# Programmierkurs
# Vorlesung 6
## Operator Overloading, Funktoren und Lambdas

Andreas Naumann

Institut für Wissenschaftliches Rechnen
Universität Heidelberg

03 April 2023

# Inhalt

# Fragen/Probleme zum Projekt?

- gitlab ist nicht erreichbar
- Abgabe per Moodle:
  - nur die Quellen (*.cc, *.h, *.hh, CMakeLists.txt)
  - zip oder gepacktes tar-Archiv:

```
tar czf projekt_loesung.tar.gz *.cc *.h *.hh CMakeLists.txt
```

  - Mit Unterverzeichnissen: (auf eine Zeile)

```
tar czf projekt_loesung.tar.gz
$(find . -name *.cc -name *.h -name *.hh -name CMakeLists.txt)
```

# Letzte Vorlesung

1. Vorgehen für Projektarbeit/Programmierung (1)
2. Auswahl von Software Pattern (2) $\surd$

# Iteratoren

# Iteratoren — Motivation

Ihr folgenden Code kennt ihr schon:

```
std::vector<int> v(20);
...
for (auto& i : v)
  std::cout << i << std::endl;
```

Doch was passiert eigentlich Hinter den Kulissen?

# Iteratoren — Motivation

Der Code kann ungefähr in folgendes übersetzt werden:

```
std::vector<int> v(20);
...
for (std::vector<int>::iterator it = v.begin(); it != v.end(); ++it) {
  auto& i = *it;
  std::cout << i << std::endl;
}
```

- Was passiert hier eigentlich?
- Was ist dieser `iterator`?
- Was macht `*it`?
- Was soll das Ganze?

# Wiederholung: Pointer

- Erinnerung: Jede Variable liegt an einer Adresse im Speicher
- Zugriff auf die Adresse mit Adressoperator &:

```
int i = 0;
std::cout << &i << std::endl;
```

- Variablen, die die Adresse einer anderen Variable speichern, heißen Pointer
- Pointer zeigen immer auf Variablen eines bestimmten Typs. Der Typ einer Pointervariablen ist der Typ der Zielvariablen mit angehängtem *:

```
int i = 0;
int* p = &i; // p is a pointer to int
```

- Pointer, die auf keine gültige Variable verweisen, sollte immer der spezielle Wert `nullptr` zugewiesen werden:

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

# Pointer als Handle für Speicher

- `array` und `vector` legen ihre Daten in einen zusammenhängenden Speicherbereich
- Pointer auf Speicherbereich mit Memberfunktion `data()`
- Pointer unterstützen mathematische Operationen:

```
std::vector<int> v(20);
int* data = v.data();
std::cout << *data << std::endl; // prints first entry
++data; // increase pointer by sizeof(int), now points to v[1]
data += 10; // now points to v[11]
std::cout << (data - v.data()) << std::endl; // prints 11
data -= 11; // points to v[0] again
```

- Vektor mit Pointern ausgeben:

```
int* end = v.data() + v.size(); // first invalid address
for(int* p = v.data() ; p != end ; ++p)
  std::cout << *p << std::endl;
```

# Iteratoren: Verallgemeinerte Pointer

## Warum sind Iteratoren nützlich?

- Nicht alle C++-Container speichern Einträge in zusammenhängendem Speicher (`list`, `map`, `deque`, ...)
- Nicht alle C++-Container erlauben Elementzugriff mit eckigen Klammern
- Wie allgemeine Algorithmen schreiben, die über Container-Elemente iterieren?

# Iteratoren: Verallgemeinerte Pointer

## Warum sind Iteratoren nützlich?

- Nicht alle C++-Container speichern Einträge in zusammenhängendem Speicher (`list`, `map`, `deque`, ...)
- Nicht alle C++-Container erlauben Elementzugriff mit eckigen Klammern
- Wie allgemeine Algorithmen schreiben, die über Container-Elemente iterieren?

## Container stellen Iteratoren zur Verfügungen

- Iteratoren verhalten sich wie Pointer
- Typ des Iterators über geschachtelten Typ `Container::iterator` bzw. `Container::const_iterator` (erlaubt nur lesenden Zugriff auf Elemente)
- Iterator für erstes Element mit `begin()`
- Iterator hinter letztes Element mit `end()`
- Manche Container erlauben Rückwärtsdurchlauf mit `rbegin()`, `rend()`

# Iteratoren: Beispiel

Ausgeben von Containern:

```
template<typename T>
void print(const T& t) {
  typename T::const_iterator end = t.end(); // oder end(t)
  for (auto it = t.begin() ; it != end ; ++it)
    std::cout << *it << std::endl;
}

std::vector<int> v(20);
print(v);

std::list<int> l;
...
print(l);
```

# Iteratoren: Kategorien

- Je nach unterliegendem Container unterstützen Iteratoren nicht alle Pointer-Operationen
- Iterator-Kategorien:

| | |
|---|---|
| `InputIterator` | Lesen von `*it` und `++it` |
| `OutputIterator` | Schreiben von `*it` und `++it` |
| `ForwardIterator` | Vollzugriff auf `*it` sowie `++it` |
| `BidirectionalIterator` | zusätzlich `--it` |
| `RandomAccessIterator` | zusätzlich `it += n`, `it -= n` |

- Jeder Container gibt an, was für eine Iteratorkategorie er hat

# Algorithmen

- Alle Algorithmen in der Standardbibliothek arbeiten mit Iteratoren
- Manche Algorithmen haben Anforderungen an die Kategorie (z.B. `std::sort()`)
- Erlauben oft sehr klares Aufschreiben der Intention:

```
std::array<int,20> a;
...
// Replace all occurences of 3 with 7
std::replace(a.begin(),a.end(),3,7);

// Count number of entries with value 7
std::cout << std::count(a.begin(),a.end(),7);

std::vector<int> v;

// Copy array to vector, no need to resize
std::copy(a.begin(),a.end(),std::back_inserter(v));
```

- Erfordern Umgewöhnung und Kenntnis der Möglichkeiten

# Zusammenfassung

- Iteratoren ermöglichen es unabhängig vom Containertyp über dessen Inhalt zu iterieren.
- Zugriff auf die Daten des Iterators erfolgt mit `*iterator`.
- Anfangs und (nach-dem-)Ende-Funktion: `begin(cont)` und `end(cont)`
- Ein Iterator braucht in der Regel mindestens einen Operator um das nächste Element zu bekommen und einen Vergleichsoperator (typischerweise `++it` und `!=` ).
- Je nach Iteratortyp kann vorwärts und rückwärts iteriert werden oder sogar auf ein beliebiges benachbartes Element zugegriffen werden.
- Viele Algorithmen arbeiten mit Iteratoren, damit diese Unabhängig von einem Containertyp implementiert werden können.

# Funktoren

# Funktoren: Funktionen mit Gedächtnis

Manchmal braucht man eine Funktion, die sich Informationen zwischen den Aufrufen merken kann:

- Eine Funktion, die zu einem Argument immer eine feste, aber zur Laufzeit bestimmte Zahl hinzuaddiert
- Eine Funktion, die weiß, wie oft sie schon aufgerufen wurde

# Funktoren: Funktionen mit Gedächtnis

Manchmal braucht man eine Funktion, die sich Informationen zwischen den Aufrufen merken kann:

- Eine Funktion, die zu einem Argument immer eine feste, aber zur Laufzeit bestimmte Zahl hinzuaddiert
- Eine Funktion, die weiß, wie oft sie schon aufgerufen wurde

Lösung: Funktoren: Objekte, die man wie eine Funktion aufrufen kann.

```
class Funktor {
public:

  T operator()(A a, B b, C c) const {
    ...
  }
};
```

# Funktoren: Beispiel

```
template<typename T>
class add {
  T _number;
  int _calls = 0;
public:

  add(T number)
    : _number(number)
  {}

  template<typename U>
  auto operator()(const U& u) const {
    ++_calls;
    return u + _number;
  }
};
```

# Funktoren in der Standardbibliothek

Viele Algorithmen in der STL akzeptieren Funktoren:

- `std::sort`
- `std::find_if`
- `std::copy_if`
- `std::transform`
- `std::generate`
- ...

Algorithmen können so angepasst werden:

- Sortiere Berge absteigend nach Höhe
- Kopiere alle Berge höher als 8.000m
- Extrahiere Liste von Erstbesteigern aus Liste von Bergen
- ...

# STL-Funktoren: Beispiel

Im folgenden operieren wir mit folgender Klasse:

```
struct Mountain {
  std::string name;
  int height;
  int first_ascent;
  std::vector<std::string> first_ascenders;
};
```

- Die Klasse ist mit als `struct` definiert, alle Member sind also `public`.
- Aus Lesbarkeitsgründen greifen wir im folgenden direkt auf die Member-Variablen zu.

Ausserdem haben wir eine Liste von Bergen:

```
std::vector<Mountain> mountains = ...;
```

# Berge sortieren

Wir können `mountains` nicht mit `std::sort()` sortieren, weil der Compiler nicht weiß, welcher Berg zuerst kommen soll.

- Wir können einen Vergleichsoperator für die Relation < definieren. Dieser wird von `std::sort()` verwendet:

```
bool operator<(const Mountain& m1, const Mountain& m2) {
  return m1.name < m2.name; // Sort mountains alphabetically
}
```

- Falls wir die Berge anders sortieren wollen, können wir `std::sort()` dies explizit sagen:

```
std::sort(
  mountains.begin(),
  mountains.end(),
  sort_mountains_by_descending_height()
  );
```

Die Definition von `sort_mountains_by_descending_height` folgt auf der nächsten Folie.

# Berge sortieren: Funktor

Bevor wir die Berge nach Höhe sortieren können, müssen wir ausserhalb der Funktion, in der wir sortieren wollen, den passenden Funktor definieren:

```
struct sort_mountains_by_descending_height {

  bool operator()(
    const Mountain& m1,
    const Mountain& m2
    ) const
  {
    // the functor returns whether the first
    // argument is smaller than the second
    return m1.height > m2.height;
  }

};
```

# Lambda-Funktionen: Motivation

Oft wird ein Funktor nur einmal beim Anruf eines Algorithmus benötigt

- Definition als Klasse weit weg von Verwendung
- Viel "Boilerplate"

Lambda-Funktionen erlauben inline-Definition von Funktoren als Variablen

```
auto sort_height = [](auto& m1, auto& m2) {
  return m1.height > m2.height;
};
```

# Lambda-Funktionen: Syntax

```
[capture-list](arg-list) -> return-type {
  body
};
```

Die Definition einer Lambda-Funktion besteht immer aus

- einer capture list in `[]`, die steuert, welche Variablen aus dem aktuellen Scope im body der Lambda-Funktion verfügbar sind.
- einer Liste von Funktions-Argumenten in `()`.
- dem eigentlichen Funktionscode in `{}`.

Meistens kann der Compiler den Rückgabetyp der Lamba-Funktion erraten, ansonsten kann er optional mit `-> return-type` angegeben werden.

# Lambda-Funktionen: Implementierung

Intern sind Lambda-Funktionen bis auf Details nur eine Kurzschreibweise für die Definition eines Funktors und die Erzeugung einer Variable vom Typ des Funktors:

```
auto squared = [](double i) {
  return i * i;
};
```

ist äquivalent zu

```
// type name is neither known nor relevant
struct unknown_type {
  auto operator()(double i) const {
    return i * i;
  }
};
...
{
  auto squared = unknown_type();
}
```

# Lambda-Funktionen: Capture-Spezifikation (I)

- Standardmässig kann man in einer Lambda-Funktion nicht auf die Variablen des umgebenden Scopes zugreifen.
- Um diese Variablen verfügbar zu machen, kann man sie in der Capture-Spezifikation auflisten:

| | |
|---|---|
| Variable: `var` | Die Variable im Lambda ist eine Kopie. |
| Variable + `&`: `&var` | Die Variable im Lambda ist eine Referenz auf die Original-Variable. |
| Ein einzelnes `&` | Im Lambda verwendete Variablen sind automatisch per Referenz verfügbar. |
| Ein einzelnes `=` | Verwendete Variablen sind automatisch als Kopie verfügbar. |

```
double a = 2.0, y = 3.0;
auto axpy = [=,&y](double x) {
  // default capture: by copy, b captured by reference
  return a * x + y;
}
a = 4.0; // does not change the lambda
y = 3.0; // changes the lambda
```

# Generische Lambda-Funktionen

- Oft ist es praktisch, wenn eine Lambda-Funktion für verschiedene Typen von Argumenten funktioniert (wie eine Template-Funktion).
- Bei Verwendung von `auto` in der Parameter-Liste wird der `operator()` im Funktor ein Template und jeder `auto`-Parameter ein Template-Argument:

```
auto plus = [](auto a, auto b) {
  return a + b;
};
```

erzeugt den Funktor

```
struct unknown_plus_type {
  template<typename T1, typename T2>
  auto operator()(T1 a, T2 b) const {
    return a + b;
  }
};
```

# Lambda-Funktionen: Hinweise (I)

- Der genaue Typ des Funktors wird vom Compiler festgelegt und kann nicht aufgeschrieben werden.
- Lambda-Funktionen kann man daher nur in einer `auto`-Variablen speichern.
- Man kann Lambda-Funktionen auch an Template-Parameter binden:

```
template<typename Functor, typename Arg>
auto call(Functor f, Arg arg)
{
  return f(arg);
}
...
call(axpy,3.0);
```

# Lambda-Funktionen: Hinweise (II)

- Captures werden intern zu Member-Variablen des Funktors.
- Der Compiler generiert einen passenden Konstruktor und den zugehörigen Aufruf.
- Vorsicht mit der Lebenszeit von Variablen bei Capture by reference, wenn das Lambda von der Funktion zurückgegeben wird:

```
auto makeLamba(int add) {
  return [&](int i) {
    return i + add;
  };
} // boom!
```

In diesem Beispiel speichert die Lambda-Funktion eine Referenz auf die Variable `add`, die aber nach dem Verlassen von `makeLambda()` nicht mehr gültig ist!

# Bedingtes Kopieren

- Die Funktion `std::copy_if` kopiert die Werte aus einer Iterator-Range, für die das Predicate (ein Funktor, der ein `bool` zurückgibt) `true` ist:

```
template<typename InIt, typename OutIt, typename Pred>
OutIt copy_if(
  InIt first, InIt last,
  OutIt out_first,
  Pred predicate);
```

- Wir wollen eine Liste mit hohen Bergen:

```
std::vector<Mountain> high;
int min_height = 5000;
std::copy_if(
  mountain.begin(),mountain.end(), // source
  std::back_inserter(high), // append copied values to high
  [=](auto& mountain) {
    return mountain.height >= min_height;
  }
);
```

# Zählen von Elementen

- Die Funktion `std::count_if` zählt, für wie viele Elemente das Predicate `true` ist:

```
template<typename It, typename Pred>
std::size_t count_if(It first, It last, Pred predicate);
```

- Wir wollen wissen, wie viele Berge erst nach 1900 bestiegen wurden:

```
auto late_ascents = std::count_if(
  mountain.begin(),mountain.end(), // source
  [=](auto& mountain) {
    return mountain.first_ascent >= 1900;
  }
);
```

# Zusammenfassung

- C++ erlaubt das Überladen von fast allen Operatoren.
- Operatoren werden als Member-Funktionen oder als Freistehende Funktionen definiert
- Freistehende Funktionen müssen ggf. 'friend' des Operanden sein.
- Klassen, welche den `operator()` überschreiben sind Funktoren, also Funktionen mit Gedächtnis (bzw. internem Zustand).
- Funktoren sind nützlich zur Definition von Prädikaten (count_if etc.) und um das Verhalten von Algorithmen zu erweitern/modifizieren (sortieren nach anderen Kriterien als dem Vergleichsoperator).
- Lambda-Funktionen sind „Wegwerf"-Funktoren und eine Kurzschreibweise um Funktoren zu implementieren.
- In Lambdas können die Variablen des aktuellen Scopes verfügbar gemacht werden. Diese können ganz Allgemein als Referenz (`[&]`) oder Kopie (`[=]`) verfügbar gemacht werden. Darüber hinaus können auch nur bestimmte Variables „gecaptured" werden.

# Operatorüberladung

# Motivation (I)

```
class Vector {
public:
  Vector();
  Vector(double x, double y);
  Vector(const Vector& v);
  void add(const Vector& v);
  void subtract(const Vector& v);
  void scale(double s);
}
```

Gegeben $\mathbf{u}, \mathbf{v} \in \mathbb{R}^2, a \in \mathbb{R}$: Berechne $\mathbf{u} = \mathbf{u} + a \cdot \mathbf{v}$

```
Vector av(v);
av.scale(a);
u.add(av);
```

Die deutlich schlechtere Lesbarkeit im Vergleich zu `u = u + a * v;`

# Motivation (II)

```
class Vector {
public:
  double x() const;
  double y() const;
  ...
  void print(std::ostream& os) const {
    os <<  "(" << x() <<  ", " << y() <<  ")";
  }
};

std::cout << "Result:  ";
u.print(std::cout);
std::cout << std::endl;
```

Etwas wie `std::cout << u;` wäre doch praktisch, oder?

# Lösung: Operator Overloading

In C++ können fast alle Operatoren überladen werden, wenn mindestens ein Operand eine Klasse oder eine Enumeration ist.

- Überladene Operatoren definiert durch spezielle Funktionen mit festem Namensschema: `operator?()`, wobei `?` durch den zu überladenden Operator zu ersetzen ist
- Verschiedene Typen von Operatoren:
  - Unäre Operatoren ein Operand, z.B. `-x`, `!x`
  - Binäre Operatoren zwei Operanden, z.B. `a + b`, `a << b`
  - Spezielle Operatoren z.B. `a[b]`, `a(b,c)`
- Weitgehend vollständige Auflistung aller Operatoren sowie weitere Informationen unter https://en.cppreference.com/w/cpp/language/operators
- Operatorfunktionen entweder als Memberfunktionen von Klassen oder als freistehende Funktionen
- Bei Operatoraufruf keine Namespace-Angabe möglich $\Rightarrow$ freistehende Funktionen immer in Namespace des eigenen Objekts, damit der Compiler sie findet (ADL: argument-dependent lookup)

# Unäre Operatoren

- Member-Funktion:

```
class Vector {
public:
  Vector operator-() const {
    return Vector(-x(),-y());
  }
};
```

- Freistehende Funktion:

```
Vector operator-(const Vector& v) {
  return Vector(-v.x(),-v.y())
}
```

# Binäre Operatoren

- Member-Funktion:

```
class Vector {
public:
  Vector operator+(const Vector& b) const {
    return Vector(x() + b.x(),y() + b.y());
  }
};
```

- Freistehende Funktion:

```
Vector operator+(const Vector& a, const Vector& b) {
  return Vector(a.x() + b.x(),a.y() + b.y());
}
```

# Binäre Operatoren mit unterschiedlichen Typen

- Reihenfolge der Argumente ist wichtig!
- Member-Funktion:

```
class Vector {
  public:
  Vector operator*(double s) const {
    return Vector(s * x(),s * y());
  }
};
```

  - Objekt ist immer der linke Operand!
  - Funktioniert nur für `v * s`, nicht für `s * v`

# Binäre Operatoren mit unterschiedlichen Typen

- Reihenfolge der Argumente ist wichtig!
- Member-Funktion:

```
class Vector {
  public:
  Vector operator*(double s) const {
    return Vector(s * x(),s * y());
  }
};
```

  - Objekt ist immer der linke Operand!
  - Funktioniert nur für `v * s`, nicht für `s * v`

- Zwei freistehende Funktionen:

```
Vector operator*(const Vector& v, double s) {
  return Vector(s * v.x(),s * v.y();
}

Vector operator*(double s, const Vector& v) {
  return v * s; // forward to other implementation
}
```

# Freistehende Funktionen als `friends`

Freistehende Operator-Funktionen oft erforderlich, aber

- haben keinen Zugriff auf private Variablen / Methoden
- nicht innerhalb der Klassendeklaration, schwer zu finden

# Freistehende Funktionen als `friends`

Freistehende Operator-Funktionen oft erforderlich, aber

- haben keinen Zugriff auf private Variablen / Methoden
- nicht innerhalb der Klassendeklaration, schwer zu finden

Freistehende Funktionen können mit einer Klasse befreundet sein

- Deklaration (und möglicherweise Definition) innerhalb der Klasse
- Kennzeichnung durch Voranstellen von `friend`
- Voller Zugriff auf alle privaten Variablen und Methoden
- Keine Member-Funktion!

```
class Vector {
public:
...
  friend Vector operator*(double s, const Vector& v) {
    return Vector(s * v.x(),s * v.y());
  }
};
```

# Klassen mit Unterstützung für Ein- / Ausgabe

```
class Vector {
public:
...
  friend std::ostream& operator<<(std::ostream& os, const Vector& v) {
    os <<  "(" << x() <<  ", " << y() <<  ")";
    return os;
  }

  friend std::istream& operator>>(std::istream& is, Vector& v) {
    ...
    return is;
  }

};
```

- Syntax exakt wie hier
- Nicht vergessen, den Stream zurückzugeben

Fragen ?