel (Gesamtüberblick)

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

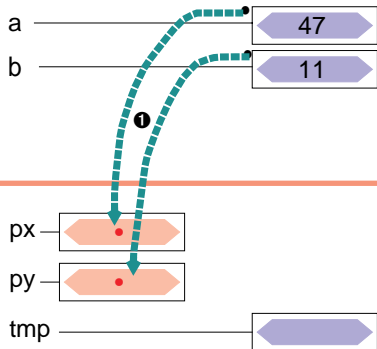
```
void swap (int *px, int *py)  
{  
    int tmp;  
  
    tmp = *px; ❷  
    *px = *py; ❸  
    *py = tmp; ❹  
}
```



## ■ Beispiel (Einzelschritte)

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

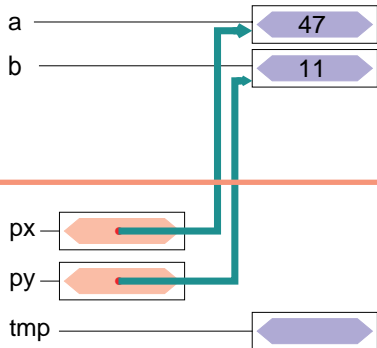
```
void swap (int *px, int *py)  
{  
    int tmp;
```



## ■ Beispiel (Einzelschritte)

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

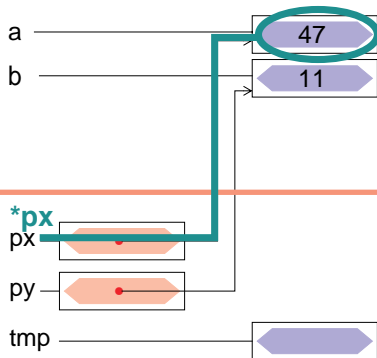
```
void swap (int *px, int *py)  
{  
    int tmp;  
    ...  
}
```



## ■ Beispiel (Einzelschritte)

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

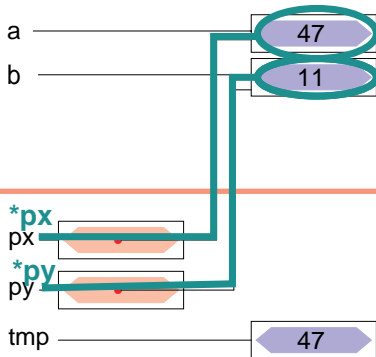
```
void swap (int *px, int *py)  
{  
    int tmp;  
  
    tmp = *px; ②  
}
```



## ■ Beispiel (Einzelschritte)

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

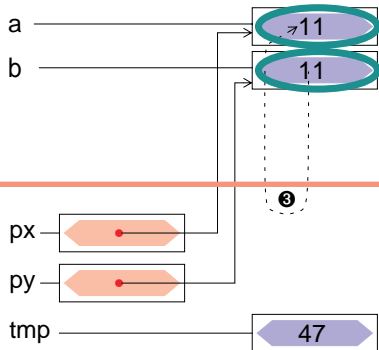
```
void swap (int *px, int *py)  
{  
    int tmp;  
  
    tmp = *px; ②  
    *px = *py; ③  
}
```



## ■ Beispiel (Einzelschritte)

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

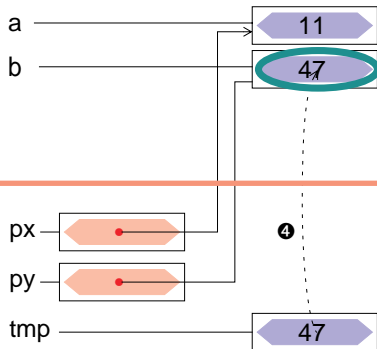
```
void swap (int *px, int *py)  
{  
    int tmp;  
  
    tmp = *px; ②  
    *px = *py; ③  
}
```



## ■ 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  
}
```



- **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
}
```



# 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 };
```



# 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

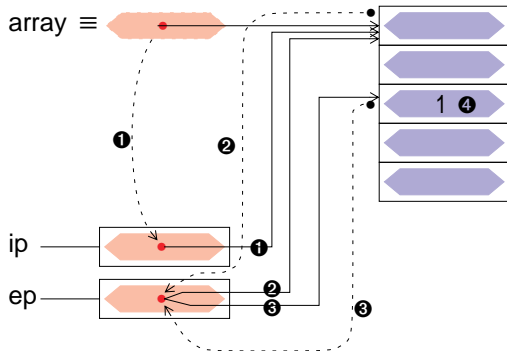
```
uint8_t LEDs[] = { RED0, YELLOW0, GREEN0, BLUE0 };  
LEDs[ 3 ] = BLUE1;  
for( uint8_t i = 0; i < 4; ++i ) {  
    sb_led_on( LEDs[ i ] );  
}  
LEDs[ 4 ] = GREEN1;    // UNDEFINED!!!
```



# Felder sind Zeiger

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

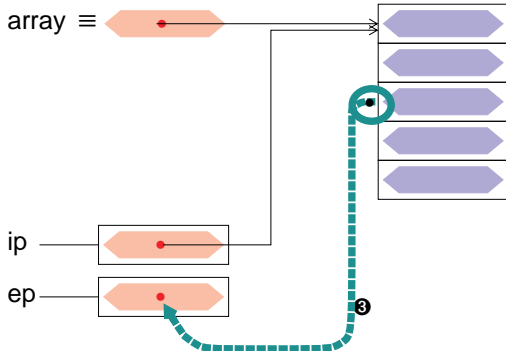
```
int array[5];  
  
int *ip = array; ①  
  
int *ep;  
ep = &array[0]; ②  
  
ep = &array[2]; ③  
  
*ep = 1; ④
```



# Felder sind Zeiger

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

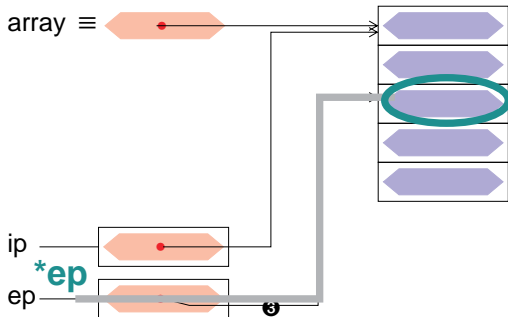
```
int array[5];  
  
int *ip = array; ①  
  
int *ep;  
ep = &array[0]; ②  
  
ep = &array[2]; ③
```



# Felder sind Zeiger

- Ein Feldbezeichner ist **syntaktisch äquivalent** zu einem konstanten Zeiger auf das erste Element des Feldes: `array`  $\equiv$  `&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; ❶  
  
int *ep;  
ep = &array[0]; ❷  
  
ep = &array[2]; ❸  
  
*ep = 1; ❹
```



# Zeiger sind Felder

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

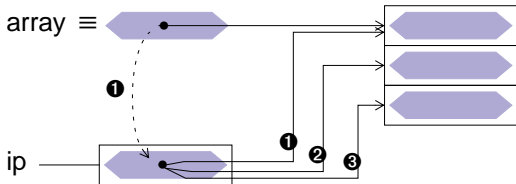


# Rechnen mit Zeigern

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

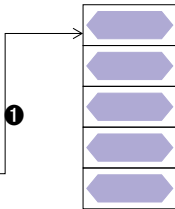
```
int array[3];  
int *ip = array; ❶
```

```
ip++; ❷  
ip++; ❸
```



```
int array[5];  
ip = array; ❶
```

`ip`



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

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



## ■ Arithmetische Operationen

- ++ Prä-/Postinkrement  
↷ Verschieben auf das nächste Objekt
- Prä-/Postdecrement  
↷ 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



# 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.



# 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)



- 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** → Guter Stil! [≠Java]

```
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)



- 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"  $\equiv$    $\leftrightarrow$  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

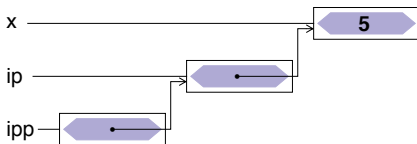
```
int strlen( const char *s ) {  
    const char *end = s;  
    while( *end )  
        end++;  
    return end - s;  
}
```



# Zeiger auf Zeiger

- Ein Zeiger kann auch auf eine Zeigervariable verweisen

```
int x = 5;  
int *ip = &x;  
  
int **ipp = &ip;  
/* → **ipp = 5 */
```



- 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



# 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
}
```



- Syntax (Definition): `Typ ( * Bezeichner ) ( FormaleParamopt );`  
(sehr ähnlich zur Syntax von Funktionsdeklarationen) ↔ 9-3
  - *Typ* Rückgabetyt der **Funktionen**, auf die dieser Zeiger verweisen kann
  - *Bezeichner* Name des **Funktionszeigers**
  - *FormaleParam<sub>opt</sub>* Formale Parameter der **Funktionen**, auf die dieser Zeiger verweisen kann:  $Typ_1, \dots, Typ_n$
- 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()
}
```



- 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
}
```



- 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

