

# C++ für Wissenschaftliches Rechnen

Dan Popović

Interdisziplinäres Institut für Wissenschaftliches Rechnen, Universität Heidelberg

24. April 2012

# C++ für Wissenschaftliches Rechnen I

## ① Warum C++?

Motivation

Konzepte von C++

## ② Das erste Programm

## ③ Grundlagen C++

Datentypen

Kontrollfluss

Funktionen

## ④ Zeiger und Referenzen

## ⑤ Abstrakte Datentypen und ihre Realisierung in C++

Klassen

Konstruktoren und Destruktoren

## ⑥ Templates und generische Programmierung

## ⑦ Die Standard Template Library (STL)

Beispiel einer Container-Klasse: Vektoren

Das Iterator-Interface

## ⑧ Built-in Algorithmen der STL

## ⑨ Vererbung in C++

# C++ für Wissenschaftliches Rechnen II

## ⑩ Virtuelle Funktionen und abstrakte Basisklassen

Virtuelle Funktionen

Rein virtuelle Funktionen und abstrakte Basisklassen

## ⑪ Statischer vs. Dynamischer Polymorphismus

Dynamischer Polymorphismus

Statischer Polymorphismus und Engines

## ⑫ Template Meta Programming

## ⑬ Template Spezialisierungen

# Anforderungen an die Programmiersprache

- Effizienz...
  - des Programms
  - der Entwicklung
- Hardware-nahe Programmiersprachen
- Integration mit existierendem Code
- Abstraktion
-

# Vergleich von C++ mit anderen Sprachen

## Fortran & C

- + schneller Code
- + gute Optimierungen
- nur prozedurale Sprachen
- wenig Flexibilität
- schlechte Wartbarkeit

## C++

- + gute Wartbarkeit
- + schneller Code
- + gute Integration mit Fortran und C Bibliotheken
- + hoher Abstraktionsgrad
- schwerer zu optimieren
- meistens mehr Speicherverbrauch

# Konzepte von C++

## C++ ist eine objektorientierte Sprache

D.h. C++ unterstützt

- 1 Abstraktion durch Klassen und Objekte,
- 2 Vererbung und
- 3 Polymorphismus zur Laufzeit.

## Polymorphismus bedeutet „Viele Gestalten“:

- Eine Variable kann ihren Typ zur Laufzeit ändern,
- Eine Funktion mit polymorphen Argumenten,
- Ein Funktionsname, der von verschiedenen Funktionen verwendet wird.

# Literatur

## Literatur zu C++

- B. Stroustrup: C++ – Die Programmiersprache (Die Bibel)
- B. Eckel: Thinking in C++, Volume 1 + 2
- A. Willms: C++ Programmierung (Für Anfänger gut geeignet)

# Grundlegende C++-Kenntnisse

Um die Vorzüge von C++ auszunutzen, sind abstrakte Techniken notwendig. Folgende grundlegenden Konzepte sind als Basis unumgänglich:

- Grundlegende Datentypen und Kontrollstrukturen:
  - `int`, `double`, `bool`, `char`, ...
  - conditionals: `if`, `switch`, ...
  - loops: `for`, `while`
- Grundlegende Programmstrukturen:
  - Funktionen
  - Rekursive und iterative Programmierung
- Zeiger und Referenzen
- Klassen und Vererbung
  - `class` und `struct`
  - `private`, `public`, `protected`
  - Konstruktoren und Destruktoren
  - `public`, `private`-Vererbung
  - (rein) virtuelle Funktionen abstrakte Basisklassen
- Polymorphismus von Funktionen, Überladen von Operatoren



# Hallo, Welt!

```
1 // include I/O-library
2 #include <iostream>
3
4 // main is always the first function to be called
5 // argc: program argument counter
6 // argv: pointer to C-Strings containing the arguments
7 int main(int argc, char** argv)
8 {
9     std::cout << "Hello, world..." << std::endl;
10
11     // return value of main
12     return 0;
13 }
```

Das Erstellen des Executables erfordert hier nur einen Compiler (g++):



# Übersetzen unter Linux

```

dan@carpathia:~$ l
insgesamt 228K
lrwxrwxrwx 1 dan 1000 17 6. Mär 23:54 Bilder -> /data/dan/Bilder/
lrwxrwxrwx 1 dan 1000 14 6. Mär 23:55 bin -> /data/dan/bin/
lrwxrwxrwx 1 dan 1000 17 6. Mär 23:55 Dan.asc -> /data/dan/Dan.asc
drwxr-xr-x 2 dan dan 4,0K 30. Mär 21:18 Desktop
lrwxrwxrwx 1 dan 1000 20 6. Mär 23:55 Documents -> /data/dan/Documents/
lrwxrwxrwx 1 dan 1000 19 6. Mär 23:55 dosgames -> /data/dan/dosgames/
-rw-r--r-- 1 dan dan 197 13. Apr 21:17 hallowelt.cc
-rw-r--r-- 1 dan dan 210K 6. Mär 21:35 nvidia-bug-report.log
drwxr-xr-x 3 dan dan 4,0K 22. Mär 20:47 opt
lrwxrwxrwx 1 dan 1000 19 6. Mär 23:55 privates -> /data/dan/privates/
lrwxrwxrwx 1 dan 1000 14 6. Mär 23:55 sim -> /data/dan/sim/
lrwxrwxrwx 1 dan 1000 15 6. Mär 23:55 spro -> /data/dan/spro/
lrwxrwxrwx 1 dan 1000 14 6. Mär 23:55 svn -> /data/dan/svn/
lrwxrwxrwx 1 dan 1000 14 6. Mär 23:55 uni -> /data/dan/uni/
dan@carpathia:~$ g++ -o hallowelt hallowelt.cc
dan@carpathia:~$ ./hallowelt
Hello, World...
dan@carpathia:~$ █
  
```

Für größere Projekte ist der C++-Build-Prozess in der Regel recht kompliziert.

# Datentypen in C++

Die elementaren Datentypen in C++ sind:

int	Ganzzahlen	<code>int a = 2;</code>
long	Große Ganzzahlen	<code>long a = 1e15;</code>
char	Zeichen	<code>char a = 'b';</code>
float	Gleitkommazahlen 4 Byte	<code>float b = 3.14;</code>
double	Gleitkommazahlen 8 Byte	<code>double c = 3.1415;</code>
bool	Wahrheitswerte	<code>bool d = false;</code>

# Vezweigungen

if-Verzweigungen:

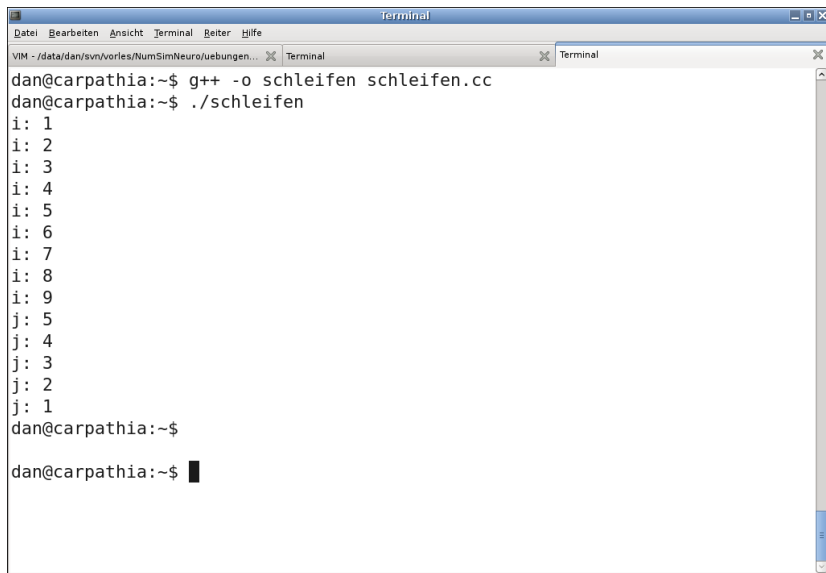
```
1  #include <iostream>
2
3  int main(int argc, char** argv)
4  {
5      int a = 5;    // an integer variable
6      if (a > 0)
7      {
8          std::cout << "Hello, World..." << std::endl;
9      }
10     else
11     {
12         return 1; // emit an error
13     }
14
15     return 0;
16 }
```

# Realisierung von Schleifen

- for-Schleifen,
- while-Schleifen,
- do..while-Schleifen.

```
1  #include <iostream>
2
3  int main(int argc, char** argv)
4  {
5      for (int i=1; i<10; ++i)
6          std::cout << "i: " << i << std::endl;
7
8      int j = 5;
9      while (j > 0)
10     {
11         std::cout << "j: " << j << std::endl;
12         j--;
13     }
14
15     return 0;
16 }
```

# Realisierung von Schleifen



```
dan@carpathia:~$ g++ -o schleifen schleifen.cc
dan@carpathia:~$ ./schleifen
i: 1
i: 2
i: 3
i: 4
i: 5
i: 6
i: 7
i: 8
i: 9
j: 5
j: 4
j: 3
j: 2
j: 1
dan@carpathia:~$
dan@carpathia:~$ █
```

# Funktionen

## Funktionen

Funktionen dienen zur Kapselung von Programmabschnitten und können bei Bedarf aufgerufen werden.

In C++ haben sie immer die Syntax

```
Rueckgabetyf Funktionsname(Parameter1, Parameter2, ..);
```

# Ein Beispielprogramm mit Funktion

```
1  #include <iostream>
2
3  using namespace std; // use namespace std globally (here ok,
4                        // avoid this in the general case)
5
6  // A function that greets everyone
7  void greet()
8  {
9      // do not need namespace-selector std:: any more
10     cout << "Hello, World." << endl;
11 }
12
13 // main function
14 int main(int argc, char** argv)
15 {
16     greet();
17     return 0;
18 }
```



# Call-by-Reference und Call-by-Value

Bei Call-by-Value wird die Adresse des Objekts als Funktionsparameter übergeben und keine Kopie des Objekts erzeugt:

```
1 // call-by-value
2 void swap_wrong (int a, int b)
3 {
4     int tmp = a;
5     a = b;           // does not work, a and b are local copies
6     b = tmp;       // in the scope of the function
7 }
8
9 // call-by-reference
10 void swap_right (int& a, int& b)
11 {
12     int tmp = a; // a, b are reference parameters
13     a = b;       // That means changes to them are
14     b = tmp;     // persistant after end of function call
15 }
```

# Call-by-Reference und Call-by-Value

```
1 // main function
2 int main(int argc, char** argv)
3 {
4     int a=5, b=6;
5
6     // Ausgabe 5, 6
7     swap_wrong(a, b)
8     std::cout << a << ", " << b << std::endl;
9
10    // Ausgabe 6, 5
11    swap_right(a, b)
12    std::cout << a << ", " << b << std::endl;
13
14    return 0;
15 }
```

Sollen Änderungen einer Funktion Bestand haben, müssen immer Referenz-Variablen verwendet werden (wie bei `swap_right`).

# Zeiger und Referenzen

Eines der kompliziertesten Themen in C/C++ sind Zeiger und Referenzen.

## Zeiger und der Adressoperator &

- `int x = 12`

Die Variable `x` ist definiert durch Adresse, Größe (benötigter Speicherplatz), Name und Inhalt.

- Um den Wert der Adresse (nicht der Variablen `x`!) zu ermitteln, gibt es den **Adressoperator** `&`:

```
std::cout << &x << std::endl // Ausgabe: 0xA0000000
```

- Adresswerte können in **Zeigervariablen** gespeichert werden. Zeigervariablen haben die Syntax `Typ* name`, `Typ` ist der Typ des Objekts, auf den der Zeiger `name` zeigt:

```
int* z = &x; // z ist eine Zeigervariable
```

# Zeiger und Referenzen

## Der Dereferenzierungsoperator \*

- Über die Zeigervariable  $z$

```
int* z = &x; // z ist eine Zeigervariable
```

kann auch der Wert der Variablen  $x$  verändert werden. Dazu gibt es den (**Dereferenzierungsoperator**  $*$ ):

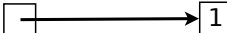
```
*z = 4711; // z wird dereferenziert, x hat nun den Wert 4711
```

- Achtung:
  - Mit dem Dereferenzierungsoperator wird nicht der Zeiger  $z$  verändert ( $z$  zeigt immer noch auf die Speicheradresse von  $x$ ).
  - Das Symbol  $*$  bezeichnet je nach Kontext den Dereferenzierungsoperator oder eine Zeigervariable.

# Zeiger und Referenzen


Den Zusammenhang zwischen Zeigervariablen, Adress- und Dereferenzierungsoperator verdeutlicht folgende Abbildung:

Zeigervariable `intPtr`

`int* intPtr = &i` 

Adressoperator `&`



`*intPtr = 6` 

Dereferenzierungsoperator `*`



# Zeiger und Referenzen

## Referenzen

Neben Zeigervariablen gibt es *Referenzen*.

- Referenzen sind intern Zeiger.
- Referenzen kann man sich als „anderen Namen“ für eine Variable vorstellen:

```
1  int   x = 5;  
2  int& y = x; // anderer Name fuer x  
3  y = 4;     // bedeutet x = 4!
```

# Zeiger und Referenzen

Beispiele für Zeiger und Referenzen:

```
1  int i, j, *p, *q;
2  int &s = i, &r = j; // Referenzen muessen initialisiert werden
3
4  r = 2;           // OK, j (==r) hat jetzt Wert 2
5  r = &j;         // BAD, &j hat falschen Typ 'int *' statt 'int'
6
7  p = 2;           // BAD, 2 hat falschen Typ 'int' statt 'int *'
8  p = &j;         // OK, p enthaelt nun Adresse von j
9
10 if (p == q)     // WAHR, falls p, q auf die gleiche Adresse zeigen
11                // Der Inhalt der Adresse ist egal.
12
13 if (r == s)     // WAHR, falls Inhalt von j (Referenz von r) und i
14                // (Referenz von s) gleich ist. Die Adresse der
15                // Variablen ist egal!
```

# Zeiger und Referenzen

(Mehrdimensionale) Felder sind nichts anderes als Zeiger auf den ersten Feldeintrag:

```
1  int a[5];           // Feld von 5 int-Variablen
2
3  a[0] = 3;
4  std::cout << *a;  // output: 3 (= a[0])
5  std::cout << &a;  // output: Adresse von a[0]
6
7  int a[3][20];      // 3 x 20 - Feld
```



# Zeiger und Referenzen

Zeiger erlauben beliebig komplizierte Konstrukte:

```
1  int **p;           // p enthaelt Zeiger, die auf Variablen des
2                      // Typs 'int' zeigen
3
4  int *p[10];       // p ist ein Feld, das 10 int-Variablen enthaelt,
5                      // denn die Klammern [] binden staerker als *.
6                      // D.h. int * ist der Typ der Feldelemente!
7
8  int (*p)[10];     // Jetzt hingegen ist p ein Zeiger auf ein
9                      // Feld mit 10 int-Komponenten
10
11 int* f()           // f ist eine parameterlose Funktion, die
12                      // einen Zeiger auf int zurueckgibt.
13                      // Runde Klammern binden staerker, wie oben!
```

# Klassen und Datentypen

Eine C++-Klasse definiert einen Datentyp. Ein Datentyp ist eine Zustandsmenge mit Operationen, die die Zustände ineinander überführen. Beispiel komplexe Zahlen:

```
1 #include <iostream>
2
3 class ComplexNumber { // a class definition
4 public:
5     void print()
6     {
7         std::cout << u << " + i * " << v << std::endl;
8     }
9
10 private:
11     double u, v;
12 }; // ';' is very important!
13
14 int main(int argc, char** argv)
15 {
16     ComplexNumber a, b, c;
17     a.print(); // print uninitialized (!) number
18
19     //c = a + b; // where defined?
20
21     return 0;
22 }
```

# Klassen und Datentypen

- C++ ermöglicht die Kapselung des Datentyps, d.h. Trennung von Implementierung und Interface.
  - `public`: Interface-Spezifikation,
  - `private`: Daten und Implementierung.
- Von außen kann nur auf Methoden und Daten im `public`-Teil zugegriffen werden.
- Implementierung der Methoden kann ausserhalb der Klasse geschehen.

# Konstruktoren

- Der Befehl `ComplexNumber a;` veranlasst den Compiler, eine Instanz der Klasse zu erzeugen.
- Zur Initialisierung wird ein Konstruktor aufgerufen.
- Es können verschiedene Konstruktoren existieren (Polymorphismus!).
- In gewissen Fällen erzeugt der Compiler default-Konstruktoren.

# Konstruktoren

Die Klasse `ComplexNumber` mit zwei Konstruktoren:

```
1  class ComplexNumbers
2  {
3  public:
4      // some constructors
5      ComplexNumber() { u = 0; v = 0; }    // default
6
7      ComplexNumber(double re, double im) // initialize with
8      { u = re; v = im; }                // given numbers
9
10     void print() { ... }
11
12 private:
13     double u, v;
14 };
```

# Konstruktoren

```
1  // usage of the complex number class
2  int main (int argc, char** argv)
3  {
4      ComplexNumber a(3.0,4.0);
5      ComplexNumber b(1.0,2.0);
6      ComplexNumber c;
7
8      a.print();           // output: 3 + i * 4
9      c = a + b;         // where defined ?
10
11     return 0;
12 };
```

# Destruktoren

- Dynamisch erzeugte Objekte können vernichtet werden, falls sie nicht mehr benötigt werden.
- Das Löschen von Objekten übernimmt der Destruktor.
- Destruktoren sind insbesondere auszuimplementieren, wenn die Klasse Zeiger (etwa Felder!) enthält.
- Ebenso bei Verwendung von dynamischen Speicher in einer Klasse.
- Stichworte zur dynamischen Speicherverwaltung: `new`, `delete`.

# Überladen von Operatoren

## Operationen für abstrakte Datentypen (Klassen)

- Die Anweisung  $a + b$  ist für `ComplexNumber` nicht definiert und muss erklärt werden.
- Für Klassen können verschiedene Operationen wie  $++$ ,  $+$ ,  $*$ ,  $/$ ,  $-$ ,  $--$ ,  $=$ ,  $!=$ ,  $!$ ,  $==$ ,  $[]$ , ... ausimplementiert werden.
- Klassen, die den Operator  $()$  implementieren, heißen *Funktoren*.



# Templates

## Templates – Code-Schablonen

- Templates ermöglichen die Parametrisierung von Klassen und Funktionen.
- Templates entkoppeln Funktionen oder Algorithmen vom Datentyp.
- Zulässige Parameter:
  - Standard-Typen wie `int`, `double`, ...,
  - Eigene Typen (Klassen),
  - Templates.
- Templates ermöglichen statischen Polymorphismus (siehe später).
- Templates verallgemeinern Code → „Generische Programmierung“.

# Beispiel: Templatisierte Funktion

```
1 #include <iostream>
2
3 // example for a function template
4 template <class T>
5 T getMax(const T& a, const T& b)
6 {
7     return (a>b) ? a : b;
8 }
9
10 int main ()
11 {
12     int    i = 5, j = 6, k;
13     double l = 10.4, m = 10.25, n;
14
15     k = getMax<int>(i,j); n = getMax<double>(l,m);
16     std::cout << k << ", " << n << std::endl;
17     // output: 6, 10.4
18
19     return 0;
20 }
```

# Beispiel: Templatisierte Array-Klasse

```
1 // a class that takes a template parameter
2 template <typename T> class Array
3 {
4 public:
5     int add(const T& next, int n);           // add 'next' at data[n]
6     T& at(int n);
7     T& operator [] (int n) { return at(n); } // overloaded operator
8
9 private:
10    T data[10];
11 };
12
13 // add a new data member
14 template <class T> int Array<T>::add(const T& next, int n)
15 {
16     if (n >= 0 && n < 10)
17     {
18         data[n] = next; return 0;
19     }
20     else return 1;
21 }
```

# Beispiel: Templatisierte Array-Klasse

```
23 // get a certain data member
24 template <class T> T& Array<T>::at(int n)
25 {
26     if (n>=0 && n<10) return data[n];
27 }
28
29 // main program
30 #include <iostream>
31 int main()
32 {
33     Array<int> c; c.add(3,0); c.add(4,5); c.add(0,1);
34     std::cout << c.at(5) << std::endl;
35     // output: 4
36
37     Array<char> d; d.add('x',9);
38     std::cout << d.at(9) << std::endl;
39     // output: x
40
41     return 0;
42 }
```

# Weiteres zu Templates

- Templates sind die Grundlage der generischen Programmierung in C++!
- Templates können ausspezialisiert werden (für Sonderfälle).
- Mehrere Template-Parameter sind möglich.
- Parameter können default-Werte haben.

# STL – Die Standard Template Library

In C++ gibt es viele vorgefertigte Template-Container, die ohne Kenntnis der Implementierung verwendet werden können. Sie sind in einer Bibliothek, der STL, zusammengefasst.

## Die STL

- ist eine Sammlung von Template Klassen und Algorithmen,
- bietet viele Containerklassen (Klasse, die eine Menge anderer Objekte verwaltet),
- hat dabei vereinheitlichte User-Interfaces für die Container,
- ist in der C++-Standardbibliothek enthalten.

# Container-Arten der STL

Die STL stellt verschiedene Arten von Containern bereit:

- Sequentielle Container  
Beispiele: Vektoren, Listen
- Container adapter  
Eingeschränktes Interface zu beliebigen Containern  
Beispiele: Stacks, Queues
- Assoziative Container  
Schlüssel-Wert Container  
Beispiel: Maps, Multimaps

# Vor- und Nachteile der STL

## Vor- und Nachteile der STL

- + Dynamisches Speichermanagement
- + Vermeidung von array-Überläufen
- + Hohe Qualität der Container
- + Optimierbarkeit durch statischen Polymorphismus
- Unübersichtliche Fehlermeldungen
- Hohe Anforderungen an Compiler und Entwickler
- Nicht alle Compiler sind STL-fähig (obwohl die STL im C++-Standard enthalten ist)



# Beispiele für die Verwendung von STL-Containern: vector

```
1 #include <iostream>
2 #include <vector>
3
4 int main() {
5     // example usage of an STL vector
6     int result = 0;
7     std::vector<int> x(100);
8
9     for (int j=0; j<100; j++) x[j] = j;
10
11    x.push_back(100);
12
13    for (int j=0; j<x.size(); j++)
14        result += x[j];
15
16    // output: 5050
17    std::cout << result << std::endl;
18
19    return 0;
20 }
```

# Das Iterator-Interface

Iteratoren bieten Zugriff auf die Elemente eines Containers. Sie

- Iterieren über die Elemente eines Containers,
- Liefern Zeiger auf Container-Elemente,
- Werden von jeder Container-Klasse bereitgestellt,
- Gibt es in „rw“- und einer „w“-Varianten,
- Helfen, array-Überläufe zu vermeiden.
- Die Iteratoren werden von vielen STL-Algorithmen wie Sortieren, Suchen u. ä. verwendet.

# Beispiel: Iteratorieren über eine Map

```
1 #include <iostream>
2 #include <map>
3 #include <cstring>
4
5 int main()
6 {
7     // example usage of an STL-map
8     std::map <std::string, int> y;
9
10    y["eins"] = 1; y["zwei"] = 2;
11    y["drei"] = 3; y["vier"] = 4;
12
13    std::map<std::string, int>::iterator it;
14    //std::map::string, double::iterator it; // nice error message :-)
15    for (it=y.begin(); it!=y.end(); ++it)
16        std::cout << it->first << ": " << it->second << std::
17            endl;
18    // output: 1: eins
19    // 2: zwei ... usw.
20    return 0;
21 }
```

# Ein Nachteil der STL: Die Fehlermeldung

Falls in diesem Beispiel der falsche Typ eines Iterators instantiiert wird, spuckt der Compiler folgende Fehlermeldung aus:

```
1 map.cc: In function 'int main()':
2 map.cc:15: error: no match for 'operator=' in 'it = y.std::map<_Key,
  _Tp, _Compare, _Alloc>::begin [with _Key = std::basic_string<char,
  std::char_traits<char>, std::allocator<char> >, _Tp = int,
  _Compare = std::less<std::basic_string<char, std::char_traits<
  char>, std::allocator<char> > >, _Alloc = std::allocator<std::
  pair<const std::basic_string<char, std::char_traits<char>, std::
  allocator<char> >, int> >]()'
3 /usr/include/c++/4.4/bits/stl_tree.h:154: note: candidates are: std::
  _Rb_tree_iterator<std::pair<const std::basic_string<char, std::
  char_traits<char>, std::allocator<char> >, double> >& std::
  _Rb_tree_iterator<std::pair<const std::basic_string<char, std::
  char_traits<char>, std::allocator<char> >, double> >::operator=(
  const std::_Rb_tree_iterator<std::pair<const std::basic_string<
  char, std::char_traits<char>, std::allocator<char> >, double>
  >&)
4 map.cc:15: error: no match for 'operator!=' in 'it != y.std::map<_Key,
  _Tp, _Compare, _Alloc>::end [with _Key = std::basic_string<char,
  std::char_traits<char>, std::allocator<char> >, _Tp = int,
  _Compare = std::less<std::basic_string<char, std::char_traits<
  char>, std::allocator<char> > >, _Alloc = std::allocator<std::
  pair<const std::basic_string<char, std::char_traits<char>, std::
  allocator<char> >, int> >]()'
5 [...]
```

# Algorithmen

## Algorithmen, die die STL bereitstellt

Die STL enthält viele hilfreiche Algorithmen, die

- Elemente eines Datencontainers manipulieren können,
- die Iteratoren zum Elementzugriff verwenden.

Beispiele:

- Sortieren
- Suchen
- Kopieren
- Umkehren der Reihenfolge im Container
- ...

# Algorithmen

## Beispiel: Sortier-Algorithmen für Vektoren

- Verschiedene Sortierungen für Vektoren stehen bereit
- Unterscheidung z.B. durch:
  - Benutzte Vergleichsoperation
  - Bereich der Sortierung
  - Stabilität
- Komplexität des Standard-Sortierers für Vektoren:
  - $O(n \cdot \log n)$  ideal
  - $O(n^2)$  ungünstigster Fall
- eigene Vergleichsfunktionen möglich
- Achtung: (doppelt verkettete) Listen sind auf Einfügen und Löschen von Elementen optimiert  $\Rightarrow$  spezielle Sortier-Algorithmen

# Algorithmen

Beispiel: Verwendung eines Sortier-Algorithmus für Vektoren

```
1 // a vector for integers
2 vector<int> x;
3
4 x.push_back(23); x.push_back(-112);
5 x.push_back(0); x.push_back(9999);
6 x.push_back(4); x.push_back(4);
7
8 // sort the integer vector
9 sort(v.begin(), v.end());
10
11 // output: -112 0 4 4 23 9999
12 for (int i = 0; i<x.size(); i++)
13     cout << x[i] << "\t";
```

# Vererbung in C++

## Vererbung

- Datentyp gibt seine Abstraktion an anderen Datentyp weiter.
- „Ist-ein“ Relation: Dreieck ist ein geometrisches Objekt, d.h. Klasse Dreieck ist von Klasse GeomObject abzuleiten.
- Nicht zu verwechseln mit einer „Enthält-ein“ Relation: Ein Dreieck enthält drei Punkte (aber ein Dreieck ist kein Punkt → keine Vererbung).



# Vererbung in C++

```
1  // example of inheritance in C++
2  class Matrix
3  {
4  public:
5      ...
6  private:
7      double data[3][3]; // (3 x 3)-Matrix
8  };
9
10 // the derived class: symmetrical matrix is a matrix
11 class SymMatrix: public Matrix
12 {
13 public:
14     double getEntry(int i, int j) { return data[i][j]; }
15         // error: data private in base class
16     ...
17     // constructor calls a constructor of base class
18     SymMatrix() : Matrix() { ... }
19 };
```

# Verschiedene Arten der Vererbung in C++

Bei Vererbung ist darauf zu achten, auf welche Member die abgeleitete Klasse Zugriff erhält → verschiedene Arten der Vererbung:

- **private**-Vererbung:  
Alle Elemente der Basisklasse werden **private** Member der abgeleiteten Klasse.
- **public**-Vererbung:  
**public**-Member der Basisklasse werden **public**-Member der abgeleiteten Klasse, **private** wird zu **private**.

# Virtuelle Funktionen

Virtuelle Funktionen erlauben, dass abgeleitete Klassen Methoden der Basisfunktionen überdecken:

```
1  class GeomObject           // base class for geo objects
2  {                           // 'area' is a function member
3  public:
4
5     virtual double area() { return 0.0; }
6     ...
7  };
8
9  class Triangle : public GeomObject
10 {                             // a derived class
11 public:                          // has a specific member 'area' as well
12
13     double area() { return 0.5 * a * h; }
14     ...
15 private:
16
17     double h, a;
18 };
```

# Virtuelle Funktionen

Wenn Basis- und abgeleitete Klasse enthalten Mitglieder gleichen Namens enthalten – Welche Methode wird aufgerufen?

```
19 int main() {
20     GeomObject* geo;
21     Triangle t;
22
23     geo = &t;
24     std::cout << geo->area() << std::endl; // ??
25
26     return 0;
27 };
```

## Lösung:

- Falls nicht anders angegeben, die Methode des Basisobjekts (!).
- Durch das Schlüsselwort `virtual` wird der Aufruf an die abgeleitete Klasse durchgereicht.
- Stichwort **Late Binding**, d.h. Zuordnung Methodenname  $\longleftrightarrow$  Implementierung erst zur Laufzeit.

# Dynamischer Polymorphismus

Die Technik der späten Typ-Bindung mit virtuellen Funktionen hat einen eigenen Namen:

## Dynamischer Polymorphismus

- Genaue Typbestimmung zur Laufzeit.
- Realisierung über:
  - Virtuelle Funktionen (*Function Lookup Table*),
  - Überschreiben von Funktionen.

# Dynamischer Polymorphismus

Die Technik der späten Typ-Bindung mit virtuellen Funktionen hat einen eigenen Namen:

## Dynamischer Polymorphismus

- Genaue Typbestimmung zur Laufzeit.
- Realisierung über:
  - Virtuelle Funktionen (*Function Lookup Table*),
  - Überschreiben von Funktionen.

## Vorteile des dynamischen Polymorphismus

- Basisklassen sind Obermengen der abgeleiteten Klassen.
- Algorithmen, die auf Basisklasse operieren, können auch auf den abgeleiteten Klassen operieren.
- Beispiel: Liste, die Pointer auf `GeomObjects` speichert. Pointer kann auf ein `Triangle`-Objekt oder jedes andere `GeomObject`-Objekt zeigen!

# Abstrakte Basisklassen und Schnittstellen

Oftmals sind virtuelle Funktionen nicht sinnvoll in der Basisklasse definierbar.  
Dann

- Deklaration der Funktion in der Basisklasse als „rein virtuell“:
- Abgeleitete Klassen müssen rein virtuelle Funktionen implementieren.

Klassen mit einer (oder mehreren) rein virtuellen Funktionen heißen **abstrakte Basisklassen**. Sie sind reine Schnittstellen-Spezifikationen.

# Abstrakte Basisklassen und Schnittstellen

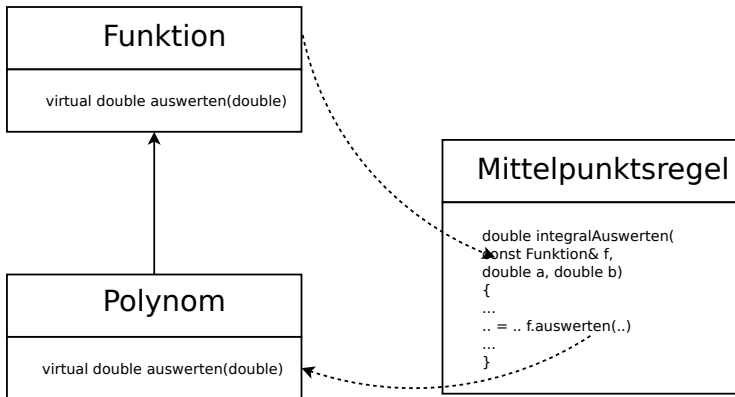
## Abstrakte Basisklassen

- Enthält eine Basis-Klasse eine rein virtuelle Funktionen, heisst die Klasse abstrakt.
- Von abstrakten Klassen können keine Objekte instanziiert werden.
- Eine abstrakte Basisklasse definiert ein einheitliches Interface.
- Algorithmen operieren auf diesem Interface, d.h. unabhängig der tatsächlichen Implementierung.



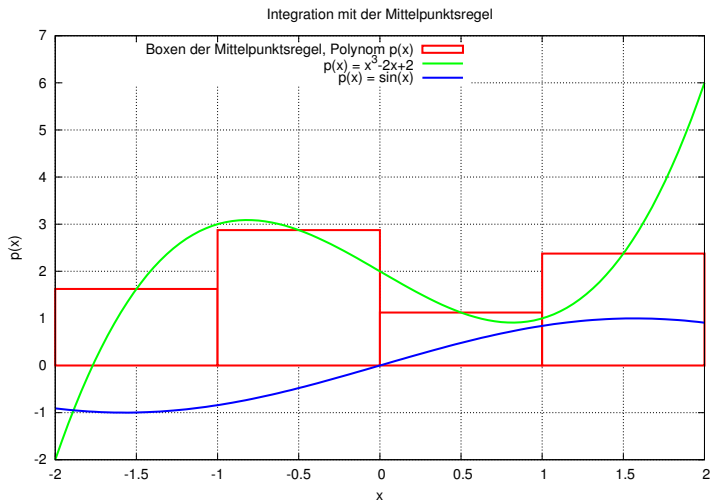
# Abstrakte Basisklassen und Schnittstellen

Beispiel:



# Abstrakte Basisklassen und Schnittstellen

Beispiel:



# Abstrakte Basisklassen und Schnittstellen

## Erklärung des Beispiels:

- Der Algorithmus `Mittelpunktsregel` integriert beliebige Funktionen
- Es existiert eine (u.U. abstrakte) Basis-Klasse für Funktionen
- Allgemeine Funktionen wie Polynome, Sinus, ... werden von der Basisklasse abgeleitet.
- `Mittelpunktsregel` operiert nur auf der Funktionsschnittstelle!

Es folgt der Code zum Beispiel, es wird ein Sinus integriert:

# Abstrakte Basisklassen und Schnittstellen

```
1 // main.cpp: Test der Integration mit der Funktions-Schnittstelle
2
3 // System-Header inkludieren
4 #include <cstdlib>
5 #include <iostream>
6 #include <cmath>
7
8 // eigene Header inkludieren
9 #include "sinus.h"
10 #include "mittelpunktsregel.h"
11
12 // main-Funktion
13 int main(int argc, char** argv)
14 {
15     // Objekt der Klasse Mittelpunktsregel anlegen
16     MittelpunktsRegel mipur(100);
17
18     // Sinus-Objekt erzeugen
19     Sinus s1;
20
21     // Integration der Polynome testen
22     std::cout << "Integral Sinus: " << mipur.integralAuswerten(s1, -2.0, 2.0) << std::endl;
23     std::cout << "Integral Sinus: " << mipur.integralAuswerten(s1, -3.1415, 6.2890) << std::endl;
24     std::cout << std::endl;
25
26     return 0;
27 }
```

# Abstrakte Basisklassen und Schnittstellen

```
1 // mittelpunktregel.h: Die Klasse Mittelpunktsregel
2
3 #include "funktion.h"
4
5 #ifndef __MIPUREGEL_H_
6 #define __MIPUREGEL_H_
7
8 // Mittelpunktsregel-Klasse
9 class MittelpunktsRegel
10 {
11 public:
12     MittelpunktsRegel(int anzahl) : n(anzahl) {}
13     ~MittelpunktsRegel() {};
14
15     // Integral einer Funktion auswerten
16     double integralAuswerten(Funktion& f, double a, double b) const
17     {
18         double erg = 0.0;
19         double h = (b-a)/(1.0*n); // Laenge der Intervalle
20
21         // Anteile der einzelnen Boxen aufsummieren
22         for (int i=0; i<n; ++i)
23         {
24             double x = a + i*h + 0.5*h; // Intervall-Mittelpunkt
25             erg += h * f.auswerten(x); // Funktionsauswertung
26         }
27
28         return erg;
29     }
30
31 private:
32     int n;
33 };
34
35 #endif
```

# Abstrakte Basisklassen und Schnittstellen

```
1 // funktion.h: Abstrakte Schnittstellenklasse fuer Funktionen
2
3 // Inklusions-Waechter
4 #ifndef __FUNKTION_H_
5 #define __FUNKTION_H_
6
7 // Abstrakte Basisklasse fuer Funktionen
8 class Funktion
9 {
10 public:
11     // Konstruktoren
12     Funktion() {};
13
14     // virtueller Destruktor
15     virtual ~Funktion() {};
16
17     // Funktion auswerten, rein virtuell !
18     virtual double auswerten(double x) const = 0;
19
20 private:
21 };
22
23 #endif
```

# Abstrakte Basisklassen und Schnittstellen

```
1 #include <cmath>
2
3 // inkludiere Basisklasse / Schnittstelle
4 #include "funktion.h"
5
6 #ifndef __SINUS_H_
7 #define __SINUS_H_
8
9 // Kapselungs-Klasse fuer den Sinus
10 class Sinus : public Funktion
11 {
12 public :
13     Sinus() {}
14
15     // Erfuellung der Schnittstelle
16     double auswerten(double x) const
17     {
18         return sin(x);
19     }
20
21 private :
22 };
23
24 #endif
```

# Statischer vs. Dynamischer Polymorphismus

## Dynamischer Polymorphismus

- Der „ganz normale“ Polymorphismus.
- Anwendung: Interface-Definitionen über abstrakte Basisklassen.
- Erlaubt Austauschbarkeit zur Laufzeit.
- Verhindert eine Vielzahl von Optimierungen, z.B.
  - inlining,
  - loop unrolling.
- Zusätzlicher Overhead (Function Lookup tables).



# Statischer vs. Dynamischer Polymorphismus

## Dynamischer Polymorphismus

- Der „ganz normale“ Polymorphismus.
- Anwendung: Interface-Definitionen über abstrakte Basisklassen.
- Erlaubt Austauschbarkeit zur Laufzeit.
- Verhindert eine Vielzahl von Optimierungen, z.B.
  - inlining,
  - loop unrolling.
- Zusätzlicher Overhead (Function Lookup tables).

## Statischer Polymorphismus

- Erlaubt lediglich Austauschbarkeit zur Compile-Zeit.
- Erlaubt alle Optimierungen.
- Längere Kompilierzeiten.
- Reduziert den Overhead der Interfaces.

# Statischer vs. Dynamischer Polymorphismus

## Techniken zur Realisierung der Polymorphismen:

statisch:

- Templates
- Überladen von Funktionen
- „Engine“-Technik

dynamisch:

- virtuelle Funktionen
- Überschreiben von Funktionen

→ Statischer Polymorphismus erlaubt es, Algorithmen und Datenstrukturen zu trennen (Interfaces), wird aber zur Compilezeit ausgewertet und erlaubt exzessives Optimieren.

# Beispiel: Dynamischer Polymorphismus bei Matrix-Klasse

```
1 // base class
2 class Matrix {
3     virtual bool isSymmetricPositiveDefinit();
4 };
5
6 // symmetric matrices
7 class SymmetricMatrix : public Matrix {
8     virtual bool isSymmetricPositiveDefinit() { ... };
9 };
10
11 // upper triangular matrices
12 class UpperTriangularMatrix : public Matrix {
13     virtual bool isSymmetricPositiveDefinit()
14     { return false };
15 };
```

Die Abfrage „Ist die Matrix symmetrisch positiv definit wird von der Basisklasse an die abgeleiteten Klassen durchgereicht.

# Beispiel: Dynamischer Polymorphismus bei Matrix-Klasse

```
1 // base class
2 class Matrix {
3     virtual bool isSymmetricPositiveDefinit();
4 };
5
6 // symmetric matrices
7 class SymmetricMatrix : public Matrix {
8     virtual bool isSymmetricPositiveDefinit() { ... };
9 };
10
11 // upper triangular matrices
12 class UpperTriangularMatrix : public Matrix {
13     virtual bool isSymmetricPositiveDefinit()
14     { return false };
15 };
```

⇒ Der Ansatz mit virtuellen Funktionen ist hier unter Umständen nicht performant. Ausweg: Statischer Polymorphismus (hier: Engine-Konzept).

# Das Engine-Konzept

```
1 // example delegation of a method to an engine
2 template<class Engine> class Matrix {
3     Engine engineImp;
4
5     bool IsSymmetricPositiveDefinit()
6     { return engineImp.isSymPositiveDefinite(); }
7 };
8
9 // some engine classes
10 class Symmetric {
11     bool isSymPositiveDefinite()
12     { /* check if matrix is spd. */}
13 };
14
15 class UpperTriangle {
16     bool isSymPositiveDefinite(){ return false; }
17 };
```

# Das Engine-Konzept

```
1 // usage (compiler evaluates Type of A !)  
2 UpperTriangle upper; // create upper matrix  
3  
4 Matrix<UpperTriangle> A(upper); // pass upper to some  
5 // constructor of A  
6  
7 std::cout << A.isSymPositiveDefinite() << std::endl;
```

# Das Engine-Konzept

## Der Engine-Ansatz

- Aspekte der verschiedenen Matrizen sind in den Engines (`Symmetric` oder `UpperTriangular`) „verpackt“.
- `Matrix` delegiert die meisten Operationen an die Engine – zur Compile-Zeit!
- Dynamischer Polymorphismus durch statischen (Templates) ersetzt.
- Nachteil: Der Basis-Typ (`Matrix`) muss alle Methoden *aller* Subklassen enthalten.
- Der Trick, dies zu vermeiden, nennt sich „Barton-Nackmann-Trick“.

# Template Meta Programming

Entscheidende Technik des statischen Polymorphismus sind Templates. Mit den Templates ist eine Programmieretechnik für Meta-Programme entstanden:

## Template Meta Programme

- Idee: Der Compiler agiert als Interpreter.
- Ersetzen von Kontrollstrukturen wie `if` und Loops durch Spezialisierung und Rekursion.
- Theoretisch: Turing-Maschine durch Template Programming möglich.



# Beispiel eines Template Meta Programms: Fakultät (T. Veldhuizen)

```
// factorial realized as TMP
template<int N> class Factorial
{
public:
    enum { value = N * Factorial<N-1>::value };
};

// a specialization is needed to break
class Factorial<1>
{
public:
    enum { value = 1 };
};
```

⇒ der Wert  $N!$  ist zur Kompilierzeit als `Factorial<N>::value` verfügbar durch erzeugen eines Objekts der Klasse:

```
Factorial<12> a; // ergibt 12!
```

# Weiteres Beispiel: Fibonacci-Zahlen

Das folgende Listing zeigt ein Programm, das die Fibonacci-Zahlen zur Compile-Zeit und zur Laufzeit auswertet und die Zeiten misst:

```

1 // fibonacci.cc:
2 // Compute fibonacci numbers at run- and compile time and compare
3 // the time used for it.
4 #include <iostream>
5 #include <cstdio>
6
7 // rekursive runtime variant
8 unsigned long Fibonacci_Simple(unsigned long n)
9 {
10     if (n==0) return 0;
11     else if (n==1) return 1;
12     else
13         return Fibonacci_Simple(n-1) + Fibonacci_Simple(n-2);
14 };
15
16 // rekursive template instantiations
17 template<unsigned long N>
18 class Fibonacci
19 {
20 public:
21     enum { value = Fibonacci<N-1>::value +
22             Fibonacci<N-2>::value };
23 };

```

# Weiteres Beispiel: Fibonacci-Zahlen

Das folgende Listing zeigt ein Programm, dass die Fibonacci-Zahlen zur Compile-Zeit und zur Laufzeit auswertet und die Zeiten misst:

```
25 // template specializations to abort iterative template instantiation
26 template<>
27 class Fibonacci<1> {
28 public:
29     enum { value = 1 };
30 };
31
32 template<>
33 class Fibonacci<0> {
34 public:
35     enum { value = 0 };
36 };
37
38 // main program
39 int main()
40 {
41     // call of recursive Fibonacci
42     clock_t begin_rec = clock();
43     unsigned long result = Fibonacci_Simple(45);
44     clock_t end_rec = clock();
45     printf("Recursive Fib(40) = %ld  computed in %lf secs.\n",
46           result, (double)(end_rec - begin_rec)/CLOCKS_PER_SEC);
```

# Weiteres Beispiel: Fibonacci-Zahlen

Das folgende Listing zeigt ein Programm, das die Fibonacci-Zahlen zur Compile-Zeit und zur Laufzeit auswertet und die Zeiten misst:

```
47
48 // call of templated Fibonacci
49 begin_rec = clock();
50 result = Fibonacci<45>::value;
51 end_rec = clock();
52 printf("Templated Fib(40) = %ld  computed in %lf secs.\n",
53        result, (double)(end_rec - begin_rec)/CLOCKS_PER_SEC);
54
55 return 0;
56 }
```

Zeiten bei mir für  $n = 45$ :

- Rekursive Funktion: 31 s (da nicht optimiert durch z.B. Werte-Caches),
- Templates : 0 s (klar :-)).

# Template Meta Programming

## Wofür brauchen wir Template Meta Programme?

- Idee: Hybrider Ansatz, also eine Zerlegung des Programms in
  - ein TMP, läuft zur Kompilier-Zeit
  - ein „normales Programm“
- ⇒ Laufzeit-Verbesserungen (etwa durch durch massives Inlining)
- Generische Programmierung und TMP werden fast immer dann verwendet, wenn eine Bibliothek gleichzeitig:
  - performant und
  - flexibelsein soll!
- Spezialisierte Algorithmen für „kleine“ Klassen
- Beispiele: komplexe Zahlen, Tensoren, Gitter, ...

# Template Spezialisierungen

Eine wichtige Technik bei der Arbeit mit Templates ist die sogenannte „Template-Spezialisierung“:

- Abweichungen von der Template-Schablone werden explizit ausprogrammiert,
- Etwa für Datentypen, die Laufzeit- oder Speicher-effizient implementiert werden können.

# Template Spezialisierungen

Beispiel zur Spezialisierung von Templates: Sortierung

```
// a sorter class with two template parameters
template <class T, int N> Sorter
{
    void sort(T* array) { /* sort here */ };
    ...
};

// sorting a single field array is simple...
template <class T> Sorter<T,1>
{
    void sort(T* array) {};
    ...
};
```

# Template Spezialisierungen

Wofür brauchen wir Template-Spezialisierung?

Viele Algorithmen (auch untemplatisierte) können durch Spezialisierung beschleunigt werden. Beispiel:

```
// dot-product  
double dotproduct(const double* a, const double* b, int N)  
{  
    double result = 0.0;  
    for (int i=0; i<N; i++)  
        result += a[i]*b[i];  
    return result;  
}  
  
// specialization for small N (e.g. N=3) speeds up calculation  
double dotproduct(const double* a, const double* b, 3)  
{  
    return a[0]*b[0] + a[1]*b[1] + a[2]*b[2];  
}
```



# Weiterführende Literatur

Es existiert eine Vielzahl Literatur zu den ausschnittsweise vorgestellten Optimierungsmöglichkeiten durch die vorgestellten Techniken (insb. Statischer Polymorphismus).

## Literatur zu „Scientific Computing with C++“

- N. Josuttis: C++ Templates – The Complete Guide
- T. Veldhuizen: Techniques for Scientific C++
- T. Veldhuizen: Template Metaprogramming
- E. Unruh: Prime Number Computation (historisches Beispiel für Template Meta Programming)