19. Dynamische Datenstrukturen II

Verkettete Listen, Vektoren als verkettete Listen

Anderes Speicherlayout: Verkettete Liste

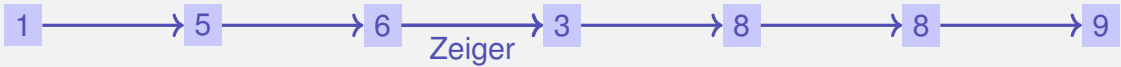
- *Kein* zusammenhängender Speicherbereich und *kein* wahlfreier Zugriff

Anderes Speicherlayout: Verkettete Liste

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

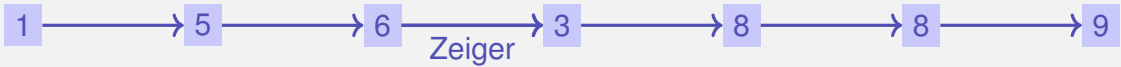
Anderes Speicherlayout: Verkettete Liste

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



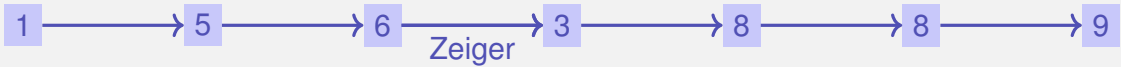
Anderes Speicherlayout: Verkettete Liste

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



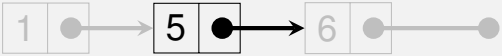
Anderes Speicherlayout: Verkettete Liste

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

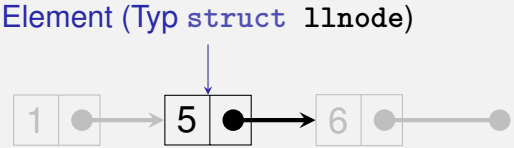


$\Rightarrow$ Unser Vektor kann als verkettete Liste realisiert werden

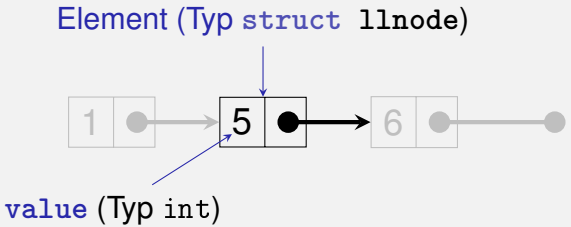
Verkettete Liste: Zoom



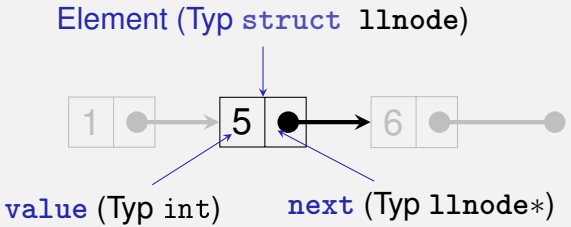
Verkettete Liste: Zoom



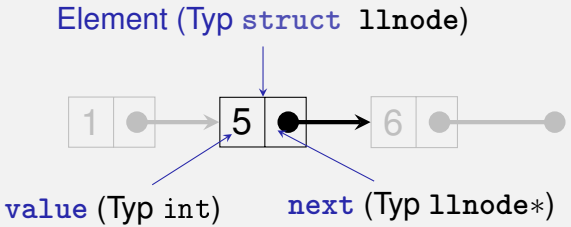
Verkettete Liste: Zoom



Verkettete Liste: Zoom

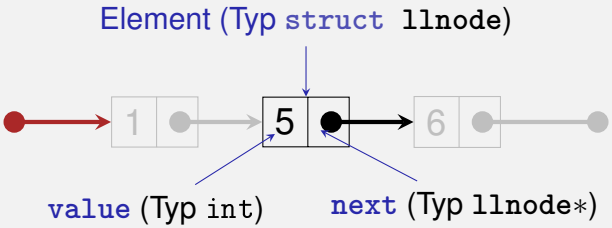


Verkettete Liste: Zoom




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

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

Vektor = Zeiger aufs erste Element




```
class llvec {
  llnode* head;
public:
  // Public interface identical to avec's
  llvec(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;
       n != nullptr;
       n = n->next)
  {
    sink << n->value << ' ';
  }
}
```

Zeiger auf erstes Element

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 << ' ';
  }
}
```

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()`

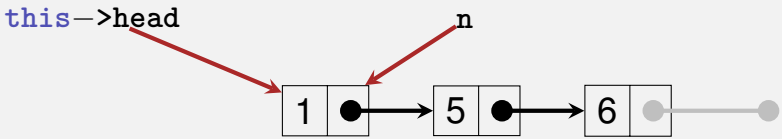
```
struct llnode {
  int value;
  llnode* next;
  ...
};
```

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

Aktuelles Element ausgeben

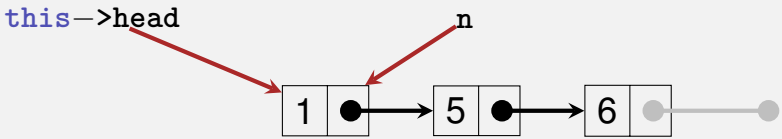
Funktion `llvec::print()`

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



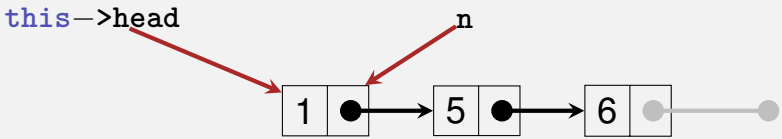
Funktion `llvec::print()`

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



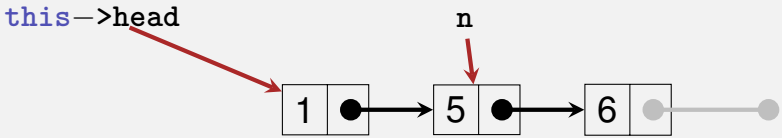
Funktion `llvec::print()`

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



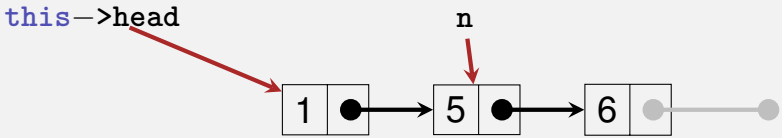
Funktion `llvec::print()`

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



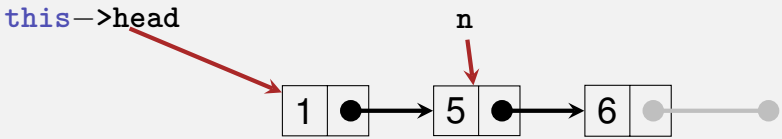
Funktion `llvec::print()`

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



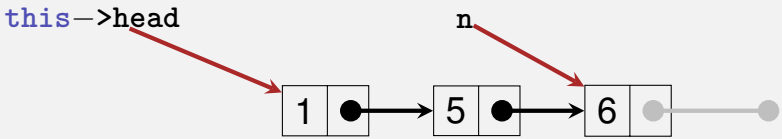
Funktion `llvec::print()`

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



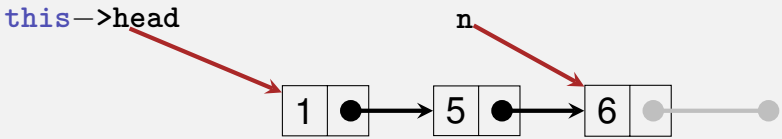
Funktion `llvec::print()`

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



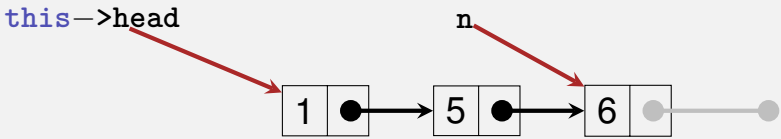
Funktion `llvec::print()`

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



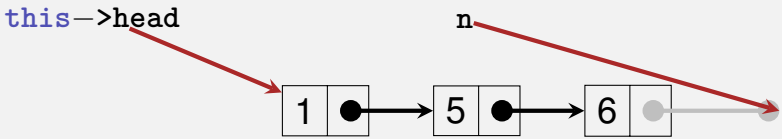
Funktion `llvec::print()`

```
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;

  for (; 0 < i; --i)
    n = n->next;

  return n->value;
}
```

Zeiger auf erstes Element

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()`:

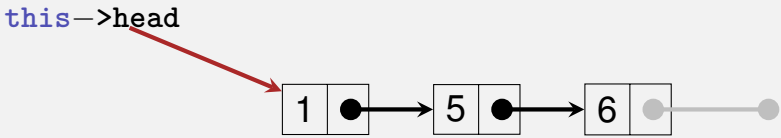
```
int& llvec::operator[](unsigned int i) {
  llnode* n = this->head;

  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:

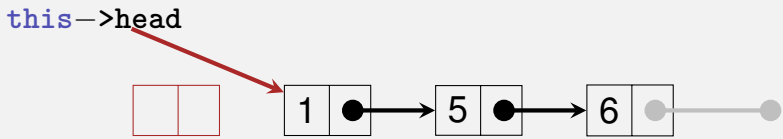
```
void llvec::push_front(int e) {
  this->head =
    new llnode{e, this->head};
}
```



Funktion `llvec::push_front()`

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

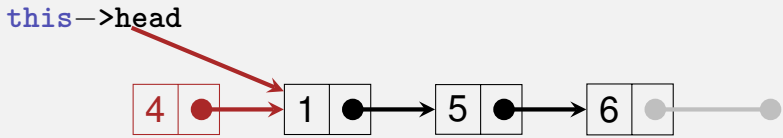
```
void llvec::push_front(int e) {
  this->head =
    new llnode{e, this->head};
}
```



Funktion `llvec::push_front()`

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

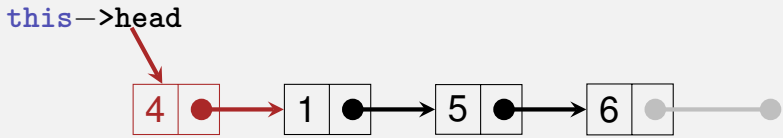
```
void llvec::push_front(int e) {
  this->head =
    new llnode{e, this->head};
}
```



Funktion `llvec::push_front()`

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

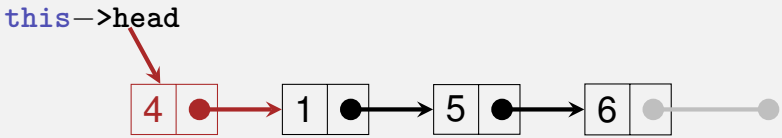
```
void llvec::push_front(int e) {
  this->head =
    new llnode{e, this->head};
}
```



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;

  for (; 0 < size; --size)
    this->push_front(0);
}
```

`head` zeigt zunächst ins Nichts

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};
}
```

Beim ersten Element beginnen ...

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()`

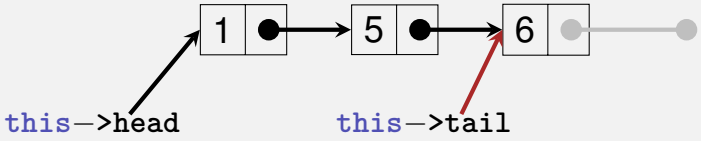
Einfach, aber ineffizient: Verkettete Liste bis ans Ende traversieren und neues Element anhängen

```
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

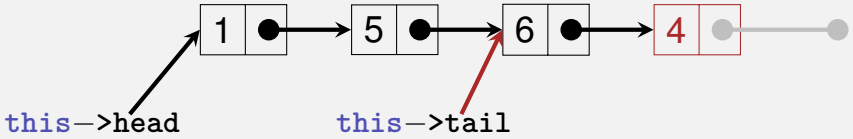
Funktion `llvec::push_back()`

- Effizienter, aber auch etwas komplexer:
  1. Zweiter Zeiger, der auf das letzte Element zeigt: `this->tail`



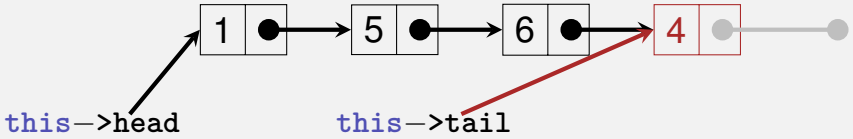
Funktion `llvec::push_back()`

- 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



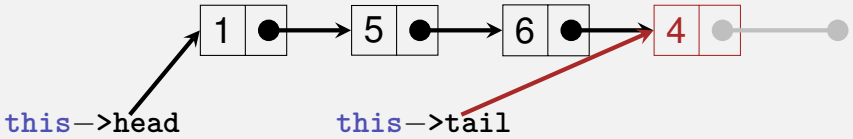
Funktion `llvec::push_back()`

- 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;

  for (llnode* n = this->head;
       n != nullptr;
       n = n->next)
    ++c;

  return c;
}
```

Zähler initial 0

Funktion `llvec::size()`

Einfach, aber ineffizient: Grösse durch abzählen *berechnen*

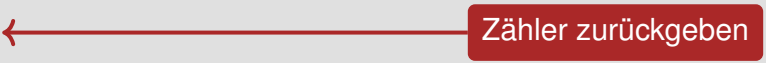
```
unsigned int llvec::size() const {
  unsigned int c = 0;

  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;
}
```



Funktion `llvec::size()`

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

1. Membervariable `unsigned int count` zur Klasse `llvec` 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 int s (Vektorgrösse n), unser `llvec` ungefähr $3n$ int s (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
```

20. 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");
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';
```

Öffne `submissions.txt`

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';
```

Namen-Menge, initial leer

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';
```

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';
```

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';
```

Namen merken falls Punkte ausreichen

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;

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 `llvec::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 `llvec::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 == p + 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 == p + size`
  - Zeiger vorrücken: `p = p + 1`

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 == p + 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 == p + 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 == p + 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 == p + 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 == p + 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

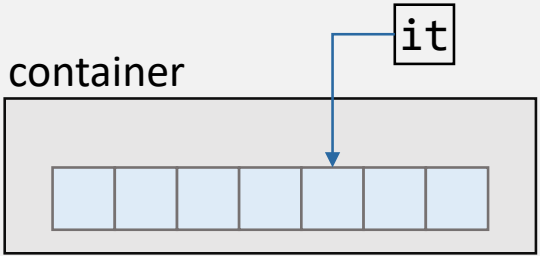
- Iteration erfordert nur die vier eben gesehenen Operationen
- Aber deren Implementierung hängt vom Container ab
- $\Rightarrow$ Jeder C++-Container implementiert seinen eigenen *Iterator*
- Gegeben ein Container `c`:
  - `it = c.begin()`: Iterator aufs erste Element
  - `it = c.end()`: Iterator *hinters*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

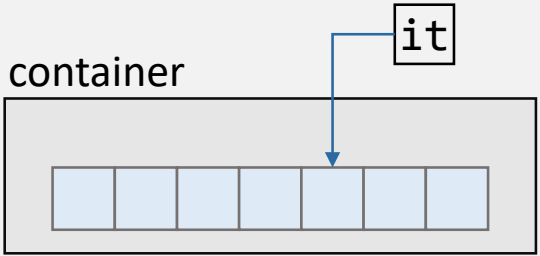
Iteratoren

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



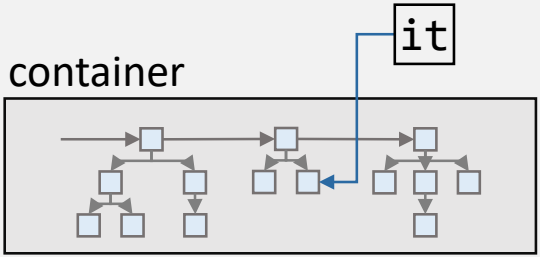
Iteratoren

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



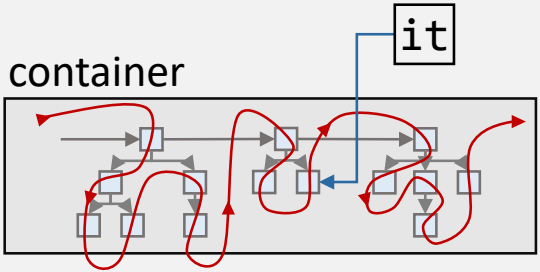
Iteratoren

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



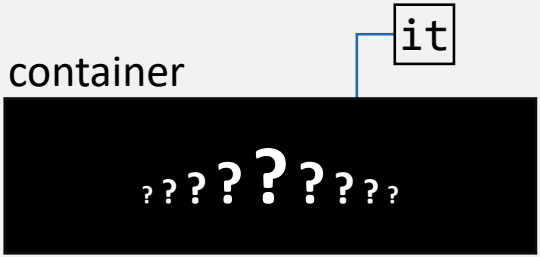
Iteratoren

- 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



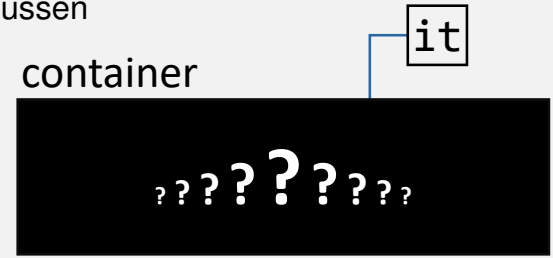
Iteratoren

- 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
- $\Rightarrow$ 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};

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

  *it = -*it;
}

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

`it` zeigt initial aufs erste Element

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
```

Abbruch falls `it` Ende erreicht hat

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
```

`it` elementweise vorwärtssetzen

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
```

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

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

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

    *it = -*it;
  }
}

// in main():
std::vector<int> v = {1, 2, 3};
neg(v); // v = {-1, -2, -3}
```

Negieren als Funktion

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

    *it = -*it;
  }
}

// in main():
std::vector<int> v = {1, 2, 3};
neg(v); // v = {-1, -2, -3}
```

Nachteil: Negiert immer den gesamten Vektor

Negieren als Funktion

Besser: Innerhalb eines bestimmten *Bereichs (Intervalls)* negieren

```
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

Besser: Innerhalb eines bestimmten *Bereichs (Intervalls)* negieren

```
void neg(std::vector<int>::iterator start;
         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 `llvec`

Wir brauchen:

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

Ein Iterator für `llvec`

Wir brauchen:

1. Einen `llvec`-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 `llvec` um einen Iterator auf den Anfang bzw. hinter das Ende zu erhalten

Iterator `avec::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 `avec::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;
};
```

Zeiger auf aktuelles Vektor-Element

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++();
  int& operator*() const;
  bool operator!=(const iterator& other) const;
};
```

Iterator ein Element vorwärtssetzen

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;
};
```

Zugriff auf aktuelles Element

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) {}


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

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

  return *this;
}
```

Iterator initial auf `n` zeigen lassen

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;

  return *this;
}
```

Iterator ein Element vorwärtssetzen

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;
}


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

Zugriff auf aktuelles Element

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 `llvec` (Wiederholung)

Wir brauchen:

1. Einen `llvec`-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 `llvec` um einen Iterator auf den Anfang bzw. hinter das Ende zu erhalten

Iterator `avec::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);
}

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

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

Exkurs: Templates

- Ziel: Ein *generischer* Ausgabe-Operator << für *iterierbare Container*: `llvec`, `avec`, `std::vector`, `std::set`, ...

Exkurs: Templates

- Ziel: Ein *generischer* Ausgabe-Operator << für *iterierbare Container*: `llvec`, `avec`, `std::vector`, `std::set`, ...
- D.h. `std::cout << c << 'n'` soll für jeden solchen Container `c` funktionieren

Exkurs: Templates

Templates ermöglichen *Typ-generische* Funktionen und Klassen:

- Templates ermöglichen die Nutzung von *Typen als Argumenten*

```
template <typename S, typename C>
S& operator<<(S& sink, const C& container);
```

Exkurs: Templates

Templates ermöglichen *Typ-generische* Funktionen und Klassen:

- Templates ermöglichen die Nutzung von *Typen als Argumenten*

```
template <typename S, typename C>
S& operator<<(S& sink, const C& container);
```

Die spitzen Klammern kennen wir schon von `std::vector<int>`. Vektoren sind auch als Templates realisiert.

Exkurs: Templates

Templates ermöglichen *Typ-generische* Funktionen und Klassen:

- Templates ermöglichen die Nutzung von *Typen als Argumenten*

```
template <typename S, typename C>
S& operator<<(S& sink, const C& container);
```

Intuition: Operator funktioniert für jeden Ausgabestrom `sink` vom Typ `S` und jeden Container `container` vom Typ `C`

Exkurs: Templates

Templates ermöglichen *Typ-generische* Funktionen und Klassen:

- Templates ermöglichen die Nutzung von *Typen als Argumenten*

```
template <typename S, typename C>
S& operator<<(S& sink, const C& container);
```

- Der Compiler *inferiert* passende Typen aus den Aufrufargumenten

```
std::set<int> s = ...;
std::cout << s << '\n';
```

S = std::ostream, C = std::set<int>

Exkurs: Templates

Implementierung von << *schränkt* `S` und `C` *ein* (Compilerfehler falls nicht erfüllt):

```
template <typename S, typename C>
S& operator<<(S& sink, const C& container) {
  for (typename C::const_iterator it = container.begin();
       it != container.end();
       ++it) {

    sink << *it << ' ';
  }

  return sink;
}
```

`C` muss Iteratoren bereitstellen

Exkurs: Templates

Implementierung von << *schränkt* `S` und `C` *ein* (Compilerfehler falls nicht erfüllt):

```
template <typename S, typename C>
S& operator<<(S& sink, const C& container) {
  for (typename C::const_iterator it = container.begin();
       it != container.end();
       ++it) {

    sink << *it << ' ';
  }

  return sink;
}
```

`C` muss Iteratoren bereitstellen – mit passenden Funktionen

Exkurs: Templates

Implementierung von << *schränkt* `S` und `C` *ein* (Compilerfehler falls nicht erfüllt):

```
template <typename S, typename C>
S& operator<<(S& sink, const C& container) {
  for (typename C::const_iterator it = container.begin();
       it != container.end();
       ++it) {

    sink << *it << ' ';
  }

  return sink;
}
```

`S` muss Ausgabe von Elementen (`*it`) und Zeichen (`' '`) unterstützen