

Systemnahe Programmierung in C (SPiC)

Teil C Systemnahe Softwareentwicklung

Jürgen Kleinöder, Daniel Lohmann, Volkmar Sieh

Lehrstuhl für Informatik 4
Verteilte Systeme und Betriebssysteme

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

Sommersemester 2016

http://www4.cs.fau.de/Lehre/SS16/V_SPiC

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, 01-01]
 - 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

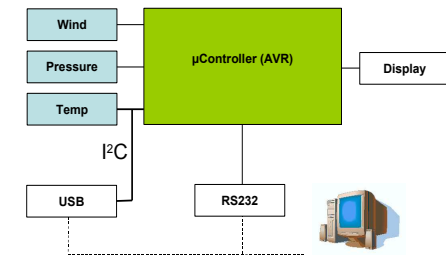
12 Programmstruktur und Module

13 Zeiger und Felder

14 μ C-Systemarchitektur

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

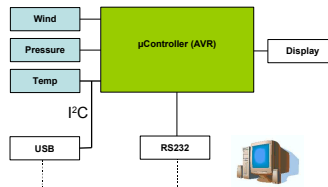


Wie sieht die **funktionale Dekomposition** der Software aus?

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

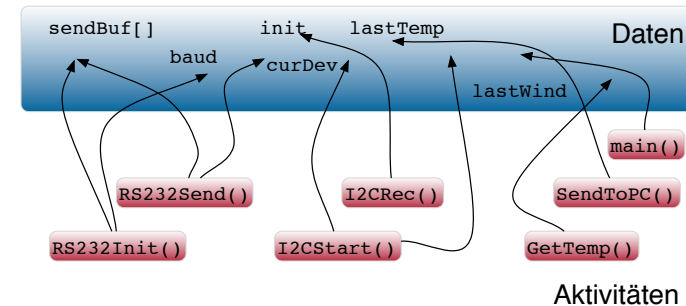


12-Module: 2016-04-25



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: 2016-04-25



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: 2016-04-25



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, static		Definition → Blockende Definition → Blockende	Definition → Blockende Programmstart → Programmende
Global	keine, static		unbeschränkt modulweit	Programmstart → Programmende Programmstart → Programmende

```

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

void f(void) {
    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: 2016-04-25



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

↪ 1-4

Konsequenz: Globale Variablen vermeiden!

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

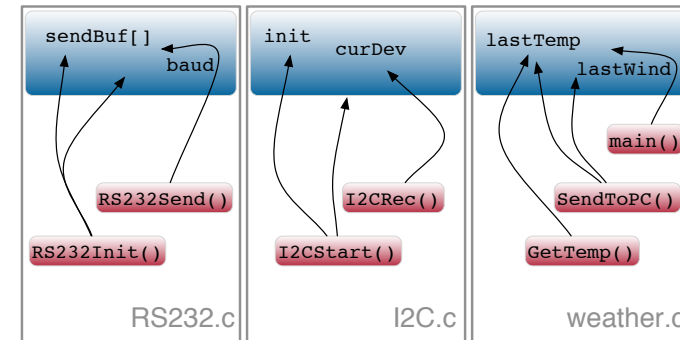
Regel: Variablen erhalten stets die **geringstmögliche Sichtbarkeit und Lebensdauer**

12-Module: 2016-04-25



Lösung: Modularisierung

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



12-Module: 2016-04-25



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: 2016-04-25



Module in C

[≠ Java]

- In C ist das Modulkonzept nicht Bestandteil der Sprache, ↪ 3-12 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

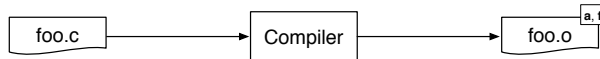
12-Module: 2016-04-25



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: 2016-04-25



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.

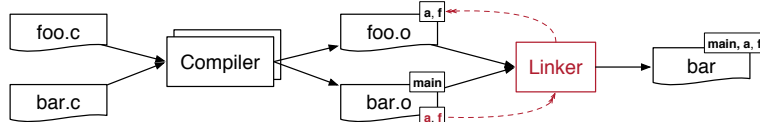
12-Module: 2016-04-25



Module in C – Import (Forts.)

[≠Java]

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



Linken ist **nicht typsicher!**

- Typinformationen sind in Objektdaten 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: 2016-04-25



Module in C – Header

[≠Java]

- Elemente aus fremden Modulen müssen deklariert werden

- Funktionen durch normale Deklaration

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

→ [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: 2016-04-25



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>

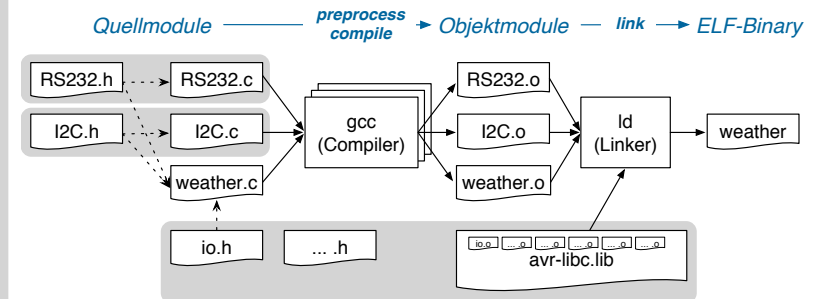
// definitions
uint16_t a;
void f(void){
    ...
}
```

Modulverwendung bar.c
(vergleiche ↪ 12-11)

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

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

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 ↪ 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

Überblick: Teil C Systemnahe Softwareentwicklung

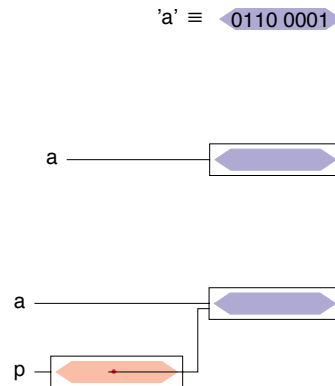
12 Programmstruktur und Module

13 Zeiger und Felder

14 µC-Systemarchitektur

Einordnung: Zeiger (Pointer)

- **Literal:** 'a'
Darstellung eines Wertes
- **Variable:** `char a;`
Behälter für einen Wert
- **Zeiger-Variable:** `char *p = &a;`
Behälter für eine Referenz auf eine Variable



13-Zeiger: 2016-04-11



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

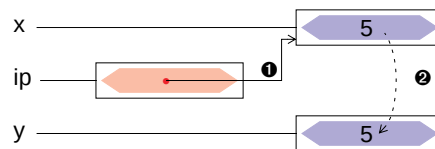
13-Zeiger: 2016-04-11



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: 2016-04-11



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: 2016-04-11



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, 14-01-01]
 - 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**

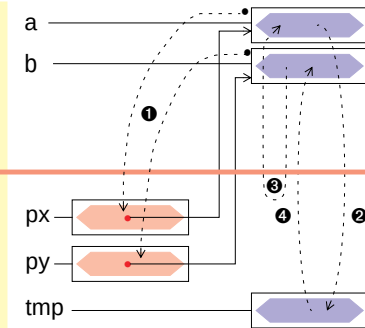
13-Zeiger: 2016-04-11



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  
}
```



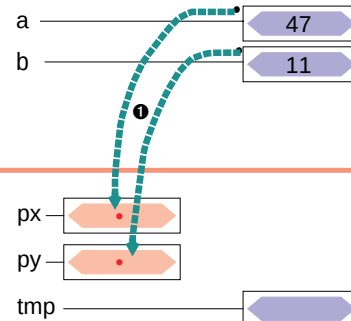
13-Zeiger: 2016-04-11



Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

- Beispiel (Einzelschritte)

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



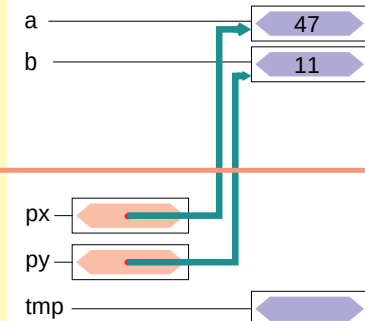
13-Zeiger: 2016-04-11



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;  
    *px = *py;  
    *py = tmp;  
}
```



13-Zeiger: 2016-04-11

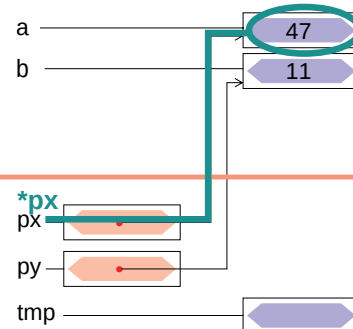


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

■ 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: 2016-04-11

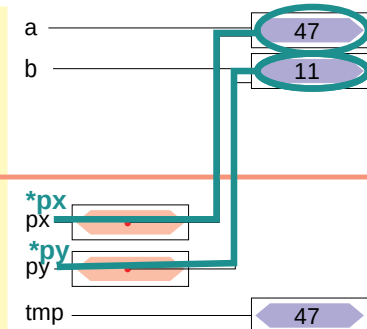


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

■ 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
```



13-Zeiger: 2016-04-11

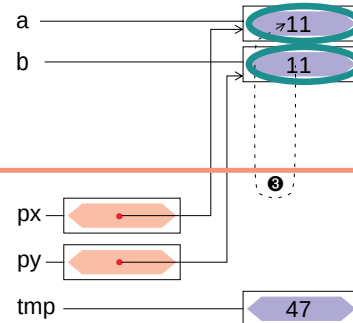


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

■ 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: 2016-04-11

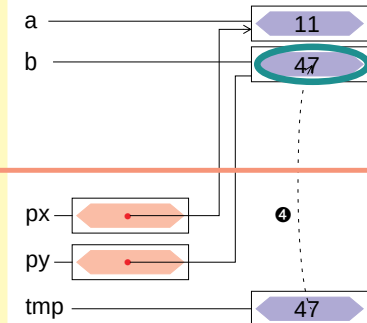


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

■ 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: 2016-04-11



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: 2016-04-11



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: 2016-04-11



Feldzugriff

- Syntax: *Feld [IntAusdruck]* [=Java]
- Wobei $0 \leq \text{IntAusdruck} < n$ für n = 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: 2016-04-11



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 ~ Wert kann nicht verändert werden
 - Über einen so ermittelten Zeiger ist ein indirekter Feldzugriff möglich
- Beispiel (Gesamtüberblick)

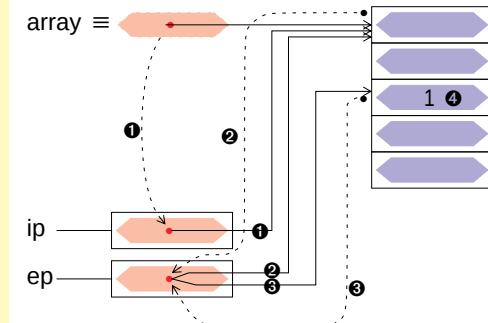
```
int array[5];

int *ip = array; ①

int *ep;
ep = &array[0]; ②

ep = &array[2]; ③

*ep = 1; ④
```



13-Zeiger: 2016-04-11



Felder sind Zeiger

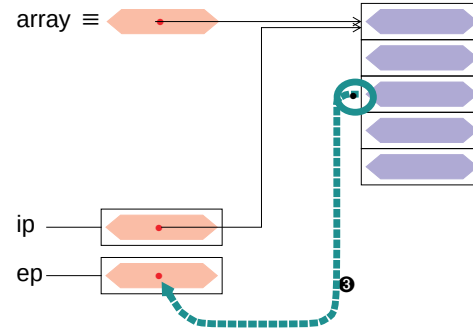
- Ein Feldbezeichner ist **syntaktisch äquivalent** zu einem konstanten Zeiger auf das erste Element des Feldes: `array ≡ &array[0]`
 - Ein Alias – kein Behälter ~ Wert kann nicht verändert werden
 - Über einen so ermittelten Zeiger ist ein indirekter Feldzugriff möglich
- Beispiel (Einzelschritte)

```
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 ~ Wert kann nicht verändert werden
 - Über einen so ermittelten Zeiger ist ein indirekter Feldzugriff möglich
- Beispiel (Einzelschritte)

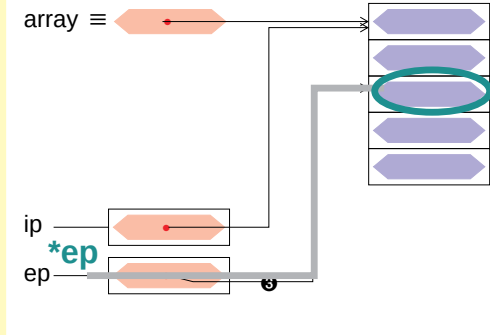
```
int array[5];

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 → 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 ] );
}
```

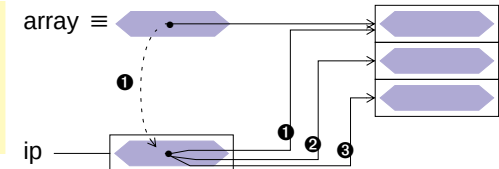


Rechnen mit Zeigern

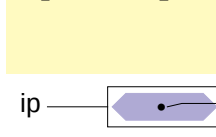
- Im Unterschied zu einem Feldbezeichner ist eine Zeigervariable ein Behälter ~ Ihr Wert ist veränderbar
- Neben einfachen Zuweisungen ist dabei auch **Arithmetik** möglich

```
int array[3];
int *ip = array; ①

ip++; ②
ip++; ③
```



```
int array[5];
ip = array; ①
```



`(ip+3) ≡ &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: 2016-04-11



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:

<code>array</code>	<code>≡</code>	<code>&array[0]</code>	<code>≡</code>	<code>ip</code>	<code>≡</code>	<code>&ip[0]</code>
<code>*array</code>	<code>≡</code>	<code>array[0]</code>	<code>≡</code>	<code>*ip</code>	<code>≡</code>	<code>ip[0]</code>
<code>*(array + i)</code>	<code>≡</code>	<code>array[i]</code>	<code>≡</code>	<code>*(ip + i)</code>	<code>≡</code>	<code>ip[i]</code>
				<code>array++</code>	<code>≠</code>	<code>ip++</code>

Fehler: `array` ist konstant!
- Umgekehrt können Zeigeroperationen auch durch Feldoperationen dargestellt werden.
Der Feldbezeichner kann aber **nicht verändert** werden.

13-Zeiger: 2016-04-11



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 );
}
```

● ● ● ● ● ● ● ●

R_0 Y_0 G_0 B_0 R_1 Y_1 G_1 B_1
- 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: 2016-04-11



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** ↪ 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)

13-Zeiger: 2016-04-11



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" =  $\leftrightarrow$ 6-13

- Implementierungsvarianten

Variante 1: Feld-Syntax

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

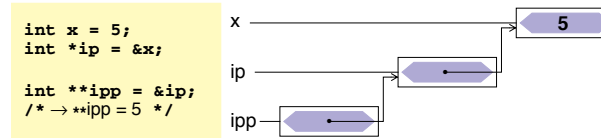
Variante 2: Zeiger-Syntax

```
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



- 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: 2016-04-11



Zeiger auf Funktionen

- Ein Zeiger kann auch auf eine Funktion verweisen
 - Damit lassen sich Funktionen an Funktionen übergeben $\rightarrow$ 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  
}
```



Zeiger auf Funktionen (Forts.)

- Syntax (Definition): `Typ ( * Bezeichner )( FormaleParam_opt );` (sehr ähnlich zur Syntax von Funktionsdeklarationen) $\leftrightarrow$ 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: $Typ_1, \dots, Typ_n$
- Ein Funktionszeiger wird genau wie eine Funktion verwendet
 - Aufruf mit *Bezeichner* (*TatParam*) $\leftrightarrow$ 9-4
 - Adress- (&) und Weisoperator (*) werden nicht benötigt $\leftrightarrow$ 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: 2016-04-11



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, BTNPRESSED,   // for this button and events
        onButton               // invoke this function
    );
    sei();                     // enable interrupts (necessary!)
    while( 1 ) ;               // wait forever
}
```

13-Zeiger: 2016-04-11



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

13-Zeiger: 2016-04-11

