

18. Dynamische Datenstrukturen I

Dynamischer Speicher, Adressen und Zeiger, Const-Zeiger, Arrays, Array-basierte Vektoren

Wiederholung: `vector<T>`

- Kann mit beliebiger Grösse `n` initialisiert werden

Wiederholung: `vector<T>`

- Kann mit beliebiger Grösse `n` initialisiert werden
- Unterstützt diverse Operationen:

```
e = v[i];           // Get element
v[i] = e;          // Set element
l = v.size();      // Get size
v.push_front(e);  // Prepend element
v.push_back(e);   // Append element
...
```

Wiederholung: `vector<T>`

- Kann mit beliebiger Grösse `n` initialisiert werden
- Unterstützt diverse Operationen:

```
e = v[i];           // Get element
v[i] = e;          // Set element
l = v.size();      // Get size
v.push_front(e);  // Prepend element
v.push_back(e);   // Append element
...
```

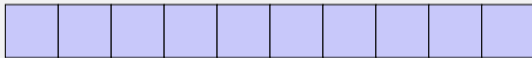
- Ein Vektor ist eine *dynamische Datenstruktur*, deren Grösse sich zur Laufzeit ändern kann

Unser eigener Vektor!

- Wir implementieren unseren eigenen Vektor: `vec`
- Schritt 1: `vec<int>` (heute)
- Schritt 2: `vec<T>` (später, nur kurz angeschnitten)

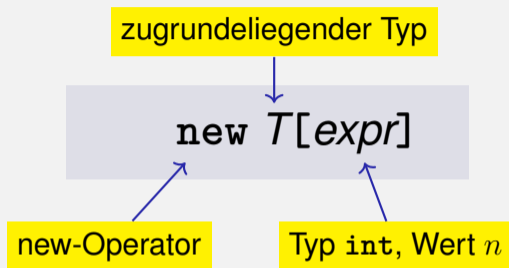
Vektoren im Speicher

Bereits bekannt: Ein Vektor belegt einen *zusammenhängenden* Speicherbereich



Frage: Wie *alloziert* (reserviert) man einen Speicherblock *beliebiger* Grösse zur Laufzeit, also *dynamisch*?

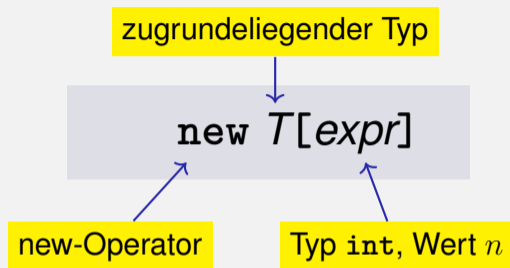
Der new-Ausdruck für Arrays



- **Effekt:** Neuer zusammenhängender Bereich im Speicher für n Elemente vom Typ T wird alloziert



Der `new`-Ausdruck für Arrays

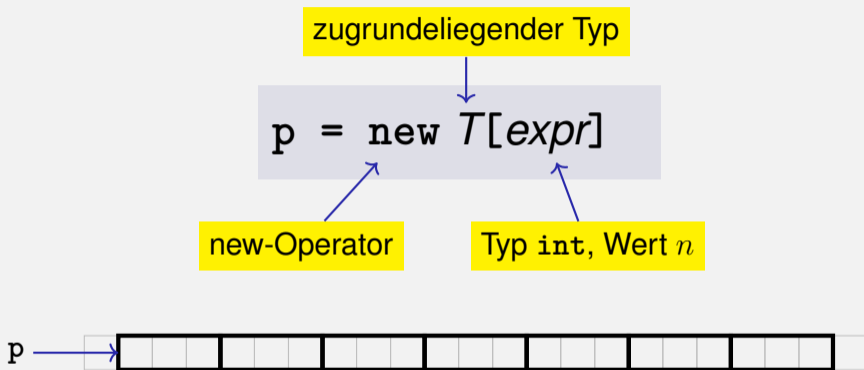


- **Effekt:** Neuer zusammenhängender Bereich im Speicher für n Elemente vom Typ T wird alloziert



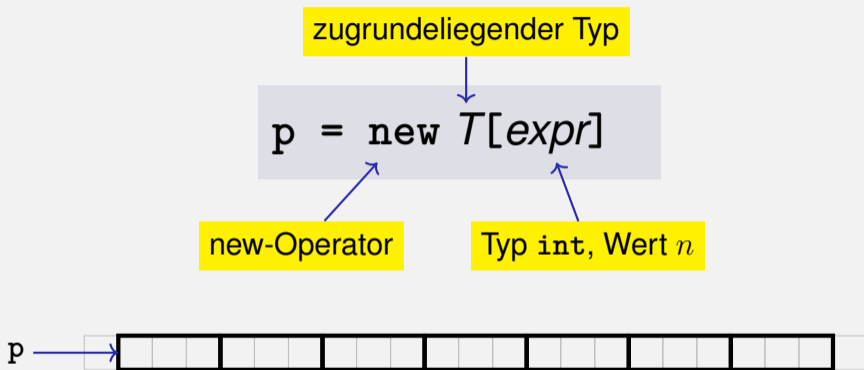
- Dieser Speicherbereich wird *Array* (der Länge n) genannt

Der new-Ausdruck für Arrays



- **Typ:** Ein Zeiger T^* (mehr dazu gleich)

Der new-Ausdruck für Arrays



- **Typ:** Ein Zeiger T^* (mehr dazu gleich)
- **Wert:** Die Startadresse des Speicherbereichs

Ausblick: new und delete

```
new T[expr]
```

- Bisher: Speicher (lokale Variablen, Funktionsargumente) „lebt“ nur innerhalb eines Funktionsaufrufs

Ausblick: new und delete

```
new T[expr]
```

- Bisher: Speicher (lokale Variablen, Funktionsargumente) „lebt“ nur innerhalb eines Funktionsaufrufs
- Aber jetzt: Speicherblock im Vektor darf nicht vor dem Vektor selbst „sterben“

Ausblick: `new` und `delete`

```
new T[expr]
```

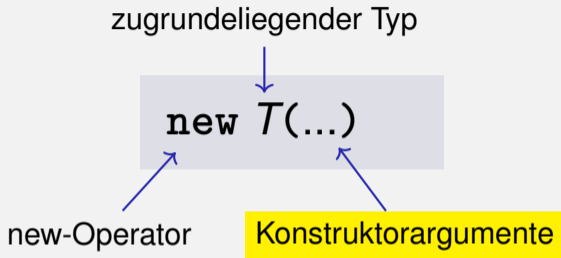
- Bisher: Speicher (lokale Variablen, Funktionsargumente) „lebt“ nur innerhalb eines Funktionsaufrufs
- Aber jetzt: Speicherblock im Vektor darf nicht vor dem Vektor selbst „sterben“
- Mittels `new` allozierter Speicher wird *nicht* automatisch dealloziert (= freigegeben)

Ausblick: `new` und `delete`

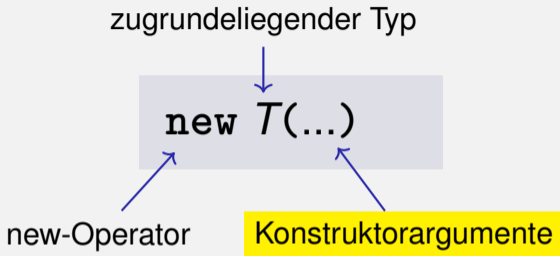
```
new T[expr]
```

- Bisher: Speicher (lokale Variablen, Funktionsargumente) „lebt“ nur innerhalb eines Funktionsaufrufs
- Aber jetzt: Speicherblock im Vektor darf nicht vor dem Vektor selbst „sterben“
- Mittels `new` allozierter Speicher wird *nicht* automatisch dealloziert (= freigegeben)
- Zu jedem `new` gehört ein `delete`, das den Speicher explizit freigibt → **in zwei Wochen**

Der new-Ausdruck (ohne Arrays)

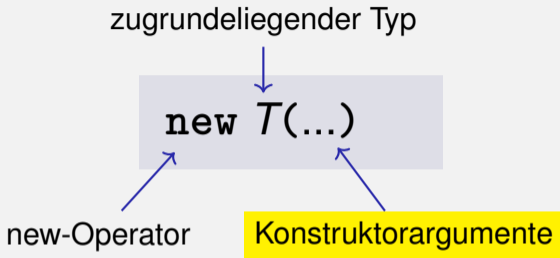


Der new-Ausdruck (ohne Arrays)



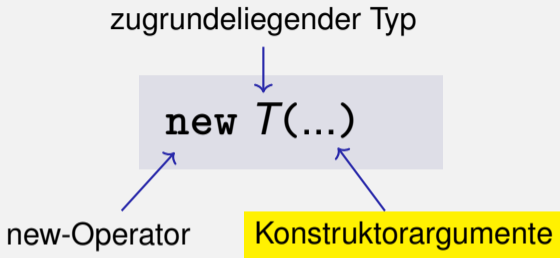
- **Effekt:** Speicher für ein neues Objekt vom Typ T wird alloziert ...

Der new-Ausdruck (ohne Arrays)



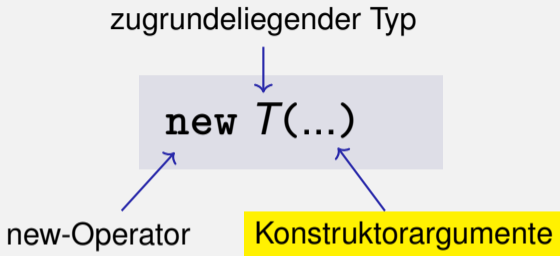
- **Effekt:** Speicher für ein neues Objekt vom Typ T wird alloziert ...
- ... und mit Hilfe des passenden Konstruktors initialisiert

Der new-Ausdruck (ohne Arrays)



- **Effekt:** Speicher für ein neues Objekt vom Typ T wird alloziert ...
- ... und mit Hilfe des passenden Konstruktors initialisiert
- **Wert:** Adresse des neuen T -Objekt, **Typ:** Zeiger T^*

Der new-Ausdruck (ohne Arrays)



- **Effekt:** Speicher für ein neues Objekt vom Typ T wird alloziert ...
- ... und mit Hilfe des passenden Konstruktors initialisiert
- **Wert:** Adresse des neuen T -Objekt, **Typ:** Zeiger T^*
- Auch hier gilt: Objekt „lebt“ bis es explizit gelöscht wird (Nutzen wird später klarer werden)

Zeiger-Typen

\mathbf{T}_* Zeiger-Typ für zugrunde liegenden
Typ \mathbf{T}

Ein Ausdruck vom Typ \mathbf{T}_* heisst *Zeiger (auf \mathbf{T})*

Zeiger-Typen

T_* Zeiger-Typ für zugrunde liegenden
Typ T

Ein Ausdruck vom Typ T_* heisst *Zeiger (auf T)*

```
int* p; // Zeiger auf einen int
std::string* q; // Zeiger auf einen std::string
```

Zeiger-Typen

Wert eines Zeigers auf T ist die *Adresse* eines Objektes vom Typ T

Zeiger-Typen

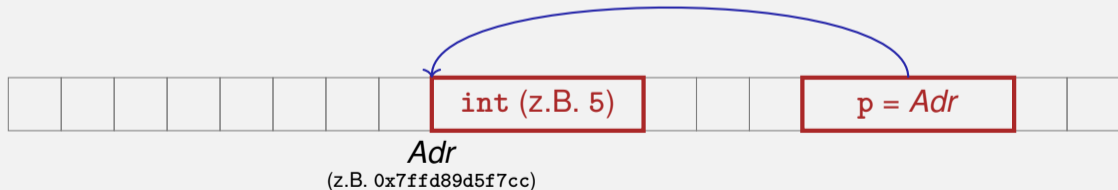
Wert eines Zeigers auf T ist die *Adresse* eines Objektes vom Typ T

```
int* p = ...;  
std::cout << p; // z.B. 0x7ffd89d5f7cc
```

Zeiger-Typen

Wert eines Zeigers auf T ist die *Adresse* eines Objektes vom Typ T

```
int* p = ...;  
std::cout << p; // z.B. 0x7ffd89d5f7cc
```



Adress-Operator

Frage: Wie kommt man an die Adresse eines Objekts?

- 1 Direkt beim Erzeugen eines neuen Objekts mittels `new`

Adress-Operator

Frage: Wie kommt man an die Adresse eines Objekts?

- 1 Direkt beim Erzeugen eines neuen Objekts mittels `new`
- 2 Für bestehende Objekte: Mittels des *Adress-Operators* `&`

`&expr` ← `expr: L-Wert vom Typ T`

Adress-Operator

Frage: Wie kommt man an die Adresse eines Objekts?

- 1 Direkt beim Erzeugen eines neuen Objekts mittels `new`
- 2 Für bestehende Objekte: Mittels des *Adress-Operators* `&`

`&expr` ← `expr: L-Wert vom Typ T`

- **Wert** des Ausdrucks: Die *Adresse* des Objekts (L-Wertes) `expr`

Adress-Operator

Frage: Wie kommt man an die Adresse eines Objekts?

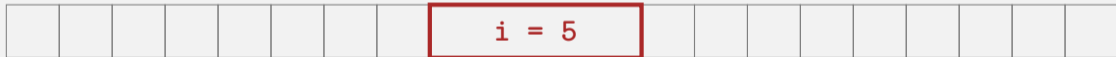
- 1 Direkt beim Erzeugen eines neuen Objekts mittels `new`
- 2 Für bestehende Objekte: Mittels des *Adress-Operators* `&`

`&expr` ← `expr: L-Wert vom Typ T`

- **Wert** des Ausdrucks: Die *Adresse* des Objekts (L-Wertes) `expr`
- **Typ** des Ausdrucks: Ein Zeiger T^* (vom Typ T)

Adress-Operator

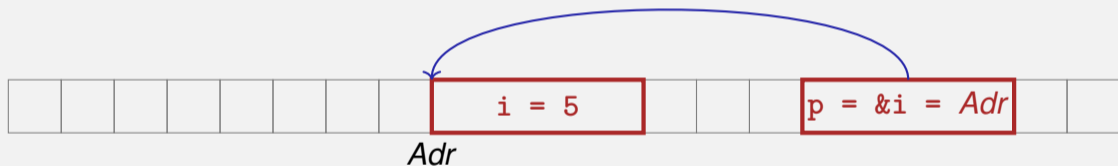
```
int i = 5; // i initialisiert mit 5
```



Adr

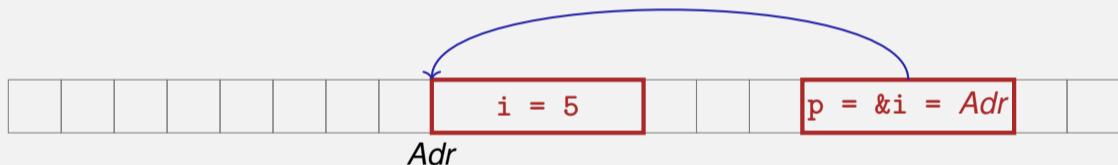
Adress-Operator

```
int i = 5; // i initialisiert mit 5  
int* p = &i; // p initialisiert mit Adresse von i
```



Adress-Operator

```
int i = 5; // i initialisiert mit 5  
int* p = &i; // p initialisiert mit Adresse von i
```



Nächste Frage: Wie „folgt“ man einem Zeiger?

Dereferenz-Operator

Antwort: Mittels des *Dereferenz-Operators* *

**expr*

← expr: R-Wert vom Typ T^*

Dereferenz-Operator

Antwort: Mittels des *Dereferenz-Operators* *

**expr* ← expr: R-Wert vom Typ T^*

- **Wert** des Ausdrucks: Der *Wert* des Objekts an der durch *expr* bestimmten Adresse

Dereferenz-Operator

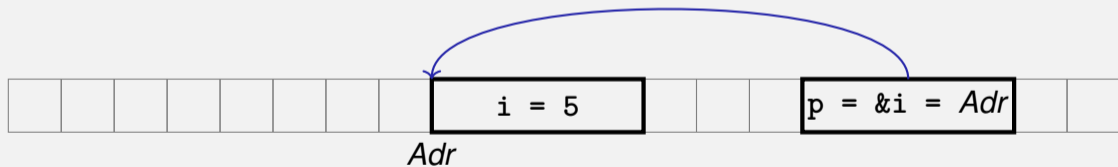
Antwort: Mittels des *Dereferenz-Operators* *

$*expr$ ← $expr$: R-Wert vom Typ T^*

- **Wert** des Ausdrucks: Der *Wert* des Objekts an der durch $expr$ bestimmten Adresse
- **Typ** des Ausdrucks: T

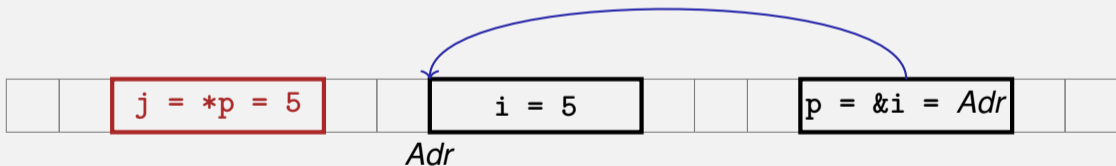
Dereferenz-Operator

```
int i = 5;  
int* p = &i; // p = Adresse von i
```

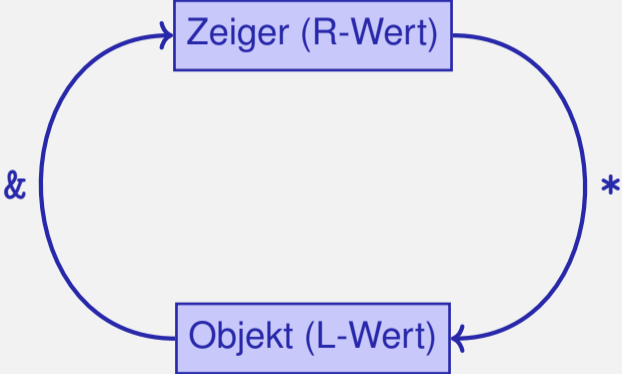


Dereferenz-Operator

```
int i = 5;  
int* p = &i; // p = Adresse von i  
int j = *p; // j = 5
```



Adress- und Dereferenzoperator



Zeiger-Typen

Wo ein T^* draufsteht, muss auch ein T drin sein

```
int* p = ...; // p zeigt auf einen int  
double* q = p; // aber q auf einen double → Kompilerfehler!
```

Eselsbrücke

Die Deklaration

```
T* p; // p ist vom Typ „Zeiger auf T“
```

Eselsbrücke

Die Deklaration

```
T* p;    // p ist vom Typ „Zeiger auf T“
```

kann gelesen werden als

```
T *p;    // *p ist vom Typ T
```


Null-Zeiger

- Spezieller Zeigerwert, der angibt, dass (noch) auf kein Objekt gezeigt wird
- Repräsentiert durch das Literal `nullptr` (konvertierbar nach `T*`)

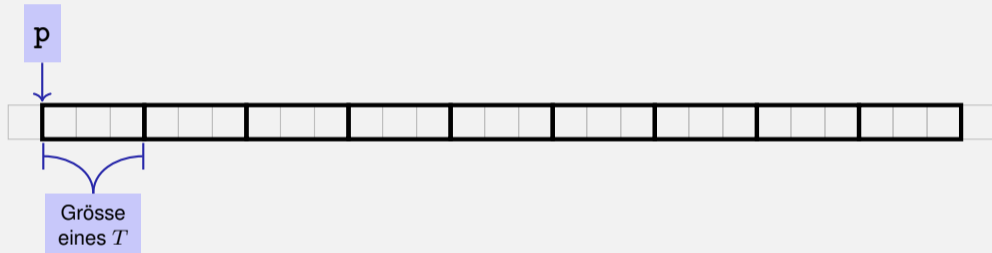
```
int* p = nullptr;
```

- Kann nicht dereferenziert werden (Laufzeitfehler)
- Dient der Vermeidung undefinierten Verhaltens

```
int* p; // p could point to anything  
int* q = nullptr; // q explicitly points nowhere
```

Zeiger-Arithmetik: Zeiger plus int

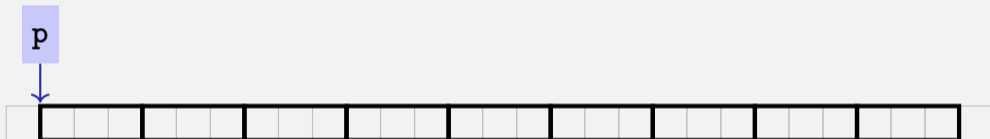
```
T* p = new T[n]; // p points to first array element
```



Wie zeigt man auf hintere Elemente?

Zeiger-Arithmetik: Zeiger plus int

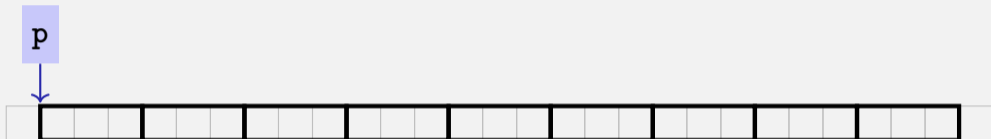
```
T* p = new T[n]; // p points to first array element
```



Wie zeigt man auf hintere Elemente? → *Zeiger-Arithmetik*:

Zeiger-Arithmetik: Zeiger plus int

```
T* p = new T[n]; // p points to first array element
```

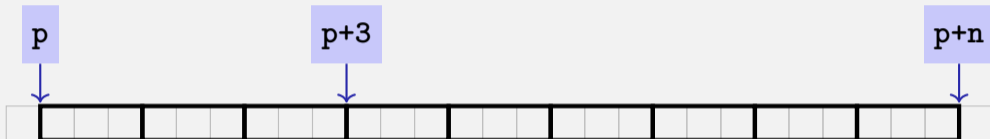


Wie zeigt man auf hintere Elemente? → *Zeiger-Arithmetik*:

- *p* gibt die *Adresse* des *ersten* Array-Elements, **p* dessen *Wert*

Zeiger-Arithmetik: Zeiger plus int

```
T* p = new T[n]; // p points to first array element
```



Wie zeigt man auf hintere Elemente? → *Zeiger-Arithmetik*:

- p gibt die *Adresse* des *ersten* Array-Elements, $*p$ dessen *Wert*
- $*(p + i)$ gibt den Wert des *i-ten* Array-Elements, für $0 \leq i < n$

Zeiger-Arithmetik: Zeiger plus int

```
T* p = new T[n]; // p points to first array element
```

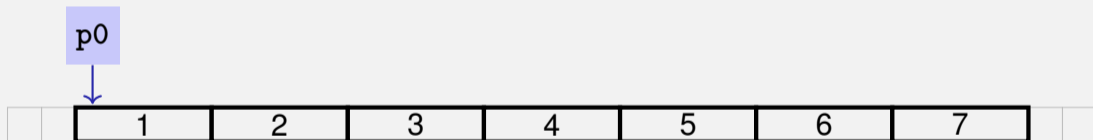


Wie zeigt man auf hintere Elemente? → *Zeiger-Arithmetik*:

- p gibt die *Adresse* des *ersten* Array-Elements, $*p$ dessen *Wert*
- $*(p + i)$ gibt den Wert des *i-ten* Array-Elements, für $0 \leq i < n$
- $*p$ ist äquivalent zu $*(p + 0)$

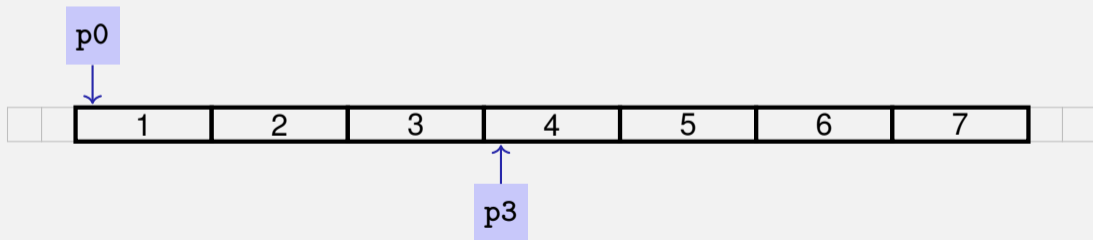
Zeiger-Arithmetik: Zeiger plus int

```
int* p0 = new int[7]{1,2,3,4,5,6,7}; // p0 points to 1st element
```



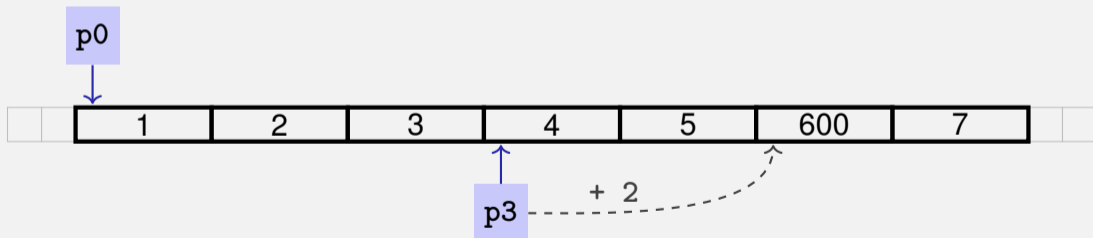
Zeiger-Arithmetik: Zeiger plus int

```
int* p0 = new int[7]{1,2,3,4,5,6,7}; // p0 points to 1st element  
int* p3 = p0 + 3; // p3 points to 4th element
```



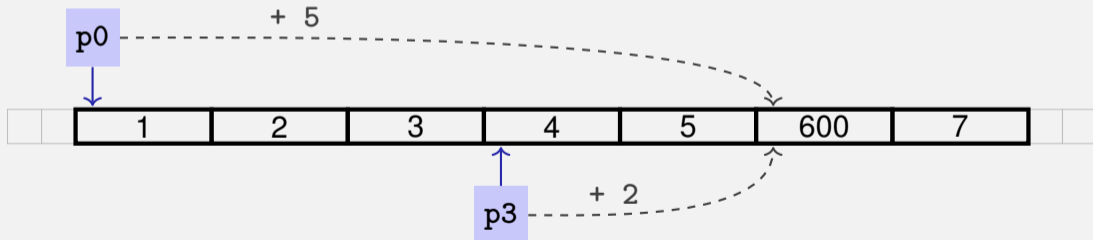
Zeiger-Arithmetik: Zeiger plus int

```
int* p0 = new int[7]{1,2,3,4,5,6,7}; // p0 points to 1st element
int* p3 = p0 + 3; // p3 points to 4th element
*(p3 + 2) = 600; // set value of 6th element to 600
std::cout << *(p0 + 5);
```



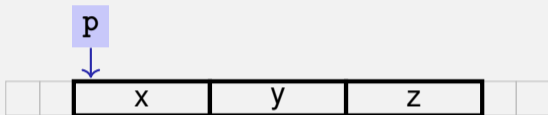
Zeiger-Arithmetik: Zeiger plus int

```
int* p0 = new int[7]{1,2,3,4,5,6,7}; // p0 points to 1st element
int* p3 = p0 + 3; // p3 points to 4th element
*(p3 + 2) = 600; // set value of 6th element to 600
std::cout << *(p0 + 5); // output 6th element's value (i.e. 600)
```



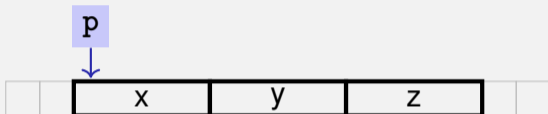
Sequenzielle Zeiger-Iteration

```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};
```



Sequenzielle Zeiger-Iteration

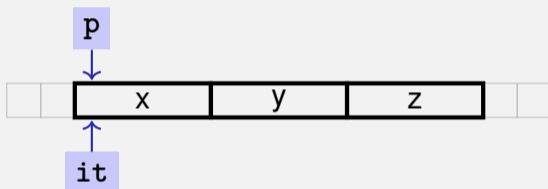
```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};
```



```
for (char* it = p;  
     it != p + 3;  
     ++it) {  
  
    std::cout << *it << ' ';  
}
```

Sequenzielle Zeiger-Iteration

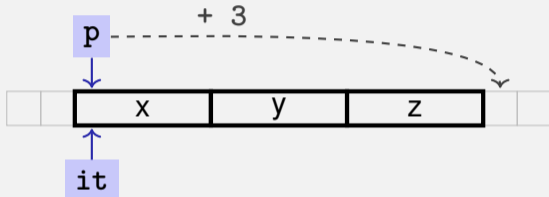
```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};
```



```
for (char* it = p; it zeigt aufs erste Element  
    it != p + 3;  
    ++it) {  
  
    std::cout << *it << ' ' << ' ' << '\n';  
}
```

Sequenzielle Zeiger-Iteration

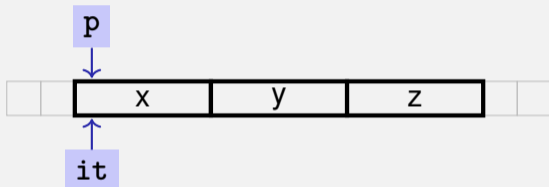
```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};
```



```
for (char* it = p;  
    it != p + 3; ← Abbruch falls Ende erreicht  
    ++it) {  
  
    std::cout << *it << ' ';  
}
```

Sequenzielle Zeiger-Iteration

```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};
```



```
for (char* it = p;  
     it != p + 3;  
     ++it) {
```

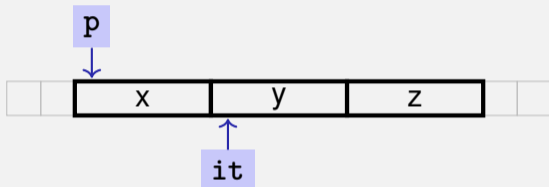
```
    std::cout << *it << ' ';
```

```
}
```

Aktuelles Element ausgeben: 'x'

Sequenzielle Zeiger-Iteration

```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};
```



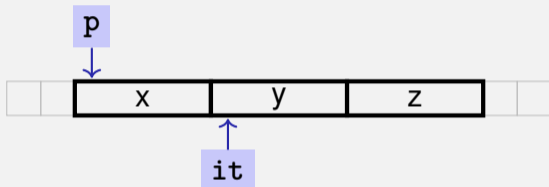
```
for (char* it = p;  
    it != p + 3;  
    ++it) {
```

Zeiger elementweise voranschieben

```
    std::cout << *it << ' '; // x  
}
```


Sequenzielle Zeiger-Iteration

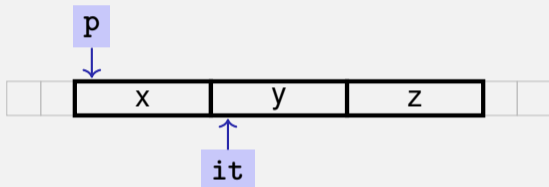
```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};
```



```
for (char* it = p;  
    it != p + 3;  
    ++it) {  
  
    std::cout << *it << ' '; // x  
}
```

Sequenzielle Zeiger-Iteration

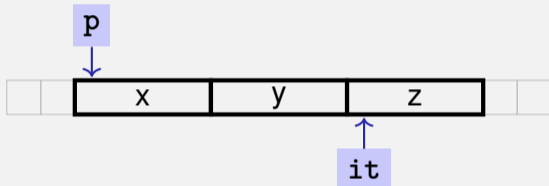
```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};
```



```
for (char* it = p;  
    it != p + 3;  
    ++it) {  
  
    std::cout << *it << ' '; // x y  
}
```

Sequenzielle Zeiger-Iteration

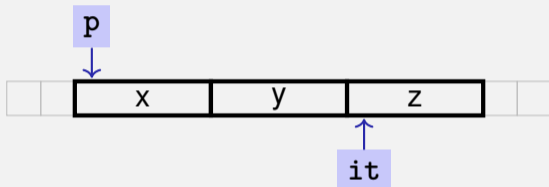
```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};
```



```
for (char* it = p;  
     it != p + 3;  
     ++it) {  
  
    std::cout << *it << ' '; // x y  
}
```

Sequenzielle Zeiger-Iteration

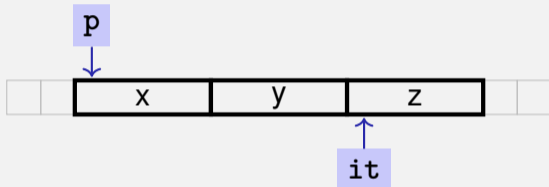
```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};
```



```
for (char* it = p;  
    it != p + 3;  
    ++it) {  
  
    std::cout << *it << ' '; // x y  
}
```

Sequenzielle Zeiger-Iteration

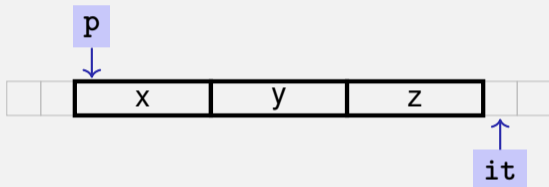
```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};
```



```
for (char* it = p;  
    it != p + 3;  
    ++it) {  
  
    std::cout << *it << ' '; // x y z  
}
```

Sequenzielle Zeiger-Iteration

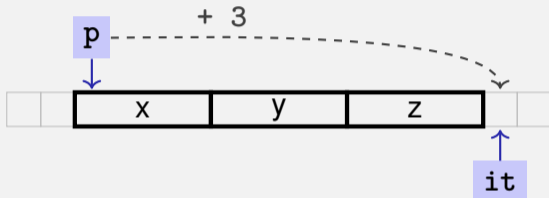
```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};
```



```
for (char* it = p;  
     it != p + 3;  
     ++it) {  
  
    std::cout << *it << ' '; // x y z  
}
```

Sequenzielle Zeiger-Iteration

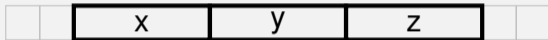
```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};
```



```
for (char* it = p;  
    it != p + 3;  
    ++it) {  
  
    std::cout << *it << ' '; // x y z  
}
```

Wahlfreier Zugriff auf Arrays

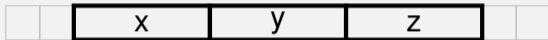
```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};
```



- Der Ausdruck `*(p + i)`
- kann auch geschrieben werden als `p[i]`

Wahlfreier Zugriff auf Arrays

```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};
```



- Der Ausdruck `*(p + i)`
- kann auch geschrieben werden als `p[i]`
- z.B. `p[1] == *(p + 1) == 'y'`

Wahlfreier Zugriff auf Arrays

Iteration über ein Array mittels Indizes und *wahlfreiem Zugriff*:

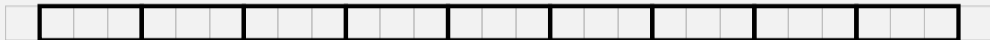
```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};

for (int i = 0; i < 3; ++i)
    std::cout << p[i] << ' ';
```

Aber: Dies ist weniger *effizient* als der vorher gezeigte *sequenzielle* Zugriff mittels Zeiger-Iteration

Wahlfreier Zugriff auf Arrays

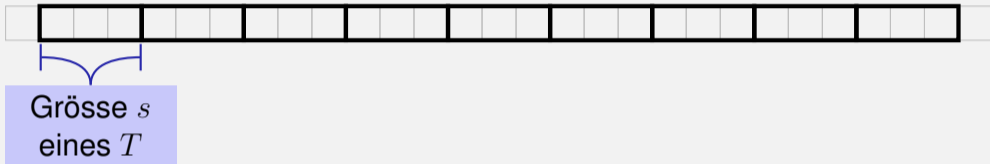
```
 $T^*$  p = new T[n];
```



Grösse s
eines T

Wahlfreier Zugriff auf Arrays

```
 $T^* \text{ p} = \text{new } T[\text{n}];$ 
```



- Zugriff $\text{p}[i]$, also $*(\text{p} + i)$, „kostet“ Berechnung $\text{p} + i \cdot s$

Wahlfreier Zugriff auf Arrays

```
T* p = new T[n];
```



- Zugriff $p[i]$, also $*(p + i)$, „kostet“ Berechnung $p + i \cdot s$
- Iteration mittels *wahlfreiem Zugriff* ($p[0], p[1], \dots$) kostet eine Addition und eine Multiplikation pro Zugriff

Wahlfreier Zugriff auf Arrays

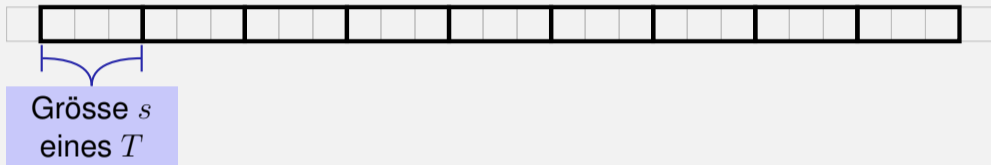
```
T* p = new T[n];
```



- Zugriff $p[i]$, also $*(p + i)$, „kostet“ Berechnung $p + i \cdot s$
- Iteration mittels *wahlfreiem Zugriff* ($p[0], p[1], \dots$) kostet eine Addition und eine Multiplikation pro Zugriff
- Iteration mittels *sequentiellem Zugriff* ($++p, ++p, \dots$) kostet nur eine Addition pro Zugriff

Wahlfreier Zugriff auf Arrays

```
T* p = new T[n];
```



- Zugriff $p[i]$, also $*(p + i)$, „kostet“ Berechnung $p + i \cdot s$
- Iteration mittels *wahlfreiem Zugriff* ($p[0], p[1], \dots$) kostet eine Addition und eine Multiplikation pro Zugriff
- Iteration mittels *sequentiellem Zugriff* ($++p, ++p, \dots$) kostet nur eine Addition pro Zugriff
- Sequenzieller Zugriff ist daher für Iterationen zu bevorzugen

Ein Buch lesen ... mit wahlfreiem Zugriff

Wahlfreier Zugriff

- öffne Buch auf S.1
- klappe Buch zu
- öffne Buch auf S.2-3
- klappe Buch zu
- öffne Buch auf S.4-5
- klappe Buch zu
-

Wahlfreier Zugriff

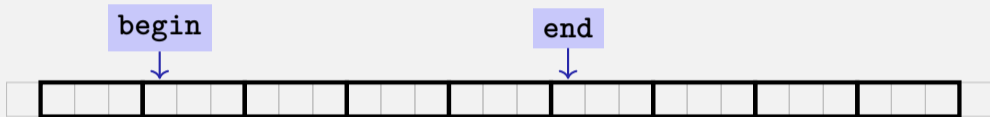
- öffne Buch auf S.1
- klappe Buch zu
- öffne Buch auf S.2-3
- klappe Buch zu
- öffne Buch auf S.4-5
- klappe Buch zu
-

Sequenzieller Zugriff

- öffne Buch auf S.1
- blättere um
- blättere um
- blättere um
- blättere um
- blättere um
- ...

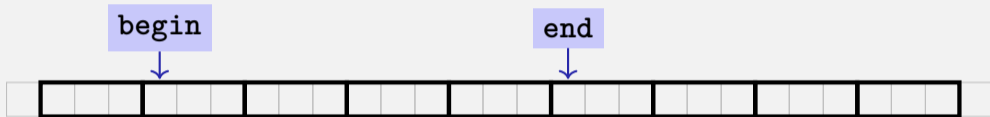
Arrays in Funktionen

Konvention in C++: Übergabe eines Arrays (oder eines Array-Ausschnitts) mit zwei Zeigern



Arrays in Funktionen

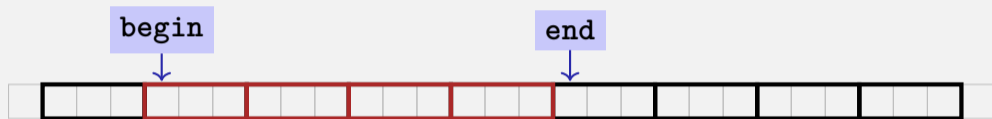
Konvention in C++: Übergabe eines Arrays (oder eines Array-Ausschnitts) mit zwei Zeigern



- **begin**: Zeiger auf das erste Element
- **end**: Zeiger *hinter* das letzte Element

Arrays in Funktionen

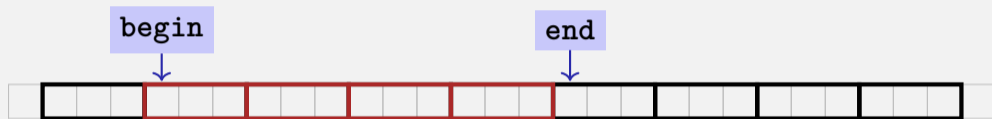
Konvention in C++: Übergabe eines Arrays (oder eines Array-Ausschnitts) mit zwei Zeigern



- `begin`: Zeiger auf das erste Element
- `end`: Zeiger *hinter* das letzte Element
- `[begin, end)` bezeichnet die Elemente des Array-Ausschnitts

Arrays in Funktionen

Konvention in C++: Übergabe eines Arrays (oder eines Array-Ausschnitts) mit zwei Zeigern



- `begin`: Zeiger auf das erste Element
- `end`: Zeiger *hinter* das letzte Element
- `[begin, end)` bezeichnet die Elemente des Array-Ausschnitts
- `[begin, end)` ist leer, wenn `begin == end`
- `[begin, end)` muss ein *gültiger Bereich* sein, d.h. ein echter (evtl. leerer) Array-Ausschnitt

Arrays in (mutierenden) Funktionen: fill

```
// PRE: [begin, end) ist ein gültiger Bereich
// POST: Jedes Element in [begin, end) wurde auf value gesetzt
void fill(int* begin, int* end, int value) {
    for (int* p = begin; p != end; ++p)
        *p = value;
}
```

Arrays in (mutierenden) Funktionen: fill

```
// PRE: [begin, end) ist ein gültiger Bereich
// POST: Jedes Element in [begin, end) wurde auf value gesetzt
void fill(int* begin, int* end, int value) {
    for (int* p = begin; p != end; ++p)
        *p = value;
}

...
int* p = new int[5];
fill(p, p+5, 1); // Array bei p wird zu {1, 1, 1, 1, 1}
```

Funktionen mit/ohne Effekt

- Zeiger können, wie auch Referenzen, für Funktionen mit Effekt verwendet werden. Beispiel: `fill`

Funktionen mit/ohne Effekt

- Zeiger können, wie auch Referenzen, für Funktionen mit Effekt verwendet werden. Beispiel: `fill`
- Aber viele Funktionen haben keinen Effekt, sie lesen Daten nur
- \Rightarrow Verwendung von `const`

Funktionen mit/ohne Effekt

- Zeiger können, wie auch Referenzen, für Funktionen mit Effekt verwendet werden. Beispiel: `fill`
- Aber viele Funktionen haben keinen Effekt, sie lesen Daten nur
- \Rightarrow Verwendung von `const`
- Bisher, zum Beispiel:

```
const int zero = 0;  
const int& nil = zero;
```

Positionierung von Const

`const T` ist äquivalent zu `T const` (und kann auch so geschrieben werden):

```
const int zero = ...  $\iff$  int const zero = ...  
const int& nil = ...  $\iff$  int const& nil = ...
```

Positionierung von Const

`const T` ist äquivalent zu `T const` (und kann auch so geschrieben werden):

```
const int zero = ...  $\iff$  int const zero = ...  
const int& nil = ...  $\iff$  int const& nil = ...
```

Beide Schreibweisen werden in der Praxis genutzt

Const und Zeiger

Lies Deklaration von rechts nach links

```
int const p;
```

p ist eine konstante Ganzzahl

Const und Zeiger

Lies Deklaration von rechts nach links

```
int const p;
```

p ist eine konstante Ganzzahl

```
int const* p;
```

p ist ein Zeiger auf eine konstante Ganzzahl

Const und Zeiger

Lies Deklaration von rechts nach links

```
int const p;
```

p ist eine konstante Ganzzahl

```
int const* p;
```

p ist ein Zeiger auf eine konstante Ganzzahl

```
int* const p;
```

p ist ein konstanter Zeiger auf eine Ganzzahl

Const und Zeiger

Lies Deklaration von rechts nach links

<code>int const p;</code>	p ist eine konstante Ganzzahl
<code>int const* p;</code>	p ist ein Zeiger auf eine konstante Ganzzahl
<code>int* const p;</code>	p ist ein konstanter Zeiger auf eine Ganzzahl
<code>int const* const p;</code>	p ist ein konstanter Zeiger auf eine konstante Ganzzahl

Nicht-mutierende Funktionen: print

```
// PRE: [begin, end) ist ein gültiger Bereich
// POST: Die Werte in [begin, end) wurden ausgegeben
void print(
    int const* const begin,
    const int* const end) {

    for (int const* p = begin; p != end; ++p)
        std::cout << *p << ' ';
}
```

Nicht-mutierende Funktionen: print

```
// PRE: [begin, end) ist ein gültiger Bereich  
// POST: Die Werte in [begin, end) wurden ausgegeben
```

```
void print(  
    int const* const begin, ←
```

Const-Zeiger auf const-int

```
    const int* const end) ←{
```

Ebenfalls (aber andere Schreibweise)

```
    for (int const* p = begin; p != end; ++p)
```

```
        std::cout << *p << ' ';
```

```
}
```

Nicht-mutierende Funktionen: print

```
// PRE: [begin, end) ist ein gültiger Bereich  
// POST: Die Werte in [begin, end) wurden ausgegeben
```

```
void print(  
    int const* const begin,   
    const int* const end) {
```

Const-Zeiger auf const-int

```
    for (int const* p = begin; p != end; ++p)  
        std::cout << *p << ' ';
```

Ebenfalls (aber andere Schreibweise)

```
    }
```

Zeiger, *nicht const*, auf const-int

Arrays, new, Zeiger: Abschluss

- Arrays sind kontinuierliche Speicherblöcke statisch unbestimmter Grösse

Arrays, new, Zeiger: Abschluss

- Arrays sind kontinuierliche Speicherblöcke statisch unbestimmter Grösse
- `new T[n]` alloziert ein T -Array der Grösse n

Arrays, new, Zeiger: Abschluss

- Arrays sind kontinuierliche Speicherblöcke statisch unbestimmter Grösse
- `new T[n]` alloziert ein T -Array der Grösse n
- `T* p = new T[n]`: Zeiger `p` zeigt auf das erste Array-Element

Arrays, new, Zeiger: Abschluss

- Arrays sind kontinuierliche Speicherblöcke statisch unbestimmter Grösse
- `new T[n]` alloziert ein T -Array der Grösse n
- `T* p = new T[n]`: Zeiger `p` zeigt auf das erste Array-Element
- Zeigerarithmetik ermöglicht Zugriff auf hintere Array-Elemente

Arrays, new, Zeiger: Abschluss

- Arrays sind kontinuierliche Speicherblöcke statisch unbestimmter Grösse
- `new T[n]` alloziert ein T -Array der Grösse n
- `T* p = new T[n]`: Zeiger `p` zeigt auf das erste Array-Element
- Zeigerarithmetik ermöglicht Zugriff auf hintere Array-Elemente
- Sequenzielle Iteration über Arrays mittels Zeigern ist effizienter als wahlfreier Zugriff

Arrays, new, Zeiger: Abschluss

- Arrays sind kontinuierliche Speicherblöcke statisch unbestimmter Grösse
- `new T[n]` alloziert ein T -Array der Grösse n
- `T* p = new T[n]`: Zeiger `p` zeigt auf das erste Array-Element
- Zeigerarithmetik ermöglicht Zugriff auf hintere Array-Elemente
- Sequenzielle Iteration über Arrays mittels Zeigern ist effizienter als wahlfreier Zugriff
- `new T` alloziert Speicher für (und initialisiert) ein einzelnes T -Objekt und liefert einen Zeiger darauf

Arrays, new, Zeiger: Abschluss

- Arrays sind kontinuierliche Speicherblöcke statisch unbestimmter Grösse
- `new T[n]` alloziert ein T -Array der Grösse n
- `T* p = new T[n]`: Zeiger `p` zeigt auf das erste Array-Element
- Zeigerarithmetik ermöglicht Zugriff auf hintere Array-Elemente
- Sequenzielle Iteration über Arrays mittels Zeigern ist effizienter als wahlfreier Zugriff
- `new T` alloziert Speicher für (und initialisiert) ein einzelnes T -Objekt und liefert einen Zeiger darauf
- Zeiger können auf etwas (nicht) `constes` zeigen und selbst (nicht) `const` sein

Arrays, new, Zeiger: Abschluss

- Arrays sind kontinuierliche Speicherblöcke statisch unbestimmter Grösse
- `new T[n]` alloziert ein T -Array der Grösse n
- `T* p = new T[n]`: Zeiger `p` zeigt auf das erste Array-Element
- Zeigerarithmetik ermöglicht Zugriff auf hintere Array-Elemente
- Sequenzielle Iteration über Arrays mittels Zeigern ist effizienter als wahlfreier Zugriff
- `new T` alloziert Speicher für (und initialisiert) ein einzelnes T -Objekt und liefert einen Zeiger darauf
- Zeiger können auf etwas (nicht) `const`s zeigen und selbst (nicht) `const` sein
- Mittels `new` allozierter Speicher wird *nicht* automatisch freigegeben (mehr dazu demnächst)

Arrays, new, Zeiger: Abschluss

- Arrays sind kontinuierliche Speicherblöcke statisch unbestimmter Grösse
- `new T[n]` alloziert ein T -Array der Grösse n
- `T* p = new T[n]`: Zeiger `p` zeigt auf das erste Array-Element
- Zeigerarithmetik ermöglicht Zugriff auf hintere Array-Elemente
- Sequenzielle Iteration über Arrays mittels Zeigern ist effizienter als wahlfreier Zugriff
- `new T` alloziert Speicher für (und initialisiert) ein einzelnes T -Objekt und liefert einen Zeiger darauf
- Zeiger können auf etwas (nicht) `constes` zeigen und selbst (nicht) `const` sein
- Mittels `new` allozierter Speicher wird *nicht* automatisch freigegeben (mehr dazu demnächst)
- Zeiger und Referenzen sind verwandt, beide „verweisen“ auf Objekte im Speicher. Siehe auch die Extrafolien `pointers.pdf`)

Array-basierter Vektor

- Vektoren ... da war doch was 🤔

Unser eigener Vektor!

- Wir implementieren unseren eigenen Vektor: `vec`
- Schritt 1: `vec<int>` (heute)
- Schritt 2: `vec<T>` (später, nur kurz angeschnitten)

Array-basierter Vektor

- Vektoren ... da war doch was 🤔
- Nun wissen wir, wie man Speicherblöcke beliebiger Grösse allozieren kann ...

Unser eigener Vektor!

- Wir implementieren unseren eigenen Vektor: `vec`
- Schritt 1: `vec<int>` (heute)
- Schritt 2: `vec<T>` (später, nur kurz angeschnitten)

Array-basierter Vektor

- Vektoren ... da war doch was 🤔
- Nun wissen wir, wie man Speicherblöcke beliebiger Grösse allozieren kann ...
- ... und können einen Vektor, auf einem solchen Speicherblock aufbauend, implementieren

Unser eigener Vektor!

- Wir implementieren unseren eigenen Vektor: `vec`
- Schritt 1: `vec<int>` (heute)
- Schritt 2: `vec<T>` (später, nur kurz angeschnitten)

Array-basierter Vektor

- Vektoren ... da war doch was 🤔
- Nun wissen wir, wie man Speicherblöcke beliebiger Grösse allozieren kann ...
- ... und können einen Vektor, auf einem solchen Speicherblock aufbauend, implementieren
- `avec` – ein Array-basierter Vektor für `int`-Elemente

Unser eigener Vektor!

- Wir implementieren unseren eigenen Vektor: `vec`
- Schritt 1: `vec<int>` (heute)
- Schritt 2: `vec<T>` (später, nur kurz angeschnitten)

Array-basierter Vektor avec: Klassensignatur

```
class avec {  
    // Private (internal) state:  
    int* elements;   
    unsigned int count;
```

← Zeiger auf erstes Element

```
}
```

Array-basierter Vektor avec: Klassensignatur

```
class avec {  
    // Private (internal) state:  
    int* elements; // Pointer to first element  
    unsigned int count; ← Anzahl Elemente  
  
}
```

Array-basierter Vektor avec: Klassensignatur

```
class avec {  
    // Private (internal) state:  
    int* elements; // Pointer to first element  
    unsigned int count; // Number of elements  
  
public: // Public interface:  
    avec(unsigned int size); ← Konstruktor  
    unsigned int size() const;  
    int& operator[] (int i);  
    void print(std::ostream& sink) const;  
}
```

Array-basierter Vektor avec: Klassensignatur

```
class avec {  
    // Private (internal) state:  
    int* elements; // Pointer to first element  
    unsigned int count; // Number of elements  
  
public: // Public interface:  
    avec(unsigned int size); // Constructor  
    unsigned int size() const; ← Grösse des Vektors  
    int& operator[] (int i);  
    void print(std::ostream& sink) const;  
}
```

Array-basierter Vektor avec: Klassensignatur

```
class avec {  
    // Private (internal) state:  
    int* elements; // Pointer to first element  
    unsigned int count; // Number of elements  
  
public: // Public interface:  
    avec(unsigned int size); // Constructor  
    unsigned int size() const; // Size of vector  
    int& operator[](int i); ← Elementzugriff  
    void print(std::ostream& sink) const;  
}
```

Array-basierter Vektor avec: Klassensignatur

```
class avec {  
    // Private (internal) state:  
    int* elements; // Pointer to first element  
    unsigned int count; // Number of elements  
  
public: // Public interface:  
    avec(unsigned int size); // Constructor  
    unsigned int size() const; // Size of vector  
    int& operator[](int i); // Access an element  
    void print(std::ostream& sink) const; ←  
}
```

Elemente ausgeben

Array-basierter Vektor avec: Klassensignatur

```
class avec {  
    // Private (internal) state:  
    int* elements; // Pointer to first element  
    unsigned int count; // Number of elements  
  
public: // Public interface:  
    avec(unsigned int size); // Constructor  
    unsigned int size() const; // Size of vector  
    int& operator[](int i); // Access an element  
    void print(std::ostream& sink) const; // Output elems.  
}
```

Konstruktor avec::avec()

```
avec::avec(unsigned int size)
    : count(size) ← {
    elements = new int[size];
}
```

Grösse speichern

Konstruktor avec::avec()

```
avec::avec(unsigned int size)
    : count(size) {
    elements = new int[size];
}
```

← Speicher allozieren

Konstruktor `avec::avec()`

```
avec::avec(unsigned int size)
    : count(size) {

    elements = new int[size];
}
```

Nebenbemerkung: Vektor wird nicht mit einem Standardwert initialisiert

Exkurs: Zugriff auf Membervariablen

```
avec::avec(unsigned int size): count(size) {  
    elements = new int[size];  
}
```

- `elements` ist eine Membervariable unserer `avec`-Instanz

Exkurs: Zugriff auf Membervariablen

```
avec::avec(unsigned int size): count(size) {  
    elements = new int[size];  
}
```

- `elements` ist eine Membervariable unserer `avec`-Instanz
- Diese Instanz ist mittels des *Zeigers* `this` zugreifbar

Exkurs: Zugriff auf Membervariablen

```
avec::avec(unsigned int size): count(size) {  
    (*this).elements = new int[size];  
}
```

- `elements` ist eine Membervariable unserer `avec`-Instanz
- Diese Instanz ist mittels des *Zeigers* `this` zugreifbar
- `elements` ist eine Kurzschreibweise von `(*this).elements`

Exkurs: Zugriff auf Membervariablen

```
avec::avec(unsigned int size): count(size) {  
    this->elements = new int[size];  
}
```

- `elements` ist eine Membervariable unserer `avec`-Instanz
- Diese Instanz ist mittels des *Zeigers* `this` zugreifbar
- `elements` ist eine Kurzschreibweise von `(*this).elements`
- Äquivalent, aber kürzer: `this->elements`

Exkurs: Zugriff auf Membervariablen

```
avec::avec(unsigned int size): count(size) {  
    this->elements = new int[size];  
}
```

- `elements` ist eine Membervariable unserer `avec`-Instanz
- Diese Instanz ist mittels des *Zeigers* `this` zugreifbar
- `elements` ist eine Kurzschreibweise von `(*this).elements`
- Äquivalent, aber kürzer: `this->elements`
- Eselsbrücke: „Folge dem Zeiger zur Membervariablen“

Funktion `avec::size()`

```
int avec::size() const ← {  
    return this->count;  
}
```

Verändert den Vektor nicht

Funktion `avec::size()`

```
int avec::size() const {  
    return this->count; ←  
}
```

Grösse zurückgeben

Anwendungsbeispiel:

```
avec v = avec(7);  
assert(v.size() == 7); // ok
```

Funktion `avec::operator []`

```
int& avec::operator [] (int i) {  
    return this->elements[i];  
}
```

i-tes Element zurückgeben

Funktion `avec::operator []`

```
int& avec::operator [] (int i) {  
    return this->elements[i];  
}
```

Elementzugriff mit Indexüberprüfung:

```
int& avec::at(int i) const {  
    assert(0 <= i && i < this->count);  
  
    return this->elements[i];  
}
```

Funktion `avec::operator []`


```
int& avec::operator [] (int i) {  
    return this->elements[i];  
}
```

Anwendungsbeispiel:

```
avec v = avec(7);  
std::cout << v[6]; // Outputs a "random" value  
v[6] = 0;  
std::cout << v[6]; // Outputs 0
```

Funktion `avec::print()`

Elemente mittels sequenziellem Zugriff ausgeben:

```
void avec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (int* p = this->elements;  ← Zeiger auf erstes Element  
        p != this->elements + this->count;  
        ++p)  
    {  
        sink << *p << ' ';  
    }  
}
```

Funktion `avec::print()`

Elemente mittels sequenziellem Zugriff ausgeben:

```
void avec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (int* p = this->elements;  
         p != this->elements + this->count;   
         ++p)  
    {  
        sink << *p << ' ' ;  
    }  
}
```

Abbruch falls hinter
letztem Element

Funktion `avec::print()`

Elemente mittels sequenziellem Zugriff ausgeben:

```
void avec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (int* p = this->elements;  
         p != this->elements + this->count;  
         ++p) ← Zeiger elementweise voranschieben  
    {  
        sink << *p << ' ' ;  
    }  
}
```

Funktion `avec::print()`

Elemente mittels sequenziellem Zugriff ausgeben:

```
void avec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (int* p = this->elements;  
         p != this->elements + this->count;  
         ++p)  
    {  
        sink << *p << ' '; ← Aktuelles Element ausgeben  
    }  
}
```


Funktion `avec::print()`

Abschluss: Ausgabeoperator überladen:

```
_____ operator<< (_____ sink,  
                    _____ vec) {  
    vec.print(sink);  
    return _____;  
}
```

Funktion `avec::print()`

Abschluss: Ausgabeoperator überladen:

```
std::ostream& operator<<(std::ostream& sink,  
                        const avec& vec) {  
    vec.print(sink);  
    return sink;  
}
```

Funktion `avec::print()`

Abschluss: Ausgabeoperator überladen:

```
std::ostream& operator<<(std::ostream& sink,  
                          const avec& vec) {  
    vec.print(sink);  
    return sink;  
}
```

Beobachtungen:

- Konstante Referenz auf `vec`, da unverändert

Funktion `avec::print()`

Abschluss: Ausgabeoperator überladen:

```
std::ostream& operator<<(std::ostream& sink,  
                          const avec& vec) {  
    vec.print(sink);  
    return sink;  
}
```

Beobachtungen:

- Konstante Referenz auf `vec`, da unverändert
- Aber nicht auf `sink`: Elemente ausgeben gleich Veränderung

Funktion `avec::print()`

Abschluss: Ausgabeoperator überladen:

```
std::ostream& operator<<(std::ostream& sink,  
                        const avec& vec) {  
    vec.print(sink);  
    return sink;  
}
```

Beobachtungen:

- Konstante Referenz auf `vec`, da unverändert
- Aber nicht auf `sink`: Elemente ausgeben gleich Veränderung
- `sink` zurückgeben, um verkettete Ausgaben zu ermöglichen, z.B.
`std::cout << v << '\n'`

Weitere Funktionen

```
class avec {  
    ...  
    void push_front(int e)           // Prepend e to vector  
    void push_back(int e)           // Append e to vector  
    void remove(unsigned int i)     // Cut out ith element  
    ...  
}
```

Weitere Funktionen

```
class avec {  
    ...  
    void push_front(int e)           // Prepend e to vector  
    void push_back(int e)           // Append e to vector  
    void remove(unsigned int i)     // Cut out ith element  
    ...  
}
```

Gemeinsamkeit: Diese Operationen müssen die *Grösse* des Vektors verändern

Arrays vergrössern/verkleinern

Ein allozierter Speicherblock (z.B. `new int [3]`) kann nicht nachträglich vergrössert/verkleinert werden

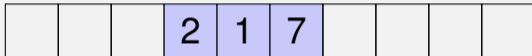
Arrays vergrössern/verkleinern

Ein allozierter Speicherblock (z.B. `new int [3]`) kann nicht nachträglich vergrössert/verkleinert werden

2	1	7
---	---	---

Arrays vergrössern/verkleinern

Ein allozierter Speicherblock (z.B. `new int [3]`) kann nicht nachträglich vergrössert/verkleinert werden

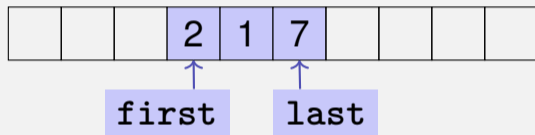


Möglichkeit:

- Mehr Speicher als initial nötig allozieren

Arrays vergrössern/verkleinern

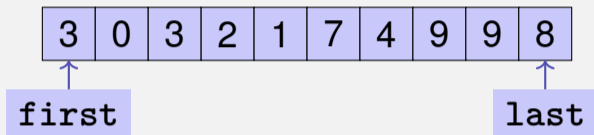
Ein allozierter Speicherblock (z.B. `new int [3]`) kann nicht nachträglich vergrössert/verkleinert werden



Möglichkeit:

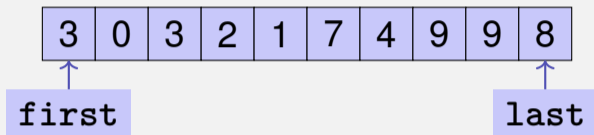
- Mehr Speicher als initial nötig allozieren
- Befüllen aus der Mitte heraus, mittels Zeigern auf erstes und letztes Element

Arrays vergrössern/verkleinern



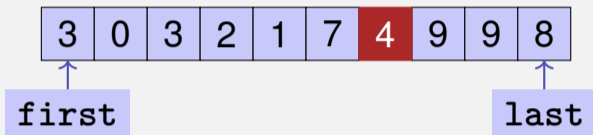
- Aber irgendwann sind alle Plätze belegt

Arrays vergrössern/verkleinern



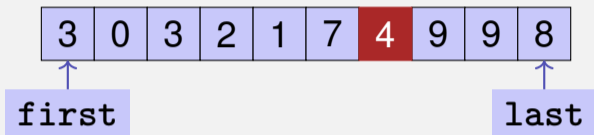
- Aber irgendwann sind alle Plätze belegt
- Dann nötig: Grösseren Speicherblock allozieren und Daten umkopieren

Arrays vergrössern/verkleinern

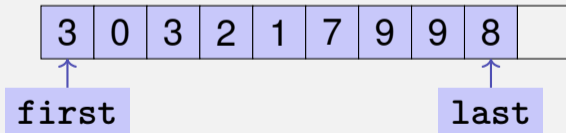


Elemente löschen erfordert verschieben (via kopieren) aller vorhergehenden oder nachfolgenden Elemente

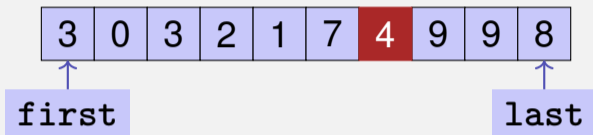
Arrays vergrössern/verkleinern



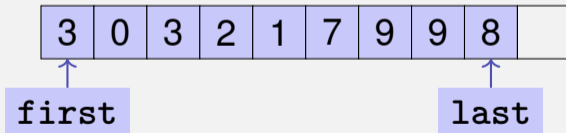
Elemente löschen erfordert verschieben (via kopieren) aller vorhergehenden oder nachfolgenden Elemente



Arrays vergrössern/verkleinern



Elemente löschen erfordert verschieben (via kopieren) aller vorhergehenden oder nachfolgenden Elemente



Ähnlich: Einfügen an beliebiger Position