

20. Dynamische Datenstrukturen I

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

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
...
```

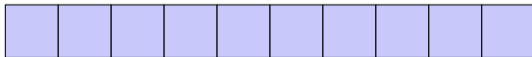
- Ein Vektor ist eine *dynamische Datenstruktur*, deren Grösse sich zur Laufzeit ändern kann

Unser eigener Vektor!

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

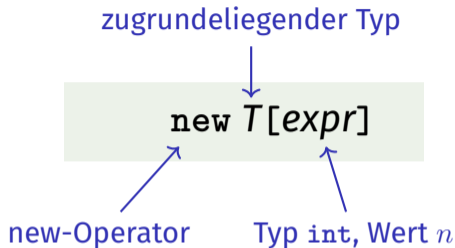
Vektoren im Speicher

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

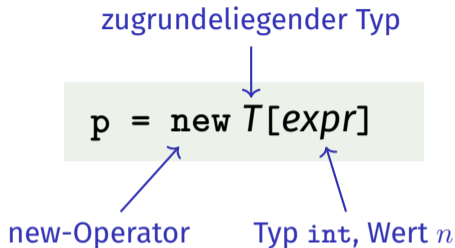


- **Effekt:** Neuer zusammenhängender Bereich im Speicher für n Elemente vom Typ T wird alloziert



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

Der new-Ausdruck für Arrays



- **Wert:** Die Startadresse des Speicherbereichs



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

Ausblick I: `new` und `delete`

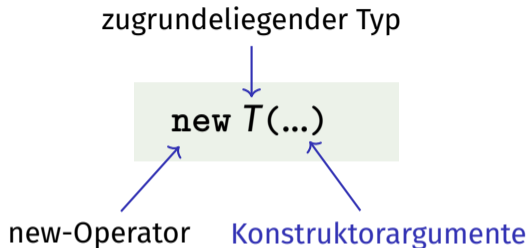
`new T[expr]`

- 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

Ausblick II: Heutige Vorlesung

- Ziel: Zeiger und dynamischen Speicher/dynamisch allozierte Objekte verstehen
- Fallbeispiel: Eigener Vektor
- Aufbau:
 1. *Einzelne* dynamisch allozierte Objekte
→ Zeiger einführen, Grundlagen erklären
 2. *Array* an dynamisch allozierten Objekten
→ Zeigerarithmetik einführen, wahlfreien & sequenziellen Zugriff erklären
 3. *Vektor-Klasse* entwickeln, um ein dynamisches Array herum
→ Anwendung von Zeigern in einem komplexeren Beispiel; Klassendesign
- Kurswebseite: Experimentieren Sie mit dem Beispielcode (z.B. Tiny Pointer Example 1/2), schauen Sie sich die Folien zu Referenzen vs. Zeigern an (Additional Pointer Slides)

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 -Objekts, **Typ:** Zeiger T^*
- Auch hier gilt: Objekt „lebt“ bis es explizit gelöscht wird (Nutzen wird später klarer werden)

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

T* Zeiger-Typ für zugrunde liegenden Typ T

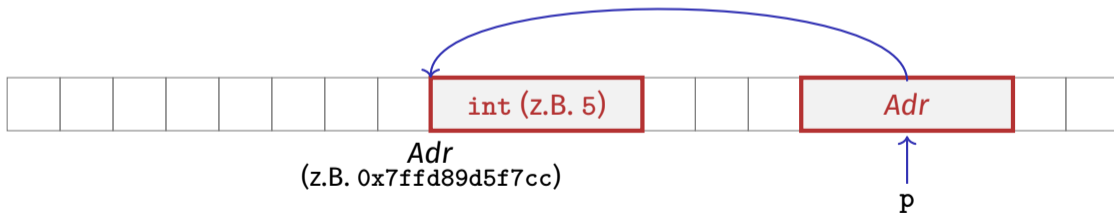
Wo ein T^* draufsteht, muss auch ein T drin sein

```
int* p = ...;  
std::string* q = p; // Kompilerfehler!
```

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?

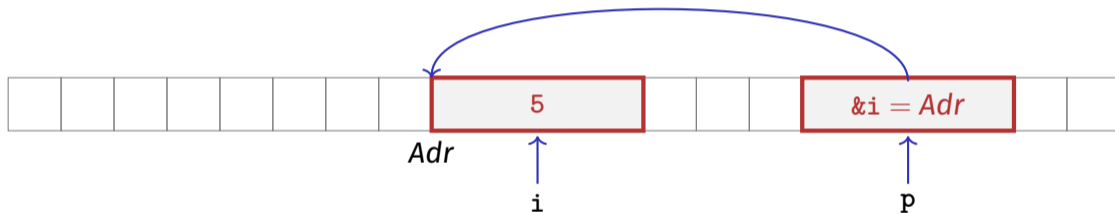
1. Direkt beim Erzeugen eines neuen Objekts mittels `new`
2. Für bestehende Objekte: Mittels des *Adress-Operators* `&`

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



Nächste Frage: Wie „folgt“ man einem Zeiger?

Dereferenz-Operator

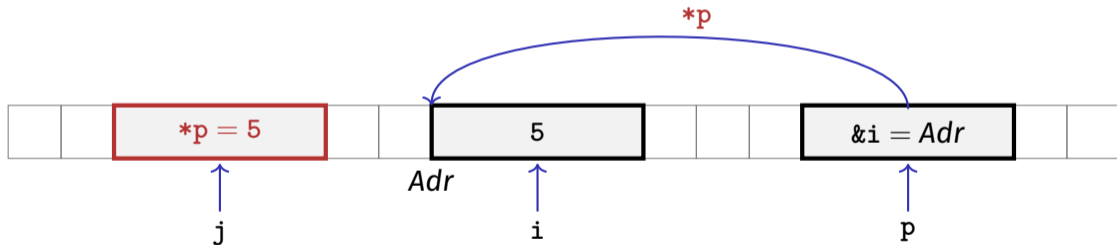
Antwort: Mittels des *Dereferenz-Operators* *

expr* ← *expr*: R-Wert vom Typ *T

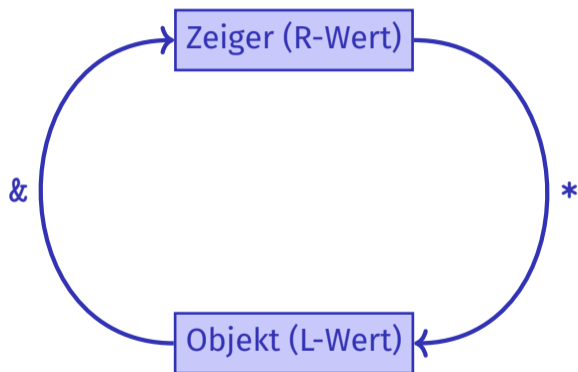
- **Wert** des Ausdrucks: Der Wert des Objekts an der durch *expr* bestimmten Adresse
- **Typ** des Ausdrucks: *T*

Dereferenz-Operator

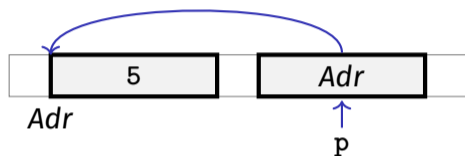
```
int i = 5;  
int* p = &i; // p = Adresse von i  
int j = *p; // j = 5
```



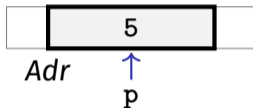
Adress- und Dereferenzoperator



Zeiger-Visualisierungen



- Bisher: Technische präzise Visualisierung *mit Indirektion*
- In p steckt eine Adresse, erst $*p$ gibt uns den Wert/das Objekt, auf den p konzeptionell zeigt



- Neu: Vereinfachte Visualisierung *ohne Indirektion*
- Adresse ist i.d.R. nur „Mittel zum Zweck“; relevant ist, worauf p konzeptionell zeigt


Eselsbrücke

Die Deklaration

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

kann gelesen werden als

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



Obwohl das legal ist,
schreiben wir es nicht so!

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; // Zugriff auf p ist undefiniertes Verhalten  
int* q = nullptr; // q hingegen zeigt explizit ins Nichts
```

Zeiger-Arithmetik: Zeiger plus int

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

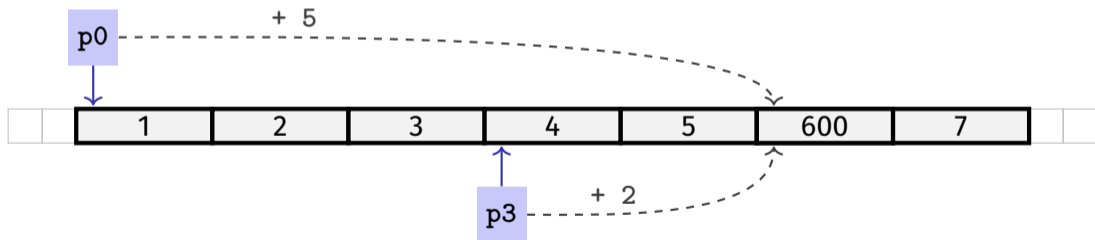


Frage: Wie zeigt man auf hintere Elemente? → mittels *Zeiger-Arithmetik*:

- `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
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)
```

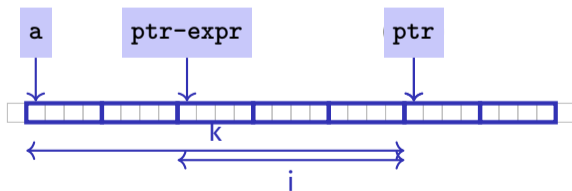


Zeiger-Arithmetik: Zeiger minus `int`

- Wenn ptr ein Zeiger auf das Element mit Index k in einem Array a der Länge n ist
- und der Wert von $expr$ eine ganze Zahl i ist, $0 \leq k - i \leq n$, dann liefert der Ausdruck

$ptr - expr$

einen Zeiger zum Element von a mit Index $k - i$.



Zeigersubtraktion

- Wenn $p1$ und $p2$ auf Elemente desselben Arrays a mit Länge n zeigen
- und $0 \leq k_1, k_2 \leq n$ die Indizes der Elemente sind, auf die $p1$ und $p2$ zeigen, so gilt

$p1 - p2$ hat den Wert $k_1 - k_2$



Nur gültig, wenn $p1$ und $p2$ ins gleiche Array zeigen.

- Die Zeigerdifferenz beschreibt, wie weit die Elemente voneinander entfernt im Speicher liegen

Zeigeroperatoren

Beschreibung	Op	Stelligkeit	Präzedenz	Assoziativität	Zuordnung
Subskript	[]	2	17	links	R-Werte → L-Wert
Dereferenzierung	*	1	16	rechts	R-Wert → L-Wert
Adresse	&	1	16	rechts	L-Wert → R-Wert

Präzedenzen und Assoziativitäten von +, -, ++ (etc.) wie in Kapitel 2

Zeigerwerte sind keine Ganzzahlen

- Adressen können als „Hausnummern des Speichers“, also als Zahlen interpretiert werden.
- Ganzzahl- und Zeigerarithmetik verhalten sich aber unterschiedlich.

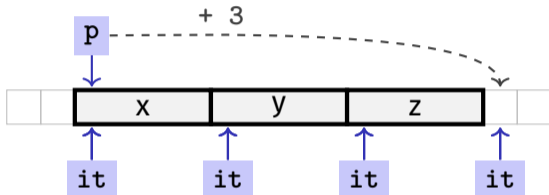
`ptr + 1` ist nicht die nächste Hausnummer, sondern die s -nächste, wobei s der Speicherbedarf eines Objekts des Typs ist, der `ptr` zugrundeliegt.

- Zeiger und Ganzzahlen sind nicht kompatibel:

```
int* ptr = 5; // Fehler: invalid conversion from int to int*  
int a = ptr; // Fehler: invalid conversion from int* to int
```

Sequenzielle Zeiger-Iteration

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



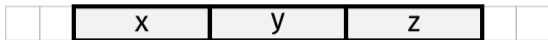
```
for (char* it = p; it zeigt aufs erste Element  
    it != p + 3; Abbruch falls Ende erreicht  
    ++it) { Zeiger elementweise voranschieben
```

```
    std::cout << *it << ' '; /// Aktuelles Element ausgeben: 'x'
```

```
}
```

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*:

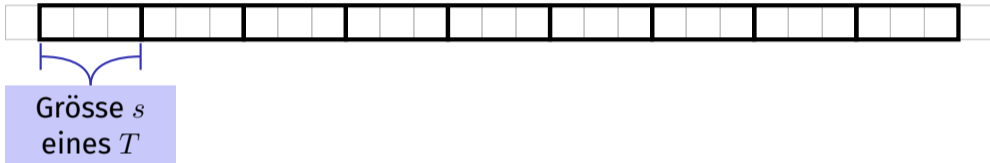
```
char* p = new char[3]{'x', 'y', 'z'};

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];
```



- 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 *sequentielltem Zugriff* ($++p, ++p, \dots$) kostet nur eine Addition pro Zugriff
- Sequenzieller Zugriff ist daher für Iterationen zu bevorzugen

Ein Buch lesen

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
- ...

Statische Arrays

- `int* p = new int[expr]` erzeugt ein dynamisches Array der Grösse *expr*
- C++ hat noch *statische* Arrays von der Vorgängersprache C geerbt:
`int a[cexpr]`
- Statische Arrays haben unter anderem den Nachteil, dass ihre Grösse *cexpr* eine Konstante sein muss. D.h. *cexpr* kann z.B. 5 oder $4*3+2$ sein, aber kein von der Tastatur eingelesener Wert n .
- Eine statisches Array-Variable *a* kann wie ein Zeiger verwendet werden
- Faustregel: Vektoren sind besser als dynamische Arrays, welche besser als statische Arrays sind

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;
}
```

```
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 Effekt⁶ verwendet werden. Beispiel: `fill`
- Aber viele Funktionen verändern die Daten nicht, sie lesen sie nur
- \Rightarrow Verwendung von `const`
- Bisher, zum Beispiel:

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

⁶auf den durch die Zeiger(bereiche) festgelegten Daten

Positionierung von Const

Zur Determinierung der Zugehörigkeit des `const` Modifiers:

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

```
const int zero = ...  ⇔  int const zero = ...  
const int& nil = ...  ⇔  int const& nil = ...
```

Beide Schreibweisen werden in der Praxis genutzt

Const und Zeiger

Lies Deklaration von rechts nach links

```
int const p1;
```

p1 ist eine konstante Ganzzahl

```
int const* p2;
```

p2 ist ein Zeiger auf eine konstante Ganzzahl

```
int* const p3;
```

p3 ist ein konstanter Zeiger auf eine Ganzzahl

```
int const* const p4;
```

p4 ist ein konstanter Zeiger auf eine konstante Ganzzahl

Nicht-mutierende Funktionen: `print`

Es gibt auch *nicht* mutierende Funktionen, die nur lesend auf Elemente eines Arrays zugreifen

```
// 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

```
    int const* const begin,
```

```
    const int* const end) {
```

Ebenfalls (aber andere Schreibweise)

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

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

Zeiger, *nicht const*, auf const-int

```
}
```

Zeiger `p` kann selbst nicht `const` sein, da er verändert wird (`++p`)

const ist nicht absolut

- Der Wert an einer Adresse kann sich ändern, auch wenn ein const-Zeiger diese Adresse speichert.

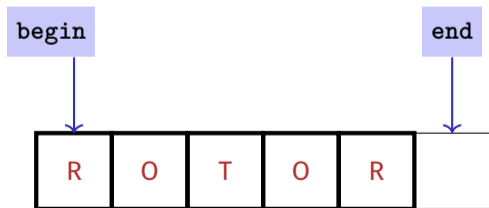
Beispiel

```
int a[5];
const int* begin1 = a;
int*      begin2 = a;
*begin1 = 1;    // Fehler: *begin1 ist const
*begin2 = 1;    // ok, obwohl sich damit auch *begin1 ändert
```

- const ist ein Versprechen lediglich aus Sicht des const-Zeigers, keine absolute Garantie.

Wow – Palindrome!

```
// PRE: [begin end) is a valid range of characters
// POST: returns true if the range forms a palindrome
bool is_palindrome (const char* begin, const char* end) {
    while (begin < end)
        if (*(begin++) != *(--end)) return false;
    return true;
}
```



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)
- 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 🤔
- 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; // 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) ← { Grösse speichern

    elements = new int[size]; ← Speicher allozieren
}
```

Achtung: Vektor wurde nicht initialisiert (mit einem Standardwert, z.B. 0)

Funktion `avec::size()`

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

← **Verändert den Vektor nicht**

← **Grösse zurückgeben**

Anwendungsbeispiel:

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

Exkurs: Zugriff auf Membervariablen


```
int avec::size() const {  
    return count;  
}
```

```
avec v1 = ...;  
avec v2 = ...;  
std::cout << v1.size();
```

- Aufruf `v1.size()`: `size()` gibt Wert der Membervariable `count` von `v1` zurück
- Frage: Wie kann die Memberfunktion `size()` das *Aufruferobjekt* (*receiver object*) `v1` ansprechen?
- Mittels des speziellen `this`-Zeigers (letzte Woche kurz eingeführt)
- Drei Möglichkeiten:
 - `return (*this).count` Explizit, aber umständliche Syntax
 - `return this->count` Explizit, einfachere Syntax
 - `return count` Implizit
- Eselsbrücke: „Folge dem Zeiger zur Membervariablen“

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);  
v[6] = 0;  
std::cout << v[6]; // Outputs 0
```


Funktion `avec::operator[]` braucht's doppelt

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

- Die erste Memberfunktion ist *nicht const* und gibt eine *nicht-const*-Referenz zurück

```
avec v = ...; // A non-const vector  
std::cout << v.get[0]; // Reading elements is allowed  
v.get[0] = 123; // Modifying elements is allowed
```

- Sie wird auf nicht-const-Vektoren aufgerufen

Funktion `avec::operator[]` braucht's doppelt

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

- Die zweite Memberfunktion *ist const* und gibt eine *const*-Referenz zurück





```
const avec v = ...; // A const vector  
std::cout << v.get[0]; // Reading elements is allowed  
v.get[0] = 123; // Compiler error: modifications are not allowed
```

- Sie wird auf *const*-Vektoren aufgerufen

Siehe auch das diesem PDF angehängte Beispiel [getters_and_const.cpp](#)

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)  Zeiger elementweise vorar Abbruch falls hinter  
        letztem Element  
    {  
        sink << *p << ' ' ;  Aktuelles Element ausgeben  
    }  
}
```

Funktion `avec::print()`

Abschluss: Ausgabeoperator überladen:

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

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

Beobachtungen:

- Konstante Referenz auf `vec`, da unverändert
- Aber nicht auf `vec`:s Elemente ausgehen, gleich Veränderung

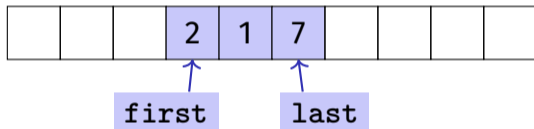
Weitere Funktionen

```
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

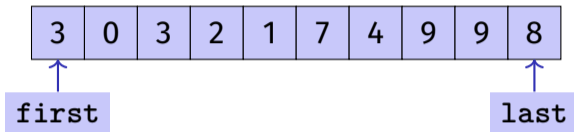
Ein allozierter Speicherblock (z.B. `new int [3]`) kann nicht nachträglich vergrössert/verkleinert werden



Möglichkeit:

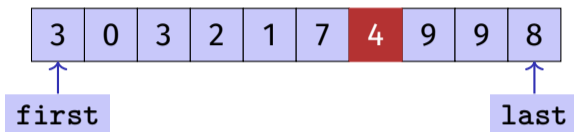
- Mehr Speicher als initial nötig allozieren
- Befüllen aus der Mitte heraus, mittels Zeigern auf erstes und letztes Element

Arrays vergrössern/verkleinern

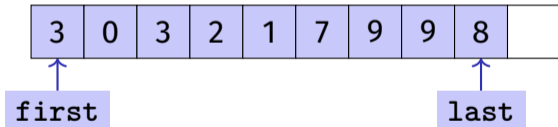


- Aber irgendwann sind alle Plätze belegt
- Dann nötig: Grösseren Speicherblock allozieren und Daten umkopieren

Arrays vergrössern/verkleinern



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



Ähnlich: Einfügen an beliebiger Position