

C++ für Wissenschaftliches Rechnen

Dan Popović

Interdisziplinäres Institut für Wissenschaftliches Rechnen, Universität Heidelberg

27. April 2010

C++ für Wissenschaftliches Rechnen

① Warum C++?

Motivation

② Vorausgesetzte Techniken

③ Das erste Programm

④ Grundlagen C++

Datentypen

Kontrollfluss

Funktionen

⑤ Zeiger und Referenzen

⑥ Abstrakte Datentypen und ihre Realisierung in C++

Klassen

Konstruktoren und Destruktoren

⑦ Templates und generische Programmierung

⑧ Die Standard Template Library (STL)

Beispiel einer Container-Klasse: Vektoren

Das Iterator-Interface

⑨ Built-in Algorithmen der STL

⑩ Vererbung in C++

⑪ Virtuelle Funktionen und abstrakte Basisklassen

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

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

```

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:~$ █

```


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:

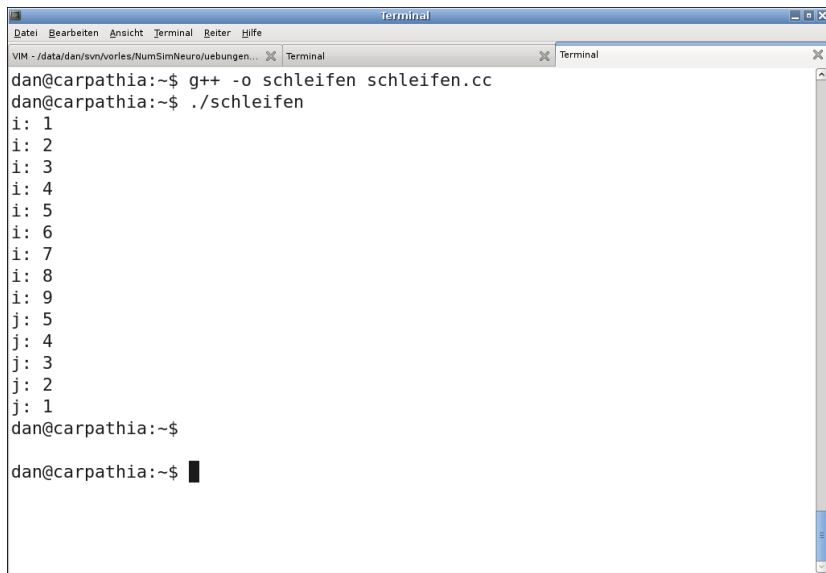
```
1  #include <iostream>
2
3  int main(int argc, char** argv)
4  {
5      int a = 5;    // an integer variable
6      if (a > 0)
7      {
8          std::cout << "Hello, World..." << std::endl;
9      }
10     else
11     {
12         return 1; // emit an error
13     }
14
15     return 0;
16 }
```

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



```
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

```
1 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 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 bekommt.

- 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 bekommt.

- 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 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

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


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 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 → 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 ↔ 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“:
`virtual area() = 0.`
- Abgeleitete Klassen müssen rein virtuelle Funktionen implementieren.

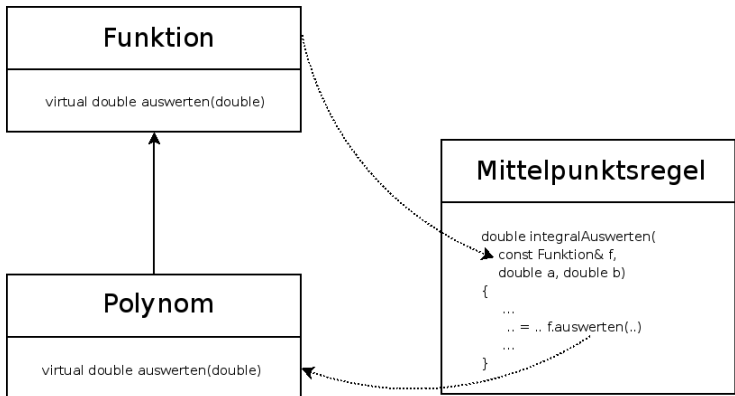
Abstrakte Basisklassen und Schnittstellen

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.

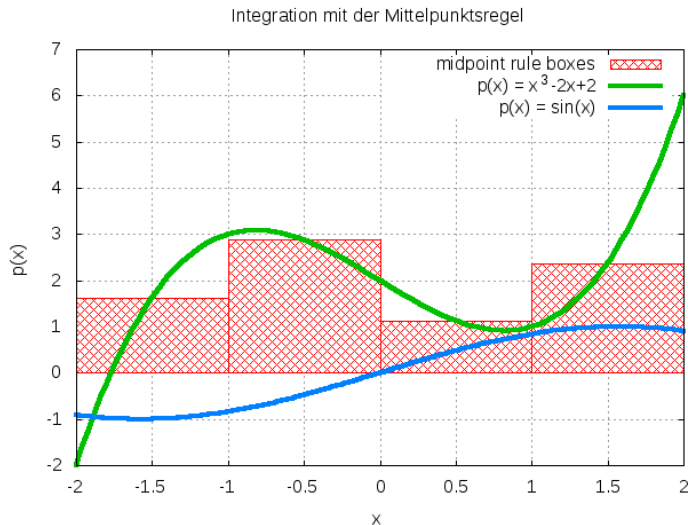
Abstrakte Basisklassen und Schnittstellen

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

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

#include "funktion.h"

#ifdef __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

→ 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“.

Der Barton-Nackmann-Trick

Auch bekannt als *Curiously Recursive Template Pattern*:

```
1  template<typename LeafType> class Matrix {
2  public :
3      LeafType& engineImp
4
5      void LeafType asLeaf()
6      { return static_cast<LeafType&>>(*this); }
7
8      bool IsSymmetricPositiveDefinit()
9      { return asLeaf().isSymPositiveDefinite(); }
10 };
11
12 // former engine classes derive from base class now!
13 class Symmetric : public Matrix{
14     bool isSymPositiveDefinite()
15     { /* check if matrix is spd. */ }
16 };
17
18 class UpperTriangle : public Matrix {
19     bool isSymPositiveDefinite(){ return false; }
20 };
```

Der Barton-Nackmann-Trick

```
1 // usage (compiler evaluates Type of A !)  
2 UpperTriangle upper; // create upper triangle matrix  
3 Symmetric      sym; // create symmetric matrix  
4  
5 Matrix<UpperTriangle> A(upper);  
6 Matrix<UpperTriangle> B(sym);  
7  
8 std::cout << A.isSymPositiveDefinite() << std::endl;  
9 std::cout << B.isSymPositiveDefinite() << std::endl;
```

Der Barton-Nackmann-Trick

Was passiert hier genau beim Aufruf `A.isSymPositiveDefinite()`?

- `A` ist ein Objekt der Basisklasse mit Template-Parameter der abgeleiteten Klasse.
- Aufruf von `A.isSymmetricPositiveDefinit()` castet `A` auf Objekt der abgeleiteten Klasse,
- und ruft `isSymmetricPositiveDefinit()` der abgeleiteten Klasse auf!

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;  
}  
  
// specialisation for small N (e.g. N=3) speeds up calculation  
double dotproduct(const double *a, const double *b, int N)  
{  
    return a[0]*b[0] + a[1]*b[1] + a[2]*b[2];  
}
```

Motivation

Templates parametrisieren Klassen und Funktionen im Typ. Fortgeschrittene Techniken erlauben weitere Parametrisierungen:

- Traits – Meta-Informationen von Template-Parametern
- Policies – Verhaltens-Modifikation von Algorithmen

Traits

Traits

Repräsentieren natürliche zusätzliche Eigenschaften eines Template Parameters.

Beispiele:

- Meta-Informationen für Gitter (Ist Gitter konform, adaptiv, ...)?
- Typ-Promotionen.

Type Promotion Traits

Betrachte Addition von 2 Vektoren:

```
template<typename T>
std::vector<T> add(const std::vector<T>& a,
                 const std::vector<T>& b);
```

Frage: Rückgabotyp bei Addition zweier Vektoren unterschiedlichen Typs:

```
template<typename T1, typename T2>
std::vector<????> add(const std::vector<T1>& a,
                   const std::vector<T2>& b);
```

Beispiel:

```
std::vector<int> a;
std::vector<complex<double> > b;

std::vector<????> c = add(a, b);
```

Type Promotion Traits

Der Rückgabetyip ist abhängig von den beiden Input-Typen! Das Problem kann mit Promotion-Traits gelöst werden:

```
template<typename T1, typename T2>
std::vector<typename Promotion<T1, T2>::promoted_type>
add(const std::vector<T1> &, const std::vector<T2> &);
```

Rückgabetyip wird von Promotion-Traits-Klasse definiert:

```
template<> // promote int to double number
struct Promotion<double, int> {
    public:
        typedef double promoted_type;
};

template<> // promote int to double number
struct Promotion<double, int> {
    public:
        typedef double promoted_type;
};
```

Type Promotion Traits

Beispiel-Anwendung:

```
std::vector<int>    a(100, 3);  
std::vector<double> b(100, 3.1415);  
  
c= add(a, b); // is equivalent to  
c= add(b, a); //!
```

Type Promotion Traits

Sind viele Typ-Promotionen notwendig, erleichtern kleine Makros die Arbeit:

```

1  #define DECLARE_PROMOTE(A,B,C) \
2      template<> struct Promotion<A,B> { \
3          typedef C promoted_type; \
4      }; \
5      template<> struct Promotion<B,A> { \
6          typedef C promoted_type; \
7      };
8
9  DECLARE_PROMOTE(int, char, int);
10 DECLARE_PROMOTE(double, float, double);
11 DECLARE_PROMOTE(complex<float>, float, complex<float>);
12 // and so on...
13
14 #undef DECLARE_PROMOTE

```

Weiteres Beispiel für Type Promotion

```
1 #include <iostream>
2
3 using namespace std;
4
5 // start with the basic template:
6 template <typename T1, typename T2>
7 struct Promote
8 {
9 };
10
11 // the same types are the same
12 template <typename T1>
13 struct Promote<T1,T1>
14 {
15     typedef T1 type;
16 };
17
18 // specilizations for all the type promotions
19 template<> struct Promote<int,char> { typedef int type; };
20 template<> struct Promote<double,int> { typedef double type;
    };
```


Weiteres Beispiel für Type Promotion

```
21 // an example function build minima of two variables with different type
22 template <typename T1, typename T2>
23 typename Promote<T1,T2>::type min( const T1 & x, const T2 &
    y )
24 {
25     return x < y ? x : y;
26 }
27
28 // main
29 int main()
30 {
31     std::cout << "min: " << min(88.9, 99) << std::endl;
32     // output: 88.9
33
34     std::cout << "min: " << min(4756, 'a') << std::endl;
35     // output: 97
36
37     return 0;
38 }
```

Template Meta Programming

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, 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 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,
- 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“
- ⇒ Laufzeit-Verbesserungen (etwa durch durch massives Inlining)
- Generische Programmierung und TMP werden fast immer dann verwendet, wenn eine Bibliothek gleichzeitig:
 - performant und
 - flexibelsein 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)