Systemnahe Programmierung in C

13 Zeiger und Felder

J. Kleinöder, D. Lohmann, V. Sieh

Lehrstuhl für Informatik 4
Systemsoftware

Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

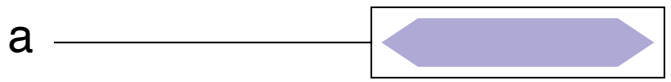
Sommersemester 2025

http://sys.cs.fau.de/lehre/ss25

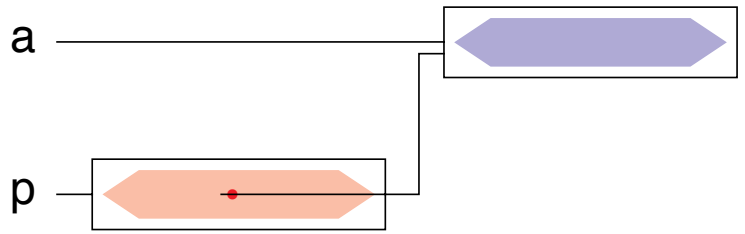
Einordnung: Zeiger (*Pointer*)

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

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



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



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

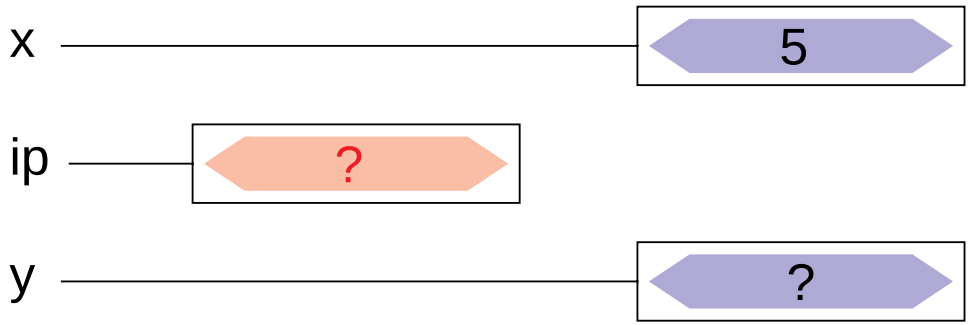
„Effizienz durch Maschinennähe“ ↪ 3–17

- Aber auch viele Probleme!
  - Programmstruktur wird unübersichtlicher (welche Funktion kann auf welche Variablen zugreifen?)
  - Zeiger sind die **häufigste Fehlerquelle** in C-Programmen!

Definition von Zeigervariablen

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

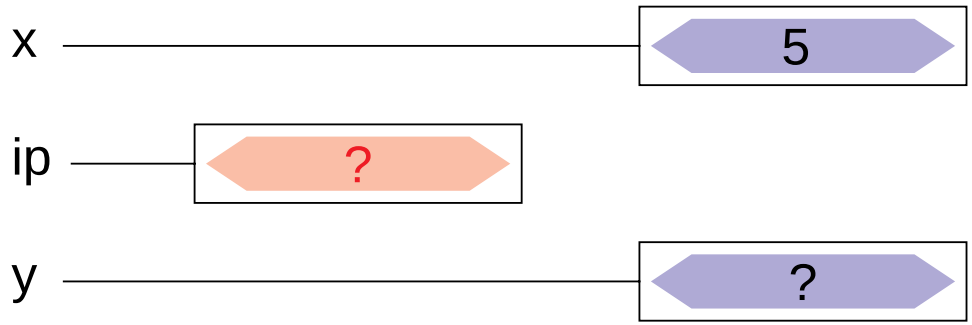
```
int x = 5;

int *ip;

int y;
```



Definition von Zeigervariablen

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

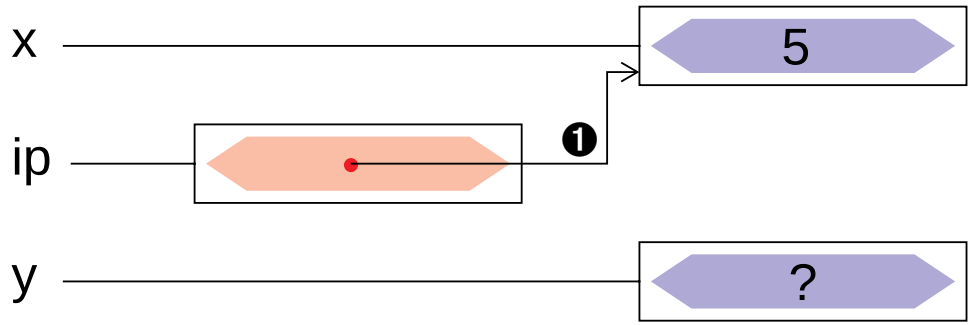
```
int x = 5;

int *ip;

int y;

ip = &x; ❶
```



Definition von Zeigervariablen

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

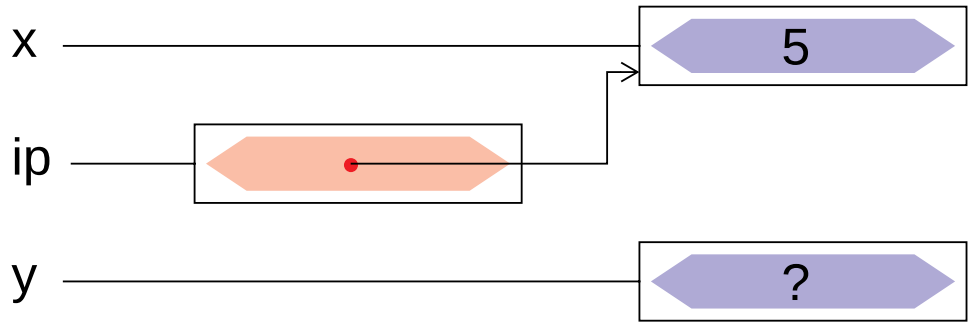
```
int x = 5;

int *ip;

int y;

ip = &x; ❶
```



Definition von Zeigervariablen

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

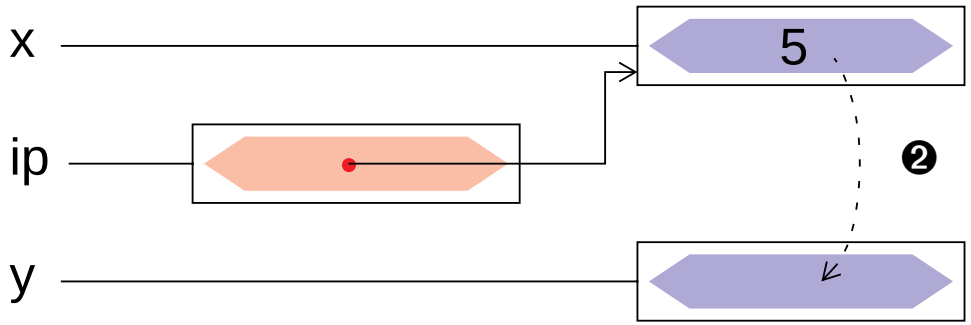
```
int x = 5;

int *ip;

int y;

ip = &x; ❶

y = *ip; ❷
```



Definition von Zeigervariablen

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

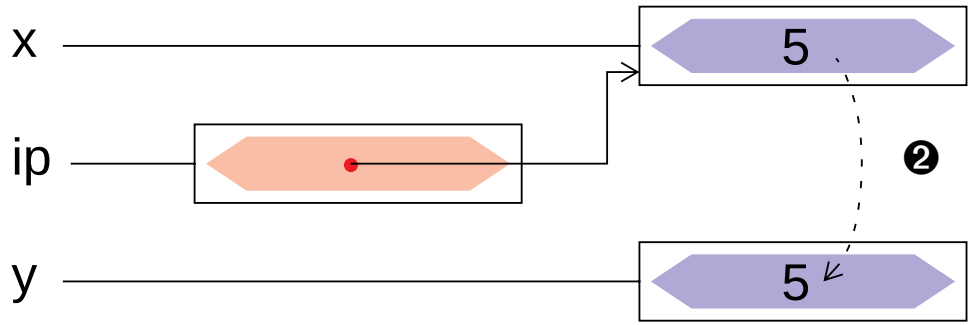
```
int x = 5;

int *ip;

int y;

ip = &x; ❶

y = *ip; ❷
```



Definition von Zeigervariablen

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

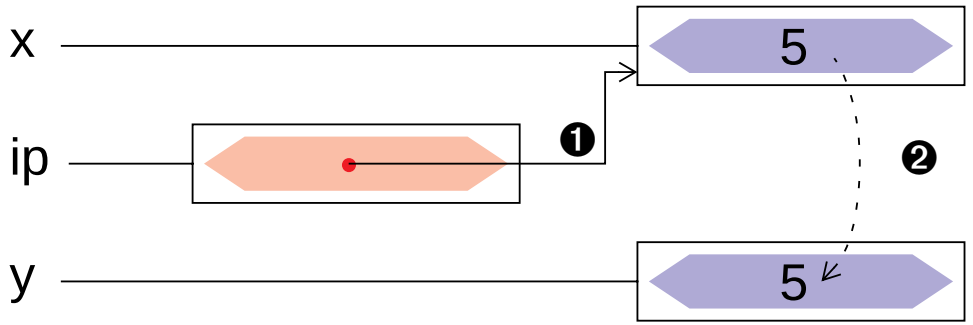
```
int x = 5;

int *ip;

int y;

ip = &x; ❶

y = *ip; ❷
```



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)) ≡ x**
  Der Verweisoperator ist die Umkehroperation des Adressoperators.

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` `typedef char *CPTR`	in Definitionen und Deklarationen
3.	Verweis (unär):	`x = *p1`	in Ausdrücken

Insbesondere 2. und 3. führen zu Verwirrung
⇝ * 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

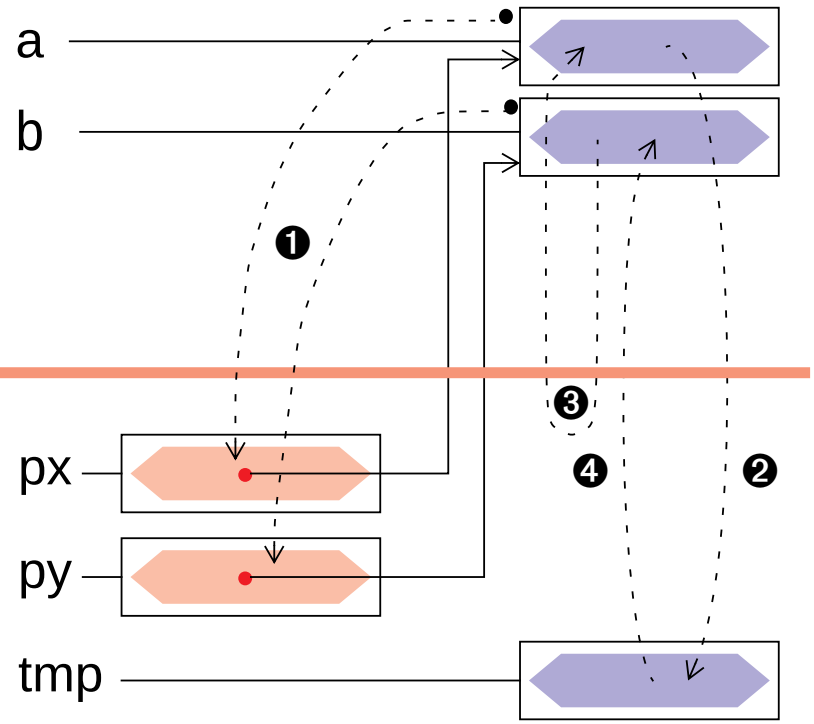
- Das gilt auch für Zeiger (Verweise)
  - Aufgerufene Funktion erhält eine Kopie des Adressverweises
  - Mit Hilfe des *-Operators kann darüber jedoch auf die Zielvariable zugegriffen werden und diese verändert werden

  ⇝ **Call-by-reference**

Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

Beispiel (Gesamtüberblick)

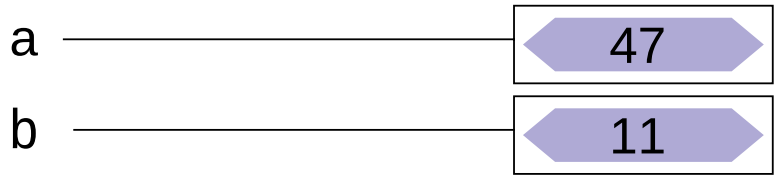
```
void swap (int *, int *);
int main() {
    int a=47, b=11;
    ...
    swap(&a, &b); ❶
    ...
}

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

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

}
```



Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

Beispiel (Einzelschritte)

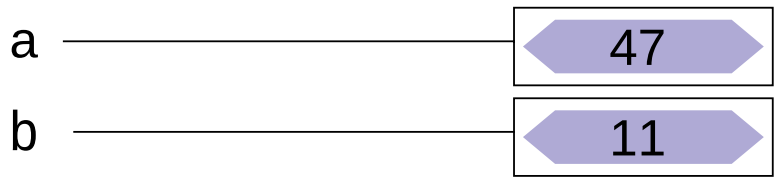
```
int main() {
    int a=47, b=11;
```



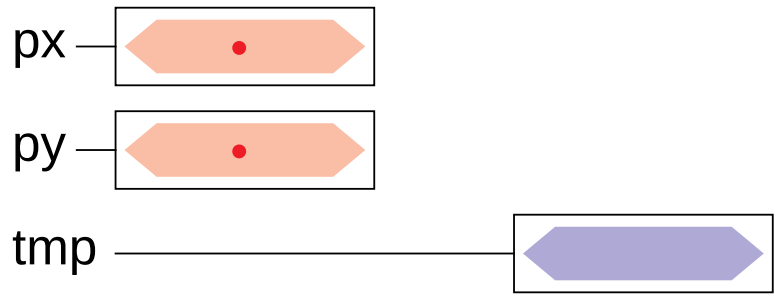
Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

Beispiel (Einzelschritte)

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




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

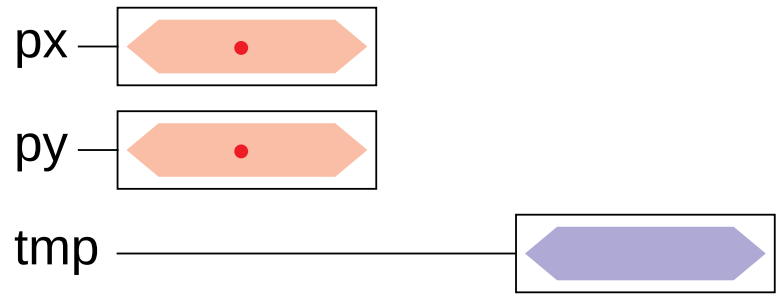


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

Beispiel (Einzelschritte)

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

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

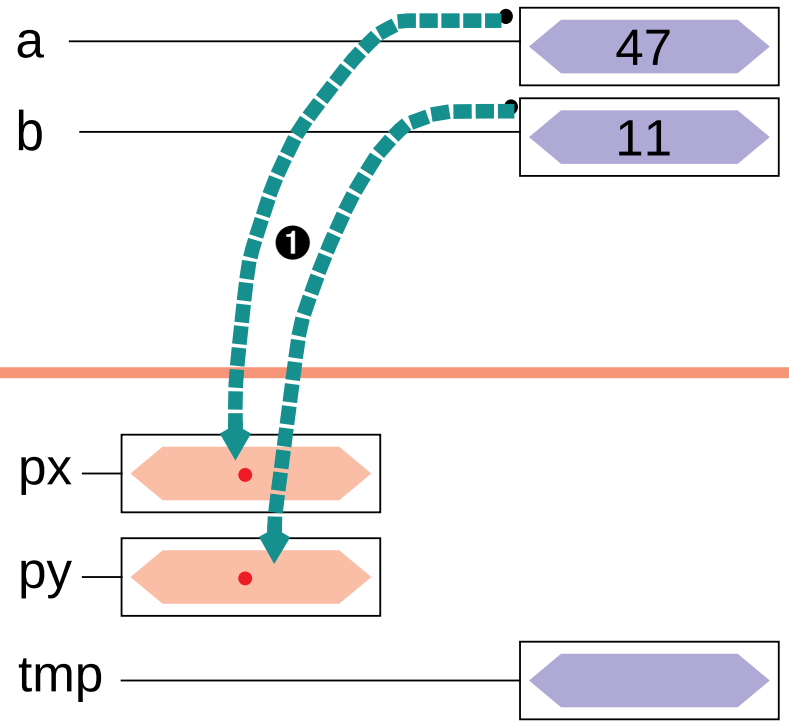


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

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;
```

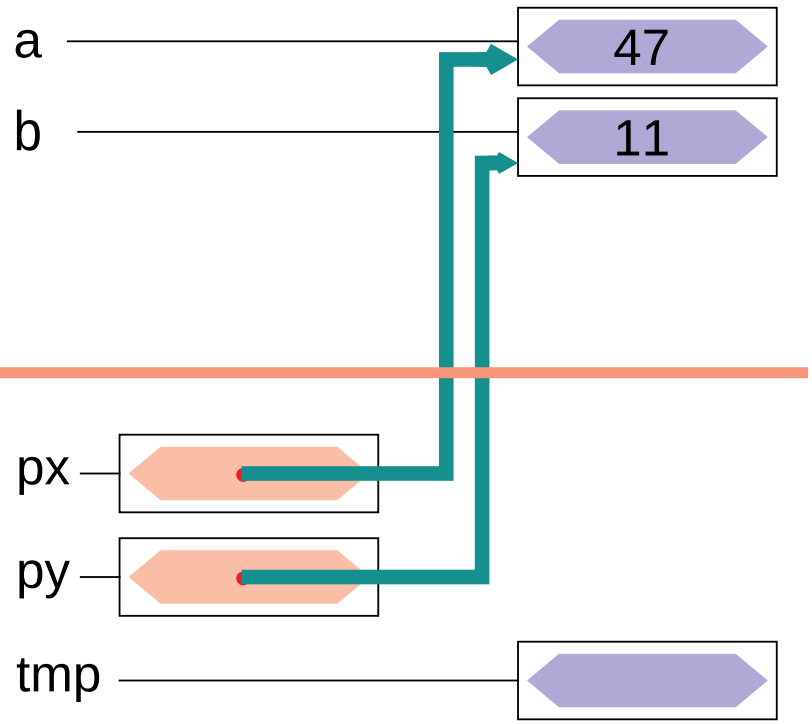


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

Beispiel (Einzelschritte)

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

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

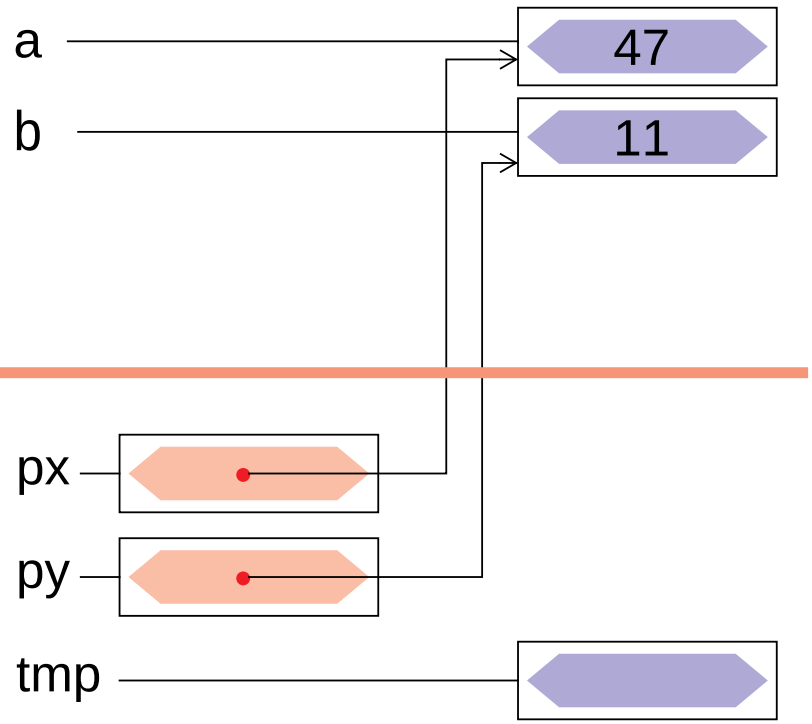


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

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; ❷
```

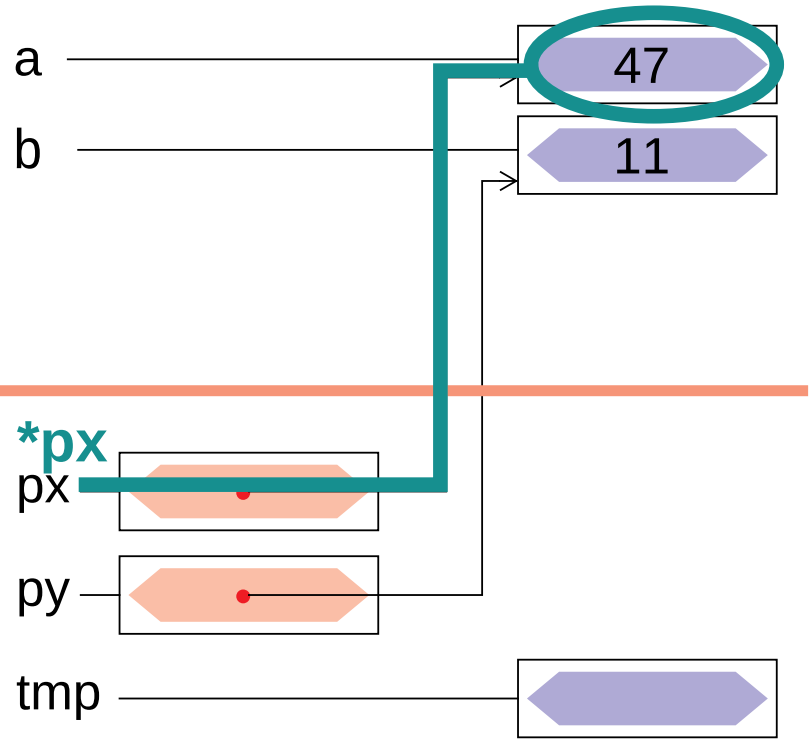


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

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; ❷
```

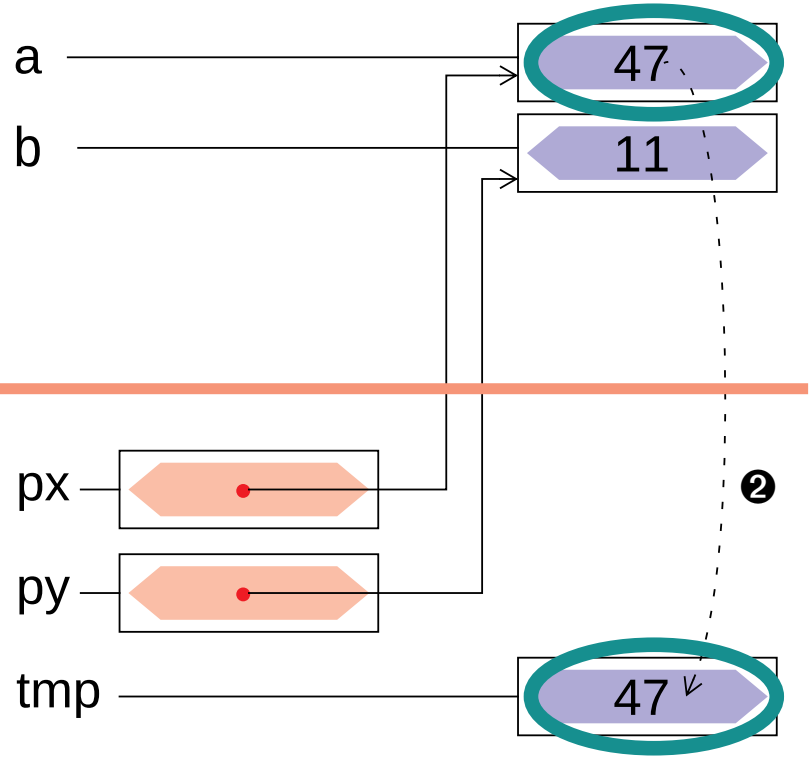


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

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; ❷
```

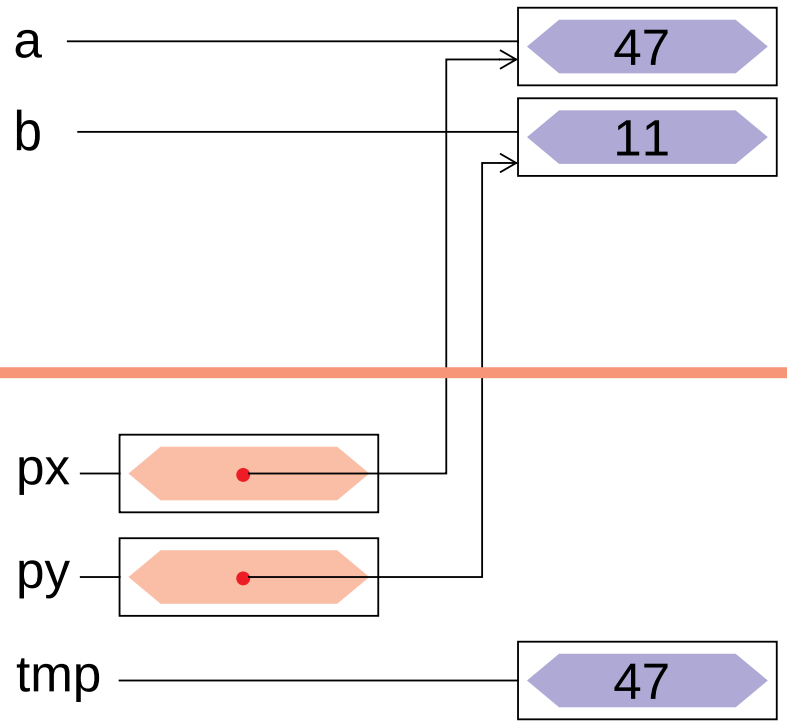


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

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; ❷
    *px = *py; ❸
```

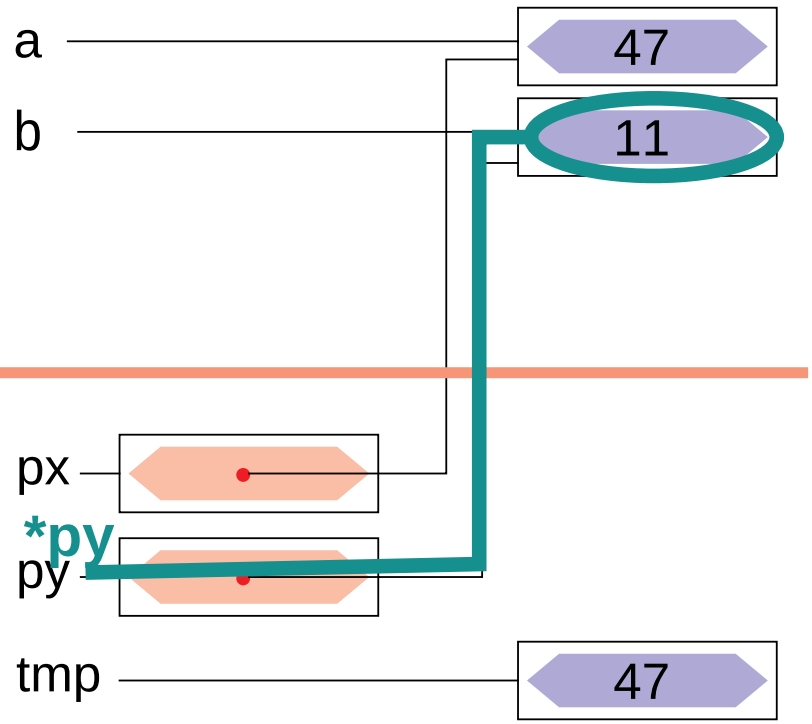


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

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; ❷
    *px = *py; ❸
```

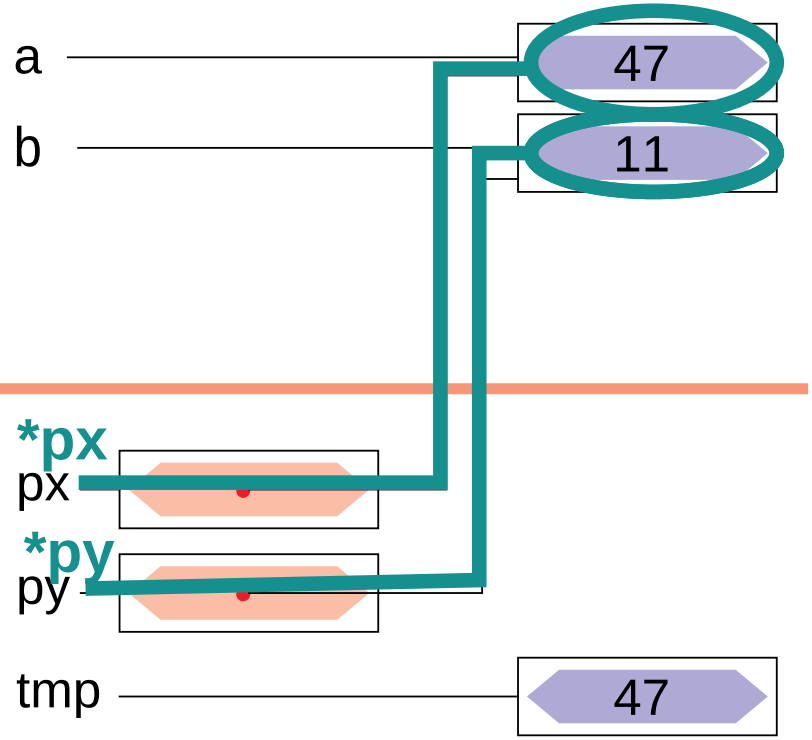


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

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; ❷
    *px = *py; ❸
```

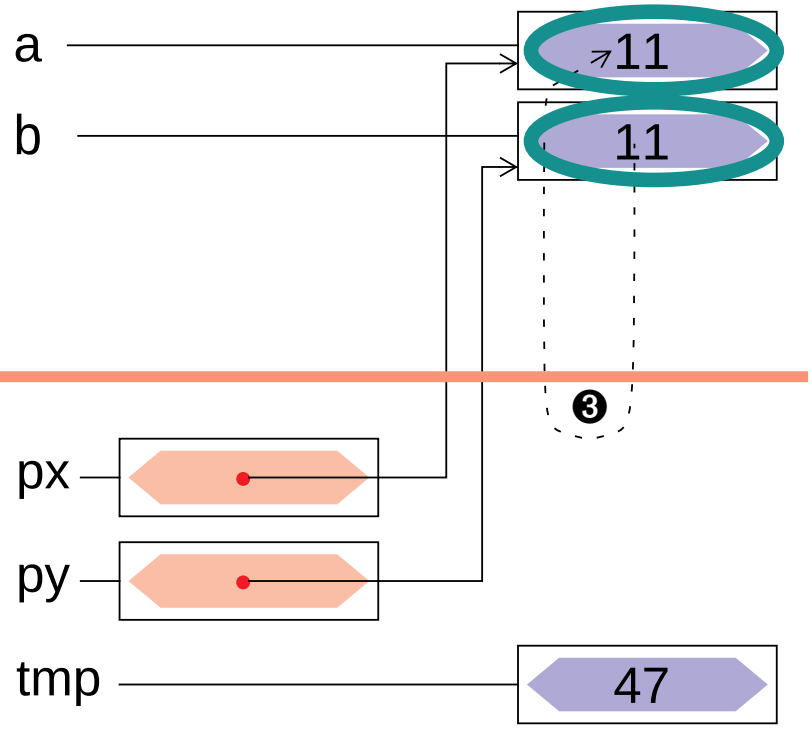


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

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; ❷
    *px = *py; ❸
```

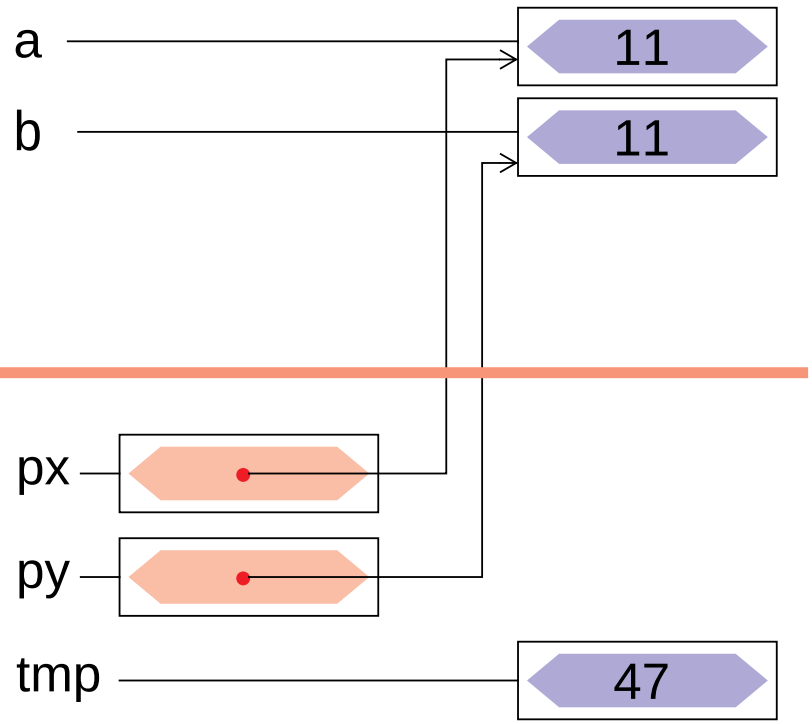


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

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; ❷
    *px = *py; ❸
    *py = tmp; ❹

}
```

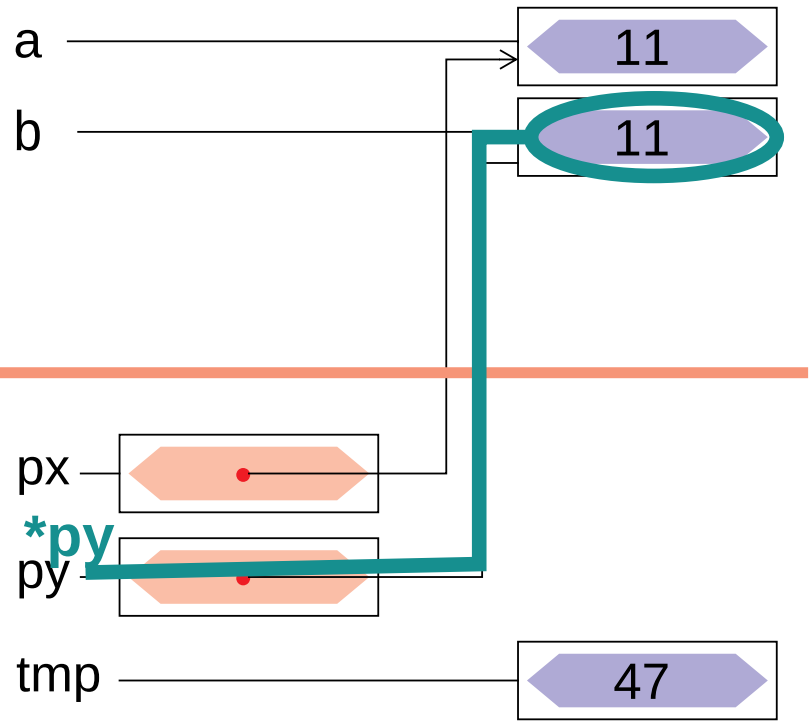


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

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; ❷
    *px = *py; ❸
    *py = tmp; ❹

}
```

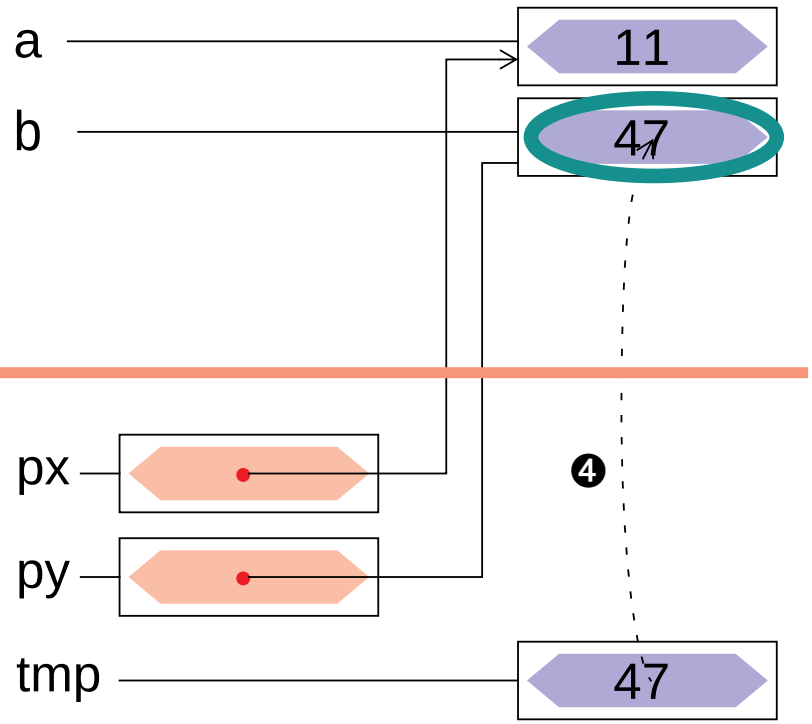


Zeiger als Funktionsargumente (Forts.)

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; ❷
    *px = *py; ❸
    *py = tmp; ❹

}
```



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
}
```

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 };
```

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 }
```

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

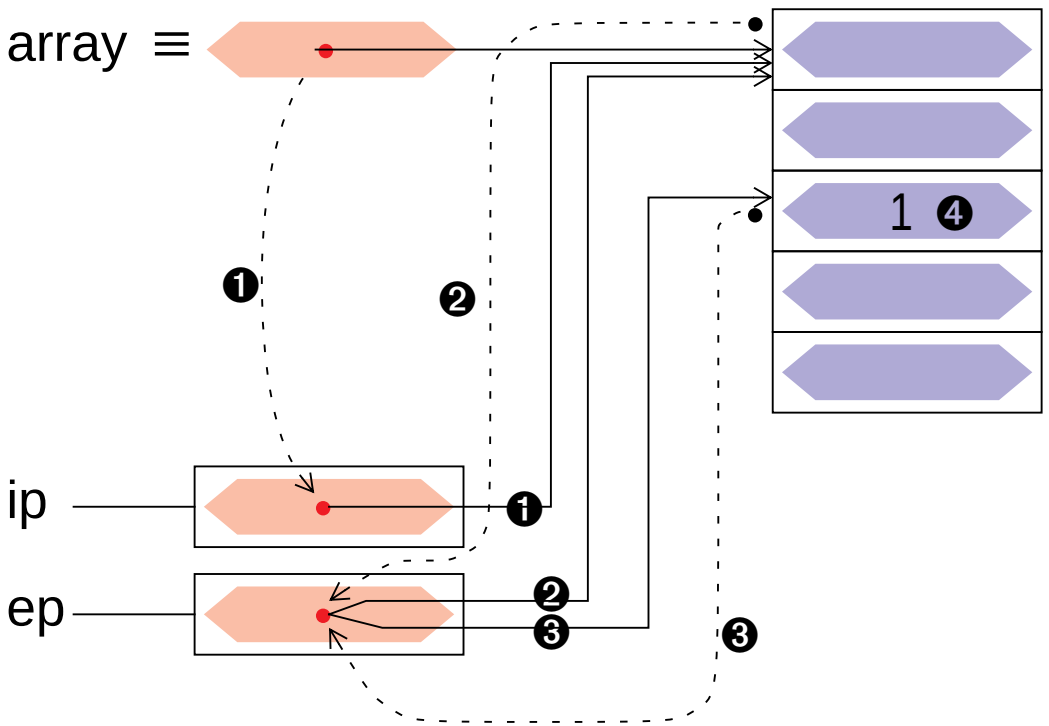
- Syntax: *Feld* **[** *IntAusdruck* **]** [=Java]
  - Wobei $0 \leq$ *IntAusdruck* $< n$ für $n =$ Feldgröße
  - **Achtung:** Feldindex wird nicht überprüft [≠Java]
    $\leadsto$ häufige Fehlerquelle in C-Programmen
- Beispiel

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

LEDs[3] = BLUE1;

for (unit8_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` ≡ `&array[0]`
  - Ein Alias – kein Behälter ⇝ Wert kann nicht verändert werden
  - Über einen so ermittelten Zeiger ist ein indirekter Feldzugriff möglich
- Beispiel (Gesamtüberblick)

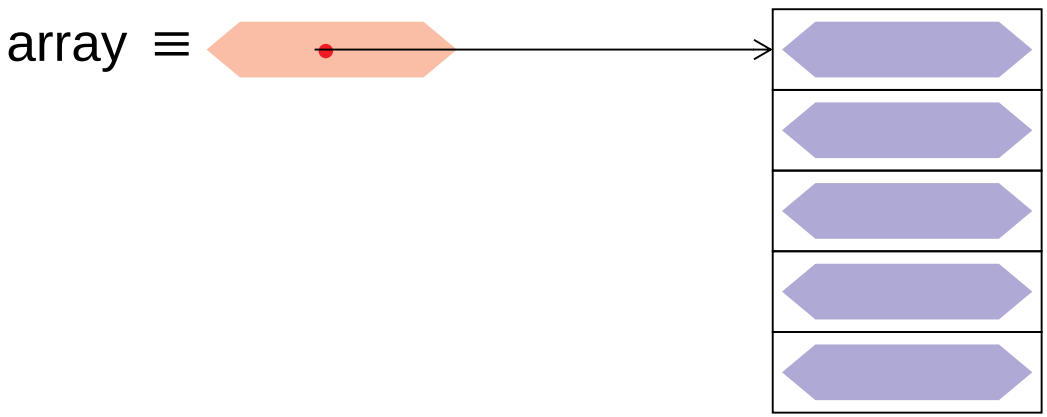
```
int array[5];

int *ip = array; ❶

int *ep;
ep = &array[0]; ❷

ep = &array[2]; ❸

*ep = 1; ❹
```



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)

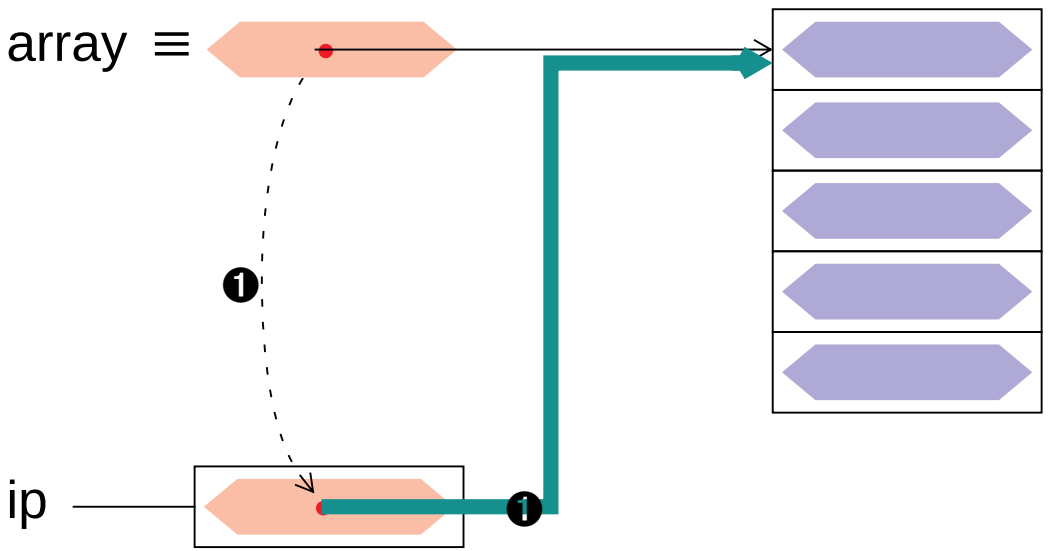
```
int array[5];
```



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)

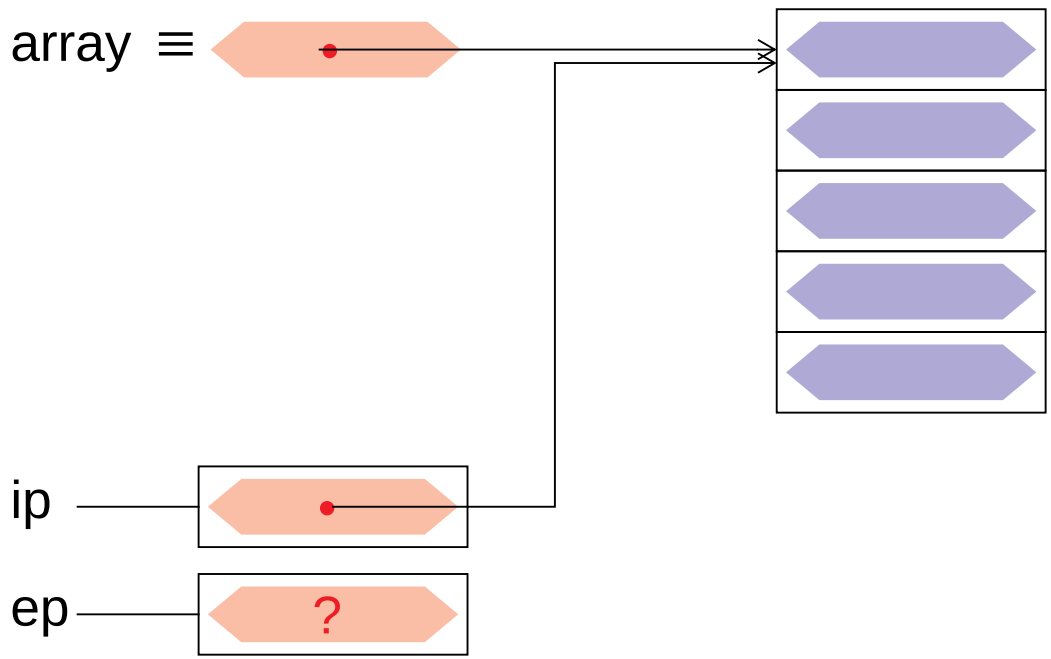
```
int array[5];

int *ip = array; ❶
```



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)

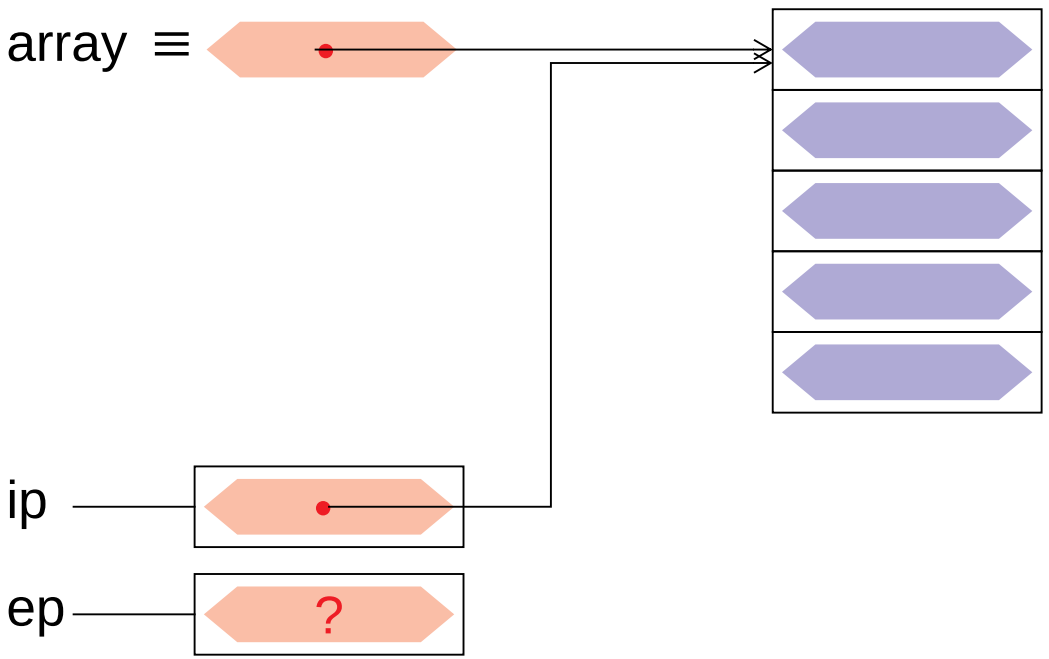
```
int array[5];

int *ip = array; ❶

int *ep;
```



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)

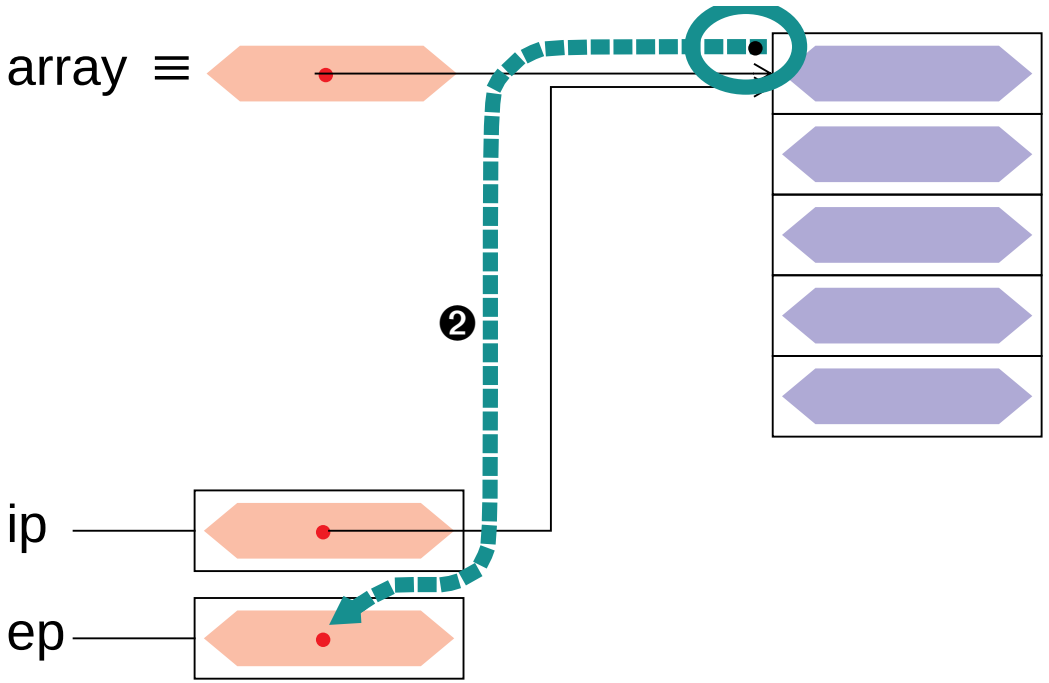
```
int array[5];

int *ip = array; ❶

int *ep;
ep = &array[0]; ❷
```



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)

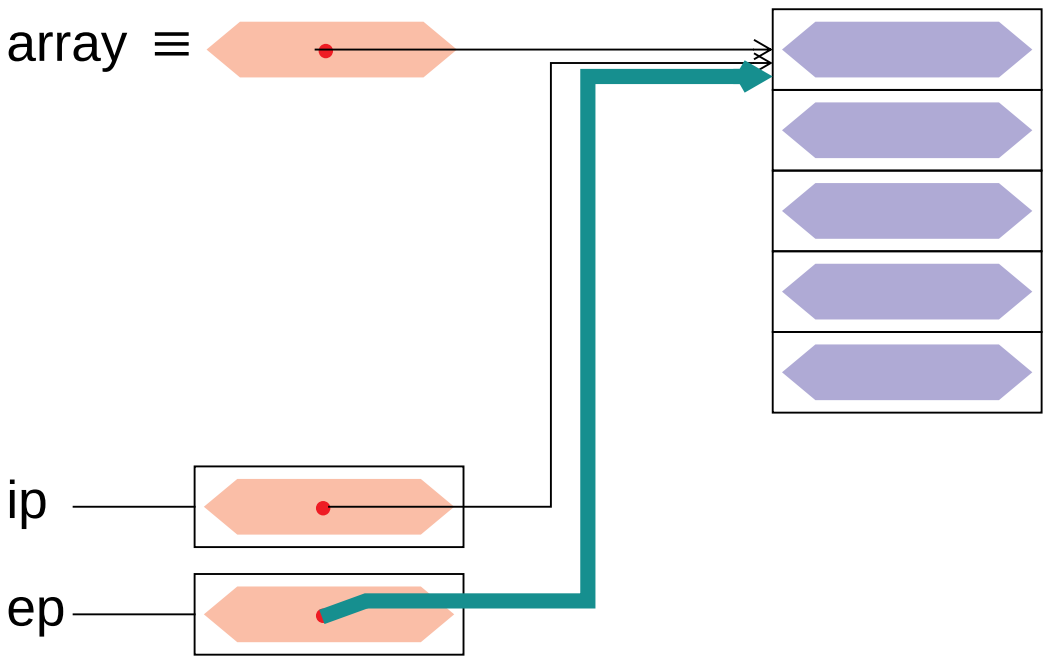
```
int array[5];

int *ip = array; ❶

int *ep;
ep = &array[0]; ❷
```



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)

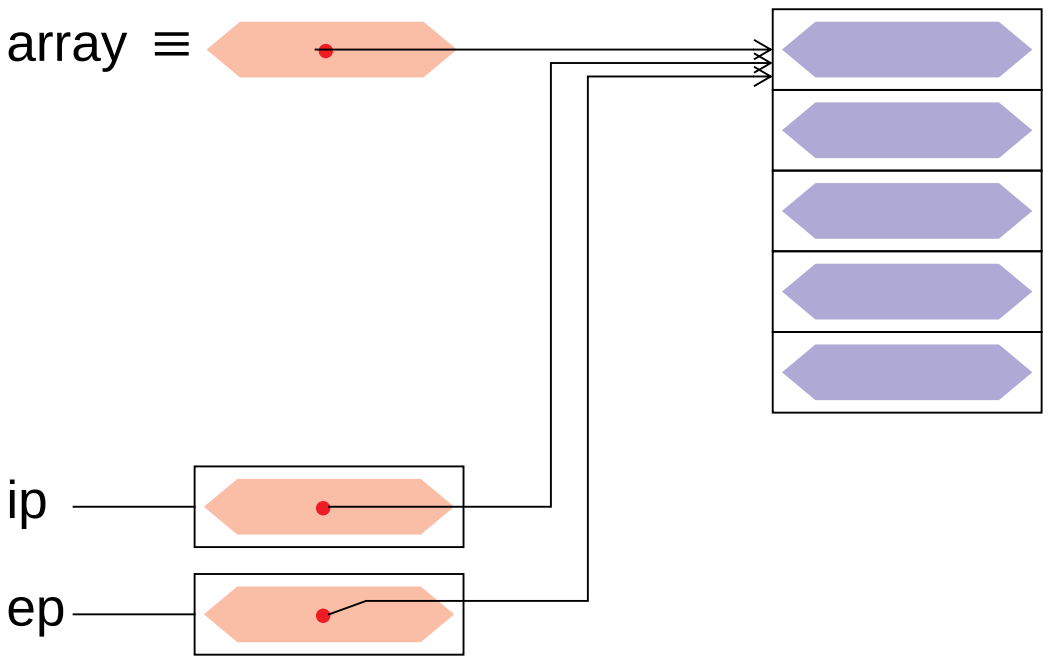
```
int array[5];

int *ip = array; ❶

int *ep;
ep = &array[0]; ❷
```



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)

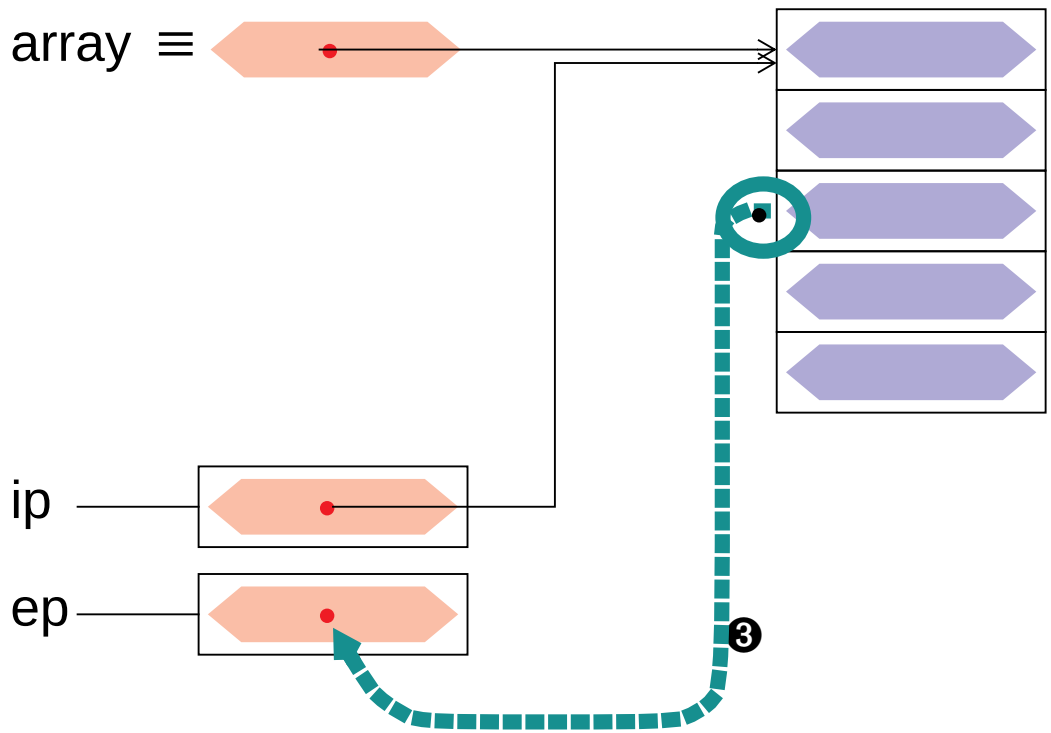
```
int array[5];

int *ip = array; ❶

int *ep;
ep = &array[0]; ❷

ep = &array[2]; ❸
```



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)

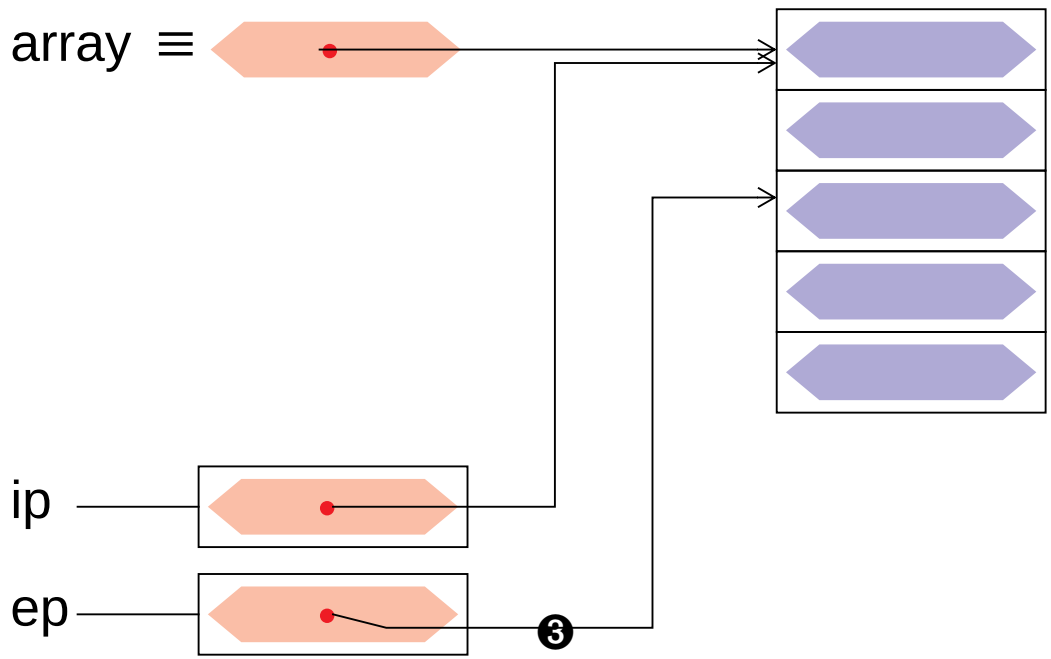
```
int array[5];

int *ip = array; ❶

int *ep;
ep = &array[0]; ❷

ep = &array[2]; ❸
```



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)

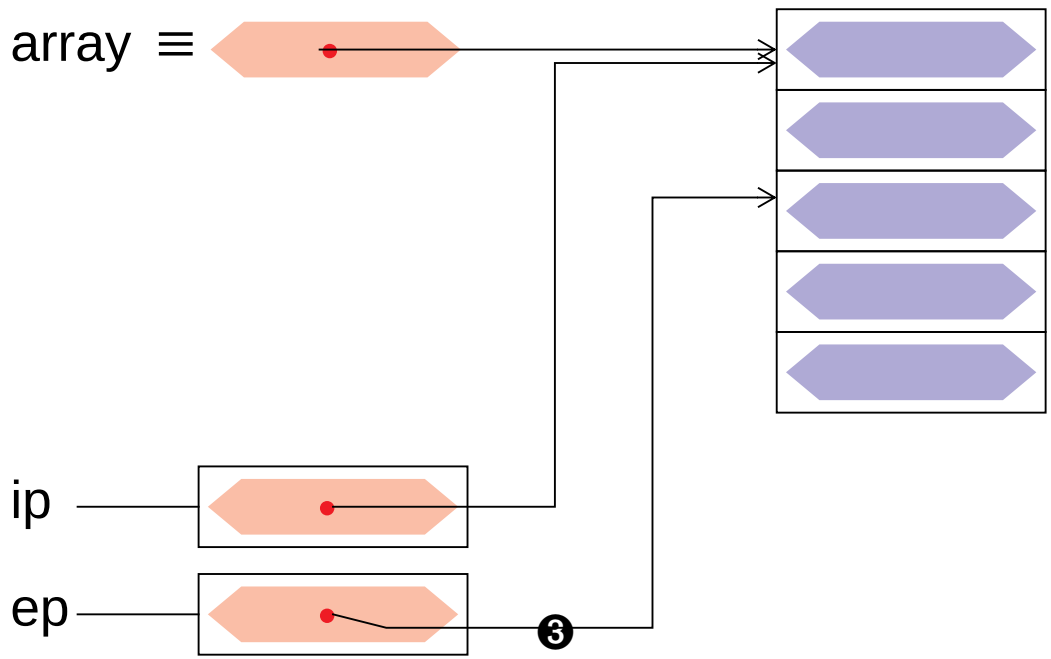
```
int array[5];

int *ip = array; ❶

int *ep;
ep = &array[0]; ❷

ep = &array[2]; ❸
```



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)

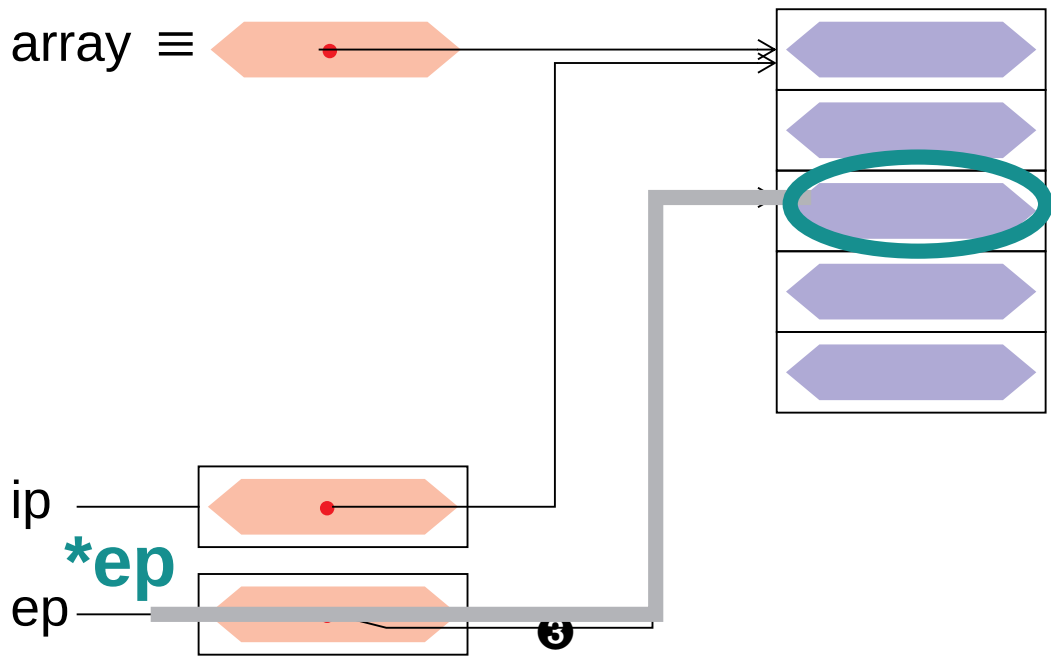
```
int array[5];

int *ip = array; ❶

int *ep;
ep = &array[0]; ❷

ep = &array[2]; ❸

*ep = 1; ❹
```



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)

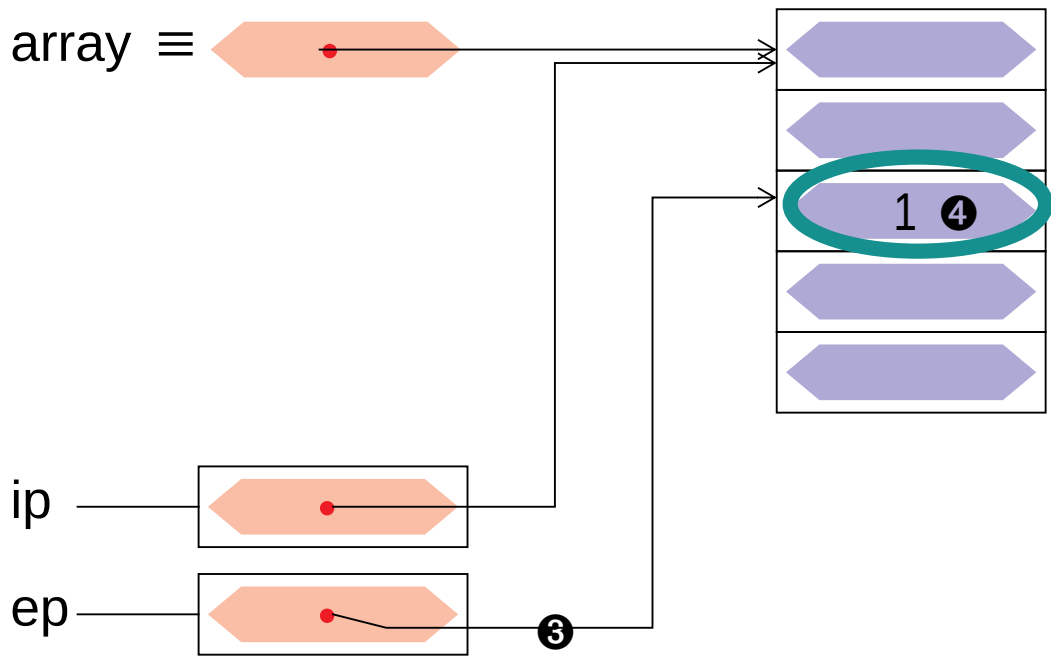
```
int array[5];

int *ip = array; ❶

int *ep;
ep = &array[0]; ❷

ep = &array[2]; ❸

*ep = 1; ❹
```



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; ❶

int *ep;
ep = &array[0]; ❷

ep = &array[2]; ❸

*ep = 1; ❹
```



Zeiger sind Felder

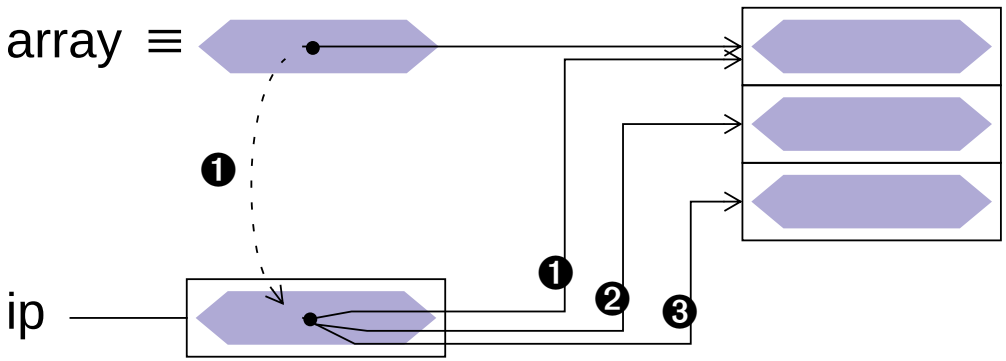
- Ein Feldbezeichner ist syntaktisch äquivalent zu einem konstanten Zeiger auf das erste Element des Feldes: `array` ≡ `&array[0]`
- Diese Beziehung gilt in beide Richtungen: `*array` ≡ `array[0]`
  - Ein Zeiger kann wie ein Feld verwendet werden
  - Insbesondere kann der **[ ]** - Operator angewandt 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 Zeiger*variable* ein Behälter $\rightsquigarrow$ Ihr Wert ist veränderbar
- Neben einfachen Zuweisungen ist dabei auch Arithmetik möglich

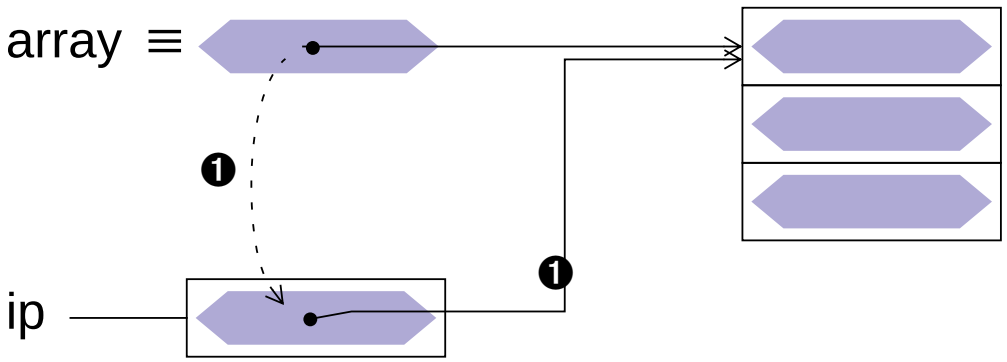
```
int array[3];
int *ip = array; ❶

ip++; ❷
ip++; ❸
```



Rechnen mit Zeigern

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

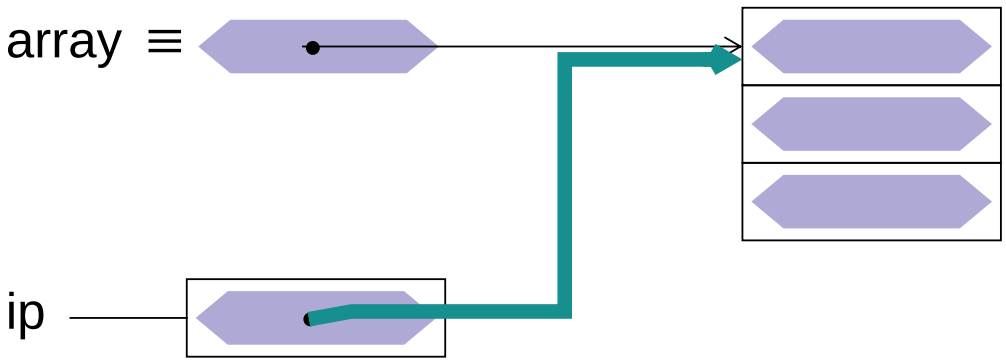
```
int array[3];
int *ip = array; ❶
```



Rechnen mit Zeigern

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

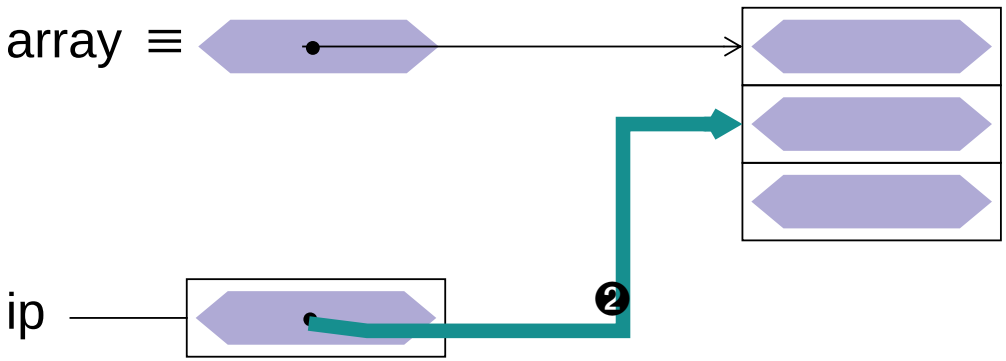
```
int array[3];
int *ip = array; ❶

ip++; ❷
```



Rechnen mit Zeigern

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

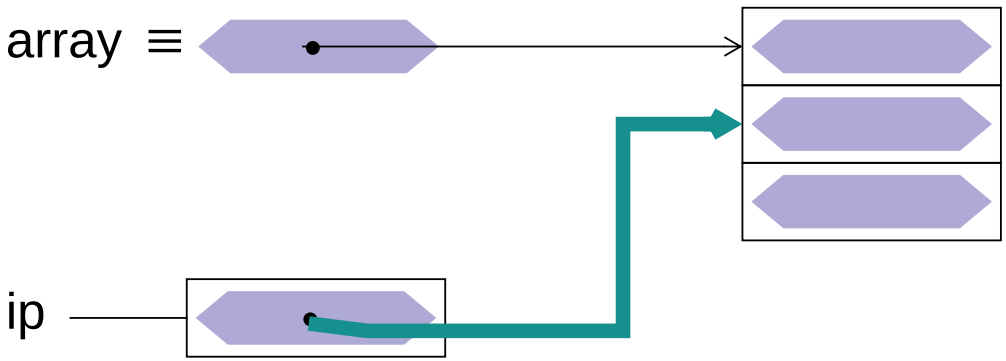
```
int array[3];
int *ip = array; ❶

ip++; ❷
```



Rechnen mit Zeigern

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

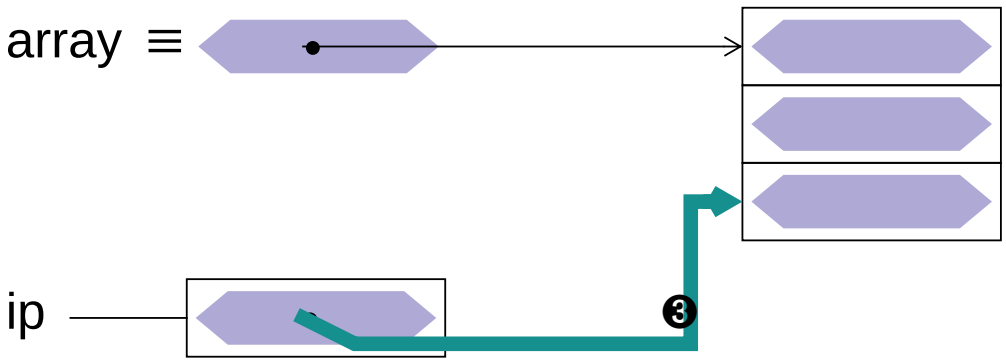
```
int array[3];
int *ip = array; ❶

ip++; ❷
ip++; ❸
```



Rechnen mit Zeigern

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

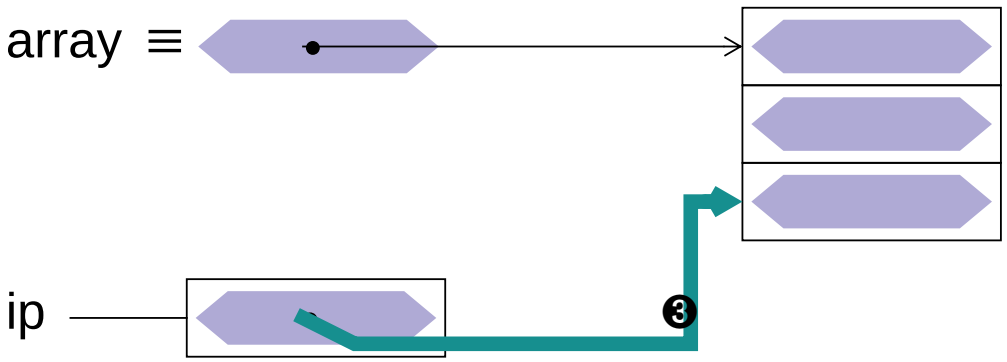
```
int array[3];
int *ip = array; ❶

ip++; ❷
ip++; ❸
```



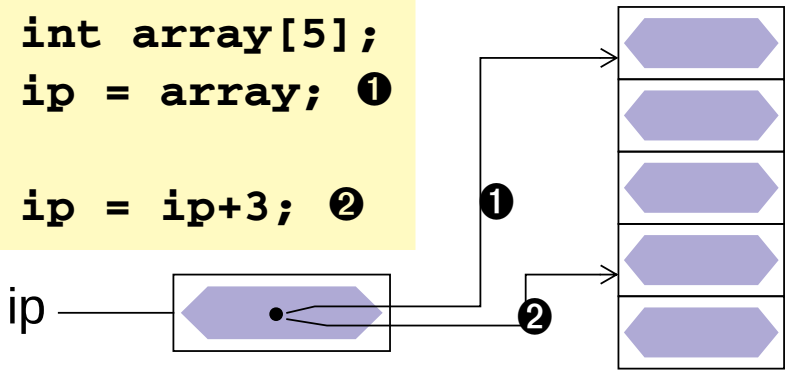
Rechnen mit Zeigern

- Im Unterschied zu einem Feldbezeichner ist eine Zeiger*variable* 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
```



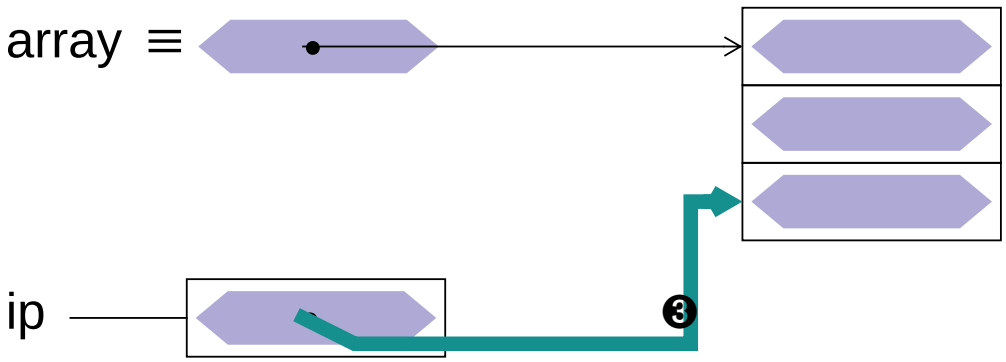

```
int array[5];
ip = array; ❶

ip = ip+3; ❷
```



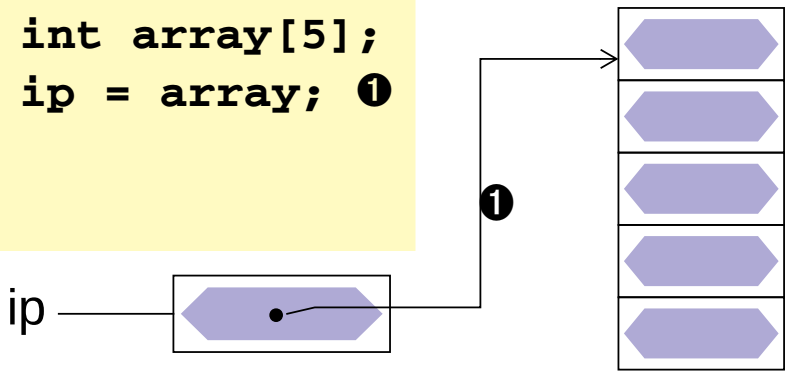
Rechnen mit Zeigern

- Im Unterschied zu einem Feldbezeichner ist eine Zeiger*variable* 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
```



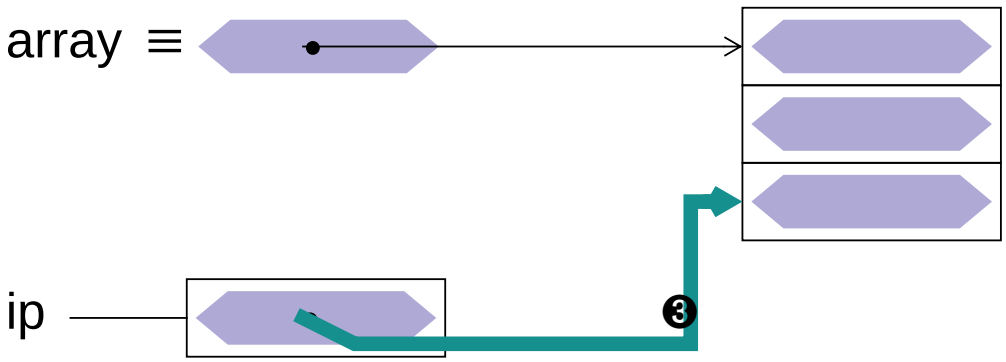

```
int array[5];
ip = array; ❶
```



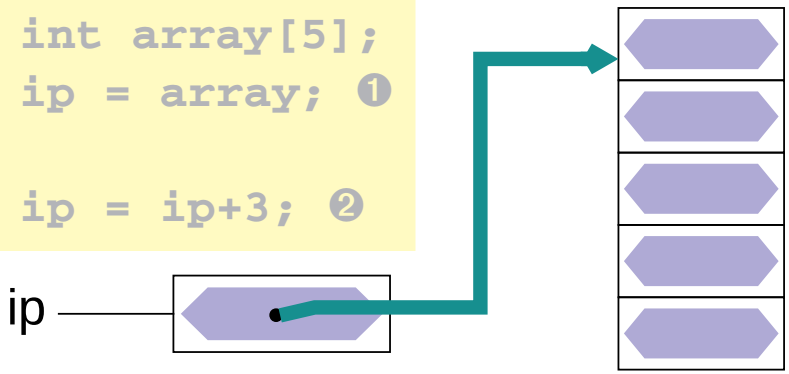
Rechnen mit Zeigern

- Im Unterschied zu einem Feldbezeichner ist eine Zeiger*variable* 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
```



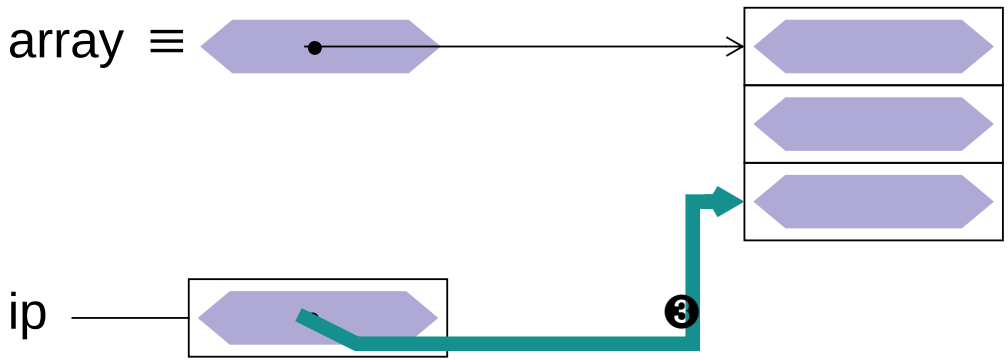

```
int array[5];
ip = array; ❶

ip = ip+3; ❷
```



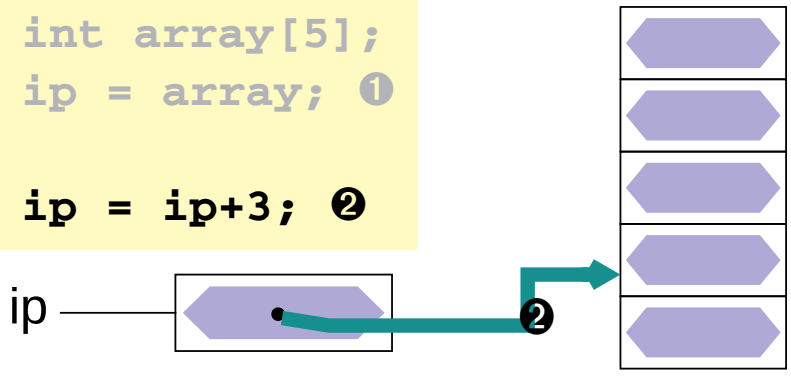
Rechnen mit Zeigern

- Im Unterschied zu einem Feldbezeichner ist eine Zeiger*variable* 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
```



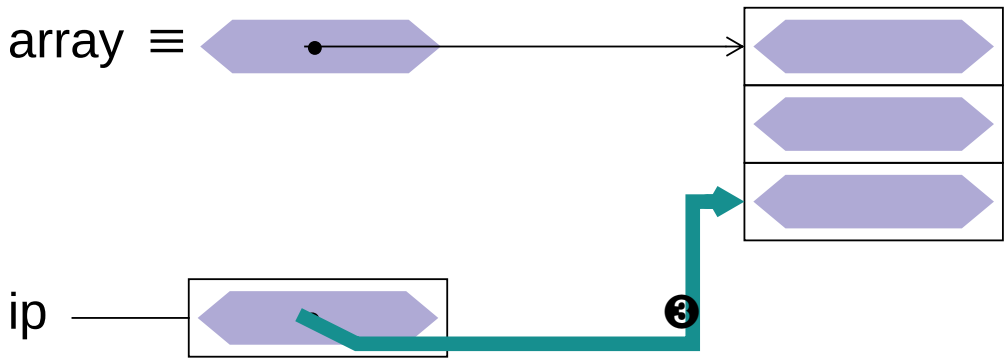

```
int array[5];
ip = array; ❶

ip = ip+3; ❷
```



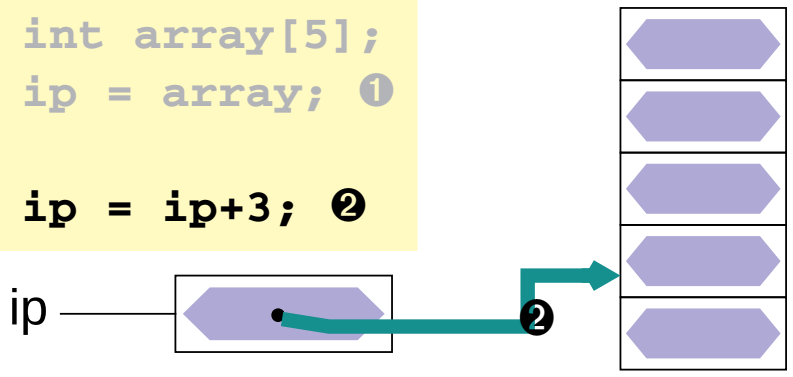
Rechnen mit Zeigern

- Im Unterschied zu einem Feldbezeichner ist eine Zeiger*variable* 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; ❷
```



`(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

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!

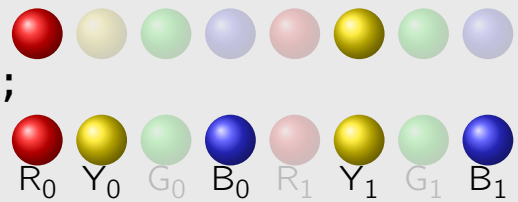
- Umgekehrt können Zeigeroperationen auch durch Feldoperationen dargestellt werden.
Der Feldbezeichner kann aber nicht verändert werden.

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 als Funktionsparameter (Forts.)

- Felder werden in C **immer** als Zeiger übergeben [=Java]
  $\rightsquigarrow$ *Call-by-reference*
- Wird der Parameter als `const` deklariert, so kann die Funktion die Feldelemente nicht verändern $\mapsto$ Guter Stil! [≠Java]

```
void enlight(const uint8_t *array, unsigned n) {
  ...
}
```

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) {
  ...
}
```

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 Funktionparameters
  - Bei Variablendefinitionen hat `array[]` eine völlig andere Bedeutung (Feldgröße aus Initialisierungsliste ermitteln, ↪ 13–8)

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

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" ≡

↪ 6–13

- Implementierungsvarianten

Variante 1: Feld-Syntax

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

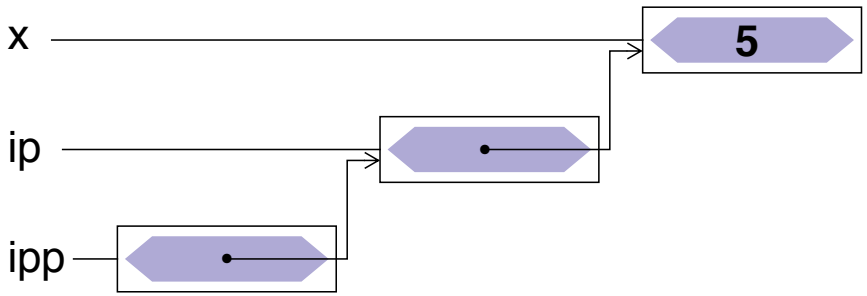
Variante 2: Zeiger-Syntax

```
int strlen(const char *s) {
  const char *end = s;
  while (*end != '\0')
    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
    $\mapsto$ 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) ↪ 9–3
  - *Typ* — Rückgabetyp 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*$_1$**,...,** *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()
}
```

Zeiger auf Funktionen (Forts.)

- Funktionszeiger werden oft für Rückruffunktionen (*Callbacks*) zur Zustellung asynchroner Ereignisse verwendet ($\mapsto$ „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_registerCallback(     // register callback
    BUTTON0, BUTTONEVENT_PRESSED, //   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