C++ für Wissenschaftliches Rechnen

Dan Popović

Interdisziplinäres Institut für Wissenschaftliches Rechnen, Universät Heidelberg

24. Oktober 2011

C++ für Wissenschaftliches Rechnen

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

+ schnellerer Code
+ gute Optimierungen

- nur prozedurale Sprachen
- wenig Flexibilität
- schlechte Wartbarkeit

C++

+ gute Wartbarkeit
+ schnellerer Code
+ gute Integration mit Fortran und C Bibliotheken
+ hoher Abstraktionsgrad

- schwerer zu optimieren
- meistens mehr Speicherverbrauch

Literatur

Literatur zu C++

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

Grundlegende vorausgesetzte C++-Kenntnisse

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

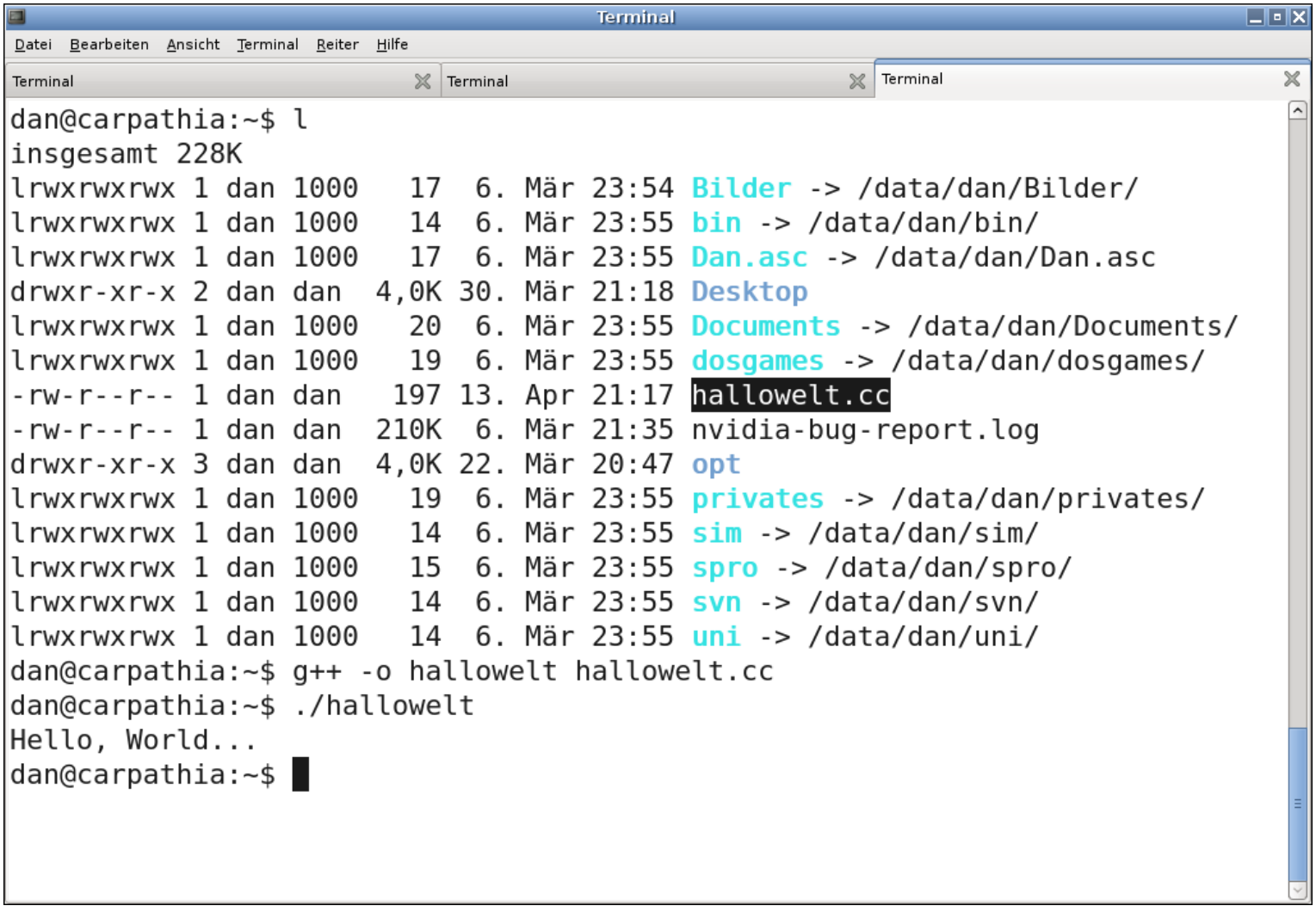
- Grundlegende Datentypen und Kontrollstrukturen:
  - `int`, `double`, `bool`, `char`, ...
  - conditionals: `if`, `switch`, ...
  - loops: `for`, `while`
- Grundlegende Programmstrukturen:
  - Funktionen
  - Rekursive und iterative Programmierung
- Zeiger und Referenzen
- Klassen und Vererbung
  - `class`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

Ein erstes Programm: Hallo, Welt!

```
1  // include i/o library
2  #include <iostream>
3
4  // main is always the first function to be called
5  // argc: counts program arguments
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 function
12   return 0;
13 }
```

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

Übersetzen unter Linux



Datentypen in C++

Die elementaren Datentypen in C++ sind:

- **int**: Ganzzahlen, `int a = 2;`
- **long**: Große Ganzzahlen, `long a = 1e15;`
- **char**: Zeichen, `char a = 'b';`
- **float**: Gleitkommazahlen 4 Byte, `float b = 3.14;`
- **double**: Gleitkommazahlen 8 Byte, `double c = 3.1415;`
- **bool**: Wahrheitswerte, `bool d = false;`

Daneben gibt es eine Vielzahl erweiterter Datentypen und die Möglichkeit, beliebige eigene zu definieren.

Vezweigungen

`if`-Verzweigungen:

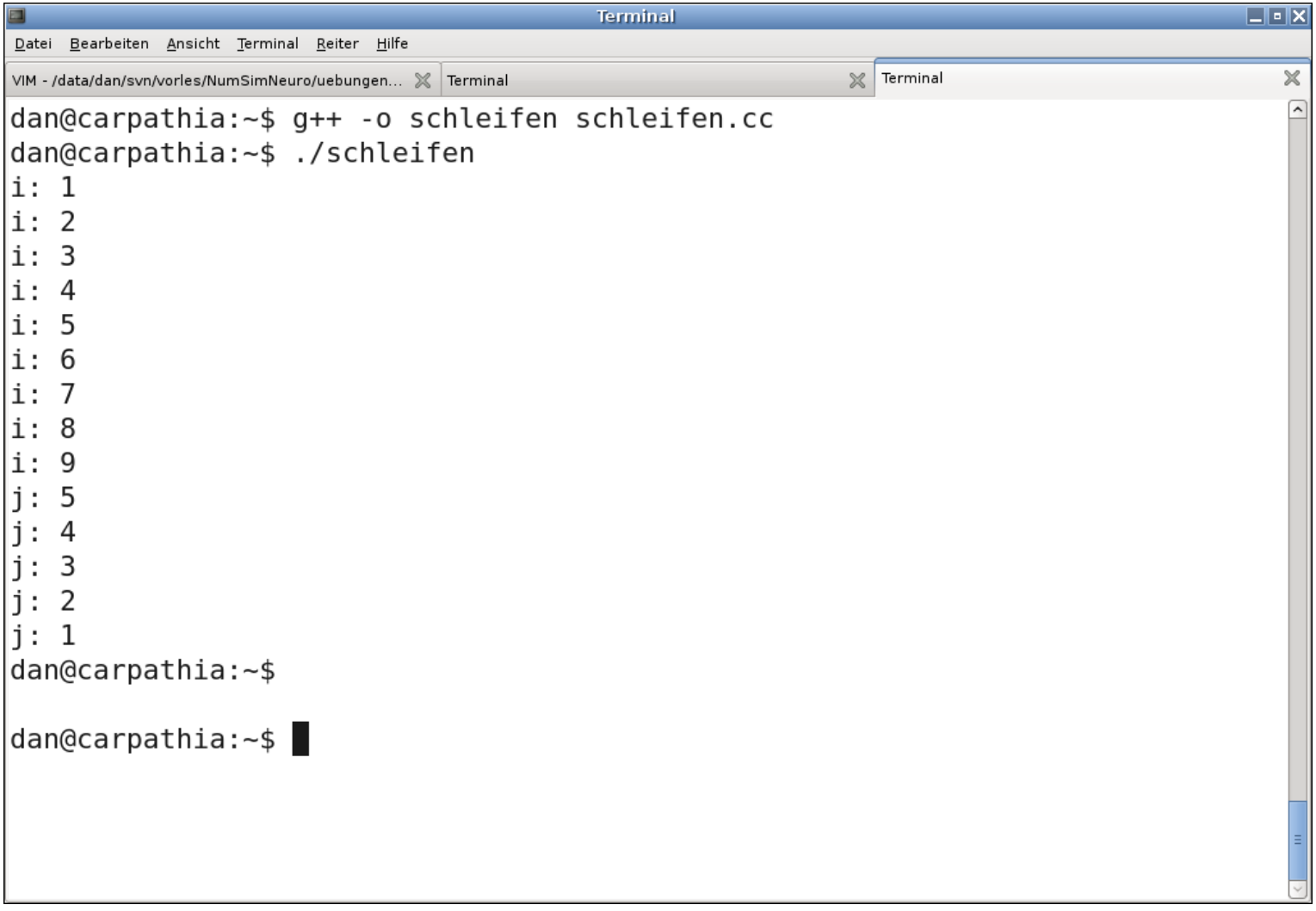
```
1  #include <iostream>
2
3  int main(int argc, char** argv)
4  {
5    int a = 5;   // an integer variable
6    if (a > 0)
7    {
8      std::cout << "Hello, World..." << std::endl;
9    }
10   else
11   {
12     return 1; // emit an error
13   }
14
15   return 0;
16 }
```

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



Funktionen

Funktionen

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

In C++ haben sie immer die Syntax

```
1 Rueckgabetyp 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` $\longrightarrow$ Ausgabe: `0xA0000000`
- Adresswerte können in sogenannten Zeigervariablen gespeichert werden.
- Zeiger haben die Syntax `typ *name`,
  wobei typ der Typ der Variablen (des Objekts) ist, auf den der Zeiger name zeigt.

  Beispiel: `int* z = &x;`

Zeiger und Referenzen

Der Dereferenzierungsoperator *

- `int* z = &x;`

  Über die Zeigervariable `z` kann der Wert der Variablen `x` verändert werden (Dereferenzierungsoperator `*`):

  `*z = 4711;` bedeutet, daß die Variable `x` den Wert 4711 zugewiesen bekommnt.
- Achtung! Mit dem Dereferenzierungsoperator wird nicht der Zeiger `z` verändert (`z` zeigt immer noch auf die Speicheradresse von `x`).

Zeiger und Referenzen

Der Dereferenzierungsoperator *

- `int* z = &x;`

  Über die Zeigervariable `z` kann der Wert der Variablen x verändert werden (Dereferenzierungsoperator `*`):

  `*z = 4711;` bedeutet, daß die Variable `x` den Wert 4711 zugewiesen bekommnt.

- Achtung! Mit dem Dereferenzierungsoperator wird nicht der Zeiger `z` verändert (`z` zeigt immer noch auf die Speicheradresse von x).

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

Felder

(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

Verschachtelungen

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 defintion
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 unitialized (!) 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 $\rightarrow$ „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

```
1  // get a certain data member
2  template <class T> T& Array<T>::at(int n)
3  {
4    if (n>=0 && n<10) return data[n];
5  }
6
7  // main program
8  #include <iostream>
9  int main()
10 {
11   Array<int> c; c.add(3,0); c.add(4,5); c.add(0,1);
12   std::cout << c.at(5) << std::endl;
13   // output: 4
14
15   Array<char> d; d.add('x',9);
16   std::cout << d.at(9) << std::endl;
17   // output: x
18
19   return 0;
20 }
```

Weiteres zu Templates

- Mehrere Template-Parameter sind möglich
- Parameter können default-Werte haben
- Templates können ausspezialisiert werden (für Sonderfälle)

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 Speichermanagment
+ 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   for (it=y.begin(); it!=y.end(); ++it)
15     std::cout << it->first << ": " << it->second <<
           std::endl;
16     // output: 1: eins
17     // 2: zwei ... usw.
18
19   return 0;
20 }
```

Algorithmen

Algorithmen, die die STL bereitstellt

Die STL enthält viele hilfreiche Algorithmen, die

- Elemente eines Datencontainerns 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 Dreick ist kein Punkt $\rightarrow$ keine Vererbung).

Vererbung in C++

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

Verschiedene Arten der Vererbung in C++

Bei Vererbung ist darauf zu achten, auf welche Member die abgeleitete Klasse Zugriff erhält $\rightarrow$ 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  public:                // area is a function member
3    virtual double area() { return 0.0; }
4    ...
5  };
6
7  class Triangle :
8    public GeomObject{ // a derived class
9  public:                // has a specific member 'area' as well!
10   double area()
11   {
12     return 0.5 * a * h;
13   }
14   ...
15 private:
16   double h, a;
17 };
```

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 $\leftrightarrow$ 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 `GeomObject`s 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

- Deklararation der Funktion in der Basisklasse als „rein virtuell“:
  `virtual area() = 0`.
- Abgeleitete Klassen müssen rein virtuelle Funktionen implementieren.

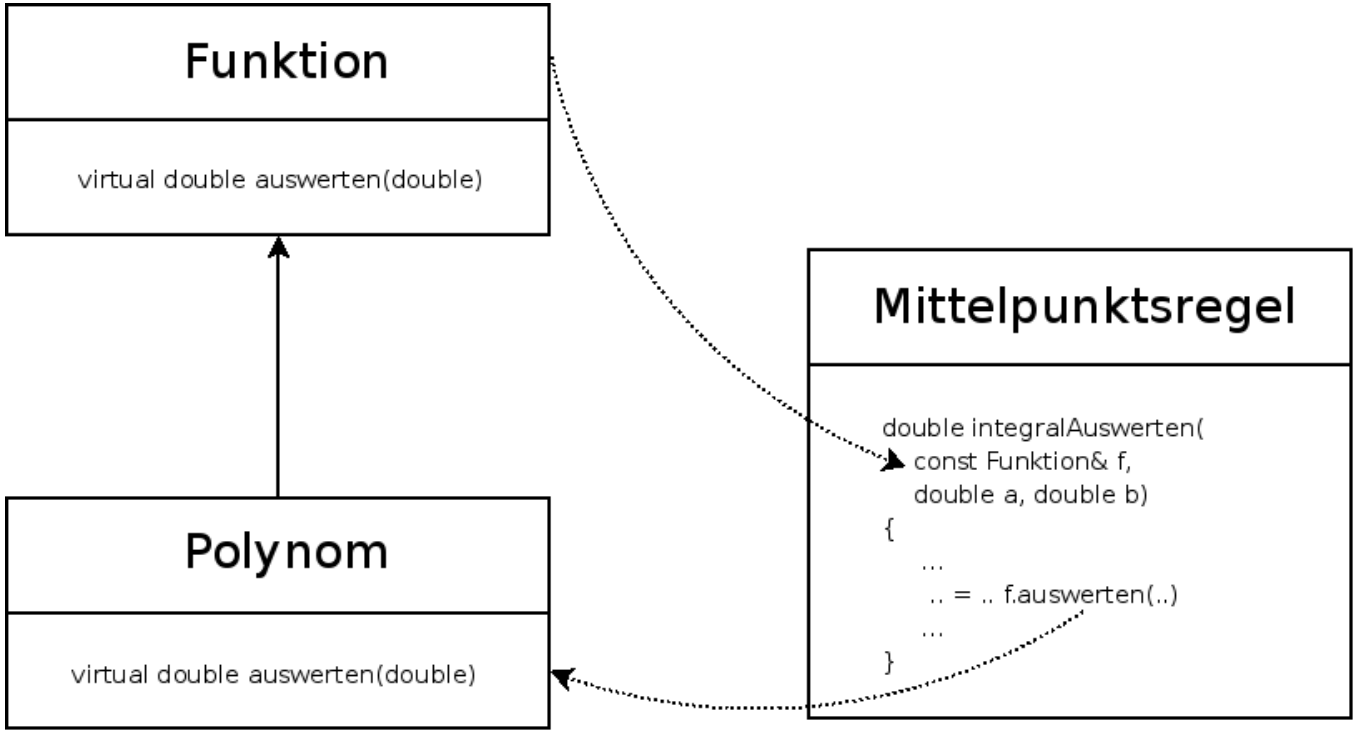
Abstrakte Basisklassen und Schnittstellen

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 einheitliches Erscheinungsbild (Interface) einer Abstraktion.
- Algorithmen operieren auf diesem Interface, d.h. unabhängig der tatsächlichen Implementierung.

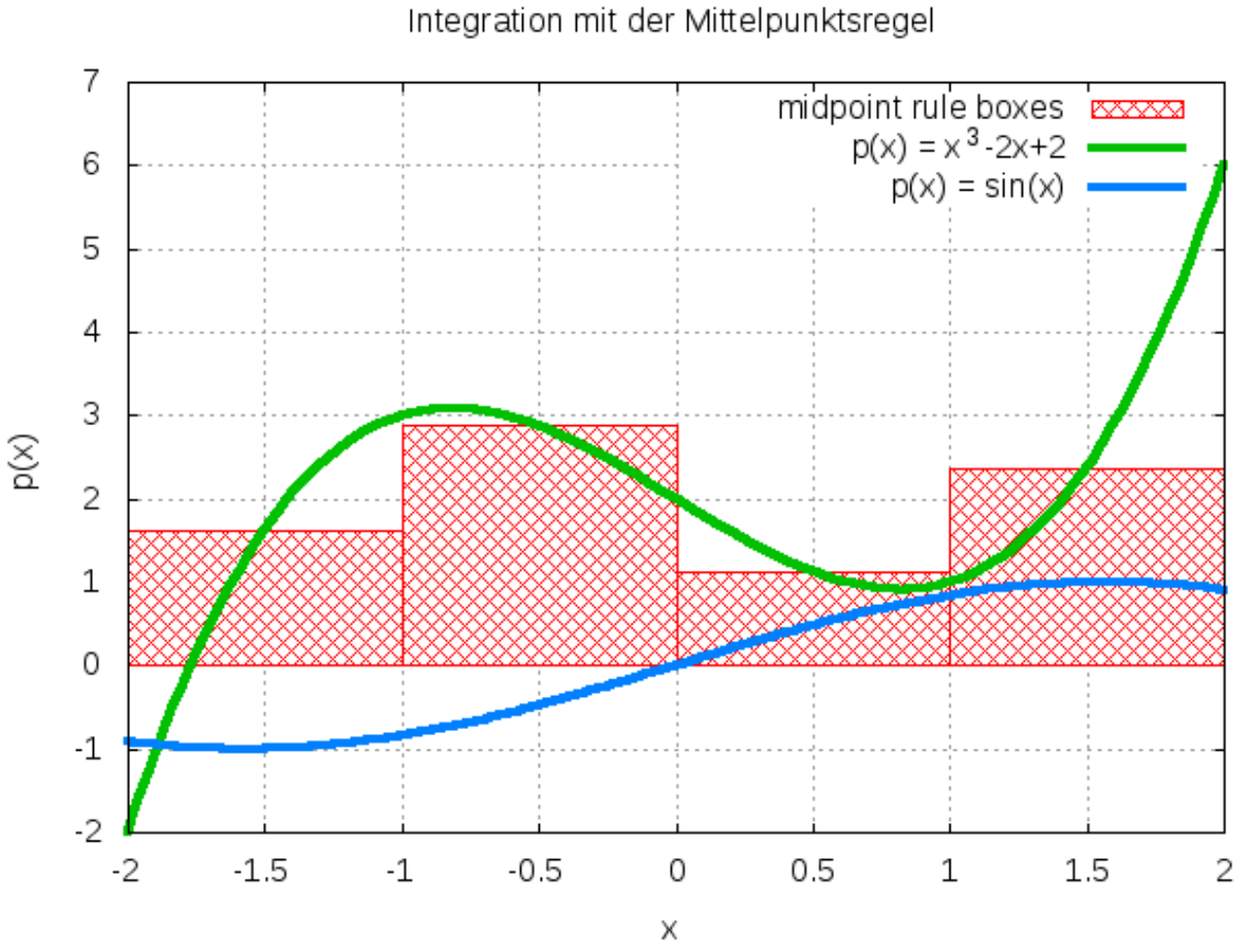
Abstrakte Basisklassen und Schnittstellen

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

```
// main.cpp: Test der Integration mit der Funktions-Schnittstelle

// System-Header inkludieren
#include <cstdlib>
#include <iostream>
#include <cmath>

// eigene Header inkludieren
#include "sinus.h"
#include "mittelpunktsregel.h"

// main-Funktion
int main(int argc, char** argv)
{
    // Objekt der Klasse Mittelpunktsregel anlegen
    MittelpunktsRegel mipur(100);

    // Sinus-Objekt erzeugen
    Sinus s1;

    // Integration der Polynome testen
    std::cout << "Integral Sinus: " << mipur.integralAuswerten(s1,-2.0,2.0) << std::endl;
    std::cout << "Integral Sinus: " << mipur.integralAuswerten(s1,-3.1415,6.2890) << std
        ::endl;
    std::cout << std::endl;

    return 0;
}
```

Abstrakte Basisklassen und Schnittstellen

```
// mittelpunktsregel.h: Die Klasse Mittelpunktsregel

#include "funktion.h"

#ifndef __MIPUREGEL_H_
#define __MIPUREGEL_H_

// Mittelpunktsregel-Klasse
class MittelpunktsRegel
{
public:
    MittelpunktsRegel(int anzahl) : n(anzahl) {}
    ~MittelpunktsRegel() {};

    // Integral einer Funktion auswerten
    double integralAuswerten(Funktion& f, double a, double b) const
    {
      double erg = 0.0;
      double h = (b-a)/(1.0*n);          // Laenge der Intervalle

      // Anteile der einzelnen Boxen aufsummieren
      for (int i=0; i<n; ++i)
      {
          double x = a + i*h + 0.5*h;  // Intervall-Mittelpunkt
          erg += h * f.auswerten(x);   // Funktionsauswertung
      }

      return erg;
    }

private:
    int n;
};

#endif
```

Abstrakte Basisklassen und Schnittstellen

```
// funktion.h: Abstrakte Schnittstellenklasse fuer Funktionen

// Inklusions-Waechter
#ifndef __FUNKTION_H_
#define __FUNKTION_H_

// Abstrakte Basisklasse fuer Funktionen
class Funktion
{
public:
  // Konstruktoren
  Funktion() {};

  // virtueller Destruktor
  virtual ~Funktion() {};

  // Funktion auswerten, rein virtuell !
  virtual double auswerten(double x) const = 0;

private:
};

#endif
```

Abstrakte Basisklassen und Schnittstellen

```
#include <cmath>

// inkludiere Basisklasse / Schnittstelle
#include "funktion.h"

#ifndef __SINUS_H_
#define __SINUS_H_

// Kapselungs-Klasse fuer den Sinus
class Sinus : public Funktion
{
public :
    Sinus() {}

    // Erfuellung der Schnittstelle
    double auswerten(double x) const
    {
      return sin(x);
    }

private :
};

#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 table).

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 table).

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

$\rightarrow$ 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 };
```

$\Rightarrow$ 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 Polynorphismus sind Templates. Mit den Templates ist eine Programmiertechnik für Meta-Programme enstanden:

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 };
};
```

$\Rightarrow$ 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, dass 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 instanciation
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, dass 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,
- Templates : 0 s (klar :-)).

Template Meta Programming

Wofür brauchen wir Template Meta Programme?

- TMP generieren spezialisierte Algorithmen für „kleine“ Klassen
- Beispiele: komplexe Zahlen, Tensoren, Gitter, ...
- Idee: Hybrider Ansatz, also eine Zerlegung des Programms in
  - ein TMP, läuft zur Kompilier-Zeit
  - ein „normales Programm“

  $\Rightarrow$ Laufzeit-Verbesserungen (etwa durch durch massives Inlining)
- Generische Programmierung und TMP werden fast immer dann verwendet, wenn eine Bibliothek gleichzeitig:
  - performant und
  - flexibel

  sein soll!

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)