

21. Dynamische Datenstrukturen II

Verkettete Listen, Vektoren als verkettete Listen

Anderes Speicherlayout: Verkettete Liste

- *Kein* zusammenhängender Speicherbereich und *kein* wahlfreier Zugriff



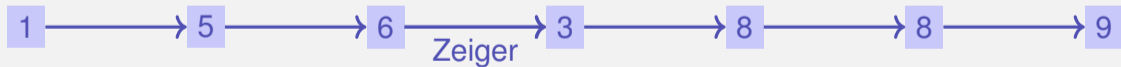
Anderes Speicherlayout: Verkettete Liste

- *Kein* zusammenhängender Speicherbereich und *kein* wahlfreier Zugriff
- Jedes Element zeigt auf seinen Nachfolger



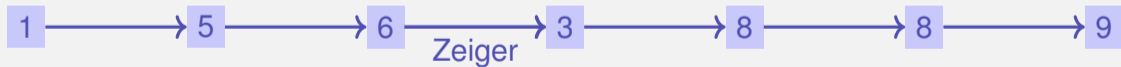
Anderes Speicherlayout: Verkettete Liste

- *Kein* zusammenhängender Speicherbereich und *kein* wahlfreier Zugriff
- Jedes Element zeigt auf seinen Nachfolger



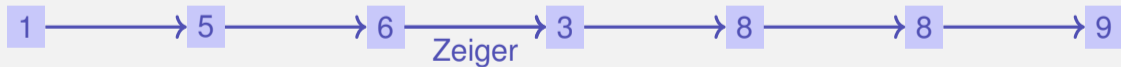
Anderes Speicherlayout: Verkettete Liste

- *Kein* zusammenhängender Speicherbereich und *kein* wahlfreier Zugriff
- Jedes Element zeigt auf seinen Nachfolger
- Einfügen und Löschen *beliebiger* Elemente ist einfach



Anderes Speicherlayout: Verkettete Liste

- *Kein* zusammenhängender Speicherbereich und *kein* wahlfreier Zugriff
- Jedes Element zeigt auf seinen Nachfolger
- Einfügen und Löschen *beliebiger* Elemente ist einfach



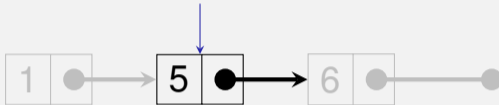
⇒ Unser Vektor kann als verkettete Liste realisiert werden

Verkettete Liste: Zoom

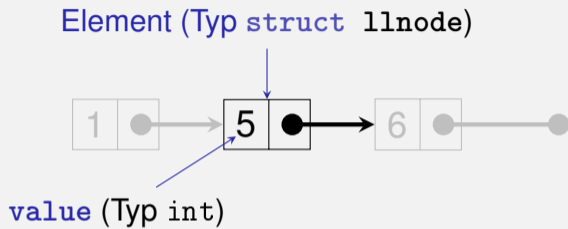


Verkettete Liste: Zoom

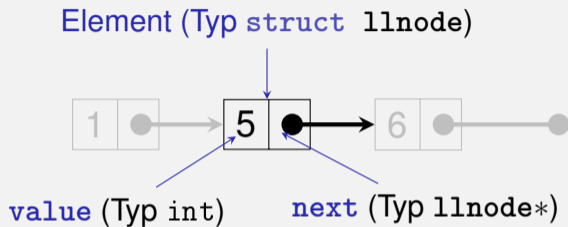
Element (Typ struct llnode)



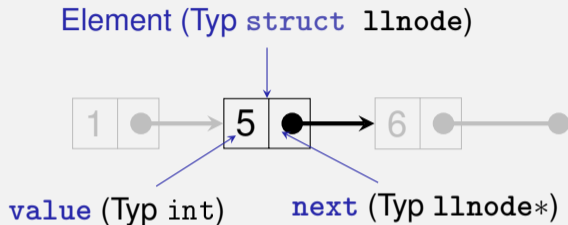
Verkettete Liste: Zoom



Verkettete Liste: Zoom

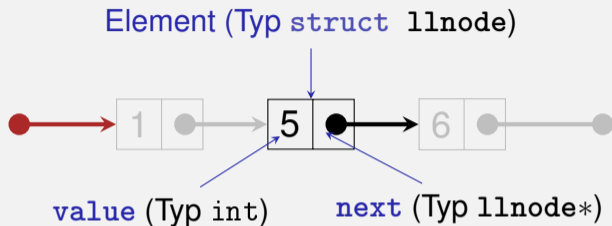


Verkettete Liste: Zoom



```
struct llnode {  
    int value;  
    llnode* next;  
  
    llnode(int v, llnode* n): value(v), next(n) {} // Constructor  
};
```

Vektor = Zeiger aufs erste Element



```
class llnvec {
    llnode* head;
public:
    // Public interface identical to avec's
    llnvec(unsigned int size);
    unsigned int size() const;
    ...
};
```

Funktion `llvec::print()`

```
struct llnode {  
    int value;  
    llnode* next;  
    ...  
};
```

```
void llvec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (llnode* n = this->head; ← Zeiger auf erstes Element  
        n != nullptr;  
        n = n->next)  
    {  
        sink << n->value << ' ' << ' ';&br/>    }  
}
```

Funktion `llvec::print()`

```
struct llnode {  
    int value;  
    llnode* next;  
    ...  
};
```

```
void llvec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (llnode* n = this->head;  
         n != nullptr; ←  
         n = n->next)  
    {  
        sink << n->value << ' ' << ' ';&br/>    }  
}
```

Abbruch falls Ende erreicht

Funktion `llvec::print()`

```
struct llnode {
    int value;
    llnode* next;
    ...
};
```

```
void llvec::print(std::ostream& sink) const {
    for (llnode* n = this->head;
         n != nullptr;
         n = n->next) {
        sink << n->value << ' ';
    }
}
```

Zeiger elementweise voranschieben

Funktion `llvec::print()`

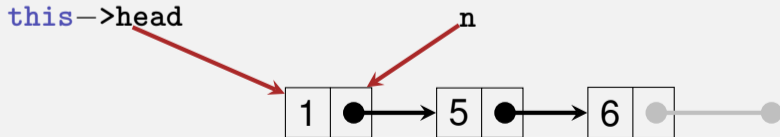
```
struct llnode {  
    int value;  
    llnode* next;  
    ...  
};
```

```
void llvec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (llnode* n = this->head;  
         n != nullptr;  
         n = n->next)  
    {  
        sink << n->value << ' '; ←  
    }  
}
```

Aktuelles Element ausgeben

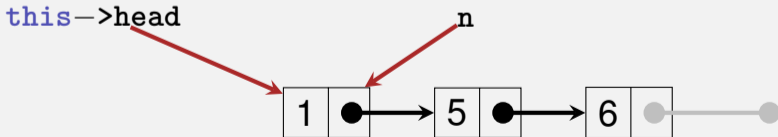
Funktion `llvec::print()`

```
void llvec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (llnode* n = this->head;  
         n != nullptr;  
         n = n->next)  
    {  
        sink << n->value << ' ';  
    }  
}
```



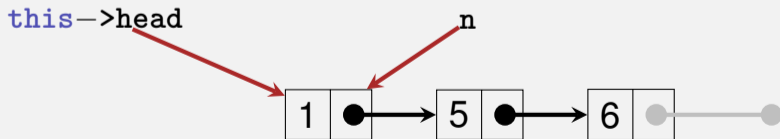
Funktion `llvec::print()`

```
void llvec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (llnode* n = this->head;  
         n != nullptr;  
         n = n->next)  
    {  
        sink << n->value << ' ';  
    }  
}
```



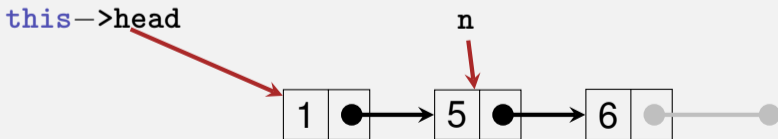
Funktion `llvec::print()`

```
void llvec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (llnode* n = this->head;  
         n != nullptr;  
         n = n->next)  
    {  
        sink << n->value << ' '; // 1  
    }  
}
```



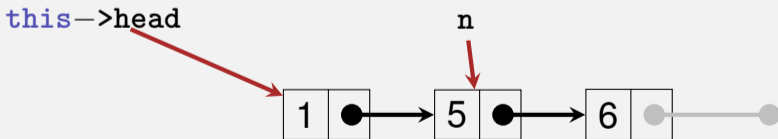
Funktion `llvec::print()`

```
void llvec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (llnode* n = this->head;  
         n != nullptr;  
         n = n->next)  
    {  
        sink << n->value << ' '; // 1  
    }  
}
```



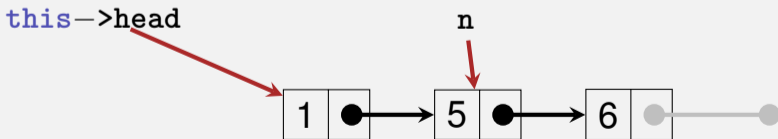
Funktion `llvec::print()`

```
void llvec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (llnode* n = this->head;  
         n != nullptr;  
         n = n->next)  
    {  
        sink << n->value << ' '; // 1  
    }  
}
```



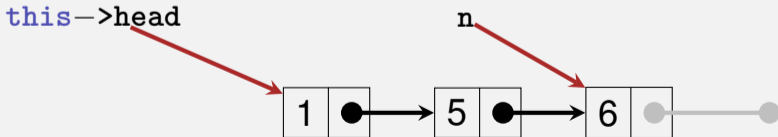
Funktion `llvec::print()`

```
void llvec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (llnode* n = this->head;  
         n != nullptr;  
         n = n->next)  
    {  
        sink << n->value << ' '; // 1 5  
    }  
}
```



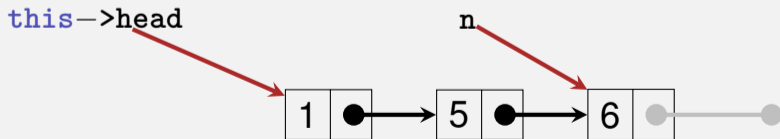
Funktion `llvec::print()`

```
void llvec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (llnode* n = this->head;  
         n != nullptr;  
         n = n->next)  
    {  
        sink << n->value << ' '; // 1 5  
    }  
}
```



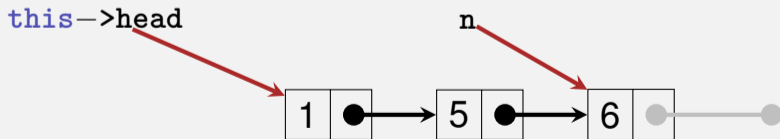
Funktion `llvec::print()`

```
void llvec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (llnode* n = this->head;  
         n != nullptr;  
         n = n->next)  
    {  
        sink << n->value << ' '; // 1 5  
    }  
}
```



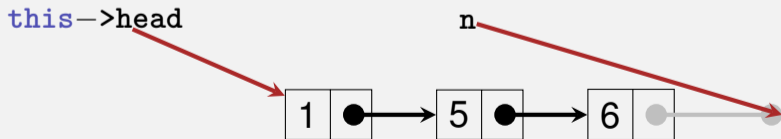
Funktion `llvec::print()`

```
void llvec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (llnode* n = this->head;  
         n != nullptr;  
         n = n->next)  
    {  
        sink << n->value << ' '; // 1 5 6  
    }  
}
```




Funktion `llvec::print()`

```
void llvec::print(std::ostream& sink) const {  
    for (llnode* n = this->head;  
         n != nullptr;  
         n = n->next)  
    {  
        sink << n->value << ' '; // 1 5 6  
    }  
}
```



Funktion `llvec::operator []`

Zugriff auf i -tes Element ähnlich implementiert wie `print()`:

```
int& llvec::operator [] (unsigned int i) {  
    llnode* n = this->head;  Zeiger auf erstes Element  
  
    for (; 0 < i; --i)  
        n = n->next;  
  
    return n->value;  
}
```

Funktion `llvec::operator []`

Zugriff auf i -tes Element ähnlich implementiert wie `print()`:

```
int& llvec::operator [] (unsigned int i) {  
    llnode* n = this->head;  
  
    for (; 0 < i; --i) |  
        n = n->next; ←  
  
    return n->value;  
}
```

Bis zum i -ten voranschreiten

Funktion `llvec::operator []`

Zugriff auf i -tes Element ähnlich implementiert wie `print()`:

```
int& llvec::operator [] (unsigned int i) {  
    llnode* n = this->head;  
  
    for (; 0 < i; --i)  
        n = n->next;  
  
    return n->value;   
}
```

← `i`-tes Element zurückgeben

Funktion `llvec::push_front()`

Vorteil `llvec`: Elemente am Anfang anfügen ist sehr einfach:

```
void llvec::push_front(int e) {  
    this->head =  
        new llnode{e, this->head};  
}
```

`this->head`

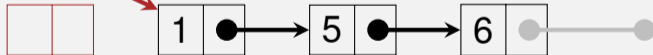


Funktion `llvec::push_front()`

Vorteil `llvec`: Elemente am Anfang anfügen ist sehr einfach:

```
void llvec::push_front(int e) {  
    this->head =  
        new llnode{e, this->head};  
}
```

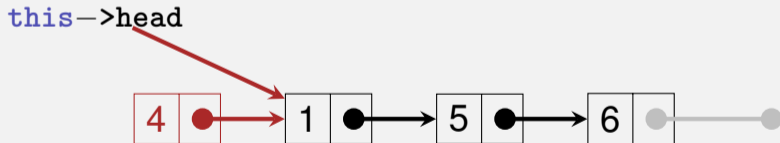
`this->head`



Funktion `llvec::push_front()`

Vorteil `llvec`: Elemente am Anfang anfügen ist sehr einfach:

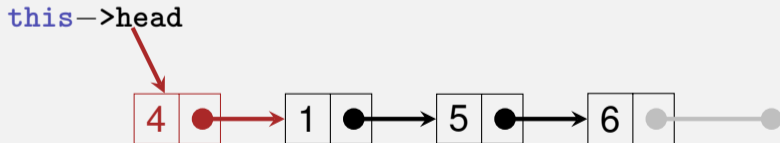
```
void llvec::push_front(int e) {  
    this->head =  
        new llnode{e, this->head};  
}
```



Funktion `llvec::push_front()`

Vorteil `llvec`: Elemente am Anfang anfügen ist sehr einfach:

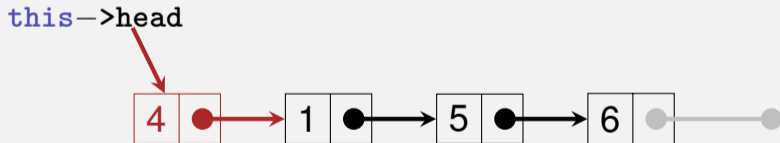
```
void llvec::push_front(int e) {  
    this->head =  
        new llnode{e, this->head};  
}
```



Funktion `llvec::push_front()`

Vorteil `llvec`: Elemente am Anfang anfügen ist sehr einfach:

```
void llvec::push_front(int e) {  
    this->head =  
        new llnode{e, this->head};  
}
```



Achtung: Wäre der neue `llnode` nicht *dynamisch* alloziert, dann würde er am Ende von `push_front` sofort wieder gelöscht (= Speicher dealloziert)

Funktion `llvec::llvec()`

Konstruktor kann mittels `push_front()` implementiert werden:

```
llvec::llvec(unsigned int size) {  
    this->head = nullptr; ← head zeigt zunächst ins Nichts  
  
    for (; 0 < size; --size)  
        this->push_front(0);  
}
```

Funktion `llvec::llvec()`

Konstruktor kann mittels `push_front()` implementiert werden:

```
llvec::llvec(unsigned int size) {  
    this->head = nullptr;  
  
    for (; 0 < size; --size)  
        this->push_front(0);  
}
```

← size mal 0 vorne anfügen

Funktion `llvec::llvec()`

Konstruktor kann mittels `push_front()` implementiert werden:


```
llvec::llvec(unsigned int size) {  
    this->head = nullptr;  
  
    for (; 0 < size; --size)  
        this->push_front(0);  
}
```

Anwendungsbeispiel:

```
llvec v = llvec(3);  
std::cout << v; // 0 0 0
```

Funktion `llvec::push_back()`

Einfach, aber ineffizient: Verkettete Liste bis ans Ende traversieren und neues Element anhängen

```
void llvec::push_back(int e) {  
    llnode* n = this->head;   
  
    for (; n->next != nullptr; n = n->next);  
  
    n->next =  
        new llnode{e, nullptr};  
}
```

Funktion `llvec::push_back()`

Einfach, aber ineffizient: Verkettete Liste bis ans Ende traversieren und neues Element anhängen

```
void llvec::push_back(int e) {  
    llnode* n = this->head;  
  
    for (; n->next != nullptr; n = n->next);  
  
    n->next =  
        new llnode{e, nullptr};  
}
```

... und bis zum letzten Element gehen

Funktion `llvec::push_back()`

Einfach, aber ineffizient: Verkettete Liste bis ans Ende traversieren und neues Element anhängen

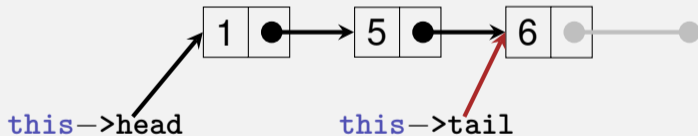
```
void llvec::push_back(int e) {  
    llnode* n = this->head;  
  
    for (; n->next != nullptr; n = n->next);  
  
    n->next =  
        new llnode{e, nullptr};  
}
```

← Neues Element an bisher
letztes anhängen

Funktion `llvec::push_back()`

- Effizienter, aber auch etwas komplexer:

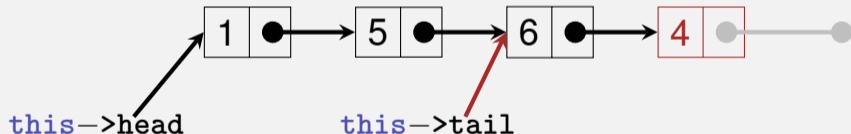
1 Zweiter Zeiger, der auf das letzte Element zeigt: `this->tail`



Funktion `llvec::push_back()`

- Effizienter, aber auch etwas komplexer:

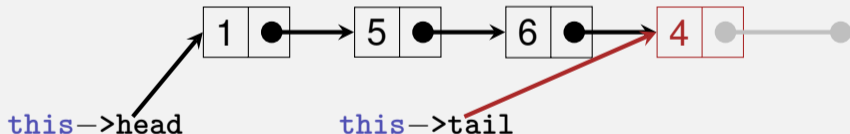
- 1 Zweiter Zeiger, der auf das letzte Element zeigt: `this->tail`
- 2 Mittels dieses Zeigers kann direkt am Ende angehängt werden



Funktion `llvec::push_back()`

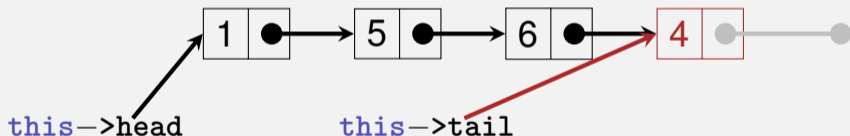
- Effizienter, aber auch etwas komplexer:

- 1 Zweiter Zeiger, der auf das letzte Element zeigt: `this->tail`
- 2 Mittels dieses Zeigers kann direkt am Ende angehängt werden



Funktion `llvec::push_back()`

- Effizienter, aber auch etwas komplexer:
 - 1 Zweiter Zeiger, der auf das letzte Element zeigt: `this->tail`
 - 2 Mittels dieses Zeigers kann direkt am Ende angehängt werden



- **Aber:** Verschiedene Grenzfälle, z.B. Vektor noch leer, müssen beachtet werden

Funktion `llvec::size()`

Einfach, aber ineffizient: Grösse durch abzählen *berechnen*

```
unsigned int llvec::size() const {
```

```
    unsigned int c = 0; ← Zähler initial 0
```

```
    for (llnode* n = this->head;
```

```
        n != nullptr;
```

```
        n = n->next)
```

```
        ++c;
```

```
    return c;
```

```
}
```

Funktion `llvec::size()`

Einfach, aber ineffizient: Grösse durch abzählen *berechnen*

```
unsigned int llvec::size() const {  
    unsigned int c = 0;  
  
    for (llnode* n = this->head;  
         n != nullptr;  
         n = n->next)  
        ++c;  
  
    return c;  
}
```



Länge der Kette abzählen

Funktion `llvec::size()`

Einfach, aber ineffizient: Grösse durch abzählen *berechnen*

```
unsigned int llvec::size() const {  
    unsigned int c = 0;  
  
    for (llnode* n = this->head;  
         n != nullptr;  
         n = n->next)  
        ++c;  
  
    return c;   
}
```

Zähler zurückgeben

Funktion `l1vec::size()`

Effizienter, aber etwas komplexer: Grösse als Membervariable *nachhalten*

- 1 Membervariable `unsigned int` `count` zur Klasse `l1vec` hinzufügen

Funktion `llvec::size()`

Effizienter, aber etwas komplexer: Grösse als Membervariable *nachhalten*

- 1 Membervariable `unsigned int count` zur Klasse `llvec` hinzufügen
- 2 `this->count` muss nun bei *jeder* Operation, die die Grösse des Vektors verändert (z.B. `push_front`), aktualisiert werden

Effizienz: Arrays vs. Verkettete Listen

- Speicher: Unser `avec` belegt ungefähr n int s (Vektorgrösse n), unser `llvec` ungefähr $3n$ int s (ein Zeiger belegt i.d.R. 8 Byte)

Effizienz: Arrays vs. Verkettete Listen

- Speicher: Unser `avec` belegt ungefähr n ints (Vektorgrösse n), unser `llvec` ungefähr $3n$ ints (ein Zeiger belegt i.d.R. 8 Byte)
- Laufzeit (mit `avec = std::vector`, `llvec = std::list`):

```
prepending (insert at front) [100,000x]:
  ▶ avec:    675 ms
  ▶ llvec:   10 ms
appending (insert at back) [100,000x]:
  ▶ avec:    2 ms
  ▶ llvec:   9 ms
removing first [100,000x]:
  ▶ avec:    675 ms
  ▶ llvec:   4 ms
removing last [100,000x]:
  ▶ avec:    0 ms
  ▶ llvec:   4 ms
removing randomly [10,000x]:
  ▶ avec:    3 ms
  ▶ llvec:  113 ms
inserting randomly [10,000x]:
  ▶ avec:    16 ms
  ▶ llvec:  117 ms
fully iterate sequentially (5000 elements) [5,000x]:
  ▶ avec:   354 ms
  ▶ llvec:  525 ms
```

22. Container, Iteratoren und Algorithmen

Container, Mengen, Iteratoren, const-Iteratoren, Algorithmen,
Templates

Vektoren sind Container

- Abstrakt gesehen ist ein Vektor
 - 1 Eine Ansammlung von Elementen
 - 2 Plus Operationen auf dieser Ansammlung

Vektoren sind Container

- Abstrakt gesehen ist ein Vektor
 - 1 Eine Ansammlung von Elementen
 - 2 Plus Operationen auf dieser Ansammlung
- In C++ heissen `vector<T>` und ähnliche „Ansammlungs“-Datenstrukturen *Container*

Vektoren sind Container

- Abstrakt gesehen ist ein Vektor
 - 1 Eine Ansammlung von Elementen
 - 2 Plus Operationen auf dieser Ansammlung
- In C++ heissen `vector<T>` und ähnliche „Ansammlungs“-Datenstrukturen *Container*
- In manchen Sprachen, z.B. Java, *Collections* genannt

Container-Eigenschaften

- Jeder Container hat bestimmte *charakteristische Eigenschaften*
- Ein Array-basierter Vektor z.B. die folgenden:

Container-Eigenschaften

- Jeder Container hat bestimmte *charakteristische Eigenschaften*
- Ein Array-basierter Vektor z.B. die folgenden:
 - Effizienter, index-basierter Zugriff ($v[i]$)
 - Effiziente Speichernutzung: Nur die Elemente selbst belegen Platz (plus Elementezähler)

Container-Eigenschaften

- Jeder Container hat bestimmte *charakteristische Eigenschaften*
- Ein Array-basierter Vektor z.B. die folgenden:
 - Effizienter, index-basierter Zugriff ($v[i]$)
 - Effiziente Speichernutzung: Nur die Elemente selbst belegen Platz (plus Elementezähler)
 - Einfügen/Entfernen an beliebigem Index ist potenziell ineffizient
 - Suchen eines bestimmten Elements ist potenziell ineffizient

Container-Eigenschaften

- Jeder Container hat bestimmte *charakteristische Eigenschaften*
- Ein Array-basierter Vektor z.B. die folgenden:
 - Effizienter, index-basierter Zugriff ($v[i]$)
 - Effiziente Speichernutzung: Nur die Elemente selbst belegen Platz (plus Elementezähler)
 - Einfügen/Entfernen an beliebigem Index ist potenziell ineffizient
 - Suchen eines bestimmten Elements ist potenziell ineffizient
 - Kann Elemente mehrfach enthalten
 - Elemente sind in Einfügereihenfolge enthalten (geordnet aber unsortiert)

Container in C++

- Fast jede Anwendung erfordert die Verwaltung und Manipulation von beliebig vielen Datensätzen

Container in C++

- Fast jede Anwendung erfordert die Verwaltung und Manipulation von beliebig vielen Datensätzen
- Aber mit unterschiedlichen Anforderungen (z.B. Elemente nur hinten anhängen, fast nie entfernen, oft suchen, ...)

Container in C++

- Fast jede Anwendung erfordert die Verwaltung und Manipulation von beliebig vielen Datensätzen
- Aber mit unterschiedlichen Anforderungen (z.B. Elemente nur hinten anhängen, fast nie entfernen, oft suchen, ...)
- Deswegen enthält die Standardbibliothek von C++ diverse Container mit unterschiedlichen Eigenschaften, siehe <https://en.cppreference.com/w/cpp/container>

Container in C++

- Fast jede Anwendung erfordert die Verwaltung und Manipulation von beliebig vielen Datensätzen
- Aber mit unterschiedlichen Anforderungen (z.B. Elemente nur hinten anhängen, fast nie entfernen, oft suchen, ...)
- Deswegen enthält die Standardbibliothek von C++ diverse Container mit unterschiedlichen Eigenschaften, siehe <https://en.cppreference.com/w/cpp/container>
- Viele weitere sind über Bibliotheken Dritter verfügbar, z.B. https://www.boost.org/doc/libs/1_68_0/doc/html/container.html, <https://github.com/abseil/abseil-cpp>

Beispiel-Container: `std::unordered_set<T>`

- Eine *mathematische Menge* ist eine ungeordnete, duplikatfreie Zusammenfassung von Elementen:

$$\{1, 2, 1\} = \{1, 2\} = \{2, 1\}$$

- In C++: `std::unordered_set<T>`

Beispiel-Container: `std::unordered_set<T>`

- Eine *mathematische Menge* ist eine ungeordnete, duplikatfreie Zusammenfassung von Elementen:

$$\{1, 2, 1\} = \{1, 2\} = \{2, 1\}$$

- In C++: `std::unordered_set<T>`
- Eigenschaften:
 - Kann kein Element doppelt enthalten
 - Elemente haben keine bestimmte Reihenfolge

Beispiel-Container: `std::unordered_set<T>`

- Eine *mathematische Menge* ist eine ungeordnete, duplikatfreie Zusammenfassung von Elementen:

$$\{1, 2, 1\} = \{1, 2\} = \{2, 1\}$$

- In C++: `std::unordered_set<T>`
- Eigenschaften:
 - Kann kein Element doppelt enthalten
 - Elemente haben keine bestimmte Reihenfolge
 - Kein indexbasierter Zugriff (`s[i]` nicht definiert)

Beispiel-Container: `std::unordered_set<T>`

- Eine *mathematische Menge* ist eine ungeordnete, duplikatfreie Zusammenfassung von Elementen:

$$\{1, 2, 1\} = \{1, 2\} = \{2, 1\}$$

- In C++: `std::unordered_set<T>`
- Eigenschaften:
 - Kann kein Element doppelt enthalten
 - Elemente haben keine bestimmte Reihenfolge
 - Kein indexbasierter Zugriff (`s[i]` nicht definiert)
 - Effiziente „Element enthalten?“-Prüfung
 - Effizientes Einfügen und Löschen von Elementen

Beispiel-Container: `std::unordered_set<T>`

- Eine *mathematische Menge* ist eine ungeordnete, duplikatfreie Zusammenfassung von Elementen:

$$\{1, 2, 1\} = \{1, 2\} = \{2, 1\}$$

- In C++: `std::unordered_set<T>`
- Eigenschaften:
 - Kann kein Element doppelt enthalten
 - Elemente haben keine bestimmte Reihenfolge
 - Kein indexbasierter Zugriff (`s[i]` nicht definiert)
 - Effiziente „Element enthalten?“-Prüfung
 - Effizientes Einfügen und Löschen von Elementen
- Randbemerkung: Implementiert als Hash-Tabelle

Anwendungsbeispiel `std::unordered_set<T>`

Problem:

- Gegeben eine Sequenz an Paaren (*Name*, *Prozente*) von Code-Expert-Submissions ...

```
// Input: file submissions.txt  
Friedrich 90  
Schwerhoff 10  
Lehner 20  
Schwerhoff 11
```

Anwendungsbeispiel `std::unordered_set<T>`

Problem:

- Gegeben eine Sequenz an Paaren (*Name*, *Prozente*) von Code-Expert-Submissions ...

```
// Input: file submissions.txt
Friedrich 90
Schwerhoff 10
Lehner 20
Schwerhoff 11
```

- ... bestimme die Abgebenden, die mindestens 50% erzielt haben

```
// Output
Friedrich
```

Anwendungsbeispiel `std::unordered_set<T>`

```
std::ifstream in("submissions.txt"); ← Öffne submissions.txt  
std::unordered_set<std::string> names;
```

```
std::string name;  
unsigned int score;
```

```
while (in >> name >> score) {  
    if (50 <= score)  
        names.insert(name);  
}
```

```
std::cout << "Unique submitters: "  
           << names << '\n';
```

Anwendungsbeispiel `std::unordered_set<T>`

```
std::ifstream in("submissions.txt");
std::unordered_set<std::string> names; ← Namen-Menge, initial leer

std::string name;
unsigned int score;

while (in >> name >> score) {
    if (50 <= score)
        names.insert(name);
}

std::cout << "Unique submitters: "
          << names << '\n';
```


Anwendungsbeispiel `std::unordered_set<T>`

```
std::ifstream in("submissions.txt");  
std::unordered_set<std::string> names;
```

```
std::string name;  
unsigned int score;
```

← Paar (Name, Punkte)

```
while (in >> name >> score) {  
    if (50 <= score)  
        names.insert(name);  
}
```

```
std::cout << "Unique submitters: "  
           << names << '\n';
```

Anwendungsbeispiel `std::unordered_set<T>`

```
std::ifstream in("submissions.txt");  
std::unordered_set<std::string> names;
```

```
std::string name;  
unsigned int score;
```

```
while (in >> name >> score) {  
    if (50 <= score)  
        names.insert(name);  
}
```

Nächstes Paar einlesen



```
std::cout << "Unique submitters: "  
            << names << '\n';
```

Anwendungsbeispiel `std::unordered_set<T>`

```
std::ifstream in("submissions.txt");  
std::unordered_set<std::string> names;
```

```
std::string name;  
unsigned int score;
```

```
while (in >> name >> score) {  
    if (50 <= score)  
        names.insert(name);  
}
```

Namen merken falls Punkte
ausreichen



```
std::cout << "Unique submitters: "  
          << names << '\n';
```

Anwendungsbeispiel `std::unordered_set<T>`

```
std::ifstream in("submissions.txt");  
std::unordered_set<std::string> names;
```

```
std::string name;  
unsigned int score;
```

```
while (in >> name >> score) {  
    if (50 <= score)  
        names.insert(name);  
}
```

```
std::cout << "Unique submitters: "  
          << names << '\n';
```

Gemerkte Namen ausgeben

Beispiel-Container: `std::set<T>`

- Fast gleich wie `std::unordered_set<T>`, aber die Elemente sind *geordnet*

$$\{1, 2, 1\} = \{1, 2\} \neq \{2, 1\}$$

Beispiel-Container: `std::set<T>`

- Fast gleich wie `std::unordered_set<T>`, aber die Elemente sind *geordnet*

$$\{1, 2, 1\} = \{1, 2\} \neq \{2, 1\}$$

- Elemente suchen, einfügen und löschen weiterhin effizient (besser als bei `std::vector<T>`), aber weniger effizient als bei `std::unordered_set<T>`

Beispiel-Container: `std::set<T>`

- Fast gleich wie `std::unordered_set<T>`, aber die Elemente sind *geordnet*

$$\{1, 2, 1\} = \{1, 2\} \neq \{2, 1\}$$

- Elemente suchen, einfügen und löschen weiterhin effizient (besser als bei `std::vector<T>`), aber weniger effizient als bei `std::unordered_set<T>`
- Denn das Beibehalten der Ordnung zieht etwas Aufwand nach sich

Beispiel-Container: `std::set<T>`

- Fast gleich wie `std::unordered_set<T>`, aber die Elemente sind *geordnet*

$$\{1, 2, 1\} = \{1, 2\} \neq \{2, 1\}$$

- Elemente suchen, einfügen und löschen weiterhin effizient (besser als bei `std::vector<T>`), aber weniger effizient als bei `std::unordered_set<T>`
- Denn das Beibehalten der Ordnung zieht etwas Aufwand nach sich
- Randbemerkung: Implementiert als Rot-Schwarz-Baum

Anwendungsbeispiel `std::set<T>`

```
std::ifstream in("submissions.txt");
```

```
std::set<std::string> names;
```

set statt unordered_set ...

```
std::string name;
```

```
unsigned int score;
```

```
while (in >> name >> score) {
```

```
    if (50 <= score)
```

```
        names.insert(name);
```

```
}
```

```
std::cout << "Unique submitters: "
```

```
    << names << '\n';
```

Anwendungsbeispiel `std::set<T>`

```
std::ifstream in("submissions.txt");  
std::set<std::string> names;
```

```
std::string name;  
unsigned int score;
```

```
while (in >> name >> score) {  
    if (50 <= score)  
        names.insert(name);  
}
```

```
std::cout << "Unique submitters: "  
           << names << '\n';
```

← ... und die Ausgabe erfolgt
alphabetisch sortiert

Container Ausgeben

- Bereits gesehen: `avec::print()` und `l1vec::print()`

Container Ausgeben

- Bereits gesehen: `avec::print()` und `llvec::print()`
- Wie sieht's mit der Ausgabe von `set`, `unordered_set`, ... aus?

Container Ausgeben

- Bereits gesehen: `avec::print()` und `l1vec::print()`
- Wie sieht's mit der Ausgabe von `set`, `unordered_set`, ... aus?
- Gemeinsamkeit: Über Container-Elemente iterieren und diese ausgeben

Ähnliche Funktionen

- Viele weitere nützliche Funktionen können mittels Container-Iteration implementiert werden:
- `contains(c, e)`: wahr gdw. Container `c` Element `e` enthält

Ähnliche Funktionen

- Viele weitere nützliche Funktionen können mittels Container-Iteration implementiert werden:
- `contains(c, e)`: wahr gdw. Container `c` Element `e` enthält
- `min/max(c)`: Gibt das grösste/kleinste Element zurück

Ähnliche Funktionen

- Viele weitere nützliche Funktionen können mittels Container-Iteration implementiert werden:
- `contains(c, e)`: wahr gdw. Container `c` Element `e` enthält
- `min/max(c)`: Gibt das grösste/kleinste Element zurück
- `sort(c)`: Sortiert die Elemente von `c`

Ähnliche Funktionen

- Viele weitere nützliche Funktionen können mittels Container-Iteration implementiert werden:
- `contains(c, e)`: wahr gdw. Container `c` Element `e` enthält
- `min/max(c)`: Gibt das grösste/kleinste Element zurück
- `sort(c)`: Sortiert die Elemente von `c`
- `replace(c, e1, e2)`: Ersetzt alle `e1` in `c` mit `e2`

Ähnliche Funktionen

- Viele weitere nützliche Funktionen können mittels Container-Iteration implementiert werden:
- `contains(c, e)`: wahr gdw. Container `c` Element `e` enthält
- `min/max(c)`: Gibt das grösste/kleinste Element zurück
- `sort(c)`: Sortiert die Elemente von `c`
- `replace(c, e1, e2)`: Ersetzt alle `e1` in `c` mit `e2`
- `sample(c, n)`: Wählt zufällig `n` Elemente aus `c` aus

Ähnliche Funktionen

- Viele weitere nützliche Funktionen können mittels Container-Iteration implementiert werden:
- `contains(c, e)`: wahr gdw. Container `c` Element `e` enthält
- `min/max(c)`: Gibt das grösste/kleinste Element zurück
- `sort(c)`: Sortiert die Elemente von `c`
- `replace(c, e1, e2)`: Ersetzt alle `e1` in `c` mit `e2`
- `sample(c, n)`: Wählt zufällig `n` Elemente aus `c` aus
- ...

Zur Erinnerung: Iterieren mit Zeigern

- Iteration über ein *Array*:



Zur Erinnerung: Iterieren mit Zeigern

- Iteration über ein *Array*:

- Auf Startelement zeigen: `p = this->arr`



Zur Erinnerung: Iterieren mit Zeigern

- Iteration über ein *Array*:

- Auf Startelement zeigen: `p = this->arr`
- Auf aktuelles Element zugreifen: `*p`



Zur Erinnerung: Iterieren mit Zeigern

■ Iteration über ein *Array*:

- Auf Startelement zeigen: `p = this->arr`
- Auf aktuelles Element zugreifen: `*p`
- Überprüfen, ob Ende erreicht:
`p == this->arr + size`



Zur Erinnerung: Iterieren mit Zeigern

■ Iteration über ein *Array*:

- Auf Startelement zeigen: `p = this->arr`
- Auf aktuelles Element zugreifen: `*p`
- Überprüfen, ob Ende erreicht:
`p == this->arr + size`
- Zeiger vorrücken: `p = p + 1`



Zur Erinnerung: Iterieren mit Zeigern

■ Iteration über ein *Array*:

- Auf Startelement zeigen: $p = \text{this} \rightarrow \text{arr}$
- Auf aktuelles Element zugreifen: $*p$
- Überprüfen, ob Ende erreicht:
 $p == \text{this} \rightarrow \text{arr} + \text{size}$
- Zeiger vorrücken: $p = p + 1$



■ Iteration über eine *verkettete Liste*:



Zur Erinnerung: Iterieren mit Zeigern

■ Iteration über ein *Array*:

- Auf Startelement zeigen: `p = this->arr`
- Auf aktuelles Element zugreifen: `*p`
- Überprüfen, ob Ende erreicht:
`p == this->arr + size`
- Zeiger vorrücken: `p = p + 1`



■ Iteration über eine *verkettete Liste*:

- Auf Startelement zeigen: `p = this->head`



Zur Erinnerung: Iterieren mit Zeigern

■ Iteration über ein *Array*:

- Auf Startelement zeigen: `p = this->arr`
- Auf aktuelles Element zugreifen: `*p`
- Überprüfen, ob Ende erreicht:
`p == this->arr + size`
- Zeiger vorrücken: `p = p + 1`



■ Iteration über eine *verkettete Liste*:

- Auf Startelement zeigen: `p = this->head`
- Auf aktuelles Element zugreifen: `p->value`



Zur Erinnerung: Iterieren mit Zeigern

■ Iteration über ein *Array*:

- Auf Startelement zeigen: `p = this->arr`
- Auf aktuelles Element zugreifen: `*p`
- Überprüfen, ob Ende erreicht:
`p == this->arr + size`
- Zeiger vorrücken: `p = p + 1`



■ Iteration über eine *verkettete Liste*:

- Auf Startelement zeigen: `p = this->head`
- Auf aktuelles Element zugreifen: `p->value`
- Überprüfen, ob Ende erreicht: `p == nullptr`



Zur Erinnerung: Iterieren mit Zeigern

■ Iteration über ein *Array*:

- Auf Startelement zeigen: `p = this->arr`
- Auf aktuelles Element zugreifen: `*p`
- Überprüfen, ob Ende erreicht:
`p == this->arr + size`
- Zeiger vorrücken: `p = p + 1`



■ Iteration über eine *verkettete Liste*:

- Auf Startelement zeigen: `p = this->head`
- Auf aktuelles Element zugreifen: `p->value`
- Überprüfen, ob Ende erreicht: `p == nullptr`
- Zeiger vorrücken: `p = p->next`



Iteratoren

- Iteration erfordert nur die vier eben gesehenen Operationen
- Aber deren Implementierung hängt vom Container ab

Iteratoren

- Iteration erfordert nur die vier eben gesehenen Operationen
- Aber deren Implementierung hängt vom Container ab
- \Rightarrow Jeder C++-Container implementiert seinen eigenen *Iterator*

Iteratoren

- Iteration erfordert nur die vier eben gesehenen Operationen
- Aber deren Implementierung hängt vom Container ab
- \Rightarrow Jeder C++-Container implementiert seinen eigenen *Iterator*
- Gegeben ein Container `c`:
 - `it = c.begin()`: Iterator aufs erste Element

Iteratoren

- Iteration erfordert nur die vier eben gesehenen Operationen
- Aber deren Implementierung hängt vom Container ab
- \Rightarrow Jeder C++-Container implementiert seinen eigenen *Iterator*
- Gegeben ein Container `c`:
 - `it = c.begin()`: Iterator aufs erste Element
 - `it = c.end()`: Iterator *hinters* letzte Element

Iteratoren

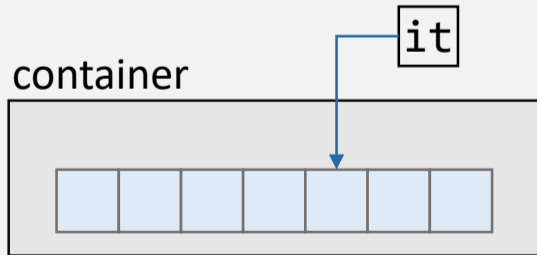
- Iteration erfordert nur die vier eben gesehenen Operationen
- Aber deren Implementierung hängt vom Container ab
- \Rightarrow Jeder C++-Container implementiert seinen eigenen *Iterator*
- Gegeben ein Container `c`:
 - `it = c.begin()`: Iterator aufs erste Element
 - `it = c.end()`: Iterator *hinters* letzte Element
 - `*it`: Zugriff aufs aktuelle Element

Iteratoren

- Iteration erfordert nur die vier eben gesehenen Operationen
- Aber deren Implementierung hängt vom Container ab
- \Rightarrow Jeder C++-Container implementiert seinen eigenen *Iterator*
- Gegeben ein Container `c`:
 - `it = c.begin()`: Iterator aufs erste Element
 - `it = c.end()`: Iterator *hinters* letzte Element
 - `*it`: Zugriff aufs aktuelle Element
 - `++it`: Iterator um ein Element verschieben
- Iteratoren sind quasi gepimpte Zeiger

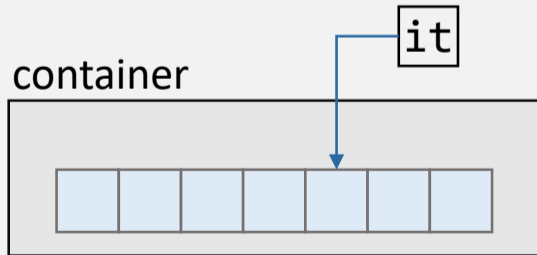
Iteratoren

- Iteratoren ermöglichen Zugriff auf verschiedene Container auf *uniforme* Weise: `*it`, `++it`, etc.



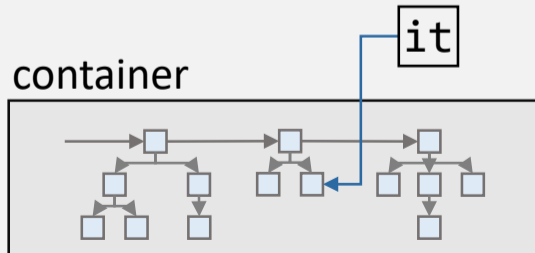
Iteratoren

- Iteratoren ermöglichen Zugriff auf verschiedene Container auf *uniforme* Weise: `*it`, `++it`, etc.
- Nutzer bleiben unabhängig von der Container-Implementierung



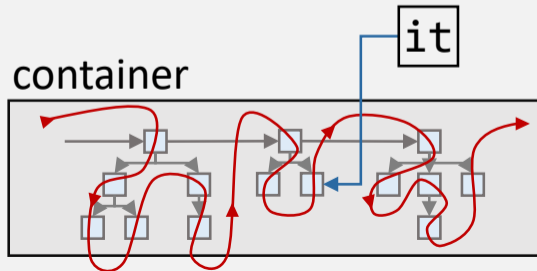
Iteratoren

- Iteratoren ermöglichen Zugriff auf verschiedene Container auf *uniforme* Weise: `*it`, `++it`, etc.
- Nutzer bleiben unabhängig von der Container-Implementierung



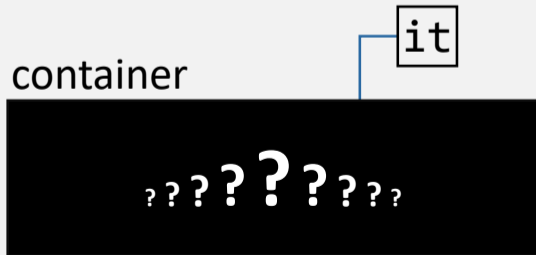
Iteratoren

- Iteratoren ermöglichen Zugriff auf verschiedene Container auf *uniforme* Weise: `*it`, `++it`, etc.
- Nutzer bleiben unabhängig von der Container-Implementierung
- Iterator weiss, wie man die Elemente „seines“ Containers abläuft



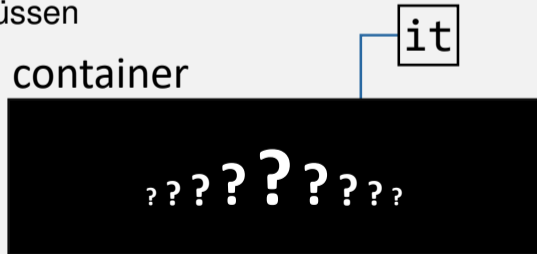
Iteratoren

- Iteratoren ermöglichen Zugriff auf verschiedene Container auf *uniforme* Weise: `*it`, `++it`, etc.
- Nutzer bleiben unabhängig von der Container-Implementierung
- Iterator weiss, wie man die Elemente „seines“ Containers abläuft
- Nutzer müssen und sollen interne Details nicht kennen



Iteratoren

- Iteratoren ermöglichen Zugriff auf verschiedene Container auf *uniforme* Weise: `*it`, `++it`, etc.
- Nutzer bleiben unabhängig von der Container-Implementierung
- Iterator weiss, wie man die Elemente „seines“ Containers abläuft
- Nutzer müssen und sollen interne Details nicht kennen
- ⇒ Containerimplementierung kann geändert werden, ohne das Nutzer Code ändern müssen



Beispiel: Iteration über `std::vector`

`it` ist ein zu `std::vector<int>` passender Iterator

```
std::vector<int> v = {1, 2, 3};

for (std::vector<int>::iterator it = v.begin();
     it != v.end();
     ++it) {

    *it = -*it;
}

std::cout << v; // -1 -2 -3
```

Beispiel: Iteration über `std::vector`

```
std::vector<int> v = {1, 2, 3};
```


it zeigt initial aufs erste Element

```
for (std::vector<int>::iterator it = v.begin(),  
     it != v.end();  
     ++it) {  
  
    *it = -*it;  
}
```

```
std::cout << v; // -1 -2 -3
```

Beispiel: Iteration über `std::vector`

```
std::vector<int> v = {1, 2, 3};

for (std::vector<int>::iterator it = v.begin();
     it != v.end();  Abbruch falls it Ende erreicht hat
     ++it) {

    *it = -*it;
}

std::cout << v; // -1 -2 -3
```

Beispiel: Iteration über `std::vector`

```
std::vector<int> v = {1, 2, 3};
```

```
for (std::vector<int>::iterator it = v.begin();
```

```
    it != v.end();
```

```
    ++it) ←{
```

it elementweise vorwärtssetzen

```
    *it = -*it;
```

```
}
```

```
std::cout << v; // -1 -2 -3
```

Beispiel: Iteration über `std::vector`

```
std::vector<int> v = {1, 2, 3};
```

```
for (std::vector<int>::iterator it = v.begin();  
     it != v.end();  
     ++it) {
```

```
    *it = -*it;  
}
```

Aktuelles Element negieren ($e \rightarrow -e$)

```
std::cout << v; // -1 -2 -3
```

Beispiel: Iteration über `std::vector`

```
std::vector<int> v = {1, 2, 3};

for (std::vector<int>::iterator it = v.begin();
     it != v.end();
     ++it) {

    *it = -*it;
}

std::cout << v; // -1 -2 -3
```

Beispiel: Iteration über `std::vector`

Zur Erinnerung: Type-Aliasse können genutzt werden um oft genutzte Typnamen abzukürzen

```
using ivit = std::vector<int>::iterator; // int-vector iterator  
  
for (ivit it = v.begin();  
     ...
```


Negieren als Funktion

Wie zuvor: Übergabe eines *Arbeitsbereichs* (-intervalls)

```
void neg(std::vector<int>::iterator begin;
        std::vector<int>::iterator end) {

    for (std::vector<int>::iterator it = begin;
         it != end;
         ++it) {

        *it = -*it;
    }
}
```

← Elemente im Intervall
[begin, end) negieren

Negieren als Funktion

Wie zuvor: Übergabe eines *Arbeitsbereichs* (-intervalls)

```
void neg(std::vector<int>::iterator begin;  
        std::vector<int>::iterator end);
```

```
// in main():
```

```
std::vector<int> v = {1, 2, 3};
```

```
neg(v.begin(), v.begin() + (v.size() / 2)); ← Erste Hälfte negieren
```

Algorithmen-Bibliothek in C++

- Die C++-Standardbibliothek enthält viele nützliche Algorithmen (Funktionen), die auf durch Iteratoren bestimmten Intervallen [*Anfang*, *Ende*) arbeiten

Algorithmen-Bibliothek in C++

- Die C++-Standardbibliothek enthält viele nützliche Algorithmen (Funktionen), die auf durch Iteratoren bestimmten Intervallen [*Anfang*, *Ende*) arbeiten
- Zum Beispiel `find`, `fill` and `sort`

Algorithmen-Bibliothek in C++

- Die C++-Standardbibliothek enthält viele nützliche Algorithmen (Funktionen), die auf durch Iteratoren bestimmten Intervallen [*Anfang*, *Ende*) arbeiten
- Zum Beispiel `find`, `fill` and `sort`
- Siehe auch <https://en.cppreference.com/w/cpp/algorithm>

Ein Iterator für `l1vec`

Wir brauchen:

1. Einen `l1vec`-spezifischen Iterator mit mindestens folgender Funktionalität:
 - Zugriff aktuelles Element: `operator*`
 - Iterator vorwärtssetzen: `operator++`
 - Ende-Erreicht-Prüfung: `operator!=` (oder `operator==`)

Ein Iterator für `l1vec`

Wir brauchen:

- 1 Einen `l1vec`-spezifischen Iterator mit mindestens folgender Funktionalität:
 - Zugriff aktuelles Element: `operator*`
 - Iterator vorwärtssetzen: `operator++`
 - Ende-Erreicht-Prüfung: `operator!=` (oder `operator==`)
- 2 Memberfunktionen `begin()` und `end()` für `l1vec` um einen Iterator auf den Anfang bzw. hinter das Ende zu erhalten

Iterator `llvec::iterator` (Schritt 1/2)

```
class llvec {  
    ...  
public:  
    class iterator {  
        ...  
    };  
  
    ...  
}
```



- Der Iterator gehört zu unserem Vektor, daher ist `iterator` eine öffentliche *innere Klasse* von `llvec`

Iterator `llvec::iterator` (Schritt 1/2)

```
class llvec {  
    ...  
public:  
    class iterator {  
        ...  
    };  
  
    ...  
}
```

- Der Iterator gehört zu unserem Vektor, daher ist `iterator` eine öffentliche *innere Klasse* von `llvec`
- Instanzen unseres Iterators sind vom Typ `llvec::iterator`

Iterator `llvec::iterator` (Schritt 1/2)

```
class iterator {  
    llnode* node;    
  
public:  
    iterator(llnode* n);  
    iterator& operator++();  
    int& operator*() const;  
    bool operator!=(const iterator& other) const;  
};
```

Iterator `llvec::iterator` (Schritt 1/2)

```
class iterator {  
    llnode* node;  
  
public:  
    iterator(llnode* n);  
    iterator& operator++();  
    int& operator*() const;  
    bool operator!=(const iterator& other) const;  
};
```

Erzeuge Iterator auf bestimmtes Element

Iterator `llvec::iterator` (Schritt 1/2)

```
class iterator {  
    llnode* node;  
  
public:  
    iterator(llnode* n);  
    iterator& operator++(); ← Iterator ein Element vorwärtssetzen  
    int& operator*() const;  
    bool operator!=(const iterator& other) const;  
};
```

Iterator `llvec::iterator` (Schritt 1/2)

```
class iterator {
    llnode* node;

public:
    iterator(llnode* n);
    iterator& operator++();
    int& operator*() const; ← Zugriff auf aktuelles Element
    bool operator!=(const iterator& other) const;
};
```

Iterator `llvec::iterator` (Schritt 1/2)

```
class iterator {  
    llnode* node;  
  
public:  
    iterator(llnode* n);  
    iterator& operator++();  
    int& operator*() const;  
    bool operator!=(const iterator& other) const;  
};
```

Vergleich mit anderem Iterator



Iterator `llvec::iterator` (Schritt 1/2)

```
// Constructor
llvec::iterator::iterator(llnode* n): node(n) {}

// Pre-increment
llvec::iterator& llvec::iterator::operator++() {
    assert(this->node != nullptr);

    this->node = this->node->next;

    return *this;
}
```

Iterator `llvec::iterator` (Schritt 1/2)

```
// Constructor
```

```
llvec::iterator::iterator(llnode* n): node(n) ← {}
```

Iterator initial auf `n` zeigen lassen

```
// Pre-increment
```

```
llvec::iterator& llvec::iterator::operator++() {
```

```
    assert(this->node != nullptr);
```

```
    this->node = this->node->next;
```

```
    return *this;
```

```
}
```


Iterator `llvec::iterator` (Schritt 1/2)

```
// Constructor
llvec::iterator::iterator(llnode* n): node(n) {}

// Pre-increment
llvec::iterator& llvec::iterator::operator++() {
    assert(this->node != nullptr);

    this->node = this->node->next;

    return *this;
}
```

Iterator `llvec::iterator` (Schritt 1/2)

```
// Constructor
llvec::iterator::iterator(llnode* n): node(n) {}

// Pre-increment
llvec::iterator& llvec::iterator::operator++() {
    assert(this->node != nullptr);

    this->node = this->node->next; ← Iterator ein Element vorwärtssetzen

    return *this;
}
```

Iterator `llvec::iterator` (Schritt 1/2)

```
// Constructor
llvec::iterator::iterator(llnode* n): node(n) {}

// Pre-increment
llvec::iterator& llvec::iterator::operator++() {
    assert(this->node != nullptr);

    this->node = this->node->next;

    return *this; ← Referenz auf verschobenen Iterator zurückgeben
}
```

Iterator `llvec::iterator` (Schritt 1/2)

```
// Element access
int& llvec::iterator::operator*() const {
    return this->node->value;
}

// Comparison
bool llvec::iterator::operator!=(const llvec::iterator& other)
    const {
    return this->node != other.node;
}
```

Iterator `llvec::iterator` (Schritt 1/2)

```
// Element access
int& llvec::iterator::operator*() const {
    return this->node->value; ← Zugriff auf aktuelles Element
}

// Comparison
bool llvec::iterator::operator!=(const llvec::iterator& other)
    const {
    return this->node != other.node;
}
```

Iterator `llvec::iterator` (Schritt 1/2)

```
// Element access
int& llvec::iterator::operator*() const {
    return this->node->value;
}

// Comparison
bool llvec::iterator::operator!=(const llvec::iterator& other)
    const {
    return this->node != other.node;
}
```

Iterator `llvec::iterator` (Schritt 1/2)

```
// Element access
int& llvec::iterator::operator*() const {
    return this->node->value;
}

// Comparison
bool llvec::iterator::operator!=(const llvec::iterator& other)
    const {
    return this->node != other.node; ←
```

this Iterator verschieden von other falls sie auf unterschiedliche Elemente zeigen

Ein Iterator für `l1vec` (Wiederholung)

Wir brauchen:

- 1 Einen `l1vec`-spezifischen Iterator mit mindestens folgender Funktionalität:
 - Zugriff aktuelles Element: `operator*`
 - Iterator vorwärtssetzen: `operator++`
 - Ende-Erreicht-Prüfung: `operator!=` (oder `operator==`)
- 2 Memberfunktionen `begin()` und `end()` für `l1vec` um einen Iterator auf den Anfang bzw. hinter das Ende zu erhalten



Iterator `llvec::iterator` (Schritt 2/2)

```
class llvec {  
    ...  
public:  
    class iterator {...};  
  
    iterator begin();  
    iterator end();  
  
    ...  
}
```

`llvec` braucht Memberfunktionen um Iteratoren *auf den Anfang* bzw. *hinter das Ende* des Vektors herausgeben zu können

Iterator `llvec::iterator` (Schritt 2/2)

```
llvec::iterator llvec::begin() {  
    return llvec::iterator(this->head);  
}
```

Iterator auf erstes Vektorelement



```
llvec::iterator llvec::end() {  
    return llvec::iterator(nullptr);  
}
```

Iterator `llvec::iterator` (Schritt 2/2)

```
llvec::iterator llvec::begin() {  
    return llvec::iterator(this->head);  
}
```

```
llvec::iterator llvec::end() {  
    return llvec::iterator(nullptr);  
}
```

Iterator hinter letztes Vektorelement



Const-Iteratoren

- Neben `iterator` sollte jeder Container auch einen *Const-Iterator* `const_iterator` bereitstellen
- Const-Iteratoren gestatten nur Lesezugriff auf den darunterliegenden Container
- Zum Beispiel für `llvec`:

```
llvec::const_iterator llvec::cbegin() const;  
llvec::const_iterator llvec::cend() const;  
  
const int& llvec::const_iterator::operator*() const;  
...
```

Const-Iteratoren

- Neben `iterator` sollte jeder Container auch einen *Const-Iterator* `const_iterator` bereitstellen
- Const-Iteratoren gestatten nur Lesezugriff auf den darunterliegenden Container
- Zum Beispiel für `llvec`:

```
llvec::const_iterator llvec::cbegin() const;  
llvec::const_iterator llvec::cend() const;  
  
const int& llvec::const_iterator::operator*() const;  
...
```

- Daher nicht möglich (Compilerfehler): `*(v.cbegin()) = 0`

Const-Iteratoren

Const-Iterator *kann* verwendet werden um nur Lesen zu erlauben:

```
llvec v = ...;
for (llvec::const_iterator it = v.cbegin(); ...)
    std::cout << *it;
```

Hier könnte auch der nicht-const iterator verwendet werden

Const-Iteratoren

Const-Iterator *muss* verwendet werden falls Vektor selbst const ist:

```
const l1vec v = ...;  
for (l1vec::const_iterator it = v.cbegin(); ...)  
    std::cout << *it;
```

Hier kann nicht der `iterator` verwendet werden (Compilerfehler)

Typ-generischer Container

Typ-spezifischer Container



Typ-generischer Container



https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/d/df/Container_01_KMJ.jpg (CC BY-SA 3.0)

Typ-generischer Container

Klasse `cell`: Ein einfacher, 1-elementiger Container für `int`

```
class cell {  
    int element;  
  
public:  
    cell(int e);  
    int& value();  
};
```



Container-
Element

```
cell::cell(int e)  
    : element(e) {}  
  
int& cell::value() {  
    return this->element;  
}
```

Typ-generischer Container

Klasse `cell`: Ein einfacher, 1-elementiger Container für `int`

```
class cell {  
    int element;  
  
public:  
    cell(int e);  
    int& value();  
};
```

Konstruktor speichert
e im Container

```
cell::cell(int e)  
: element(e) {}  
  
int& cell::value() {  
    return this->element;  
}
```

Typ-generischer Container

Klasse `cell`: Ein einfacher, 1-elementiger Container für `int`

```
class cell {  
    int element;  
  
public:  
    cell(int e);  
    int& value();  
};
```

```
cell::cell(int e)  
    : element(e) {}  
  
int& cell::value() {  
    return this->element;  
}
```

↑
Zugriff aufs Element

Typ-generischer Container

Klasse `cell`: Ein einfacher, 1-elementiger Container für `int`

```
class cell {  
    int element;  
  
public:  
    cell(int e);  
    int& value();  
};
```

```
cell::cell(int e)  
    : element(e) {}  
  
int& cell::value() {  
    return this->element;  
}
```

Besser: Generische `cell<E>` für jeden Elementtyp `E` (analog zu `std::vector<E>`)

Typ-generischer Container mit Templates

Templates ermöglichen *Typ-generische* Funktionen und Klassen:

```
template<typename E> ← Sei E ein beliebiger Typ ...  
class cell {  
    E element;  
  
public:  
    cell(E e);  
    E& value();  
};
```

- Typen können als *Parameter* genutzt werden

Typ-generischer Container mit Templates

Templates ermöglichen *Typ-generische* Funktionen und Klassen:

```
template<typename E> ← Sei E ein beliebiger Typ ...  
class cell {  
    E element;  
  
public:  
    cell(E e);  
    E& value();  
};
```

← ... dann verwaltet cell ein Element vom Typ E

- Typen können als *Parameter* genutzt werden
- Typ-Parameter sind im „templatierten“ Gültigkeitsbereich nutzbar

Typ-generischer Container mit Templates

- Signaturen und Implementierungen müssen „templatiert“ werden
- Bei separaten Implementierungen muss das Klassen-Präfix in generischer Form angegeben werden

```
template<typename E>
class cell {
    E element;

public:
    cell(E e);
    E& value();
};
```

```
template<typename E>
cell<E>::cell(E e)
    : element(e) {}

template<typename E>
E& cell<E>::value() {
    return this->element;
}
```

Typ-generischer Container mit Templates

```
cell<int> c1(313);  
cell<std::string> c2("terrific!")
```

- Typ-Parameter müssen bei *Deklarationen*, z.B. `cell<int>`, explizit angegeben werden ...
- ... aber überall sonst werden sie vom Compiler *inferriert*, z.B. bei `c1(313)`, d.h. beim Aufruf des generischen Konstruktors `cell(E e)` (wobei Typparameter `E` vom Compiler mit `int` instanziiert wird)

Templates: Abschluss

- Templates realisieren in C++ *statische Codegenerierung* bzw. *statische Metaprogrammierung*
- Template-Code wird pro Typ-Instanziierung *kopiert*. Bei Benutzung von `cell<int>` und `cell<std::string>` legt der Compiler zwei *instanziierte Kopien* des `cell`-Codes an: sozusagen die beiden (nicht mehr generischen) Klassen `cell_int` und `cell_stdstring`.
- Templates reduzieren Codeduplikation und fördern Code-Wiederverwendbarkeit
- Leider sind Compiler-Fehlermeldungen, die sich auf Templates beziehen, oft noch komplexer, als es C++-Fehlermeldungen ohnehin schon oft sind