

Einführung in das Programmieren für Technische Mathematik

Prof. Dr. Dirk Praetorius

Fr. 10:15 - 11:45, Freihaus HS 8



Institut für Analysis
und Scientific Computing

C++

- ▶ Was ist C++?
- ▶ Wie erstellt man ein C++ Programm?
- ▶ Hello World! mit C++

- ▶ main
- ▶ cout, cin, endl
- ▶ using std::
- ▶ Scope-Operator ::
- ▶ Operatoren «, »
- ▶ #include <iostream>

202

Was ist C++

- ▶ Weiterentwicklung von C
 - Entwicklung ab 1979 bei AT&T
 - Entwickler: Bjarne Stroustrup
- ▶ C++ ist abwärtskompatibel zu C
 - keine Syntaxkorrektur
 - aber: stärkere Zugriffskontrolle bei „Strukturen“
 - * Datenkapselung
- ▶ Compiler:
 - frei verfügbar in Unix/Mac: **g++**
 - Microsoft Visual C++ Compiler
 - Borland C++ Compiler

Objektorientierte Programmiersprache

- ▶ C++ ist objektorientiertes C
- ▶ Objekt = Zusammenfassung von Daten + Fktn.
 - Funktionalität hängt von Daten ab
 - vgl. Multiplikation für Skalar, Vektor, Matrix
- ▶ Befehlsreferenzen
 - <http://en.cppreference.com/w/cpp>
 - <http://www.cplusplus.com>

203

Wie erstellt man ein C++ Prg?

- ▶ Starte Editor Emacs aus einer Shell mit **emacs &**
 - Die wichtigsten Tastenkombinationen:
 - * **C-x C-f** = Datei öffnen
 - * **C-x C-s** = Datei speichern
 - * **C-x C-c** = Emacs beenden
- ▶ Öffne eine (ggf. neue) Datei **name.cpp**
 - Endung **.cpp** ist Kennung für C++ Programm
- ▶ Die ersten beiden Punkte kann man auch simultan erledigen mittels **emacs name.cpp &**
- ▶ Schreibe *Source-Code* (= C++ Programm)
- ▶ Abspeichern mittels **C-x C-s** nicht vergessen
- ▶ Compilieren z.B. mit **g++ name.cpp**
- ▶ Falls Code fehlerfrei, erhält man *Executable* **a.out**
 - unter Windows: **a.exe**
- ▶ Diese wird durch **a.out** bzw. **./a.out** gestartet
- ▶ Compilieren mit **g++ name.cpp -o output** erzeugt Executable **output** statt **a.out**

204

Hello World!

```
1 #include <iostream>
2
3 int main() {
4     std::cout << "Hello World!\n";
5     return 0;
6 }
```

- ▶ C++ Bibliothek für Ein- und Ausgabe ist **iostream**
- ▶ **main** hat zwingend Rückgabewert **int**
 - **int main()**
 - **int main(int argc, char* argv[])**
 - * insbesondere **return 0**; am Programmende
- ▶ Scope-Operator **::** gibt *Name Space* an
 - alle Fktn. der Standardbibliotheken haben **std**
- ▶ **std::cout** ist die Standard-Ausgabe (= Shell)
 - Operator **<<** übergibt rechtes Argument an **cout**

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 int main() {
5     cout << "Hello World!\n";
6     return 0;
7 }
```

- ▶ **using std::cout;**
 - **cout** gehört zum *Name Space* **std**
 - darf im Folgenden abkürzen **cout** statt **std::cout**

205

Shell-Input für Main

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 int main(int argc, char* argv[]) {
6     int j = 0;
7     cout << "This is " << argv[0] << endl;
8     cout << "got " << argc-1 << " inputs:" << endl;
9     for (j=1; j<argc; ++j) {
10        cout << j << ": " << argv[j] << endl;
11    }
12    return 0;
13 }
```

- ▶ **<<** arbeitet mit verschiedenen Typen
- ▶ kann mehrfache Ausgabe machen **<<**
- ▶ **endl** ersetzt **"\n"**
- ▶ Shell übergibt Input als C-Strings an Programm
 - Parameter jeweils durch Leerzeichen getrennt
 - **argc** = Anzahl der Parameter
 - **argv** = Vektor der Input-Strings
 - **argv[0]** = Programmname
 - d.h. **argc-1** echte Input-Parameter
- ▶ Output für Shell-Eingabe **./a.out Hello World!**

```
This is ./a.out
got 2 inputs:
1: Hello
2: World!
```

206

Eingabe / Ausgabe

```
1 #include <iostream>
2 using std::cin;
3 using std::cout;
4 using std::endl;
5
6 int main() {
7     int x = 0;
8     double y = 0;
9     double z = 0;
10
11     cout << "Geben Sie einen Integer ein: ";
12     cin >> x;
13     cout << "Geben Sie zwei Double ein: ";
14     cin >> y >> z;
15
16     cout << x << " * " << y << " / " << z;
17     cout << " = " << x*y/z << endl;
18
19     return 0;
20 }
```

- ▶ **std::cin** ist die Standard-Eingabe (= Tastatur)
 - Operator **>>** schreibt Input in Variable rechts
- ▶ Beispielhafte Eingabe / Ausgabe:
Geben Sie einen Integer ein: 2
Geben Sie zwei Double ein: 3.6 1.3
2 * 3.6 / 1.3 = 5.53846
- ▶ **cin** / **cout** gleichwertig mit **printf** / **scanf** in C
 - aber leichter zu bedienen
 - keine Platzhalter + Pointer
 - Formatierung, siehe <http://www.cplusplus.com>
 - * → **ostream::operator<<**

207

Datentyp bool

- ▶ **bool**
- ▶ **true**
- ▶ **false**

208

Datentyp bool

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 int main() {
5     double var = 0.3;
6     bool tmp = var;
7
8     if (1) {
9         cout << "1 ist wahr\n";
10    }
11    if (var) {
12        cout << var << " ist auch wahr\n";
13    }
14    if (tmp == true) {
15        cout << tmp << " ist auch wahr\n";
16        cout << "sizeof(bool) = " << sizeof(bool) << "\n";
17    }
18    if (0) {
19        cout << "0 ist wahr\n";
20    }
21
22    return 0;
23 }
```

- ▶ C kennt keinen Datentyp für Wahrheitswerte
 - logischer Vergleich liefert 1 für wahr, 0 für falsch
 - jede Zahl ungleich 0 wird als wahr interpretiert
- ▶ C++ hat Datentyp **bool** für Wahrheitswerte
 - Wert **true** für wahr, **false** für falsch
 - jede Zahl ungleich 0 wird als wahr interpretiert
- ▶ Output:
 - 1 ist wahr
 - 0.3 ist auch wahr
 - 1 ist auch wahr
 - sizeof(bool) = 1

209

Klassen

- ▶ Klassen
- ▶ Instanzen
- ▶ Objekte

- ▶ **class**
- ▶ **struct**
- ▶ **private, public**
- ▶ **string**

- ▶ **#include <cmath>**
- ▶ **#include <cstdio>**
- ▶ **#include <string>**

210

Klassen & Objekte

- ▶ **Klassen** sind (benutzerdefinierte) Datentypen
 - erweitern **struct** aus C
 - bestehen aus Daten und Methoden
 - **Methoden** = Fktn. auf den Daten der Klasse
- ▶ Deklaration etc. wie bei Struktur-Datentypen
 - Zugriff auf Members über Punktoperator
 - sofern dieser Zugriff erlaubt ist!
 - * Zugriffskontrolle = Datenkapselung
- ▶ formale Syntax: **class** **ClassName**{ ... };
- ▶ **Objekte** = Instanzen einer Klasse
 - entspricht Variablen dieses neuen Datentyps
 - wobei Methoden nur 1x im Speicher liegen
- ▶ **später**: Kann Methoden überladen
 - d.h. Funktionalität einer Methode abhängig von Art des Inputs
- ▶ **später**: Kann Operatoren überladen
 - z.B. $x + y$ für Vektoren
- ▶ **später**: Kann Klassen von Klassen ableiten
 - sog. Vererbung
 - z.B. $\mathbb{C} \supset \mathbb{R} \supset \mathbb{Q} \supset \mathbb{Z} \supset \mathbb{N}$
 - dann: \mathbb{R} erbt Methoden von \mathbb{C} etc.

211

Zugriffskontrolle

- ▶ Klassen (und Objekte) dienen der Abstraktion
 - genaue Implementierung nicht wichtig
- ▶ Benutzer soll so wenig wissen wie möglich
 - sogenannte *black-box* Programmierung
 - nur Ein- und Ausgabe müssen bekannt sein
- ▶ Richtiger Zugriff muss sichergestellt werden
- ▶ Schlüsselwörter **private**, **public** und **protected**

- ▶ **private** (Standard)
 - Zugriff nur von Methoden der gleichen Klasse

- ▶ **public**
 - erlaubt Zugriff von überall

- ▶ **protected**
 - teilweiser Zugriff von außen (\rightsquigarrow Vererbung)

212

Beispiel 1/2

```
1 class Triangle {
2 private:
3     double x[2];
4     double y[2];
5     double z[2];
6
7 public:
8     void setX(double, double);
9     void setY(double, double);
10    void setZ(double, double);
11    double area();
12};
```

- ▶ Dreieck in \mathbb{R}^2 mit Eckpunkten x, y, z
- ▶ Benutzer kann Daten x, y, z nicht lesen + schreiben
 - `get/set` Funktionen in `public`-Bereich einbauen
- ▶ Benutzer kann Methode `area` aufrufen
- ▶ Benutzer muss nicht wissen, wie Daten intern verwaltet werden
 - kann interne Datenstruktur später leichter verändern, falls das nötig wird
 - z.B. Dreieck kann auch durch einen Punkt und zwei Vektoren abgespeichert werden
- ▶ Zeile 2: `private`: kann weggelassen werden
 - alle Members/Methoden standardmäßig `private`
- ▶ Zeile 7: ab `public`: ist Zugriff frei
 - d.h. Zeile 8 und folgende

213

Beispiel 2/2

```
1 class Triangle {
2 private:
3     double x[2];
4     double y[2];
5     double z[2];
6
7 public:
8     void setX(double, double);
9     void setY(double, double);
10    void setZ(double, double);
11    double getArea();
12};
13
14 int main() {
15     Triangle tri;
16
17     tri.x[0] = 1.0; // Syntax-Fehler!
18
19     return 0;
20 }
```

- ▶ Zeile 8–11: Deklaration von `public`-Methoden
- ▶ Zeile 15: Objekt `tri` vom Typ `Triangle` deklarieren
- ▶ Zeile 17: Zugriff auf `private`-Member
- ▶ Beim Kompilieren tritt Fehler auf

```
triangle2.cpp:17: error: 'x' is a private member of 'Triangle'
triangle2.cpp:3: note: declared private here
```
- ▶ daher: `get/set`-Funktionen, falls nötig

214

Methoden implementieren 1/2

```
1 #include <cmath>
2
3 class Triangle {
4 private:
5     double x[2];
6     double y[2];
7     double z[2];
8 public:
9     void setX(double, double);
10    void setY(double, double);
11    void setZ(double, double);
12    double getArea();
13};
14
15 double Triangle::getArea() {
16     return 0.5*fabs( (y[0]-x[0])*(z[1]-x[1])
17                    - (z[0]-x[0])*(y[1]-x[1]) );
18 }
```

- ▶ Implementierung wie bei anderen Funktionen
 - direkter Zugriff auf Members der Klasse
- ▶ Signatur: `type ClassName::fctName(input)`
 - `type` ist Rückgabewert (`void, double` etc.)
 - `input` = Übergabeparameter wie in C
- ▶ Wichtig: `ClassName::` vor `fctName`
 - d.h. Methode `fctName` gehört zu `ClassName`
- ▶ Darf innerhalb von `ClassName::fctName` auf alle Members der Klasse direkt zugreifen (Zeile 16–17)
 - auch auf `private`-Members
- ▶ Zeile 1: Einbinden der `math.h` aus C

215

Methoden implementieren 2/2

```
1 #include <cmath>
2
3 class Triangle {
4 private:
5     double x[2];
6     double y[2];
7     double z[2];
8
9 public:
10    void setX(double, double);
11    void setY(double, double);
12    void setZ(double, double);
13    double getArea();
14};
15
16 void Triangle::setX(double x0, double x1) {
17     x[0] = x0; x[1] = x1;
18 }
19
20 void Triangle::setY(double y0, double y1) {
21     y[0] = y0; y[1] = y1;
22 }
23
24 void Triangle::setZ(double z0, double z1) {
25     z[0] = z0; z[1] = z1;
26 }
27
28 double Triangle::getArea() {
29     return 0.5*fabs( (y[0]-x[0])*(z[1]-x[1])
30                    - (z[0]-x[0])*(y[1]-x[1]) );
31 }
```

216

Methoden aufrufen

```
1 #include <iostream>
2 #include "triangle4.cpp" // Code von letzter Folie
3
4 using std::cout;
5 using std::endl;
6
7 // void Triangle::setX(double x0, double x1)
8 // void Triangle::setY(double y0, double y1)
9 // void Triangle::setZ(double z0, double z1)
10
11 // double Triangle::getArea() {
12 //     return 0.5*fabs( (y[0]-x[0])*(z[1]-x[1])
13 //                     - (z[0]-x[0])*(y[1]-x[1]) );
14 // }
15
16 int main() {
17     Triangle tri;
18     tri.setX(0.0,0.0);
19     tri.setY(1.0,0.0);
20     tri.setZ(0.0,1.0);
21     cout << "Flaeche = " << tri.getArea() << endl;
22     return 0;
23 }
```

- ▶ Aufruf wie Member-Zugriff bei C-Strukturen
 - wäre in C über Funktionspointer analog möglich
- ▶ `getArea` agiert auf den Members von `tri`
 - d.h. `x[0]` in Implementierung entspricht `tri.x[0]`
- ▶ **Output:** Flaeche = 0.5

217

Methoden direkt implementieren

```
1 #include <cmath>
2
3 class Triangle {
4 private:
5     double x[2];
6     double y[2];
7     double z[2];
8
9 public:
10    void setX(double x0, double x1) {
11        x[0] = x0;
12        x[1] = x1;
13    }
14    void setY(double y0, double y1) {
15        y[0] = y0;
16        y[1] = y1;
17    }
18    void setZ(double z0, double z1) {
19        z[0] = z0;
20        z[1] = z1;
21    }
22    double getArea() {
23        return 0.5*fabs( (y[0]-x[0])*(z[1]-x[1])
24                        - (z[0]-x[0])*(y[1]-x[1]) );
25    }
26 };
```

- ▶ kann Methoden auch in Klasse implementieren
- ▶ ist aber unübersichtlicher ⇒ besser nicht!

218

Klasse string

```
1 #include <iostream>
2 #include <string>
3 #include <cstdio>
4 using std::cout;
5 using std::string;
6
7 int main() {
8     string str1 = "Hallo";
9     string str2 = "Welt";
10    string str3 = str1 + " " + str2;
11
12    cout << str3 << "! ";
13    str3.replace(6,4, "Peter");
14    cout << str3 << "! ";
15
16    printf("%s?\n",str3.c_str());
17
18    return 0;
19 }
```

- ▶ **Output:** Hallo Welt! Hallo Peter! Hallo Peter?
- ▶ Zeile 3: Einbinden der `stdio.h` aus C
- ▶ Wichtig: `string` ≠ `char*`, sondern mächtiger!
- ▶ liefert eine Reihe nützlicher Methoden
 - `'+'` zum Zusammenfügen
 - `replace` zum Ersetzen von Teilstrings
 - `length` zum Auslesen der Länge u.v.m.
 - `c_str` liefert Pointer auf `char*`
- ▶ <http://www.cplusplus.com/reference/string/string/>

219

Strukturen

```
1 struct MyStruct {
2     double x[2];
3     double y[2];
4     double z[2];
5 };
6
7 class MyClass {
8     double x[2];
9     double y[2];
10    double z[2];
11 };
12
13 class MyStructClass {
14 public:
15     double x[2];
16     double y[2];
17     double z[2];
18 };
19
20 int main() {
21     MyStruct var1;
22     MyClass var2;
23     MyStructClass var3;
24
25     var1.x[0] = 0;
26     var2.x[0] = 0; // Syntax-Fehler
27     var3.x[0] = 0;
28
29     return 0;
30 }
```

- ▶ Strukturen = Klassen, wobei alle Members `public`
 - d.h. `MyStruct` = `MyStructClass`
- ▶ besser direkt `class` verwenden

220

Funktionen

- ▶ Default-Parameter & Optionaler Input
- ▶ Überladen

221

Default-Parameter 1/2

```
1 void f(int x, int y, int z = 0);
2 void g(int x, int y = 0, int z = 0);
3 void h(int x = 0, int y = 0, int z = 0);
```

- ▶ kann Default-Werte für Input von Fktn. festlegen
 - durch `= wert`
 - der Input-Parameter ist dann optional
 - bekommt Default-Wert, falls nicht übergeben
- ▶ Beispiel: Zeile 1 erlaubt Aufrufe
 - `f(x,y,z)`
 - `f(x,y)` und `z` bekommt implizit den Wert `z = 0`

```
1 void f(int x = 0, int y = 0, int z); // Fehler
2 void g(int x, int y = 0, int z);    // Fehler
3 void h(int x = 0, int y, int z = 0); // Fehler
```

- ▶ darf nur für hintere Parameter verwendet werden
 - d.h. nach optionalem Parameter darf kein obligatorischer Parameter mehr folgen

222

Default-Parameter 2/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 void f(int x, int y = 0);
5
6 void f(int x, int y = 0) {
7     cout << "x=" << x << ", y=" << y << "\n";
8 }
9
10 int main() {
11     f(1);
12     f(1,2);
13     return 0;
14 }
```

- ▶ Default-Parameter darf nur einmal gegeben werden
- ▶ Kompilieren liefert Syntax-Fehler:
`default_wrong.cpp:6: error: redefinition of default argument`
- ▶ d.h. Default-Parameter nur in Zeile 4 definieren!
- ▶ Output nach Korrektur:
`x=1, y=0`
`x=1, y=2`
- ▶ **Konvention:**
 - d.h. Default-Parameter werden in `hpp` festgelegt
- ▶ brauche bei Forward Decl. keine Variablennamen
 - `void f(int, int = 0);` in Zeile 4 ist OK

223

Überladen von Funktionen 1/2

```
1 void f(char*);
2 double f(char*, double);
3 int f(char*, char*, int = 1);
4 int f(char*);           // Syntax-Fehler
5 double f(char*, int = 0); // Syntax-Fehler
```

- ▶ Mehrere Funktionen gleichen Namens möglich
 - unterscheiden sich durch ihre Signaturen
- ▶ Input muss Variante eindeutig festlegen
- ▶ bei Aufruf wird die richtige Variante ausgewählt
 - Compiler erkennt dies über Input-Parameter
 - Achtung mit implizitem Type Cast
- ▶ Diesen Vorgang nennt man Überladen
- ▶ Reihenfolge bei der Deklaration ist unwichtig
 - d.h. kann Zeilen 1–3 beliebig permutieren
- ▶ Rückgabewerte können unterschiedlich sein
 - Also: unterschiedliche Output-Parameter und gleiche Input-Parameter geht nicht
 - * Zeile 1 + 2 + 3: OK
 - * Zeile 4: Syntax-Fehler, da Input gleich zu 1
 - * Zeile 5: Syntax-Fehler, da optionaler Input

224

Überladen von Funktionen 2/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 class Car {
6 public:
7     void drive();
8     void drive(int km);
9     void drive(int km, int h);
10 };
11
12 void Car::drive() {
13     cout << "10 km gefahren" << endl;
14 }
15
16 void Car::drive(int km) {
17     cout << km << " km gefahren" << endl;
18 }
19
20 void Car::drive(int km, int h) {
21     cout << km << " km gefahren in " << h
22         << " Stunde(n)" << endl;
23 }
24
25 int main() {
26     Car TestCar;
27     TestCar.drive();
28     TestCar.drive(35);
29     TestCar.drive(50,1);
30     return 0;
31 }
```

▶ Ausgabe: 10 km gefahren
35 km gefahren
50 km gefahren in 1 Stunde(n)

225

Überladen vs. Default-Parameter

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 class Car {
6 public:
7     void drive(int km = 10, int h = 0);
8 };
9
10 void Car::drive(int km, int h) {
11     cout << km << " km gefahren";
12     if (h > 0) {
13         cout << " in " << h << " Stunde(n)";
14     }
15     cout << endl;
16 }
17
18 int main() {
19     Car TestCar;
20     TestCar.drive();
21     TestCar.drive(35);
22     TestCar.drive(50,1);
23     return 0;
24 }
```

▶ Ausgabe: 10 km gefahren
35 km gefahren
50 km gefahren in 1 Stunde(n)

226

Naive Fehlerkontrolle

- ▶ Wozu Zugriffskontrolle?
- ▶ Vermeidung von Laufzeitfehlern!
- ▶ bewusster Fehlerabbruch

- ▶ assert
- ▶ #include <cassert>

227

Wozu Zugriffskontrolle?

```
1 class Fraction {
2 public:
3     int numerator;
4     int denominator;
5 };
6
7 int main() {
8     Fraction x;
9     x.numerator = -1000;
10    x.denominator = 0;
11
12    return 0;
13 }
```

- ▶ Großteil der Entwicklungszeit geht in Fehlersuche von Laufzeitfehlern!
- ▶ **Möglichst viele Fehler bewusst abfangen!**
 - Fkt-Input auf Konsistenz prüfen, ggf. Abbruch
 - garantieren, dass Funktions-Output zulässig!
 - Zugriff kontrollieren mittels **get** und **set**
 - * reine Daten sollten immer **private** sein
 - * Benutzer kann/darf Daten nicht verpfuschen!
 - * **in C = soll nicht, in C++ = kann nicht!**
- ▶ Wie sinnvolle Werte sicherstellen? (Zeile 10)
 - mögliche Fehlerquellen direkt ausschließen
 - Programm bestimmt, was Nutzer darf!
- ▶ kontrollierter Abbruch mit C-Bibliothek **assert.h**
 - Einbinden **#include <cassert>**
 - Abbruch mit Ausgabe der Zeile im Source-Code

228

C-Bibliothek assert.h

```
1 #include <iostream>
2 #include <cassert>
3 using std::cout;
4
5 class Fraction {
6 private:
7     int numerator;
8     int denominator;
9 public:
10    int getNumerator() { return numerator; };
11    int getDenominator() { return denominator; };
12    void setNumerator(int n) { numerator = n; };
13    void setDenominator(int n) {
14        assert(n != 0);
15        if (n > 0) {
16            denominator = n;
17        }
18        else {
19            denominator = -n;
20            numerator = -numerator;
21        }
22    }
23    void print() {
24        cout << numerator << "/" << denominator << "\n";
25    }
26 };
27
28 int main() {
29     Fraction x;
30     x.setNumerator(1);
31     x.setDenominator(3);
32     x.print();
33     x.setDenominator(0);
34     return 0;
35 }
```

▶ `assert(condition)`; bricht ab, falls `condition` falsch

▶ Output:

1/3

Assertion failed: (n>0), function setDenominator,
file assert.cpp, line 14.

229

Konventionen

▶ Namens-Konventionen

▶ Deklaration von Variablen

▶ File-Konventionen

▶ `for(int j=0; j<dim; ++j) { ... }`

230

Namens-Konventionen

▶ lokale Variablen

- `klein_mit_underscores`

▶ globale Variablen

- `klein_mit_underscore_hinten_`

▶ Präprozessor-Konstanten

- `GROSS_MIT_UNDERSCORE`

▶ in Header-Files

- `_NAME_DER_KLASSE_`

▶ Funktionen / Methoden

- `erstesWortKleinKeineUnderscores`

▶ Strukturen / Klassen

- `ErstesWortGrossKeineUnderscores`

231

Variablen-Deklaration

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 int main() {
6     double sum = 0;
7
8     for (int j=1; j<=100; ++j) {
9         sum = sum + j;
10    }
11
12    cout << sum << endl;
13 }
```

▶ in C++ überall erlaubt, aber schlechter Stil!

- wird schnell unübersichtlich!

▶ **Konvention:** Deklaration nur am Blockanfang

- ist übersichtlicher!

▶ **zwei Ausnahmen:**

- Zählvariable bei `for`-Schleife
 - * üblicherweise im Schleifen-Kopf deklariert
 - * ist lokale Variable, bis Schleife terminiert
- `assert` vor Deklaration ist OK!

▶ Beispiel-Code berechnet $\sum_{j=1}^{100} j = 5050$

- Zählvariable `j` existiert nur in Zeile 8–10

232

Schlechter Code 1/2

```
1 #include <stdio.h>
2
3 int main() {
4     int a[2] = {0, 1};
5     int b[2] = {2, 3};
6     int c[3] = {4, 5};
7     int i = 0;
8
9     printf("a = (%d,%d), b = (%d,%d), c = (%d,%d), i = %d\n",
10          a[0], a[1], b[0], b[1], c[0], c[1], i);
11
12     a[i] = b[i] = c[i];
13
14     printf("a = (%d,%d), b = (%d,%d), c = (%d,%d), i = %d\n",
15          a[0], a[1], b[0], b[1], c[0], c[1], i);
16
17     c[0] = 9;
18     i = 0;
19
20     a[i] = b[i++] = c[i];
21
22     printf("a = (%d,%d), b = (%d,%d), c = (%d,%d), i = %d\n",
23          a[0], a[1], b[0], b[1], c[0], c[1], i);
24
25     return 0;
26 }
```

- ▶ **schlecht:** Nicht jede Zeile sofort verständlich!
- ▶ **Achtung:** Verhalten von `b[i++]` ist undefiniert!
warning: unsequenced modification and access to 'i'
- ▶ **faktischer Output:**
a = (0,1), b = (2,3), c = (4,5), i = 0
a = (4,1), b = (4,3), c = (4,5), i = 0
a = (4,9), b = (9,3), c = (9,5), i = 1

233

Schlechter Code 2/2

```
1 #include <stdlib>
2 #include <stdio>
3 int main(){
4     int i=0;
5     int n=5;
6     int* a=(int*)malloc((n+1)*sizeof(int));
7     int*b=(int*)malloc((n+1)*sizeof(int));
8     int *c=(int*)malloc((n+1)*sizeof(int));
9     int * d=(int*)malloc((n+1)*sizeof(int));
10    while(i<n){
11        a[i]=b[i]=c[i]=d[i]=i++;}
12    printf("a[%d] = %d\n",n-1,n-1);
13 }
```

- ▶ **Code für menschliches Auge schreiben!**
 - Leerzeichen vor/nach Zuweisungen
 - Leerzeichen vor/nach Type-Cast-Operator
 - (manchmal) Leerzeichen vor/nach arithm. Op.
 - (manchmal) Leerzeichen vor/nach Klammern, wenn Klammern geschachtelt werden
 - Leerzeilen dort, wo gedankliche Blöcke
 - * Deklarationen / Speicher anlegen / Aktionen
- ▶ **Guter Code hat nur eine Aktion pro Zeile!**
 - Deshalb Mehrfachzuweisungen schlecht, aber dennoch (leider) in C/C++ möglich!
- ▶ **Zählschleifen, falls Laufzeit klar!**
 - auch wenn defacto `for = while` in C

234

Besser lesbar!

```
1 #include <stdlib>
2 #include <stdio>
3
4 int main(){
5     int n = 5;
6
7     int* a = (int*) malloc( (n+1)*sizeof(int) );
8     int* b = (int*) malloc( (n+1)*sizeof(int) );
9     int* c = (int*) malloc( (n+1)*sizeof(int) );
10    int* d = (int*) malloc( (n+1)*sizeof(int) );
11
12    for(int i=0; i<n; ++i){
13        a[i] = i - 1;
14        b[i] = i - 1;
15        c[i] = i - 1;
16        d[i] = i - 1;
17    }
18
19    printf("a[%d] = %d\n",n-1,a[n-1]);
20 }
```

- ▶ **Code für menschliches Auge schreiben!**
 - Leerzeichen vor/nach Zuweisungen
 - Leerzeichen vor/nach Type-Cast-Operator
 - (manchmal) Leerzeichen vor/nach arithm. Op.
 - (manchmal) Leerzeichen vor/nach Klammern, wenn Klammern geschachtelt werden
 - Leerzeilen dort, wo gedankliche Blöcke
 - * Deklarationen / Speicher anlegen / Aktionen
- ▶ **Guter Code hat nur eine Aktion pro Zeile!**
 - schlecht: `b = ++a;`
 - schlecht: `a = b = c;`
- ▶ **Zählschleifen, falls Laufzeit klar!**
 - auch wenn defacto `for = while` in C

235

File-Konventionen

- ▶ Jedes C++ Programm besteht aus mehreren Files
 - C++ File für das Hauptprogramm `main.cpp`
 - **Konvention:** pro verwendeter Klasse zusätzlich
 - * Header-File `myClass.hpp`
 - * Source-File `myClass.cpp`
- ▶ Header-File `myClass.hpp` besteht aus
 - `#include` aller benötigten Bibliotheken
 - Definition der Klasse
 - nur Signaturen der Methoden (ohne Rumpf)
 - Kommentare zu den Methoden
 - * Was tut eine Methode?
 - * Was ist Input? Was ist Output?
 - * insb. Default-Parameter + optionaler Input
- ▶ `myClass.cpp` enthält Source-Code der Methoden
- ▶ Warum Code auf mehrere Files aufteilen?
 - Übersichtlichkeit & Verständlichkeit des Codes
 - Anlegen von Bibliotheken
- ▶ Header-File beginnt mit

```
#ifndef _MY_CLASS_
#define _MY_CLASS_
```
- ▶ Header-File endet mit

```
#endif
```
- ▶ Dieses Vorgehen erlaubt mehrfache Einbindung!
- ▶ **Wichtig:** Kein `using` im Header verwenden!
 - insb. auch kein `using std::...`

236

triangle.hpp

```
1 #ifndef _TRIANGLE_
2 #define _TRIANGLE_
3
4 #include <cmath>
5
6 // The class Triangle stores a triangle in R2
7
8 class Triangle {
9 private:
10 // the coordinates of the nodes
11 double x[2];
12 double y[2];
13 double z[2];
14
15 public:
16 // define or change the nodes of a triangle,
17 // e.g., triangle.setX(x1,x2) writes the
18 // coordinates of the node x of the triangle.
19 void setX(double, double);
20 void setY(double, double);
21 void setZ(double, double);
22
23 // return the area of the triangle
24 double getArea();
25 };
26
27 #endif
```

237

triangle.cpp

```
1 #include "triangle.hpp"
2
3 void Triangle::setX(double x0, double x1) {
4     x[0] = x0; x[1] = x1;
5 }
6
7 void Triangle::setY(double y0, double y1) {
8     y[0] = y0; y[1] = y1;
9 }
10
11 void Triangle::setZ(double z0, double z1) {
12     z[0] = z0; z[1] = z1;
13 }
14
15 double Triangle::getArea() {
16     return 0.5*fabs( (y[0]-x[0])*(z[1]-x[1])
17                   - (z[0]-x[0])*(y[1]-x[1]) );
18 }
```

▶ Erzeuge Objekt-Code aus Source (Option **-c**)

- **g++ -c triangle.cpp** liefert **triangle.o**

▶ Kompilieren **g++ triangle.cpp** liefert Fehler

- Linker **ld** scheitert, da kein **main** vorhanden

```
Undefined symbols for architecture x86_64:
  "_main", referenced from:
      implicit entry/start for main executable
ld: symbol(s) not found for architecture x86_64
```

238

triangle_main.cpp

```
1 #include <iostream>
2 #include "triangle.hpp"
3
4 using std::cout;
5 using std::endl;
6
7 int main() {
8     Triangle tri;
9     tri.setX(0.0,0.0);
10    tri.setY(1.0,0.0);
11    tri.setZ(0.0,1.0);
12    cout << "Flaeche = " << tri.getArea() << endl;
13    return 0;
14 }
```

▶ Kompilieren mit **g++ triangle_main.cpp triangle.o**

- erzeugt Objekt-Code aus **triangle_main.cpp**
- bindet zusätzlichen Objekt-Code **triangle.o** ein
- linkt den Code inkl. Standardbibliotheken

▶ oder Verwendung von **make** analog zu C

239

Konstruktor & Destruktor

▶ Konstruktor

▶ Destruktor

▶ Überladen von Methoden

▶ optionaler Input & Default-Parameter

▶ Schachtelung von Klassen

▶ **this**

▶ **ClassName(...)**

▶ **~ClassName()**

▶ **Operator :**

240

Konstruktor & Destruktor

- ▶ Konstruktor = **Aufruf automatisch bei Deklaration**
 - kann Initialisierung übernehmen
 - kann **verschiedene Aufrufe** haben, z.B.
 - * Anlegen eines Vektors der Länge Null
 - * Anlegen eines Vektors $x \in \mathbb{R}^N$ und Initialisieren mit Null
 - * Anlegen eines Vektors $x \in \mathbb{R}^N$ und Initialisieren mit gegebenem Wert
 - formal: `className(input)`
 - * kein Output, eventuell Input
 - * versch. Konstruktoren haben versch. Input
 - * Standardkonstruktor: `className()`
- ▶ Destruktor = **Aufruf automat. bei Lifetime-Ende**
 - Freigabe von dynamischem Speicher
 - es gibt nur Standarddestruitor: `~className()`
 - * kein Input, kein Output
- ▶ Methode kann überladen werden, z.B. Konstruktor
 - kein Input \Rightarrow Vektor der Länge Null
 - ein Input `dim` \Rightarrow Null-Vektor der Länge `dim`
 - Input `dim, val` \Rightarrow Vektor der Länge `dim` mit Einträgen `val`

241

Konstruktor: Ein Beispiel

```
1 #include <iostream>
2 #include <string>
3 using std::cout;
4 using std::string;
5
6 class Student {
7 private:
8     string lastname;
9     int student_id;
10 public:
11     Student() {
12         cout << "Student generiert\n";
13     };
14     Student(string name, int id) {
15         lastname = name;
16         student_id = id;
17         cout << "Student (" << lastname << ", ";
18         cout << student_id << ") angemeldet\n";
19     };
20 };
21
22 int main() {
23     Student demo;
24     Student var("Praetorius",12345678);
25     return 0;
26 }
```

- ▶ Konstruktor hat keinen Rückgabewert (Z. 11, 14)
 - Name `className(input)`
 - Standardkonstr. `Student()` ohne Input (Z. 11)
- ▶ Output
Student generiert
Student (Praetorius, 12345678) angemeldet

242

Namenskonflikt & Pointer this

```
1 #include <iostream>
2 #include <string>
3 using std::cout;
4 using std::string;
5
6 class Student {
7 private:
8     string lastname;
9     int student_id;
10 public:
11     Student() {
12         cout << "Student generiert\n";
13     };
14     Student(string lastname, int student_id) {
15         this->lastname = lastname;
16         this->student_id = student_id;
17         cout << "Student (" << lastname << ", ";
18         cout << student_id << ") angemeldet\n";
19     };
20 };
21
22 int main() {
23     Student demo;
24     Student var("Praetorius",12345678);
25     return 0;
26 }
```

- ▶ **this** gibt Pointer auf das aktuelle Objekt
 - `this->` gibt Zugriff auf Member des akt. Objekts
- ▶ Namenskonflikt in Konstruktor (Zeile 14)
 - Input-Variable heißen wie Members der Klasse
 - Zeile 14–16: Lösen des Konflikts mittels `this->`

243

Destruktor: Ein Beispiel

```
1 #include <iostream>
2 #include <string>
3 using std::cout;
4 using std::string;
5
6 class Student {
7 private:
8     string lastname;
9     int student_id;
10 public:
11     Student() {
12         cout << "Student generiert\n";
13     };
14     Student(string lastname, int student_id) {
15         this->lastname = lastname;
16         this->student_id = student_id;
17         cout << "Student (" << lastname << ", ";
18         cout << student_id << ") angemeldet\n";
19     };
20     ~Student() {
21         cout << "Student (" << lastname << ", ";
22         cout << student_id << ") abgemeldet\n";
23     };
24 };
25
26 int main() {
27     Student var("Praetorius",12345678);
28     return 0;
29 }
```

- ▶ Zeile 20–23: Destruktor (ohne Input + Output)
- ▶ Output
Student (Praetorius, 12345678) angemeldet
Student (Praetorius, 12345678) abgemeldet

244

Methoden: Kurzschreibweise

```
1 #include <iostream>
2 #include <string>
3 using std::cout;
4 using std::string;
5
6 class Student {
7 private:
8     string lastname;
9     int student_id;
10 public:
11     Student() : lastname("nobody"), student_id(0) {
12         cout << "Student generiert\n";
13     };
14     Student(string name, int id) :
15         lastname(name), student_id(id) {
16         cout << "Student (" << lastname << ", ";
17         cout << student_id << ") angemeldet\n";
18     };
19     ~Student() {
20         cout << "Student (" << lastname << ", ";
21         cout << student_id << ") abgemeldet\n";
22     };
23 };
24
25 int main() {
26     Student test;
27     return 0;
28 }
```

- ▶ Zeile 11, 14–15: Kurzschreibweise für Zuweisung
 - ruft entsprechende Konstruktoren auf
 - eher schlecht lesbar
- ▶ Output
 - Student generiert
 - Student (nobody, 0) abgemeldet

245

Noch ein Beispiel

```
1 #include <iostream>
2 #include <string>
3 using std::cout;
4 using std::string;
5
6 class Test {
7 private:
8     string name;
9 public:
10     void print() {
11         cout << "Name " << name << "\n";
12     };
13     Test() : name("Standard") { print(); };
14     Test(string n) : name(n) { print(); };
15     ~Test() {
16         cout << "Loesche " << name << "\n";
17     };
18 };
19
20 int main() {
21     Test t1("Objekt1");
22     {
23         Test t2;
24         Test t3("Objekt3");
25     }
26     cout << "Blockende" << "\n";
27     return 0;
28 }
```

- ▶ Ausgabe:
 - Name Objekt1
 - Name Standard
 - Name Objekt3
 - Loesche Objekt3
 - Loesche Standard
 - Blockende
 - Loesche Objekt1

246

Schachtelung von Klassen

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 class Class1 {
6 public:
7     Class1() { cout << "Konstr Class1" << endl; };
8     ~Class1() { cout << "Destr Class1" << endl; };
9 };
10
11 class Class2 {
12 private:
13     Class1 obj1;
14 public:
15     Class2() { cout << "Konstr Class2" << endl; };
16     ~Class2() { cout << "Destr Class2" << endl; };
17 };
18
19 int main() {
20     Class2 obj2;
21     return 0;
22 }
```

- ▶ Klassen können geschachtelt werden
 - Standardkonstr./-destr. automatisch aufgerufen
 - Konstruktoren der Member zuerst
 - Destruktoren der Member zuletzt
- ▶ Ausgabe:
 - Konstr Class1
 - Konstr Class2
 - Destr Class2
 - Destr Class1

247

vector_first.hpp

```
1 #ifndef _VECTOR_FIRST_
2 #define _VECTOR_FIRST_
3
4 #include <cmath>
5 #include <cstdlib>
6 #include <cassert>
7 #include <iostream>
8
9 // The class Vector stores vectors in Rd
10
11 class Vector {
12 private:
13     // dimension of the vector
14     int dim;
15     // dynamic coefficient vector
16     double* coeff;
17
18 public:
19     // constructors and destructor
20     Vector();
21     Vector(int dim, double init = 0);
22     ~Vector();
23
24     // return vector dimension
25     int size();
26
27     // read and write vector coefficients
28     void set(int k, double value);
29     double get(int k);
30
31     // compute Euclidean norm
32     double norm();
33 };
34
35 #endif
```

248

vector_first.cpp 1/2

```
1 #include "vector_first.hpp"
2
3 Vector::Vector() {
4     dim = 0;
5     coeff = (double*) 0;
6     std::cout << "allocate empty vector" << "\n";
7 }
8
9 Vector::Vector(int dim, double init) {
10    assert(dim>0);
11    this->dim = dim;
12    coeff = (double*) malloc(dim*sizeof(double));
13    assert(coeff != (double*) 0);
14    for (int j=0; j<dim; ++j) {
15        coeff[j] = init;
16    }
17    std::cout << "allocate vector, length " << dim << "\n";
18 }
```

- ▶ erstellt drei Konstruktoren (Zeile 5, Zeile 10)
 - Standardkonstruktor (Zeile 5)
 - Deklaration `Vector var(dim,init);`
 - Deklaration `Vector var(dim);` mit `init = 0`
 - opt. Input durch Default-Parameter (Zeile 10)
 - * wird in `vector.hpp` angegeben (letzte Folie!)
- ▶ **Achtung:** `g++` erfordert expliziten Type Cast bei Pointern, z.B. `malloc` (Zeile 13)
- ▶ in C++ darf man Variablen überall deklarieren
 - ist kein guter Stil, da unübersichtlich
 - * im ursprünglichen C nur am Blockanfang
 - * C-Stil möglichst beibehalten! Code wartbarer!
- ▶ **vernünftig:** `for (int j=0; j<dim; ++j) { ... }`
 - für lokale Zählvariablen (in Zeile 15)

249

vector_first.cpp 2/2

```
9 Vector::Vector(int dim, double init) {
10    assert(dim>0);
11    this->dim = dim;
12    coeff = (double*) malloc(dim*sizeof(double));
13    assert(coeff != (double*) 0);
14    for (int j=0; j<dim; ++j) {
15        coeff[j] = init;
16    }
17    std::cout << "allocate vector, length " << dim << "\n";
18 }
19
20 Vector::~Vector() {
21     if (dim > 0) {
22         free(coeff);
23     }
24     std::cout << "free vector, length " << dim << "\n";
25 }
26
27 int Vector::size() {
28     return dim;
29 }
30
31 void Vector::set(int k, double value) {
32     assert(k>=0 && k<dim);
33     coeff[k] = value;
34 }
35
36 double Vector::get(int k) {
37     assert(k>=0 && k<dim);
38     return coeff[k];
39 }
40
41 double Vector::norm() {
42     double norm = 0;
43     for (int j=0; j<dim; ++j) {
44         norm = norm + coeff[j]*coeff[j];
45     }
46     return sqrt(norm);
47 }
```

- ▶ **ohne Destruktor:** nur Speicher von Pointer frei

250

main.cpp

```
1 #include "vector_first.hpp"
2 #include <iostream>
3
4 using std::cout;
5
6 int main() {
7     Vector vector1;
8     Vector vector2(20);
9     Vector vector3(100,4);
10    cout << "Norm = " << vector1.norm() << "\n";
11    cout << "Norm = " << vector2.norm() << "\n";
12    cout << "Norm = " << vector3.norm() << "\n";
13
14    return 0;
15 }
```

- ▶ Kompilieren mit

```
g++ -c vector_first.cpp
g++ main.cpp vector_first.o
```

- ▶ Output:

```
allocate empty vector
allocate vector, length 20
allocate vector, length 100
Norm = 0
Norm = 0
Norm = 40
free vector, length 100
free vector, length 20
free vector, length 0
```

251

Referenzen

- ▶ Definition
- ▶ Unterschied zwischen Referenz und Pointer
- ▶ direktes Call by Reference
- ▶ Referenzen als Funktions-Output
- ▶ `type&`

252

Was ist eine Referenz?

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 int main() {
6     int var = 5;
7     int& ref = var;
8
9     cout << "var = " << var << endl;
10    cout << "ref = " << ref << endl;
11    ref = 7;
12    cout << "var = " << var << endl;
13    cout << "ref = " << ref << endl;
14
15    return 0;
16 }
```

- ▶ Referenzen sind **Aliasnamen** für Objekte/Variablen
- ▶ **type& ref = var;**
 - erzeugt eine Referenz **ref** zu **var**
 - **var** muss vom Datentyp **type** sein
 - Referenz muss bei Definition initialisiert werden!
- ▶ nicht verwechselbar mit Address-Of-Operator
 - **type&** ist Referenz
 - **&var** liefert Speicheradresse von **var**
- ▶ Output:
 - var = 5
 - ref = 5
 - var = 7
 - ref = 7

253

Address-Of-Operator

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 int main() {
6     int var = 5;
7     int& ref = var;
8
9     cout << "var = " << var << endl;
10    cout << "ref = " << ref << endl;
11    cout << "Adresse von var = " << &var << endl;
12    cout << "Adresse von ref = " << &ref << endl;
13
14    return 0;
15 }
```

- ▶ **muss:** Deklaration + Init. bei Referenzen (Zeile 7)
 - sind nur Alias-Name für denselben Speicher
 - d.h. **ref** und **var** haben dieselbe Adresse
- ▶ Output:
 - var = 5
 - ref = 5
 - Adresse von var = 0x7fff532e8b48
 - Adresse von ref = 0x7fff532e8b48

254

Funktionsargumente als Pointer

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 void swap(int* px, int* py) {
6     int tmp = *px;
7     *px = *py;
8     *py = tmp;
9 }
10
11 int main() {
12     int x = 5;
13     int y = 10;
14     cout << "x = " << x << ", y = " << y << endl;
15     swap(&x, &y);
16     cout << "x = " << x << ", y = " << y << endl;
17     return 0;
18 }
```

- ▶ Output:
 - x = 5, y = 10
 - x = 10, y = 5
- ▶ bereits bekannt aus C:
 - übergebe Adressen **&x**, **&y** mit Call-by-Value
 - lokale Variablen **px**, **py** vom Typ **int***
 - Zugriff auf Speicherbereich von **x** durch Dereferenzieren ***px**
 - analog für ***py**
- ▶ Zeile 6–8: Vertauschen der Inhalte von ***px** und ***py**

255

Funktionsargumente als Referenz

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 void swap(int& rx, int& ry) {
6     int tmp = rx;
7     rx = ry;
8     ry = tmp;
9 }
10
11 int main() {
12     int x = 5;
13     int y = 10;
14     cout << "x = " << x << ", y = " << y << endl;
15     swap(x, y);
16     cout << "x = " << x << ", y = " << y << endl;
17     return 0;
18 }
```

- ▶ Output:
 - x = 5, y = 10
 - x = 10, y = 5
- ▶ echtes **Call-by-Reference in C++**
 - Funktion kriegt als Input Referenzen
 - Syntax: **type fName(..., type& ref, ...)**
 - * dieser Input wird als Referenz übergeben
- ▶ **rx** ist lokaler Name (Zeile 5–9) für den Speicherbereich von **x** (Zeile 12–17)
- ▶ analog für **ry** und **y**

256

Referenzen vs. Pointer

- ▶ Referenzen sind Aliasnamen für Variablen
 - müssen bei Deklaration initialisiert werden
 - kann Referenzen nicht nachträglich zuordnen!
- ▶ keine vollständige Alternative zu Pointern
 - keine Mehrfachzuweisung
 - kein dynamischer Speicher möglich
 - keine Felder von Referenzen möglich
 - Referenzen dürfen nicht **NULL** sein
- ▶ **Achtung:** Syntax verschleiert Programmablauf
 - bei Funktionsaufruf nicht klar, ob Call by Value oder Call by Reference
 - anfällig für Laufzeitfehler, wenn Funktion Daten ändert, aber Hauptprogramm das nicht weiß
 - passiert bei Pointer nicht
- ▶ **Wann Call by Reference sinnvoll?**
 - falls Input-Daten umfangreich
 - * denn Call by Value kopiert Daten
 - dann Funktionsaufruf billiger

257

Refs als Funktions-Output 1/3

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 int& fct() {
6     int x = 4711;
7     return x;
8 }
9
10 int main() {
11     int var = fct();
12     cout << "var = " << var << endl;
13
14     return 0;
15 }
```

- ▶ Referenzen können Output von Funktionen sein
 - sinnvoll bei Objekten (später!)
- ▶ wie bei Pointern auf Lifetime achten!
 - Referenz wird zurückgegeben (Zeile 7)
 - aber Speicher wird freigegeben, da Blockende!
- ▶ Compiler erzeugt Warnung

```
reference_output.cpp:7: warning: reference to
stack memory associated with local variable
'x' returned
```

258

Refs als Funktions-Output 2/3

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 class Demo {
6 private:
7     int val;
8 public:
9     Demo(int input) {
10         val = input;
11     }
12     int getContent() {
13         return val;
14     }
15 };
16
17 int main() {
18     Demo var(10);
19     int x = var.getContent();
20     x = 1;
21     cout << "x = " << x << ", ";
22     cout << "val = " << var.getContent() << endl;
23     return 0;
24 }
```

- ▶ Output:
x = 1, val = 10
- ▶ Auf Folie nichts Neues!
 - nur Motivation der folgenden Folie

259

Refs als Funktions-Output 3/3

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 class Demo {
6 private:
7     int val;
8 public:
9     Demo(int input) {
10         val = input;
11     }
12     int& getContent() {
13         return val;
14     }
15 };
16
17 int main() {
18     Demo var(10);
19     int& x = var.getContent();
20     x = 1;
21     cout << "x = " << x << ", ";
22     cout << "val = " << var.getContent() << endl;
23     return 0;
24 }
```

- ▶ Output:
x = 1, val = 1
- ▶ Achtung: **private** Member wurde geändert
 - Das will man eigentlich nicht!
 - Das kann Laufzeitfehler produzieren!
- ▶ Beachte: Code von `getContent` gleich
 - nur andere Signatur
 - Änderungen nur in Zeile 12, 19

260

Schlüsselwort const

- ▶ Konstanten definieren
 - ▶ read-only Referenzen
 - ▶ Überladen & const bei Variablen
 - ▶ Überladen & const bei Referenzen
 - ▶ Überladen & const bei Methoden
-
- ▶ const
 - ▶ const int*, int const*, int* const
 - ▶ const int&

261

elementare Konstanten

- ▶ möglich über `#define CONST wert`
 - einfache Textersetzung `CONST` durch `wert`
 - fehleranfällig & kryptische Fehlermeldung
 - * falls `wert` Syntax-Fehler erzeugt
 - Konvention: Konstantennamen groß schreiben
- ▶ besser als konstante Variable
 - z.B. `const int var = wert;`
 - z.B. `int const var = wert;`
 - * beide Varianten haben dieselbe Bedeutung!
 - wird als Variable angelegt, aber Compiler verhindert Schreiben
 - zwingend Initialisierung bei Deklaration
- ▶ **Achtung** bei Pointern
 - `const int* ptr` ist Pointer auf `const int`
 - `int const* ptr` ist Pointer auf `const int`
 - * beide Varianten haben dieselbe Bedeutung!
 - `int* const ptr` ist konstanter Pointer auf `int`

262

Beispiel 1/2

```
1 int main() {
2   const double var = 5;
3   var = 7;
4   return 0;
5 }
```

- ▶ Syntax-Fehler beim Kompilieren:
const.cpp:3: error: read-only variable is not assignable

```
1 int main() {
2   const double var = 5;
3   double tmp = 0;
4   const double* ptr = &var;
5   ptr = &tmp;
6   *ptr = 7;
7   return 0;
8 }
```

- ▶ Syntax-Fehler beim Kompilieren:
const_pointer.cpp:6: error: read-only variable is not assignable

263

Beispiel 2/2

```
1 int main() {
2   const double var = 5;
3   double tmp = 0;
4   double* const ptr = &var;
5   ptr = &tmp;
6   *ptr = 7;
7   return 0;
8 }
```

- ▶ Syntax-Fehler beim Kompilieren:
const_pointer2.cpp:4: error: cannot initialize a variable of type 'double *const' with an rvalue of type 'const double *'
 - * Der Pointer `ptr` hat falschen Typ (Zeile 4)

```
1 int main() {
2   const double var = 5;
3   double tmp = 0;
4   const double* const ptr = &var;
5   ptr = &tmp;
6   *ptr = 7;
7   return 0;
8 }
```

- ▶ zwei Syntax-Fehler beim Kompilieren:
const_pointer3.cpp:5: error: read-only variable is not assignable
const_pointer3.cpp:6: error: read-only variable is not assignable
 - * Zuweisung auf Pointer `ptr` (Zeile 5)
 - * Dereferenzieren und Schreiben (Zeile 6)

264

Read-Only Referenzen

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 int main() {
6     double var = 5;
7     double& ref = var;
8     const double& cref = var;
9     cout << "var = " << var << ", ";
10    cout << "ref = " << ref << ", ";
11    cout << "cref = " << cref << endl;
12    ref = 7;
13    cout << "var = " << var << ", ";
14    cout << "ref = " << ref << ", ";
15    cout << "cref = " << cref << endl;
16    // cref = 9;
17    return 0;
18 }
```

► const type& cref

- deklariert konstante Referenz auf `type`
 - * alternative Syntax: `type const& cref`
- d.h. `cref` ist wie Variable vom Typ `const type`
- Zugriff auf Referenz nur **lesend** möglich

► Output:

```
var = 5, ref = 5, cref = 5
var = 7, ref = 7, cref = 7
```

- Zeile `cref = 9;` würde Syntaxfehler liefern
error: read-only variable is not assignable

265

Read-Only Refs als Output 1/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 class Demo {
6 private:
7     int val;
8 public:
9     Demo(int input) {
10        val = input;
11    }
12    int& getContent() {
13        return val;
14    }
15 };
16
17 int main() {
18     Demo var(10);
19     int& x = var.getContent();
20     x = 1;
21     cout << "x = " << x << ", ";
22     cout << "val = " << var.getContent() << endl;
23     return 0;
24 }
```

► Output:

```
x = 1, val = 1
```

- Achtung: `private` Member wurde geändert
- selber Code wie oben (nur Wiederholung!)

266

Read-Only Refs als Output 2/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 class Demo {
6 private:
7     int val;
8 public:
9     Demo(int input) { val = input; }
10    const int& getContent() { return val; }
11 };
12
13 int main() {
14     Demo var(10);
15     const int& x = var.getContent();
16     // x = 1;
17     cout << "x = " << x << ", ";
18     cout << "val = " << var.getContent() << endl;
19     return 0;
20 }
```

► Output:

```
x = 10, val = 10
```

- Zuweisung `x = 1;` würde Syntax-Fehler liefern
error: read-only variable is not assignable
- Deklaration `int& x = var.getContent();` würde Syntax-Fehler liefern
error: binding of reference to type 'int' to a value of type 'const int' drops qualifiers
- sinnvoll, falls Read-Only Rückgabe sehr groß ist
 - z.B. Vektor, langer String etc.

267

Type Casting

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 double square(double& x) {
6     return x*x;
7 }
8
9 int main() {
10    const double var = 5;
11    cout << "var = " << var << ", ";
12    cout << "var*var = " << square(var) << endl;
13    return 0;
14 }
```

- `const type` ist stärker als `type`
 - kein Type Casting von `const type` auf `type`
- Syntax-Fehler beim Kompilieren:
const.typecasting.cpp:12 error: no matching function for call to 'square'
const.typecasting.cpp:5: note: candidate function not viable: 1st argument ('const double') would lose const qualifier
- Type Casting von `type` auf `const type` ist aber OK!
- mögliche Lösung: Signatur ändern auf
 - `double square(const double& x)`

268

Read-Only Refs als Input 1/5

```
1 #include "vector_first.hpp"
2 #include <iostream>
3 #include <cassert>
4
5 using std::cout;
6
7 double product(const Vector& x, const Vector& y){
8     double sum = 0;
9     assert( x.size() == y.size() );
10    for (int j=0; j<x.size(); ++j) {
11        sum = sum + x.get(j)*y.get(j);
12    }
13    return sum;
14 }
15
16 int main() {
17     Vector x(100,1);
18     Vector y(100,2);
19     cout << "norm(x) = " << x.norm() << "\n";
20     cout << "norm(y) = " << y.norm() << "\n";
21     cout << "x.y = " << product(x,y) << "\n";
22     return 0;
23 }
```

- ▶ Vorteil: schlanker Daten-Input ohne Kopieren!
 - und: Daten können nicht verändert werden!
- ▶ Problem: Syntax-Fehler beim Kompilieren, z.B. `const_vector.cpp:9: error: member function 'size' not viable: 'this' argument has type 'const Vector', but function is not marked const`
 - * d.h. Problem mit Methode `size`

269

Read-Only Refs als Input 2/5

```
1 #ifndef _VECTOR_NEW_
2 #define _VECTOR_NEW_
3
4 #include <cmath>
5 #include <cstdlib>
6 #include <cassert>
7
8 // The class Vector stores vectors in R^d
9
10 class Vector {
11 private:
12     // dimension of the vector
13     int dim;
14     // dynamic coefficient vector
15     double* coeff;
16
17 public:
18     // constructors and destructor
19     Vector();
20     Vector(int, double = 0);
21     ~Vector();
22
23     // return vector dimension
24     int size() const;
25
26     // read and write vector coefficients
27     void set(int k, double value);
28     double get(int k) const;
29
30     // compute Euclidean norm
31     double norm() const;
32 };
33
34 #endif
```

- ▶ Read-Only Methoden werden mit `const` markiert
 - `className::fct(... input ...) const { ... }`
 - geht nur bei Methoden, nicht bei allg. Fktn.
- ▶ neue Syntax: Zeile 24, 28, 31

270

Read-Only Refs als Input 3/5

```
1 #include "vector_new.hpp"
2 #include <iostream>
3 using std::cout;
4
5 Vector::Vector() {
6     dim = 0;
7     coeff = (double*) 0;
8     cout << "new empty vector" << "\n";
9 }
10
11 Vector::Vector(int dim, double init) {
12     assert(dim > 0);
13     this->dim = dim;
14     coeff = (double*) malloc(dim*sizeof(double));
15     assert( coeff != (double*) 0);
16     for (int j=0; j<dim; ++j) {
17         coeff[j] = init;
18     }
19     cout << "new vector, length " << dim << "\n";
20 }
21
22 Vector::~Vector() {
23     if (dim > 0) {
24         free(coeff);
25     }
26     cout << "free vector, length " << dim << "\n";
27 }
```

- ▶ keine Änderungen!

271

Read-Only Refs als Input 4/5

```
29 int Vector::size() const {
30     return dim;
31 }
32
33 void Vector::set(int k, double value) {
34     assert(k>=0 && k<dim);
35     coeff[k] = value;
36 }
37
38 double Vector::get(int k) const {
39     assert(k>=0 && k<dim);
40     return coeff[k];
41 }
42
43 double Vector::norm() const {
44     double norm = 0;
45     for (int j=0; j<dim; ++j) {
46         norm = norm + coeff[j]*coeff[j];
47     }
48     return sqrt(norm);
49 }
```

- ▶ geändert: Zeile 29, 38, 43

272

Read-Only Refs als Input 5/5

```
1 #include "vector_new.hpp"
2 #include <iostream>
3 #include <cassert>
4
5 using std::cout;
6
7 double product(const Vector& x, const Vector& y){
8     double sum = 0;
9     assert( x.size() == y.size() );
10    for (int j=0; j<x.size(); ++j) {
11        sum = sum + x.get(j)*y.get(j);
12    }
13    return sum;
14 }
15
16 int main() {
17     Vector x(100,1);
18     Vector y(100,2);
19     cout << "norm(x) = " << x.norm() << "\n";
20     cout << "norm(y) = " << y.norm() << "\n";
21     cout << "x.y = " << product(x,y) << "\n";
22     return 0;
23 }
```

- ▶ Vorteil: schlanker Daten-Input ohne Kopieren!
 - und: Daten können nicht verändert werden!

- ▶ Output:

```
new vector, length 100
new vector, length 100
norm(x) = 10
norm(y) = 20
x.y = 200
free vector, length 100
free vector, length 100
```

273

Zusammenfassung Syntax

- ▶ bei normalen Datentypen (nicht Pointer, Referenz)
 - `const int var`
 - `int const var`
 - * dieselbe Bedeutung = Integer-Konstante
- ▶ bei Referenzen
 - `const int& ref` = Referenz auf `const int`
 - `int const& ref` = Referenz auf `const int`
- ▶ Achtung bei Pointern
 - `const int* ptr` = Pointer auf `const int`
 - `int const* ptr` = Pointer auf `const int`
 - `int* const ptr` = konstanter Pointer auf `int`
- ▶ bei Methoden, die nur Lese-Zugriff brauchen
 - `className::fct(... input ...) const`
 - kann Methode sonst nicht mit `const`-Refs nutzen
- ▶ sinnvoll, falls Rückgabe eine Referenz ist
 - `const int& fct(... input ...)`
 - lohnt sich nur bei großer Rückgabe, die nur gelesen wird
 - **Achtung:** Rückgabe muss existieren, sonst Laufzeitfehler!

274

Überladen und const 1/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 void f(int x) { cout << "int\n"; };
5 void f(const int x) { cout << "const int\n"; };
6
7 int main() {
8     int x = 0;
9     const int c = 0;
10    f(x);
11    f(c);
12    return 0;
13 }
```

- ▶ `const` wird bei Input-Variablen nicht berücksichtigt
 - Syntax-Fehler beim Kompilieren:
overload.const.cpp:2: error: redefinition of 'f'

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 void f(int& x) { cout << "int\n"; };
5 void f(const int& x) { cout << "const int\n"; };
6
7 int main() {
8     int x = 0;
9     const int c = 0;
10    f(x);
11    f(c);
12    return 0;
13 }
```

- ▶ `const` wichtig bei Referenzen als Input
 - Kompilieren OK und Output:
int
const int

275

Überladen und const 2/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Demo {
5 private:
6     int content;
7 public:
8     Demo() { content = 0; }
9     void f() { cout << "normales Objekt\n"; };
10    void f() const { cout << "const Objekt\n"; };
11 };
12
13 int main() {
14     Demo x;
15     const Demo y;
16     x.f();
17     y.f();
18     return 0;
19 }
```

- ▶ kann Methode durch `const`-Methode überladen
 - `const`-Meth. wird für `const`-Objekte verwendet
 - sonst wird „normale“ Methode verwendet
- ▶ Output:
normales Objekt
const Objekt

276

Überladen von Operatoren

- ▶ Kopierkonstruktor
- ▶ Type Casting
- ▶ Zuweisungsoperator
- ▶ Unäre und binäre Operatoren
- ▶ **operator**

277

Klasse für Komplexe Zahlen

```
1 #include <iostream>
2 #include <cmath>
3
4 class Complex {
5 private:
6     double re;
7     double im;
8 public:
9     Complex(double=0, double=0);
10    double real() const;
11    double imag() const;
12    double abs() const;
13    void print() const;
14 };
15
16 Complex::Complex(double re, double im) {
17     this->re = re;
18     this->im = im;
19 }
20
21 double Complex::real() const {
22     return re;
23 }
24
25 double Complex::imag() const {
26     return im;
27 }
28
29 double Complex::abs() const {
30     return sqrt(re*re + im*im);
31 }
32
33 void Complex::print() const {
34     std::cout << re << " + " << im << " * i";
35 }
```

- ▶ Default-Parameter in der ersten Deklaration
 - Zeile 9: Forward Declaration des Konstruktors
 - Zeile 16–19: Code des Konstruktors

278

Kopierkonstruktor

```
1 Complex::Complex(const Complex& rhs) {
2     re = rhs.re;
3     im = rhs.im;
4 }
```

- ▶ `className::className(const className& rhs)`
- ▶ Spezieller Konstruktor für den Aufruf
 - `Complex lhs = rhs;`
 - oder auch `Complex lhs(rhs);`
- ▶ erzeugt neues Objekt `lhs`, kopiert Daten von `rhs`
 - also Input als konstante Referenz (read-only)
- ▶ wird automatisch erstellt (Shallow Copy), falls nicht explizit programmiert
 - hier formal unnötig, da nur statische Daten
 - wichtig, falls Klasse dynamische Daten enthält

279

Zuweisungsoperator

```
1 Complex& Complex::operator=(const Complex& rhs) {
2     if (this != &rhs) {
3         re = rhs.re;
4         im = rhs.im;
5     }
6     return *this;
7 }
```

- ▶ `className& className::operator=(const className& rhs)`
- ▶ Falls `Complex lhs, rhs;` bereits deklariert
 - Zuweisung `lhs = rhs;`
 - keine Deklaration, also Referenz zurückgeben
 - Input als konstante Referenz (read-only)
 - Output als Referenz für Zuweisungsketten
 - * z.B. `a = b = c = d;`
 - * `=` weist von rechts nach links zu!
 - * `a = ...` braucht Auswertung von `b = c = d;`
- ▶ Funktionalität:
 - Daten von `lhs` durch `rhs` überschreiben
 - ggf. dynamische Daten von `lhs` vorher freigeben
- ▶ `this` is Pointer auf das Objekt selbst
 - d.h. `*this` ist das Objekt selbst
- ▶ `if` verhindert Konflikt bei Selbstzuweisung `z = z;`
 - hier formal unnötig, da nur statische Daten
- ▶ wird automatisch erstellt (Shallow Copy), falls nicht explizit programmiert
 - hier formal unnötig, da nur statische Daten
 - wichtig, falls Klasse dynamische Daten enthält

280

Type Casting

```
1 Complex::Complex(double re = 0, double im = 0) {
2   this->re = re;
3   this->im = im;
4 }
```

- ▶ Konstruktor gibt Type Cast **double** auf **Complex**
 - d.h. $x \in \mathbb{R}$ entspricht $x + 0i \in \mathbb{C}$

```
1 Complex::operator double() const {
2   return re;
3 }
```

- ▶ Type Cast **Complex** auf **double**, z.B. durch Realteil
 - formal: **ClassName::operator type() const**
 - * implizite Rückgabe
- ▶ Beachte ggf. bekannte Type Casts
 - implizit von **int** auf **double**
 - oder implizit von **double** auf **int**

281

Unäre Operatoren

- ▶ unäre Operatoren = Op. mit einem Argument

```
1 const Complex Complex::operator-() const {
2   return Complex(-re,-im);
3 }
```

- ▶ Vorzeichenwechsel - (Minus)
 - **const Complex Complex::operator-() const**
 - * Output ist vom Typ **const Complex**
 - * Methode agiert nur auf aktuellen Members
 - * Methode ist read-only auf aktuellen Daten
 - wird Methode der Klasse

- ▶ Aufruf später durch -x

```
1 const Complex Complex::operator~() const {
2   return Complex(re,-im);
3 }
```

- ▶ Konjugation ~ (Tilde)
 - **const Complex Complex::operator~() const**
 - * Output ist vom Typ **const Complex**
 - * Methode agiert nur auf aktuellen Members
 - * Methode ist read-only auf aktuellen Daten
 - wird Methode der Klasse

- ▶ Aufruf später durch ~x

282

complex_part.hpp

```
1 #ifndef _COMPLEX_PART_
2 #define _COMPLEX_PART_
3
4 #include <iostream>
5 #include <cmath>
6
7 class Complex {
8 private:
9   double re;
10  double im;
11 public:
12   Complex(double=0, double=0);
13   Complex(const Complex& rhs);
14   ~Complex();
15   Complex& operator=(const Complex& rhs);
16
17   double real() const;
18   double imag() const;
19   double abs() const;
20   void print() const;
21
22   operator double() const;
23
24   const Complex operator~() const;
25   const Complex operator-() const;
26 };
27
28 #endif
```

- ▶ Zeile 12: Forward Declaration mit Default-Input
- ▶ Zeile 12 + 22: Type Casts **Complex** vs. **double**

283

complex_part.cpp 1/2

```
1 #include "complex_part.hpp"
2
3 using std::cout;
4
5 Complex::Complex(double re, double im) {
6   this->re = re;
7   this->im = im;
8   cout << "Konstruktor\n";
9 }
10
11 Complex::Complex(const Complex& rhs) {
12   re = rhs.re;
13   im = rhs.im;
14   cout << "Kopierkonstruktor\n";
15 }
16
17 Complex::~~Complex() {
18   cout << "Destruktor\n";
19 }
20
21 Complex& Complex::operator=(const Complex& rhs) {
22   if (this != &rhs) {
23     re = rhs.re;
24     im = rhs.im;
25     cout << "Zuweisung\n";
26   }
27   else {
28     cout << "Selbstzuweisung\n";
29   }
30   return *this;
31 }
```

284

complex_part.cpp 2/2

```
33 double Complex::real() const {
34     return re;
35 }
36
37 double Complex::imag() const {
38     return im;
39 }
40
41 double Complex::abs() const {
42     return sqrt(re*re + im*im);
43 }
44
45 void Complex::print() const {
46     cout << re << " + " << im << "*i";
47 }
48
49 Complex::operator double() const {
50     cout << "Complex -> double\n";
51     return re;
52 }
53
54 const Complex Complex::operator-() const {
55     return Complex(-re, -im);
56 }
57
58 const Complex Complex::operator~() const {
59     return Complex(re, -im);
60 }
```

285

Beispiel

```
1 #include <iostream>
2 #include "complex_part.hpp"
3 using std::cout;
4
5 int main() {
6     Complex w(1);
7     Complex x;
8     Complex y(1,1);
9     Complex z = y;
10    x = x;
11    x = ~y;
12    w.print(); cout << "\n";
13    x.print(); cout << "\n";
14    y.print(); cout << "\n";
15    z.print(); cout << "\n";
16    return 0;
17 }
```

► Output:

```
Konstruktor
Konstruktor
Konstruktor
Kopierkonstruktor
Selbstzuweisung
Konstruktor
Zuweisung
Destruktor
1 + 0*i
1 + -1*i
1 + 1*i
1 + 1*i
Destruktor
Destruktor
Destruktor
Destruktor
```

286

Beispiel: Type Cast

```
1 #include <iostream>
2 #include "complex_part.hpp"
3 using std::cout;
4
5 int main() {
6     Complex z((int) 2.3, (int) 1);
7     double x = z;
8     z.print(); cout << "\n";
9     cout << x << "\n";
10    return 0;
11 }
```

► Konstruktor fordert **double** als Input (Zeile 6)

- erst expliziter Type Cast **2.3** auf **int**
- dann impliziter Type Cast auf **double**

► Output:

```
Konstruktor
Complex -> double
2 + 1*i
2
Destruktor
```

287

Binäre Operatoren

```
1 const Complex operator+(const Complex& x, const Complex& y) {
2     double xr = x.real();
3     double xi = x.imag();
4     double yr = y.real();
5     double yi = y.imag();
6     return Complex(xr + yr, xi + yi);
7 }
8 const Complex operator-(const Complex& x, const Complex& y) {
9     double xr = x.real();
10    double xi = x.imag();
11    double yr = y.real();
12    double yi = y.imag();
13    return Complex(xr - yr, xi - yi);
14 }
15 const Complex operator*(const Complex& x, const Complex& y) {
16    double xr = x.real();
17    double xi = x.imag();
18    double yr = y.real();
19    double yi = y.imag();
20    return Complex(xr*yr - xi*yi, xr*yi + xi*yr);
21 }
22 const Complex operator/(const Complex& x, const double y) {
23    assert(y != 0);
24    return Complex(x.real()/y, x.imag()/y);
25 }
26 const Complex operator/(const Complex& x, const Complex& y) {
27    double norm = y.abs();
28    assert(norm > 0);
29    return x*~y / (norm*norm);
30 }
```

► binäre Operatoren = Op. mit zwei Argumenten

- z.B. **+**, **-**, *****, **/**

► außerhalb der Klassendefinition als Funktion

- formal: **const type operator+(const type& rhs1, const type& rhs2)**

- **Achtung:** kein **type::** da kein Teil der Klasse!

► Zeile 22 + 26: beachte $x/y = (x\bar{y})/(y\bar{y}) = x\bar{y}/|y|^2$

288

Operator <<

```
1 std::ostream& operator<<(std::ostream& output,  
2     const Complex& x) {  
3     if (x.imag() == 0) {  
4         return output << x.real();  
5     }  
6     else if (x.real() == 0) {  
7         return output << x.imag() << "i";  
8     }  
9     else {  
10        return output << x.real() << " + " << x.imag() << "i";  
11    }  
12 }
```

- ▶ `cout`-Ausgabe erfolgt über Klasse `std::ostream`
- ▶ weitere Ausgabe wird einfach angehängt mit `<<`
 - kann insbesondere `for`-Schleife verwenden, um z.B. Vektoren / Matrizen mit `cout` auszugeben

289

complex.hpp

```
1 #ifndef _COMPLEX_  
2 #define _COMPLEX_  
3  
4 #include <iostream>  
5 #include <cmath>  
6 #include <cassert>  
7  
8 class Complex {  
9 private:  
10    double re;  
11    double im;  
12 public:  
13    Complex(double=0, double=0);  
14    Complex(const Complex&);  
15    ~Complex();  
16    Complex& operator=(const Complex&);  
17  
18    double real() const;  
19    double imag() const;  
20    double abs() const;  
21  
22    operator double() const;  
23  
24    const Complex operator~() const;  
25    const Complex operator-() const;  
26  
27 };  
28  
29 std::ostream& operator<<(std::ostream& output,  
30     const Complex& x);  
31 const Complex operator+(const Complex&, const Complex&);  
32 const Complex operator-(const Complex&, const Complex&);  
33 const Complex operator*(const Complex&, const Complex&);  
34 const Complex operator/(const Complex&, const double);  
35 const Complex operator/(const Complex&, const Complex&);  
36  
37 #endif
```

- ▶ "vollständige Bibliothek" ohne unnötige `cout` im folgende `cpp` Source-Code

290

complex.cpp 1/3

```
1 #include "complex.hpp"  
2 using std::ostream;  
3  
4 Complex::Complex(double re, double im) {  
5     this->re = re;  
6     this->im = im;  
7 }  
8  
9 Complex::Complex(const Complex& rhs) {  
10    re = rhs.re;  
11    im = rhs.im;  
12 }  
13  
14 Complex::~Complex() {  
15 }  
16  
17 Complex& Complex::operator=(const Complex& rhs) {  
18     if (this != &rhs) {  
19         re = rhs.re;  
20         im = rhs.im;  
21     }  
22     return *this;  
23 }  
24  
25 double Complex::real() const {  
26     return re;  
27 }  
28  
29 double Complex::imag() const {  
30     return im;  
31 }  
32  
33 double Complex::abs() const {  
34     return sqrt(re*re + im*im);  
35 }  
36  
37 Complex::operator double() const {  
38     return re;  
39 }
```

291

complex.cpp 2/3

```
41 const Complex Complex::operator-() const {  
42     return Complex(-re,-im);  
43 }  
44  
45 const Complex Complex::operator~() const {  
46     return Complex(re,-im);  
47 }  
48  
49 const Complex operator+(const Complex& x,const Complex& y){  
50     double xr = x.real();  
51     double xi = x.imag();  
52     double yr = y.real();  
53     double yi = y.imag();  
54     return Complex(xr + yr, xi + yi);  
55 }  
56  
57 const Complex operator-(const Complex& x,const Complex& y){  
58     double xr = x.real();  
59     double xi = x.imag();  
60     double yr = y.real();  
61     double yi = y.imag();  
62     return Complex(xr - yr, xi - yi);  
63 }  
64  
65 const Complex operator*(const Complex& x,const Complex& y){  
66     double xr = x.real();  
67     double xi = x.imag();  
68     double yr = y.real();  
69     double yi = y.imag();  
70     return Complex(xr*yr - xi*yi, xr*yi + xi*yr);  
71 }
```

292

complex.cpp 3/3

```
73 const Complex operator/(const Complex& x, const double y){
74     assert(y != 0);
75     return Complex(x.real()/y, x.imag()/y);
76 }
77
78 const Complex operator/(const Complex& x, const Complex& y){
79     double norm = y.abs();
80     assert(norm > 0);
81     return x*~y / (norm*norm);
82 }
83
84 std::ostream& operator<<(std::ostream& output,
85     const Complex& x) {
86     if (x.imag() == 0) {
87         return output << x.real();
88     }
89     else if (x.real() == 0) {
90         return output << x.imag() << "i";
91     }
92     else {
93         return output << x.real() << " + " << x.imag() << "i";
94     }
95 }
```

293

complex_main.cpp

```
1 #include "complex.hpp"
2 #include <iostream>
3 using std::cout;
4
5 int main() {
6     Complex w;
7     Complex x(1,0);
8     Complex y(0,1);
9     Complex z(3,4);
10
11     w = x + y;
12     cout << w << "\n";
13
14     w = x*y;
15     cout << w << "\n";
16
17     w = x/y;
18     cout << w << "\n";
19
20     w = z/(x + y);
21     cout << w << "\n";
22
23     w = w.abs();
24     cout << w << "\n";
25
26     return 0;
27 }
```

► Output:

```
1 + 1i
1i
-1i
3.5 + 0.5i
3.53553
```

294

Funktionsaufruf & Kopierkonstruktor 1/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Demo {
5 private:
6     int data;
7 public:
8     Demo(int data = 0) {
9         cout << "Standardkonstruktor\n";
10        this->data = data;
11    }
12
13    Demo(const Demo& rhs) {
14        cout << "Kopierkonstruktor\n";
15        data = rhs.data;
16    }
17
18    Demo& operator=(const Demo& rhs) {
19        cout << "Zuweisungsoperator\n";
20        data = rhs.data;
21        return *this;
22    }
23
24    ~Demo() {
25        cout << "Destruktor\n";
26    }
27 }
28 ;
```

- Bei Funktionsaufruf werden Daten mittels Kopierkonstruktor an Funktion übergeben

295

Funktionsaufruf & Kopierkonstruktor 2/2

```
30 void function(Demo input) {
31     cout << "Funktion mit Call by Value\n";
32 }
33
34 void function2(Demo& input) {
35     cout << "Funktion mit Referenz\n";
36 }
37
38 int main() {
39     Demo x;
40     Demo y = x;
41     cout << "*** Funktionsaufruf (Call by Value)\n";
42     function(y);
43     cout << "*** Funktionsaufruf (Call by Reference)\n";
44     function2(x);
45     cout << "*** Programmende\n";
46     return 0;
47 }
```

- Bei Funktionsaufruf werden Daten mittels Kopierkonstruktor an Funktion übergeben

► Output:

```
Standardkonstruktor
Kopierkonstruktor
*** Funktionsaufruf (Call by Value)
Kopierkonstruktor
Funktion mit Call by Value
Destruktor
*** Funktionsaufruf (Call by Reference)
Funktion mit Referenz
*** Programmende
Destruktor
Destruktor
```

296

Zusammenfassung Syntax

- ▶ Konstruktor (= Type Cast auf `Class`)
`Class::Class(... input ...)`
- ▶ Destruktor
`Class::~~Class()`
- ▶ Type Cast von `Class` auf `type`
`Class::operator type() const`
 - explizit durch Voranstellen (`type`)
 - implizit bei Zuweisung auf Var. vom Typ `type`
- ▶ Kopierkonstruktor (Deklaration mit Initialisierung)
`Class::Class(const Class&)`
 - expliziter Aufruf durch `Class var(rhs);`
* oder `Class var = rhs;`
 - implizite bei Funktionsaufruf (Call by Value)
- ▶ Zuweisungsoperator
`Class& Class::operator=(const Class&)`
- ▶ unäre Operatoren, z.B. Tilde `~` und Vorzeichen `-`
`const Class Class::operator-() const`
- ▶ binäre Operatoren, z.B. `+`, `-`, `*`, `/`
`const Class operator+(const Class&, const Class&)`
 - außerhalb der Klasse als Funktion
- ▶ Ausgabe mittels `cout`
`std::ostream& operator<<(std::ostream& output, const Class& object)`

297

Binäre Operatoren in der Klasse

```

1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Complex {
5 private:
6     double re;
7     double im;
8 public:
9     Complex(double re=0, double im=0) {
10         this->re = re;
11         this->im = im;
12     }
13     const Complex operator-() const {
14         return Complex(-re, -im);
15     }
16     const Complex operator-(const Complex& y) {
17         return Complex(re-y.re, im-y.im);
18     }
19     void print() const {
20         cout << re << " + " << im << "\n";
21     }
22 };
23
24 int main() {
25     Complex x(1,0);
26     Complex y(0,1);
27     Complex w = x-y;
28     (-y).print();
29     w.print();
30 }

```

- ▶ binäre Operatoren `+`, `-`, `*`, `/` als Methode möglich
 - Vorzeichen (unärer Operator): Zeile 13-15
 - Subtraktion (binärer Operator): Zeile 16-18
* dann erstes Argument = aktuelles Objekt
- ▶ statt außerhalb der Klasse als Funktion
`const Complex operator-(const Complex& x, const Complex& y)`

298

Welche Operatoren überladen?

<code>+</code>	<code>-</code>	<code>*</code>	<code>/</code>	<code>&</code>	<code>^</code>	<code>%</code>
<code> </code>	<code>~</code>	<code>!</code>	<code>=</code>	<code><</code>	<code>></code>	<code>+=</code>
<code>-=</code>	<code>*=</code>	<code>/=</code>	<code>%=</code>	<code>^=</code>	<code>&=</code>	<code> =</code>
<code><<</code>	<code>>></code>	<code>>>=</code>	<code><<=</code>	<code>==</code>	<code>!=</code>	<code><=</code>
<code>>=</code>	<code>&&</code>	<code> </code>	<code>++</code>	<code>--</code>	<code>->*</code>	<code>,</code>
<code>-></code>	<code>[]</code>	<code>()</code>	<code>new</code>	<code>new[]</code>	<code>delete</code>	<code>delete[]</code>

- ▶ als unäre Operatoren, vorangestellt `++var`
`const Class Class::operator++()`
- ▶ als unäre Operatoren, nachgestellt `var++`
`const Class Class::operator++(int)`
- ▶ als binäre Operatoren
`const Class operator+(const Class&, const Class&)`
- ▶ kann Operatoren auch überladen
 - z.B. Division `Complex/double` vs. `Complex/Complex`
 - z.B. unär und binär (neg. Vorzeichen vs. Minus)
 - unterschiedliche Signatur beachten!
- ▶ Man kann keine neuen Operatoren definieren!
- ▶ Man kann `.`, `:`, `::`, `sizeof`, `.*` nicht überladen!
- ▶ Im Test sind Signaturen für Operator vorgegeben!
 - Ausnahme: Konstruktor, Destruktor!
- ▶ <https://www.c-plusplus.net/forum/232010-full>
- ▶ https://en.wikipedia.org/wiki/Operators_in_C_and_C++

299

Dynamische Speicherverwaltung

- ▶ dynamische Speicherverwaltung in C++
- ▶ Dreierregel
 - ▶ `new, new ... []`
 - ▶ `delete, delete[]`

300

new vs. malloc

- ▶ **malloc** reserviert nur Speicher
 - **Nachteil:** Konstr. werden nicht aufgerufen
 - * d.h. Initialisierung händisch
- ▶ ein dynamisches Objekt

```
type* var = (type*) malloc(sizeof(type));
*var = ...;
```
- ▶ dynamischer Vektor von Objekten der Länge **N**

```
type* vec = (type*) malloc(N*sizeof(type));
vec[j] = ...;
```
- ▶ in C++ ist Type Cast bei **malloc** zwingend!

- ▶ **new** reserviert Speicher + ruft Konstruktoren auf
- ▶ ein dynamisches Objekt (mit Standardkonstruktor)

```
type* var = new type;
```
- ▶ ein dynamisches Objekt (mit Konstruktor)

```
type* var = new type(... input ... );
```
- ▶ dyn. Vektor der Länge **N** (mit Standardkonstruktor)

```
type* vec = new type[N];
```

 - * Standardkonstruktor für jeden Koeffizienten

- ▶ **Konvention:** Immer **new** verwenden!
- ▶ Aber: Es gibt keine C++ Variante von **realloc**

301

delete vs. free

- ▶ **free** gibt Speicher von **malloc** frei

```
type* vec = (type*) malloc(N*sizeof(type));
free(vec);
```

 - unabhängig von Objekt / Vektor von Objekten
 - nur auf Output von **malloc** anwenden!

- ▶ **delete** ruft Destruktor auf und gibt Speicher von **new** frei

```
type* var = new type(... input ... );
delete var;
```

 - für ein dynamische erzeugtes Objekt
 - nur auf Output von **new** anwenden!

- ▶ **delete[]** ruft Destruktor für jeden Koeffizienten auf und gibt Speicher von **new ...[N]** frei

```
type* vec = new type[N];
delete[] vec;
```

 - für einen dynamischen Vektor von Objekten
 - nur auf Output von **new ...[N]** anwenden!

- ▶ **Konvention:** Falls Pointer auf keinen dynamischen Speicher zeigt, wird er händisch auf **NULL** gesetzt
 - d.h. nach **free**, **delete**, **delete[]** folgt
 - * **vec = (type*) NULL;**
 - * in C++ häufiger: **vec = (type*) 0;**

302

Dreierregel

- ▶ auch: Regel der großen Drei

- ▶ **Wenn Destruktor oder Kopierkonstruktor oder Zuweisungsoperator implementiert ist, so müssen alle drei implementiert werden!**

- ▶ notwendig, wenn Klasse dynamische Felder enthält
 - anderenfalls macht Compiler automatisch Shallow Copy (OK bei elementaren Typen!)
 - denn Shallow Copy führt sonst auf Laufzeitfehler bei dynamischen Feldern

303

Missachtung der Dreierregel 1/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Demo {
5 private:
6     int n;
7     double* data;
8 public:
9     Demo(int n, double input);
10    ~Demo();
11    int getN() const;
12    const double* getData() const;
13    void set(double input);
14 };
15
16 Demo::Demo(int n, double input) {
17     cout << "constructor, length " << n << "\n";
18     this->n = n;
19     data = new double[n];
20     for (int j=0; j<n; ++j) {
21         data[j] = input;
22     }
23 }
24
25 Demo::~Demo() {
26     cout << "destructor, length " << n << "\n";
27     delete[] data;
28 }
29
30 int Demo::getN() const {
31     return n;
32 }
33
34 const double* Demo::getData() const {
35     return data;
36 }
```

- ▶ Destruktor ist vorhanden (dynamischer Speicher!)
- ▶ Kopierkonstruktor und Zuweisungsoperator fehlen

304

Missachtung der Dreierregel 2/2

```
38 void Demo::set(double input) {
39     for (int j=0; j<n; ++j) {
40         data[j] = input;
41     }
42 }
43
44 std::ostream& operator<<(std::ostream& output,
45                         const Demo& object) {
46     const double* data = object.getData();
47     for(int j=0; j<object.getN(); ++j) {
48         output << data[j] << " ";
49     }
50     return output;
51 }
52
53 void print(Demo z) {
54     cout << "print: " << z << "\n";
55 }
56
57 int main() {
58     Demo x(4,2);
59     Demo y = x;
60     cout << "x = " << x << ", y = " << y << "\n";
61     y.set(3);
62     cout << "x = " << x << ", y = " << y << "\n";
63     print(x);
64     x.set(5);
65     cout << "x = " << x << ", y = " << y << "\n";
66     return 0;
67 }
```

► Output:

```
x = 2 2 2 2 , y = 2 2 2 2
x = 3 3 3 3 , y = 3 3 3 3
print: 3 3 3 3
destructor, length 4
x = 5 5 5 5 , y = 5 5 5 5
destructor, length 4
```

Speicherzugriffsfehler

305

vector.hpp

```
1 #ifndef _VECTOR_
2 #define _VECTOR_
3 #include <cmath>
4 #include <cassert>
5
6 // The class Vector stores vectors in R^d
7 class Vector {
8 private:
9     int dim;
10    double* coeff;
11
12 public:
13    // constructors, destructor, assignment
14    Vector();
15    Vector(int dim, double init=0);
16    Vector(const Vector&);
17    ~Vector();
18    Vector& operator=(const Vector&);
19    // return length of vector
20    int size() const;
21    // read and write entries
22    const double& operator[](int k) const;
23    double& operator[](int k);
24    // compute Euclidean norm
25    double norm() const;
26 };
27
28 // addition of vectors
29 const Vector operator+(const Vector&, const Vector&);
30 // scalar multiplication
31 const Vector operator*(const double, const Vector&);
32 const Vector operator*(const Vector&, const double);
33 // scalar product
34 const double operator*(const Vector&, const Vector&);
35
36 #endif
```

► Überladen von []

- falls konstantes Objekt, Methode aus Zeile 22
- falls "normales Objekt", Methode aus Zeile 23

306

vector.cpp 1/4

```
1 #include "vector.hpp"
2 #include <iostream>
3 using std::cout;
4
5 Vector::Vector() {
6     dim = 0;
7     coeff = (double*) 0;
8     // just for demonstration purposes
9     cout << "constructor, empty\n";
10 }
11
12 Vector::Vector(int dim, double init) {
13     assert(dim >= 0);
14     this->dim = dim;
15     if (dim == 0) {
16         coeff = (double*) 0;
17     }
18     else {
19         coeff = new double[dim];
20         for (int j=0; j<dim; ++j) {
21             coeff[j] = init;
22         }
23     }
24     // just for demonstration purposes
25     cout << "constructor, length " << dim << "\n";
26 }
27
28 Vector::Vector(const Vector& rhs) {
29     dim = rhs.dim;
30     if (dim == 0) {
31         coeff = (double*) 0;
32     }
33     else {
34         coeff = new double[dim];
35         for (int j=0; j<dim; ++j) {
36             coeff[j] = rhs[j];
37         }
38     }
39     // just for demonstration purposes
40     cout << "copy constructor, length " << dim << "\n";
41 }
```

307

vector.cpp 2/4

```
43 Vector::~Vector() {
44     if (dim > 0) {
45         delete[] coeff;
46     }
47     // just for demonstration purposes
48     cout << "free vector, length " << dim << "\n";
49 }
50
51 Vector& Vector::operator=(const Vector& rhs) {
52     if (this != &rhs) {
53         if (dim != rhs.dim) {
54             if (dim > 0) {
55                 delete[] coeff;
56             }
57             dim = rhs.dim;
58             if (dim > 0) {
59                 coeff = new double[dim];
60             }
61             else {
62                 coeff = (double*) 0;
63             }
64         }
65         for (int j=0; j<dim; ++j) {
66             coeff[j] = rhs[j];
67         }
68     }
69     // just for demonstration purposes
70     cout << "deep copy, length " << dim << "\n";
71     return *this;
72 }
73
74 int Vector::size() const {
75     return dim;
76 }
```

308

vector.cpp 3/4

```
78 const double& Vector::operator[](int k) const {
79     assert(k>=0 && k<dim);
80     return coeff[k];
81 }
82
83 double& Vector::operator[](int k) {
84     assert(k>=0 && k<dim);
85     return coeff[k];
86 }
87
88 double Vector::norm() const {
89     double sum = 0;
90     for (int j=0; j<dim; ++j) {
91         sum = sum + coeff[j]*coeff[j];
92     }
93     return sqrt(sum);
94 }
95
96 const Vector operator+(const Vector& rhs1,
97                       const Vector& rhs2) {
98     assert(rhs1.size() == rhs2.size());
99     Vector result(rhs1);
100    for (int j=0; j<result.size(); ++j) {
101        result[j] += rhs2[j];
102    }
103    return result;
104 }
```

- ▶ Zugriff auf Vektor-Koeff. über [] (Zeile 81 + 86)

309

vector.cpp 4/4

```
106 const Vector operator*(const double scalar,
107                        const Vector& input) {
108     Vector result(input);
109     for (int j=0; j<result.size(); ++j) {
110         result[j] *= scalar;
111     }
112     return result;
113 }
114
115 const Vector operator*(const Vector& input,
116                       const double scalar) {
117     return scalar*input;
118 }
119
120 const double operator*(const Vector& rhs1,
121                       const Vector& rhs2) {
122     double scalarproduct = 0;
123     assert(rhs1.size() == rhs2.size());
124     for (int j=0; j<rhs1.size(); ++j) {
125         scalarproduct += rhs1[j]*rhs2[j];
126     }
127     return scalarproduct;
128 }
```

- ▶ Zeile 118: Falls man `Vector * double` nicht implementiert, kriegt man kryptischen Laufzeitfehler:
 - impliziter Type Cast `double` auf `int`
 - Aufruf Konstruktor mit einem `int`-Argument
 - vermutlich `assert`-Abbruch in Zeile 126
- ▶ Operator `*` dreifach überladen:
 - `Vector * double` Skalarmultiplikation
 - `double * Vector` Skalarmultiplikation
 - `Vector * Vector` Skalarprodukt

310

Beispiel

```
1 #include "vector.hpp"
2 #include <iostream>
3 using std::cout;
4
5 int main() {
6     Vector vector1;
7     Vector vector2(100,4);
8     Vector vector3 = 4*vector2;
9     cout << "*** Addition\n";
10    vector1 = vector2 + vector2;
11    cout << "Norm1 = " << vector1.norm() << "\n";
12    cout << "Norm2 = " << vector2.norm() << "\n";
13    cout << "Norm3 = " << vector3.norm() << "\n";
14    cout << "Skalarprodukt = " << vector2*vector3 << "\n";
15    cout << "Norm " << (4*vector3).norm() << "\n";
16    return 0;
17 }
```

▶ Output:

```
constructor, empty
constructor, length 100
copy constructor, length 100
*** Addition
copy constructor, length 100
deep copy, length 100
free vector, length 100
Norm1 = 80
Norm2 = 40
Norm3 = 160
Skalarprodukt = 6400
Norm copy constructor, length 100
640
free vector, length 100
free vector, length 100
free vector, length 100
free vector, length 100
```

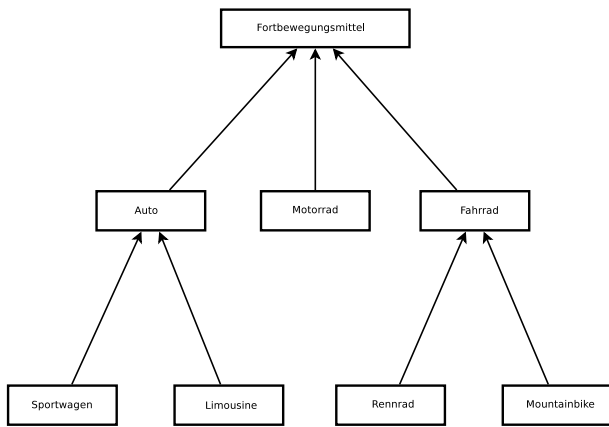
311

Vererbung

- ▶ Was ist Vererbung?
- ▶ Geerbte Felder und Methoden
- ▶ Methoden redefinieren
- ▶ Aufruf von Basismethoden

312

Was ist Vererbung?



- ▶ im Alltag werden Objekte klassifiziert, z.B.
 - Jeder Sportwagen ist ein Auto
 - * kann alles, was ein Auto kann, und noch mehr
 - Jedes Auto ist ein Fortbewegungsmittel
 - * kann alles, was ein Fbm. kann, und noch mehr
- ▶ in C++ mittels Klassen abgebildet
 - Klasse (Fortbewegungsmittel) vererbt alle Members/Methoden an abgeleitete Klasse (Auto)
 - abgeleitete Klasse (Auto) kann zusätzliche Members/Methoden haben
- ▶ mathematisches Beispiel: $\mathbb{Q} \subset \mathbb{R} \subset \mathbb{C}$

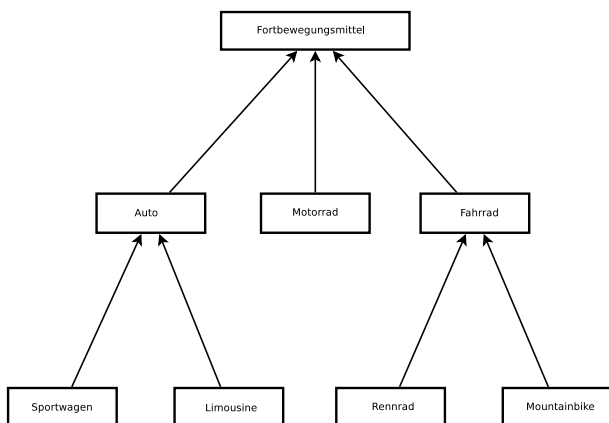
313

public-Vererbung

- ▶ `class Abgeleitet : public Basisklasse { ... };`
 - Klasse **Abgeleitet** erbt alles von **Basisklasse**
 - * alle Members + Methoden
 - Qualifier **public** gibt Art der Vererbung an
 - * alle **private** Members von **Basisklasse** sind unsichtbare Members von **Abgeleitet**, d.h. nicht im Scope!
 - * alle **public** Members von **Basisklasse** sind auch **public** Members von **Abgeleitet**
 - später noch Qualifier **private** und **protected**
 - kann weitere Members + Methoden zusätzlich für **Abgeleitet** im Block `{ ... }` definieren
 - * wie bisher!
- ▶ Vorteil bei Vererbung:
 - Muss Funktionalität ggf. 1x implementieren!
 - Code wird kürzer (vermeidet Copy'n'Paste)
 - Fehlervermeidung

314

Formales Beispiel



- ▶ `class Fortbewegungsmittel { ... };`
- ▶ `class Auto : public Fortbewegungsmittel { ... };`
- ▶ `class Sportwagen : public Auto { ... };`
- ▶ `class Limousine : public Auto { ... };`
- ▶ `class Motorrad : public Fortbewegungsmittel { ... };`
- ▶ `class Fahrrad : public Fortbewegungsmittel { ... };`
- ▶ `class Rennrad : public Fahrrad { ... };`
- ▶ `class Mountainbike : public Fahrrad { ... };`

315

Ein erstes C++ Beispiel

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Basisklasse {
5 private:
6     double x;
7 public:
8     double getX() const { return x; }
9     void setX(double input) { x = input; }
10 };
11
12 class Abgeleitet : public Basisklasse {
13 private:
14     double y;
15 public:
16     double getY() const { return y; }
17     void setY(double input) { y = input; }
18 };
19
20 int main() {
21     Basisklasse var1;
22     Abgeleitet var2;
23
24     var1.setX(5);
25     cout << "var1.x = " << var1.getX() << "\n";
26
27     var2.setX(1);
28     var2.setY(2);
29     cout << "var2.x = " << var2.getX() << "\n";
30     cout << "var2.y = " << var2.getY() << "\n";
31     return 0;
32 }
```

▶ Output:

```
var1.x = 5
var2.x = 1
var2.y = 2
```

316

private Members vererben 1/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Basisklasse {
5 private:
6     double x;
7 public:
8     Basisklasse() { x = 0; }
9     Basisklasse(double inx) { x = inx; }
10    double getX() const { return x; }
11    void setX(double inx) { x = inx; }
12 };
13
14 class Abgeleitet : public Basisklasse {
15 private:
16     double y;
17 public:
18     Abgeleitet() { x = 0; y = 0; };
19     Abgeleitet(double inx, double iny) { x = inx; y = iny; };
20     double getY() const { return y; }
21     void setY(double iny) { y = iny; }
22 };
23
24 int main() {
25     Basisklasse var1(5);
26     Abgeleitet var2(1,2);
27
28     cout << "var1.x = " << var1.getX() << ", ";
29     cout << "var2.x = " << var2.getX() << ", ";
30     cout << "var2.y = " << var2.getY() << "\n";
31     return 0;
32 }
```

- ▶ derselbe Syntax-Fehler in Zeile 18 + 19:
Ableiten2.cpp:18: error: 'x' is a private member of 'Basisklasse'
- ▶ Zugriff auf **private** Members nur in eigener Klasse, nicht im Scope bei Objekten abgeleiteter Klassen

317

private Members vererben 2/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Basisklasse {
5 private:
6     double x;
7 public:
8     Basisklasse() { x = 0; }
9     Basisklasse(double inx) { x = inx; }
10    double getX() const { return x; }
11    void setX(double inx) { x = inx; }
12 };
13
14 class Abgeleitet : public Basisklasse {
15 private:
16     double y;
17 public:
18     Abgeleitet() { setX(0); y = 0; };
19     Abgeleitet(double inx, double iny) { setX(inx); y = iny; };
20     double getY() const { return y; }
21     void setY(double iny) { y = iny; }
22 };
23
24 int main() {
25     Basisklasse var1(5);
26     Abgeleitet var2(1,2);
27     cout << "var1.x = " << var1.getX() << ", ";
28     cout << "var2.x = " << var2.getX() << ", ";
29     cout << "var2.y = " << var2.getY() << "\n";
30     return 0;
31 }
```

- ▶ **Output:** var1.x = 5, var2.x = 1, var2.y = 2
- ▶ Zeile 18 + 19: Aufruf von **public**-Methoden aus **Basisklasse** erlaubt Zugriff auf **private**-Members von **Basisklasse** auch für Objekte der Klasse **Abgeleitet**
- ▶ **x** ist in **Abgeleitet** nicht im Scope, aber existiert!

318

Konstruktor & Destruktor 1/4

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Basisklasse {
5 private:
6     double x;
7 public:
8     Basisklasse() {
9         cout << "Basisklasse()\n";
10        x = 0;
11    }
12    Basisklasse(double inx) {
13        cout << "Basisklasse(" << inx << ")\n";
14        x = inx;
15    }
16    ~Basisklasse() {
17        cout << "~Basisklasse()\n";
18    }
19    double getX() const { return x; }
20    void setX(double inx) { x = inx; }
21 };
22
23 class Abgeleitet : public Basisklasse {
24 private:
25     double y;
26 public:
27     Abgeleitet() {
28         cout << "Abgeleitet()\n";
29         setX(0);
30         y = 0;
31     };
32     Abgeleitet(double inx, double iny) {
33         cout << "Abgeleitet(" << inx << ", " << iny << ")\n";
34         setX(inx);
35         y = iny;
36     };
37     ~Abgeleitet() {
38         cout << "~Abgeleitet()\n";
39     }
40     double getY() const { return y; }
41     void setY(double iny) { y = iny; }
42 };
```

319

Konstruktor & Destruktor 2/4

```
44 int main() {
45     Basisklasse var1(5);
46     Abgeleitet var2(1,2);
47     cout << "var1.x = " << var1.getX() << ", ";
48     cout << "var2.x = " << var2.getX() << ", ";
49     cout << "var2.y = " << var2.getY() << "\n";
50     return 0;
51 }
```

- ▶ Anlegen eines Objekts vom Typ **Abgeleitet** ruft Constructoren von **Basisklasse** und **Abgeleitet** auf
 - automatisch wird Standard-Konstr. aufgerufen!
- ▶ Freigabe eines Objekts vom Typ **Abgeleitet** ruft Destruktoren von **Abgeleitet** und **Basisklasse**
- ▶ **Output:**
Basisklasse(5)
Basisklasse()
Abgeleitet(1,2)
var1.x = 5, var2.x = 1, var2.y = 2
~Abgeleitet()
~Basisklasse()
~Basisklasse()

320

Konstruktor & Destruktor 3/4

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Basisklasse {
5 private:
6     double x;
7 public:
8     Basisklasse() {
9         cout << "Basisklasse()\n";
10        x = 0;
11    }
12    Basisklasse(double inx) {
13        cout << "Basisklasse(" << inx << ")\n";
14        x = inx;
15    }
16    ~Basisklasse() {
17        cout << "~Basisklasse()\n";
18    }
19    double getX() const { return x; }
20    void setX(double inx) { x = inx; }
21 };
22
23 class Abgeleitet : public Basisklasse {
24 private:
25     double y;
26 public:
27     Abgeleitet() {
28         cout << "Abgeleitet()\n";
29         setX(0);
30         y = 0;
31     };
32     Abgeleitet(double inx, double iny) : Basisklasse(inx) {
33         cout << "Abgeleitet(" << inx << ", " << iny << ")\n";
34         y = iny;
35     };
36     ~Abgeleitet() {
37         cout << "~Abgeleitet()\n";
38     }
39     double getY() const { return y; }
40     void setY(double iny) { y = iny; }
41 };
```

321

Konstruktor & Destruktor 4/4

```
43 int main() {
44     Basisklasse var1(5);
45     Abgeleitet var2(1,2);
46     cout << "var1.x = " << var1.getX() << ", ";
47     cout << "var2.x = " << var2.getX() << ", ";
48     cout << "var2.y = " << var2.getY() << "\n";
49     return 0;
50 }
```

- ▶ kann bewusst Konstruktor von **Basisklasse** wählen wenn Konstruktor von **Abgeleitet** aufgerufen wird
 - **Abgeleitet(...)** : **Basisklasse(...)** {...};
 - ruft Konstruktor von **Basisklasse**, welcher der Signatur entspricht (→ Überladen)

- ▶ Output:

```
Basisklasse(5)
Basisklasse(1)
Abgeleitet(1,2)
var1.x = 5, var2.x = 1, var2.y = 2
~Abgeleitet()
~Basisklasse()
~Basisklasse()
```

322

Ein weiteres Beispiel 1/3

```
1 #ifndef _FORTBEWEGUNGSMITTEL_
2 #define _FORTBEWEGUNGSMITTEL_
3
4 #include <iostream>
5 #include <string>
6
7 class Fortbewegungsmittel {
8 private:
9     double speed;
10 public:
11     Fortbewegungsmittel(double = 0);
12     double getSpeed() const;
13     void setSpeed(double);
14     void bewegen() const;
15 };
16
17 class Auto : public Fortbewegungsmittel {
18 private:
19     std::string farbe;
20     // zusaetzliche Eigenschaft
21 public:
22     Auto();
23     Auto(double, std::string);
24     std::string getFarbe() const;
25     void setFarbe(std::string);
26     void schalten() const; // zusaetzliche Faehigkeit
27 };
28 class Sportwagen : public Auto {
29 public:
30     Sportwagen();
31     Sportwagen(double, std::string);
32     void kickstart() const; // zusaetzliche Eigenschaft
33 };
34 #endif
```

323

Ein weiteres Beispiel 2/3

```
1 #include "fortbewegungsmittel.hpp"
2 using std::string;
3 using std::cout;
4
5 Fortbewegungsmittel::Fortbewegungsmittel(double s) {
6     cout << "Fortbewegungsmittel(" << s << ")\n";
7     speed = s;
8 }
9 double Fortbewegungsmittel::getSpeed() const {
10    return speed;
11 }
12 void Fortbewegungsmittel::setSpeed(double s) {
13    speed = s;
14 }
15 void Fortbewegungsmittel::bewegen() const {
16    cout << "Ich bewege mich mit " << speed << " km/h\n";
17 }
18
19 Auto::Auto() { cout << "Auto()\n"; };
20 Auto::Auto(double s, string f) : Fortbewegungsmittel(s) {
21    cout << "Auto(" << s << ", " << f << ")\n";
22    farbe = f;
23 }
24 string Auto::getFarbe() const {
25    return farbe;
26 }
27 void Auto::setFarbe(string f) {
28    farbe = f;
29 }
30 void Auto::schalten() const {
31    cout << "Geschaltet\n";
32 }
33
34 Sportwagen::Sportwagen() { cout << "Sportwagen()\n"; };
35 Sportwagen::Sportwagen(double s, string f) : Auto(s,f) {
36    cout << "Sportwagen(" << s << ", " << f << ")\n";
37 }
38 void Sportwagen::kickstart() const {
39    cout << "Roar\n";
40 }
```

324

Ein weiteres Beispiel 3/3

```
1 #include "fortbewegungsmittel.hpp"
2 #include <iostream>
3
4 int main() {
5     Fortbewegungsmittel fahrrad(10);
6     Auto cabrio(100,"rot");
7     Sportwagen porsche(230,"schwarz");
8
9     fahrrad.bewegen();
10    cabrio.bewegen();
11    porsche.bewegen();
12
13    cabrio.schalten();
14    porsche.kickstart();
15
16    return 0;
17 }
```

► Output:

```
Fortbewegungsmittel(10)
Fortbewegungsmittel(100)
Auto(100,rot)
Fortbewegungsmittel(230)
Auto(230,schwarz)
Sportwagen(230,schwarz)
Ich bewege mich mit 10 km/h
Ich bewege mich mit 100 km/h
Ich bewege mich mit 230 km/h
Geschaltet
Roar
```

325

private, protected, public 1/2

- **private, protected, public** sind Qualifier für Members in Klassen
 - kontrollieren, wie auf Members der Klasse zugegriffen werden darf
- **private** (Standard)
 - Zugriff nur von Methoden der gleichen Klasse
- **protected**
 - Zugriff nur von Methoden der gleichen Klasse
 - Unterschied zu **private** nur bei Vererbung
- **public**
 - erlaubt Zugriff von überall
- **Konvention.** Datenfelder sind immer **private**
- **private, protected, public** sind auch Qualifier für Vererbung, z.B.
 - **class Abgeleitet : public Basisklasse {...};**

Basisklasse	abgeleitete Klasse		
	public	protected	private
public	public	protected	private
protected	protected	protected	private
private	hidden	hidden	hidden

- Sichtbarkeit ändert sich durch Art der Vererbung
 - Zugriff kann nur verschärft werden
 - andere außer **public** machen selten Sinn

326

private, protected, public 2/2

```
1 class Basisklasse {
2     private:
3         int a;
4     protected:
5         int b;
6     public:
7         int c;
8 };
9
10 class Abgeleitet : public Basisklasse {
11 public:
12     void methode() {
13         a = 10; // Nicht OK, da hidden
14         b = 10; // OK, da protected
15         c = 10; // OK, da public
16     }
17 };
18
19 int main() {
20     Basisklasse bas;
21     bas.a = 10; // Nicht OK, da private
22     bas.b = 10; // Nicht OK, da protected
23     bas.c = 10; // OK, da public
24
25     Abgeleitet abg;
26     abg.a = 10; // Nicht OK, da hidden
27     abg.b = 10; // Nicht OK, da protected
28     abg.c = 10; // OK, da public
29
30     return 0;
31 }
```

► Compiler liefert Syntax-Fehler in Zeile 13, 21, 22, 26, 27

```
protected.cpp:13: error: 'a' is a private member of 'Basisklasse'
protected.cpp:3: note: declared private here
```

327

Methoden redefinieren 1/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Basisklasse {
5     public:
6         void print() { cout << "kein Input\n"; }
7         void print(int x) { cout << "Input = " << x << "\n"; }
8 };
9
10 class Abgeleitet : public Basisklasse {
11     public:
12         void print() { cout << "Abgeleitet: kein Input\n"; }
13 };
14
15 int main() {
16     Basisklasse var1;
17     Abgeleitet var2;
18
19     var1.print();
20     var1.print(1);
21     var2.print();
22     var2.print(2);
23     return 0;
24 }
```

- wird in Basisklasse und abgeleiteter Klasse eine Methode gleichen Namens definiert, so steht für Objekte der abgeleiteten Klasse nur diese Methode zur Verfügung, alle Überladungen in der Basisklasse werden überdeckt, sog. Redefinieren
 - **Unterscheide Überladen** (Zeile 6 + 7)
 - **und Redefinieren** (Zeile 12)
- Kompilieren liefert Fehlermeldung:

```
redefinieren1.cpp:22: error: too many arguments to function call, expected 0, have 1; did you mean 'Basisklasse::print'?
```

328

Methoden redefinieren 2/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Basisklasse {
5 public:
6     void print() { cout << "kein Input\n"; }
7     void print(int x) { cout << "Input = " << x << "\n"; }
8 };
9
10 class Abgeleitet : public Basisklasse {
11 public:
12     void print() { cout << "Abgeleitet: kein Input\n"; }
13 };
14
15 int main() {
16     Basisklasse var1;
17     Abgeleitet var2;
18
19     var1.print();
20     var1.print(1);
21     var2.print();
22     var2.Basisklasse::print(2); // nur diese Zeile ist anders
23     return 0;
24 }
```

- ▶ **Basisklasse** hat überladene Methode **print**
 - 2 Methoden (Zeile 6 + 7)
- ▶ **Abgeleitet** hat nur eine Methode **print** (Zeile 12)
 - **print** aus **Basisklasse** überdeckt (Redefinition)
- ▶ Zugriff auf **print** aus Basisklasse über vollständigen Namen möglich (inkl. Klasse als Namensbereich)
- ▶ Output:
 - kein Input
 - Input = 1
 - Abgeleitet: kein Input
 - Input = 2

329

Matrizen

- ▶ Klasse für Matrizen
- ▶ Vektoren als abgeleitete Klasse

330

Natürliche Matrix-Hierarchie

- ▶ für allgemeine Matrix $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$
 - Vektoren $x \in \mathbb{R}^m \simeq \mathbb{R}^{m \times 1}$
 - quadratische Matrix $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$
 - * reguläre Matrix: $\det(A) \neq 0$
 - * symmetrische Matrix: $A = A^T$
 - * untere Dreiecksmatrix, $A_{jk} = 0$ für $k > j$
 - * obere Dreiecksmatrix, $A_{jk} = 0$ für $k < j$
- ▶ kann für $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ z.B.
 - Matrix-Matrix-Summe
 - Matrix-Matrix-Produkt
 - Norm berechnen
- ▶ kann zusätzlich für quadratische Matrix, z.B.
 - Determinante berechnen
- ▶ kann zusätzlich für reguläre Matrix, z.B.
 - Gleichungssystem eindeutig lösen

331

Koeffizientenzugriff

```
1 double& Matrix::operator()(int j, int k) {
2     assert(j>=0 && j<m);
3     assert(k>=0 && k<n);
4     return coeff[j+k*m];
5 }
6
7 double& Matrix::operator[](int ell) {
8     assert(ell>=0 && ell<m*n);
9     return coeff[ell];
10 }
```

- ▶ speichere Matrix $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$ spaltenweise als $a \in \mathbb{R}^{mn}$
 - $A_{jk} = a_\ell$ mit $\ell = j + km$ für $j, k = 0, 1, \dots$
- ▶ Operator **[]** erlaubt nur ein Argument in C++
 - Syntax $A[j, k]$ nicht erlaubt
 - Syntax $A[j][k]$ nur möglich mit **double** coeff**
- ▶ Nutze Operator **(,)**, d.h. Zugriff mittels **A(j, k)**
 - **A(j, k)** liefert A_{jk}
- ▶ Nutze Operator **[]** für Zugriff auf Speichervektor
 - **A[e]ll** liefert a_ℓ

332

Summe

```
1 const Matrix operator+(const Matrix& A, const Matrix& B) {
2   int m = A.size1();
3   int n = A.size2();
4   assert(m == B.size1());
5   assert(n == B.size2());
6   Matrix sum(m,n);
7   for (int j=0; j<m; ++j) {
8     for (int k=0; k<n; ++k) {
9       sum(j,k) = A(j,k) + B(j,k);
10    }
11  }
12  return sum;
13 }
```

▶ $A+B$ nur definiert für Matrizen gleicher Dimension

- $(A+B)_{jk} = A_{jk} + B_{jk}$

▶ könnte auch Speichervektoren addieren, aber...

- führt auf Fehler, falls zwei Matrizen unterschiedlich gespeichert sind!
 - * z.B. quadratische Matrix + untere Δ -Matrix

333

Produkt

```
1 const Matrix operator*(const Matrix& A, const Matrix& B) {
2   int m = A.size1();
3   int n = A.size2();
4   int p = B.size2();
5   double sum = 0;
6   assert(n == B.size1());
7   Matrix product(m,p);
8   for (int i=0; i<m; ++i) {
9     for (int k=0; k<p; ++k) {
10      sum = 0;
11      for (int j=0; j<n; ++j) {
12        sum = sum + A(i,j)*B(j,k);
13      }
14      product(i,k) = sum;
15    }
16  }
17  return product;
18 }
```

▶ $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times p} \Rightarrow AB \in \mathbb{R}^{m \times p}$

- erfordert passende Dimension!

- $(AB)_{ik} = \sum_{j=0}^{n-1} A_{ij}B_{jk}$

334

matrix.hpp

```
1 #ifndef _MATRIX_
2 #define _MATRIX_
3 #include <cmath>
4 #include <cassert>
5 #include <iostream>
6
7 class Matrix {
8 private:
9   int m;
10  int n;
11  double* coeff;
12
13 public:
14   // constructors, destructor, assignment
15   Matrix();
16   Matrix(int m, int n, double init=0);
17   Matrix(const Matrix&);
18   ~Matrix();
19   Matrix& operator=(const Matrix&);
20
21   // return size of matrix
22   int size1() const;
23   int size2() const;
24
25   // read and write entries with matrix access A(j,k)
26   const double& operator()(int j, int k) const;
27   double& operator()(int j, int k);
28
29   // read and write storage vector A[ell]
30   const double& operator[](int ell) const;
31   double& operator[](int ell);
32
33   // compute norm
34   double norm() const;
35 };
36
37 // matrix-matrix sum and product
38 const Matrix operator+(const Matrix&, const Matrix&);
39 const Matrix operator*(const Matrix&, const Matrix&);
40 // print matrix via output stream
41 std::ostream& operator<<(std::ostream& output,
42                          const Matrix&);
43 #endif
```

335

matrix.cpp 1/4

```
1 #include "matrix.hpp"
2 using std::cout;
3 using std::ostream;
4
5 Matrix::Matrix() {
6   m = 0;
7   n = 0;
8   coeff = (double*) 0;
9   cout << "constructor, empty\n";
10 }
11
12 Matrix::Matrix(int m, int n, double init) {
13   assert(m > 0);
14   assert(n > 0);
15   this->m = m;
16   this->n = n;
17   coeff = new double[m*n];
18   for (int ell=0; ell<m*n; ++ell) {
19     coeff[ell] = init;
20   }
21   cout << "constructor, " << m << " x " << n << "\n";
22 }
23
24 Matrix::Matrix(const Matrix& rhs) {
25   m = rhs.m;
26   n = rhs.n;
27   if (m > 0 && n > 0) {
28     coeff = new double[m*n];
29   }
30   else {
31     coeff = (double*) 0;
32   }
33   for (int ell=0; ell<m*n; ++ell) {
34     coeff[ell] = rhs[ell];
35   }
36   cout << "copy constructor, " << m << " x " << n << "\n";
37 }
```

336

matrix.cpp 2/4

```
39 Matrix::~Matrix() {
40     if (m > 0 && n > 0) {
41         delete[] coeff;
42     }
43     cout << "destructor, " << m << " x " << n << "\n";
44 }
45
46 Matrix& Matrix::operator=(const Matrix& rhs) {
47     if ( this != &rhs) {
48         if ( (m != rhs.m) || (n != rhs.n) ) {
49             if (m > 0 && n > 0) {
50                 delete[] coeff;
51             }
52             m = rhs.m;
53             n = rhs.n;
54             if (m > 0 && n > 0) {
55                 coeff = new double[m*n];
56             }
57             else {
58                 coeff = (double*) 0;
59             }
60         }
61         for (int ell=0; ell<m*n; ++ell) {
62             coeff[ell] = rhs[ell];
63         }
64     }
65     cout << "deep copy, " << m << " x " << n << "\n";
66     return *this;
67 }
68
69 int Matrix::size1() const {
70     return m;
71 }
72
73 int Matrix::size2() const {
74     return n;
75 }
```

337

matrix.cpp 3/4

```
77 const double& Matrix::operator()(int j, int k) const {
78     assert(j>=0 && j<m);
79     assert(k>=0 && k<n);
80     return coeff[j+k*m];
81 }
82
83 double& Matrix::operator()(int j, int k) {
84     assert(j>=0 && j<m);
85     assert(k>=0 && k<n);
86     return coeff[j+k*m];
87 }
88
89 const double& Matrix::operator[](int ell) const {
90     assert( ell>=0 && ell<m*n );
91     return coeff[ell];
92 }
93
94 double& Matrix::operator[](int ell) {
95     assert( ell>=0 && ell<m*n);
96     return coeff[ell];
97 }
98
99 double Matrix::norm() const {
100     double norm = 0;
101     for (int j=0; j<m; ++j) {
102         for (int k=0; k<n; ++k) {
103             norm = norm + (*this)(j,k) * (*this)(j,k);
104         }
105     }
106     return sqrt(norm);
107 }
```

338

matrix.cpp 4/4

```
109 const Matrix operator+(const Matrix& A, const Matrix& B) {
110     int m = A.size1();
111     int n = A.size2();
112     assert(m == B.size1() );
113     assert(n == B.size2() );
114     Matrix sum(m,n);
115     for (int j=0; j<m; ++j) {
116         for (int k=0; k<n; ++k) {
117             sum(j,k) = A(j,k) + B(j,k);
118         }
119     }
120     return sum;
121 }
122
123 const Matrix operator*(const Matrix& A, const Matrix& B) {
124     int m = A.size1();
125     int n = A.size2();
126     int p = B.size2();
127     double sum = 0;
128     assert(n == B.size1() );
129     Matrix product(m,p);
130     for (int i=0; i<m; ++i) {
131         for (int k=0; k<p; ++k) {
132             sum = 0;
133             for (int j=0; j<n; ++j) {
134                 sum = sum + A(i,j)*B(j,k);
135             }
136             product(i,k) = sum;
137         }
138     }
139     return product;
140 }
141
142 ostream& operator<<(ostream& output, const Matrix& A) {
143     for (int j=0; j<A.size1(); j++) {
144         for (int k=0; k<A.size2(); k++) {
145             output << " " << A(j,k);
146         }
147         output << "\n";
148     }
149     return output;
150 }
```

339

Testbeispiel

```
1 #include "matrix.hpp"
2 #include <iostream>
3 using std::cout;
4
5 int main() {
6     int m = 2;
7     int n = 3;
8     Matrix A(m,n);
9     for (int j=0; j<m; ++j) {
10         for (int k=0; k<n; ++k) {
11             A(j,k) = j + k*m;
12         }
13     }
14     cout << A;
15     Matrix C;
16     C = A + A;
17     cout << C;
18     return 0;
19 }
```

► Output:

```
constructor, 2 x 3
0 2 4
1 3 5
constructor, empty
constructor, 2 x 3
deep copy, 2 x 3
destructor, 2 x 3
0 4 8
2 6 10
destructor, 2 x 3
destructor, 2 x 3
```

340

matrix_vector.hpp

```
1 #ifndef _VECTOR_
2 #define _VECTOR_
3
4 #include "matrix.hpp"
5
6 class Vector : public Matrix {
7 public:
8     // constructor and type cast Matrix to Vector
9     Vector();
10    Vector(int m, double init=0);
11    Vector(const Matrix&);
12
13    // return size of vector
14    int size() const;
15
16    // read and write coefficients with access x(j)
17    const double& operator()(int j) const;
18    double& operator()(int j);
19 };
20 #endif
```

- ▶ Identifiziere $x \in \mathbb{R}^n \simeq \mathbb{R}^{n \times 1}$
 - d.h. Klasse **Vector** wird von **Matrix** abgeleitet
- ▶ Konstr. **Vector** $x(n)$; und **Vector** $x(n,init)$;
- ▶ Type Cast von **Matrix** auf **Vector** schreiben!
 - Type Cast von **Vector** auf **Matrix** automatisch, da **Vector** von **Matrix** abgeleitet
- ▶ Zugriff auf Koeffizienten mit $x(j)$ oder $x[j]$
- ▶ **ACHTUNG** mit Destr., Kopierkonstr. Zuweisung
 - wenn fehlt, aus Basisklasse genommen
 - hier kein Problem!

341

matrix_vector.cpp

```
1 #include "matrix-vector.hpp"
2 using std::cout;
3
4 Vector::Vector() {
5     cout << "vector constructor, empty\n";
6 }
7
8 Vector::Vector(int m, double init) : Matrix(m,1,init) {
9     cout << "vector constructor, size " << m << "\n";
10 }
11
12 Vector::Vector(const Matrix& rhs) : Matrix(rhs.size(),1) {
13     assert(rhs.size2() == 1);
14     for (int j=0; j<rhs.size(); ++j) {
15         (*this)[j] = rhs(j,0);
16     }
17     cout << "type cast Matrix -> Vector\n";
18 }
19
20 int Vector::size() const {
21     return size1();
22 }
23
24 const double& Vector::operator()(int j) const {
25     assert( j>=0 && j<size() );
26     return (*this)[j];
27 }
28
29 double& Vector::operator()(int j) {
30     assert( j>=0 && j<size() );
31     return (*this)[j];
32 }
```

- ▶ Type Cast stellt sicher, dass Input in $\mathbb{R}^{n \times 1}$

342

Matrix-Vektor-Produkt

- ▶ $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times p} \Rightarrow AB \in \mathbb{R}^{m \times p}$,
 - $(AB)_{ik} = \sum_{j=0}^{n-1} A_{ij}B_{jk}$
- ▶ $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $x \in \mathbb{R}^n \Rightarrow Ax \in \mathbb{R}^m$,
 - $(Ax)_i = \sum_{j=0}^{n-1} A_{ij}x_j$
 - d.h. Spezialfall von Matrix-Matrix-Produkt
- ▶ Interne Realisierung von **A*x**
 - **x** ist **Vector**, insb. **Matrix** mit Dimension $n \times 1$
 - **A*x** ist **Matrix** mit Dimension $m \times 1$
 - ggf. impliziter Cast auf **Vector**

343

Testbeispiel

```
1 #include "matrix.hpp"
2 #include "matrix-vector.hpp"
3 using std::cout;
4
5 int main() {
6     int n = 3;
7     Matrix A(n,n);
8     for (int j=0; j<n; ++j) {
9         A(j,j) = j+1;
10    }
11    cout << A;
12    Vector X(n,1);
13    Vector Y = A*X;
14    cout << Y;
15    return 0;
16 }
```

▶ Output:

```
constructor, 3 x 3
1 0 0
0 2 0
0 0 3
constructor, 3 x 1
vector constructor, size 3
constructor, 3 x 1
constructor, 3 x 1
type cast Matrix -> Vector
destructor, 3 x 1
1
2
3
destructor, 3 x 1
destructor, 3 x 1
destructor, 3 x 3
```

344

Schlüsselwort virtual

- ▶ Polymorphie
- ▶ Virtuelle Methoden
- ▶ virtual

345

Polymorphie

- ▶ Jedes Objekt der abgeleiteten Klasse **ist auch** ein Objekt der Basisklasse
 - Vererbung impliziert immer **ist-ein**-Beziehung
- ▶ Jede Klasse definiert einen Datentyp
 - Objekte können mehrere Typen haben
 - Objekte abgeleiteter Klassen haben mindestens zwei Datentypen:
 - * Typ der abgeleiteten Klasse
 - * **und** Typ der Basisklasse
 - * **BSP:** im letztem Beispiel ist Vektor vom Typ **Vector** und **Matrix**
- ▶ kann den jeweils passenden Typ verwenden
 - Diese Eigenschaft nennt man **Polymorphie** (*griech. Vielgestaltigkeit*)
- ▶ Das hat insbesondere Konsequenzen für Pointer!

346

Pointer und virtual 1/3

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Basisklasse {
5 public:
6     void print() {cout << "Basisklasse\n";}
7 };
8
9 class Abgeleitet : public Basisklasse {
10 public:
11     void print() {cout << "Abgeleitet\n";}
12 };
13
14 int main() {
15     Abgeleitet a;
16     Abgeleitet* pA = &a;
17     Basisklasse* pB = &a;
18     pA->print();
19     pB->print();
20     return 0;
21 }
```

- ▶ Output:
Abgeleitet
Basisklasse
- ▶ Zeile 15: Objekt a vom Typ **Abgeleitet** ist auch vom Typ **Basisklasse**
- ▶ Pointer auf **Basisklasse** mit Adresse von **a** möglich
- ▶ Zeile 19 ruft **print** aus **Basisklasse** auf
 - i.a. soll **print** aus **Abgeleitet** verwendet werden

347

Pointer und virtual 2/3

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Basisklasse {
5 public:
6     virtual void print() {cout << "Basisklasse\n";}
7 };
8
9 class Abgeleitet : public Basisklasse {
10 public:
11     void print() {cout << "Abgeleitet\n";}
12 };
13
14 int main() {
15     Abgeleitet a;
16     Abgeleitet* pA = &a;
17     Basisklasse* pB = &a;
18     pA->print();
19     pB->print();
20     return 0;
21 }
```

- ▶ Output:
Abgeleitet
Abgeleitet
- ▶ Zeile 6: neues Schlüsselwort **virtual**
 - vor Signatur der Methode **print** (in Basisklasse!)
 - deklariert virtuelle Methode
 - zur Laufzeit wird korrekte Methode aufgerufen
 - * **Varianten müssen gleiche Signatur haben**
 - Zeile 19 ruft nun redefinierte Methode **print** auf

348

Pointer und virtual 3/3

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Basisklasse {
5 public:
6     virtual void print() {cout << "Basisklasse\n";}
7 };
8
9 class Abgeleitet1 : public Basisklasse {
10 public:
11     void print() {cout << "Nummer 1\n";}
12 };
13
14 class Abgeleitet2 : public Basisklasse {
15 public:
16     void print() {cout << "Nummer 2\n";}
17 };
18
19 int main() {
20     Basisklasse* var[2];
21     var[0] = new Abgeleitet1;
22     var[1] = new Abgeleitet2;
23
24     for (int j=0; j<2; ++j) {
25         var[j]->print();
26     }
27     return 0;
28 }
```

- ▶ Output:
 Nummer 1
 Nummer 2
- ▶ `var` ist Vektor mit Objekten verschiedener Typen!

349

Destruktor und virtual 1/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Basisklasse {
5 public:
6     ~Basisklasse() {
7         cout << "~Basisklasse()\n";
8     }
9 };
10
11 class Abgeleitet : public Basisklasse {
12 public:
13     ~Abgeleitet() {
14         cout << "~Abgeleitet()\n";
15     }
16 };
17
18 int main() {
19     Basisklasse* var = new Abgeleitet;
20     delete var;
21     return 0;
22 }
```

- ▶ Output:
 ~Basisklasse()
- ▶ Destruktor von `Abgeleitet` wird nicht aufgerufen!
 - ggf. entsteht toter Speicher, falls `Abgeleitet` zusätzlichen dynamischen Speicher anlegt
- ▶ Destruktoren werden deshalb üblicherweise als `virtual` deklariert

350

Destruktor und virtual 2/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Basisklasse {
5 public:
6     virtual ~Basisklasse() {
7         cout << "~Basisklasse()\n";
8     }
9 };
10
11 class Abgeleitet : public Basisklasse {
12 public:
13     ~Abgeleitet() {
14         cout << "~Abgeleitet()\n";
15     }
16 };
17
18 int main() {
19     Basisklasse* var = new Abgeleitet;
20     delete var;
21     return 0;
22 }
```

- ▶ Output:
 ~Abgeleitet()
 ~Basisklasse()
- ▶ Destruktor von `Abgeleitet` wird aufgerufen
 - ruft implizit Destruktor von `Basisklasse` auf

351

Virtuelle Methoden 1/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Basisklasse {
5 public:
6     void ego() { cout << "Basisklasse\n"; }
7     void print() { cout << "Ich bin "; ego(); }
8 };
9
10 class Abgeleitet1: public Basisklasse {
11 public:
12     void ego() { cout << "Nummer 1\n"; }
13 };
14
15 class Abgeleitet2: public Basisklasse {};
16
17 int main() {
18     Basisklasse var0;
19     Abgeleitet1 var1;
20     Abgeleitet2 var2;
21     var0.print();
22     var1.print();
23     var2.print();
24     return 0;
25 }
```

- ▶ Output:
 Ich bin Basisklasse
 Ich bin Basisklasse
 Ich bin Basisklasse
- ▶ Obwohl `ego` redefiniert wird für `Abgeleitet1`, bindet `print` immer `ego` von `Basisklasse` ein

352

Virtuelle Methoden 2/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Basisklasse {
5 public:
6     virtual void ego() { cout << "Basisklasse\n"; }
7     void print() { cout << "Ich bin "; ego(); }
8 };
9
10 class Abgeleitet1: public Basisklasse {
11 public:
12     void ego() { cout << "Nummer 1\n"; }
13 };
14
15 class Abgeleitet2: public Basisklasse {};
16
17 int main() {
18     Basisklasse var0;
19     Abgeleitet1 var1;
20     Abgeleitet2 var2;
21     var0.print();
22     var1.print();
23     var2.print();
24     return 0;
25 }
```

▶ Output:

```
Ich bin Basisklasse
Ich bin Nummer 1
Ich bin Basisklasse
```

- ▶ **virtual** (Zeile 6) sorgt für korrekte Einbindung, falls diese für abgeleitete Klasse redefiniert ist

353

Abstrakte Klassen

- ▶ Manchmal werden Klassen nur zur Strukturierung / zum Vererben angelegt, aber Instanzierung ist nicht sinnvoll / nicht gewollt
 - d.h. es soll keine Objekte der Basisklasse geben
 - sog. **abstrakte Klassen**
 - dient nur als Schablone für abgeleitete Klassen
- ▶ abstrakte Klassen können nicht instanziiert werden
 - Compiler liefert Fehlermeldung!
- ▶ In C++ ist eine Klasse abstrakt, falls eine Methode existiert der Form

```
virtual return-type method( ... ) = 0;
```

 - Diese sog. **abstrakte Methode** muss in allen abgeleiteten Klassen implementiert werden
 - * wird nicht in Basisklasse implementiert

354

Beispiel zu abstrakten Klassen

```
1 #include <cmath>
2
3 class Figure {
4 private:
5     double centerOfMass[2];
6 public:
7     virtual double getArea() = 0;
8 };
9
10 class Circle : public Figure {
11 private:
12     double radius;
13 public:
14     double getArea() {
15         return radius*radius*3.14159;
16     }
17 };
18
19 class Triangle : public Figure {
20 private:
21     double a[2],b[2],c[2];
22 public:
23     double getArea() {
24         return fabs(0.5*( (b[0]-a[0])*(c[1]-a[1])
25                         -(c[0]-a[0])*(b[1]-a[1])));
26     }
27 };
```

- ▶ Abstrakte Klasse **Figure**
 - durch abstrakte Methode **getArea** (Zeile 6)
- ▶ abgeleitete Klassen **Circle**, **Triangle**
- ▶ **Circle** und **Triangle** redefinieren **getArea**
 - alle abstrakten Meth. müssen redefiniert werden

355

Beispiel zu virtual: Matrizen

- ▶ für allgemeine Matrix $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$
 - Vektoren $x \in \mathbb{R}^m \simeq \mathbb{R}^{m \times 1}$
 - quadratische Matrix $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$
 - * reguläre Matrix: $\det(A) \neq 0$
 - * symmetrische Matrix: $A = A^T$
 - * untere Dreiecksmatrix, $A_{jk} = 0$ für $k > j$
 - * obere Dreiecksmatrix, $A_{jk} = 0$ für $k < j$
- ▶ symmetrischen Matrizen und Dreiecksmatrizen brauchen generisch weniger Speicher
 - $\frac{n(n+1)}{2}$ statt n^2
- ▶ muss Koeffizientenzugriff überladen
 - Koeffizientenzugriff in **Matrix** muss **virtual** sein, damit Methoden für **Matrix** z.B. auch für symmetrische Matrizen anwendbar

356

matrix.hpp 1/3

```
1 #ifndef _MATRIX_
2 #define _MATRIX_
3 #include <cmath>
4 #include <cassert>
5 #include <iostream>
6
7 class Matrix {
8 private:
9     int m;
10    int n;
11    int storage;
12    double* coeff;
13
14 protected:
15    // methods such that subclasses can access data fields
16    void allocate(int m, int n, int storage, double init);
17    const double* getCoeff() const;
18    double* getCoeff();
19    int getStorage() const;
```

- ▶ abgeleitete Klassen, z.B. `SymmetricMatrix` können auf Datenfelder nicht zugreifen, da hidden nach Vererbung
 - muss Zugriffsfunktionen schaffen
 - `protected` stellt sicher, dass diese Methoden nur in den abgeleiteten Klassen verwendet werden können (aber nicht von Außen!)
- ▶ `SymmetricMatrix` hat weniger Speicher als `Matrix`
 - muss Allocation als Methode bereitstellen
 - * $m \cdot n$ Speicherplätze für $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$
 - * nur $\frac{n(n+1)}{2} = \sum_{i=1}^n i$ für $A = A^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$

357

matrix.hpp 2/3

```
21 public:
22    // constructors, destructor, assignment
23    Matrix();
24    Matrix(int m, int n, double init=0);
25    Matrix(const Matrix&);
26    ~Matrix();
27    Matrix& operator=(const Matrix&);
28
29    // return size of matrix
30    int size1() const;
31    int size2() const;
32
33    // read and write entries with matrix access A(j,k)
34    virtual const double& operator()(int j, int k) const;
35    virtual double& operator()(int j, int k);
```

- ▶ Destruktor nicht virtuell, da abgeleitete Klassen keinen dynamischen Speicher haben
- ▶ Koeffizienten-Zugriff muss `virtual` sein, da z.B. symmetrische Matrizen anders gespeichert
 - `virtual` nur in Klassendefinition, d.h. generisch im Header-File
- ▶ Funktionalität wird mittels Koeff.-Zugriff `A(j,k)` realisiert, z.B. `operator+`, `operator*`
 - kann alles auch für symm. Matrizen nutzen
 - nur 1x für Basisklasse implementieren
 - * manchmal ist Redefinition sinnvoll für effizientere Lösung

358

matrix.hpp 3/3

```
37 // read and write storage vector A[ell]
38 const double& operator[](int ell) const;
39 double& operator[](int ell);
40
41 // compute norm
42 double norm() const;
43 };
44
45 // print matrix via output stream
46 std::ostream& operator<<(std::ostream& output,
47                          const Matrix&);
48
49 // matrix-matrix sum and product
50 const Matrix operator+(const Matrix&, const Matrix&);
51 const Matrix operator*(const Matrix&, const Matrix&);
52
53 #endif
```

- ▶ Operator `[]` für effiziente Implementierung
 - z.B. Addition bei gleichem Matrix-Typ
 - d.h. bei gleicher interner Speicherung
 - * muss nur Speichervektoren addieren
- ▶ Implementierung von `norm`, `operator+`, `operator*` mittels Koeffizienten-Zugriff `A(j,k)`
 - direkt für abgeleitete Klassen anwendbar

359

matrix.cpp 1/5

```
1 #include "matrix.hpp"
2 using std::cout;
3 using std::ostream;
4
5 void Matrix::allocate(int m, int n, int storage,
6                       double init) {
7     assert(m>=0);
8     assert(n>=0);
9     assert(storage>=0 && storage<=m*n);
10    this->m = m;
11    this->n = n;
12    this->storage = storage;
13    if (storage>0) {
14        coeff = new double[storage];
15        for (int ell=0; ell<storage; ++ell) {
16            coeff[ell] = init;
17        }
18    }
19    else {
20        coeff = (double*) 0;
21    }
22 }
23
24 const double* Matrix::getCoeff() const {
25     return coeff;
26 }
27
28 double* Matrix::getCoeff() {
29     return coeff;
30 }
31
32 int Matrix::getStorage() const {
33     return storage;
34 }
```

360

matrix.cpp 2/5

```
36 Matrix::Matrix() {
37     m = 0;
38     n = 0;
39     storage = 0;
40     coeff = (double*) 0;
41     cout << "Matrix: empty constructor\n";
42 }
43
44 Matrix::Matrix(int m, int n, double init) {
45     allocate(m,n,m*n,init);
46     cout << "Matrix: constructor, "
47         << m << " x " << n << "\n";
48 }
49
50 Matrix::Matrix(const Matrix& rhs) {
51     m = rhs.m;
52     n = rhs.n;
53     storage = m*n;
54     if (storage > 0) {
55         coeff = new double[storage];
56         for (int j=0; j<m; ++j) {
57             for (int k=0; k<n; ++k) {
58                 (*this)(j,k) = rhs(j,k);
59             }
60         }
61     }
62     else {
63         coeff = (double*) 0;
64     }
65     cout << "Matrix: copy constructor, "
66         << m << " x " << n << "\n";
67 }
68
69 Matrix::~Matrix() {
70     if (storage > 0) {
71         delete[] coeff;
72     }
73     cout << "Matrix: destructor, "
74         << m << " x " << n << "\n";
75 }
```

361

matrix.cpp 3/5

```
77 Matrix& Matrix::operator=(const Matrix& rhs) {
78     if (this != &rhs) {
79         if ( ( m != rhs.m ) || ( n != rhs.n ) ) {
80             if (storage > 0) {
81                 delete[] coeff;
82             }
83             m = rhs.m;
84             n = rhs.n;
85             storage = m*n;
86             if (storage > 0) {
87                 coeff = new double[storage];
88             }
89             else {
90                 coeff = (double*) 0;
91             }
92         }
93         for (int j=0; j<m; ++j) {
94             for (int k=0; k<n; ++k) {
95                 (*this)(j,k) = rhs(j,k);
96             }
97         }
98         cout << "Matrix: deep copy, "
99             << m << " x " << n << "\n";
100     }
101     return *this;
102 }
103
104 int Matrix::size1() const {
105     return m;
106 }
107
108 int Matrix::size2() const {
109     return n;
110 }
```

- ▶ Zeile 78: Code sicher Selbst-Zuweisung $A = A$
- keine Aktion, nur `return *this;`

362

matrix.cpp 4/5

```
112 const double& Matrix::operator()(int j, int k) const {
113     assert(j>=0 && j<m);
114     assert(k>=0 && k<n);
115     return coeff[j+k*m];
116 }
117
118 double& Matrix::operator()(int j, int k) {
119     assert(j>=0 && j<m);
120     assert(k>=0 && k<n);
121     return coeff[j+k*m];
122 }
123
124 const double& Matrix::operator[](int ell) const {
125     assert( ell>=0 && ell<storage );
126     return coeff[ell];
127 }
128
129 double& Matrix::operator[](int ell) {
130     assert( ell>=0 && ell<storage );
131     return coeff[ell];
132 }
133
134 double Matrix::norm() const {
135     double norm = 0;
136     for (int j=0; j<m; ++j) {
137         for (int k=0; k<n; ++k) {
138             norm = norm + (*this)(j,k) * (*this)(j,k);
139         }
140     }
141     return sqrt(norm);
142 }
143
144 ostream& operator<<(ostream& output, const Matrix& A) {
145     output << "\n";
146     for (int j=0; j<A.size1(); j++) {
147         for (int k=0; k<A.size2(); k++) {
148             output << " " << A(j,k);
149         }
150         output << "\n";
151     }
152     return output;
153 }
```

363

matrix.cpp 5/5

```
155 const Matrix operator+(const Matrix& A, const Matrix& B) {
156     int m = A.size1();
157     int n = A.size2();
158     assert(m == B.size1() );
159     assert(n == B.size2() );
160     Matrix sum(m,n);
161     for (int j=0; j<m; ++j) {
162         for (int k=0; k<n; ++k) {
163             sum(j,k) = A(j,k) + B(j,k);
164         }
165     }
166     return sum;
167 }
168
169 const Matrix operator*(const Matrix& A, const Matrix& B) {
170     int m = A.size1();
171     int n = A.size2();
172     int p = B.size2();
173     double sum = 0;
174     assert(n == B.size1() );
175     Matrix product(m,p);
176     for (int i=0; i<m; ++i) {
177         for (int k=0; k<p; ++k) {
178             sum = 0;
179             for (int j=0; j<n; ++j) {
180                 sum = sum + A(i,j)*B(j,k);
181             }
182             product(i,k) = sum;
183         }
184     }
185     return product;
186 }
```

- ▶ Addition: $A + B \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $(A + B)_{j\ell} = A_{j\ell} + B_{j\ell}$
- ▶ Multiplikation: $AB \in \mathbb{R}^{m \times p}$, $(AB)_{j\ell} = \sum_{k=1}^n A_{jk}B_{k\ell}$
- $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times p}$

364

Bemerkungen

- ▶ da Matrizen spaltenweise gespeichert sind, sollte man eigentlich bei der Reihenfolge der Schleifen beachten, z.B.

```
for (int j=0; j<m; ++j) {
    for (int k=0; k<n; ++k) {
        (*this)(j,k) = rhs(j,k);
    }
}
```

besser ersetzen durch

```
for (int k=0; k<n; ++k) {
    for (int j=0; j<m; ++j) {
        (*this)(j,k) = rhs(j,k);
    }
}
```

- ▶ Speicherzugriff ist dann schneller,
 - es wird nicht im Speicher herumgesprungen
- ▶ weitere Funktionen zu `Matrix` sind denkbar
 - Vorzeichen
 - Skalarmultiplikation
 - Matrizen subtrahieren
- ▶ weitere Methoden zu `Matrix` sind denkbar
 - Matrix transponieren

365

squareMatrix.hpp

```
1 #ifndef _SQUAREMATRIX_
2 #define _SQUAREMATRIX_
3 #include "matrix.hpp"
4 #include <cassert>
5 #include <iostream>
6
7 class SquareMatrix : public Matrix {
8 public:
9     // constructors, destructor, type cast from Matrix
10    SquareMatrix();
11    SquareMatrix(int n, double init=0);
12    SquareMatrix(const SquareMatrix&);
13    ~SquareMatrix();
14    SquareMatrix(const Matrix&);
15
16    // further members
17    int size() const;
18 };
19
20 #endif
```

- ▶ Jede quadratische Matrix $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ist insb. eine allgemeine Matrix $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$
 - zusätzliche Funktion: z.B. $\det(A)$ berechnen
 - hier wird nur `SquareMatrix` von `Matrix` abgeleitet
 - keine zusätzliche Funktionalität, nur
 - * Standardkonstruktor und Konstruktor
 - * Kopierkonstruktor
 - * Destruktor
 - * Type Cast `Matrix` auf `SquareMatrix`
 - * `size` als Vereinfachung von `size1`, `size2`

366

squareMatrix.cpp

```
1 #include "squareMatrix.hpp"
2 using std::cout;
3
4 SquareMatrix::SquareMatrix() {
5     cout << "SquareMatrix: empty constructor\n";
6 }
7
8 SquareMatrix::SquareMatrix(int n, double init) :
9     Matrix(n,n,init) {
10    cout << "SquareMatrix: constructor, " << size() << "\n";
11 };
12
13 SquareMatrix::SquareMatrix(const SquareMatrix& rhs) :
14     Matrix(rhs) {
15    cout << "SquareMatrix: copy constructor, "
16        << size() << "\n";
17 }
18
19 SquareMatrix::~SquareMatrix() {
20    cout << "SquareMatrix: destructor, " << size() << "\n";
21 }
22
23 SquareMatrix::SquareMatrix(const Matrix& rhs) :
24     Matrix(rhs) {
25    assert(size1() == size2());
26    cout << "type cast Matrix -> SquareMatrix\n";
27 }
28
29 int SquareMatrix::size() const {
30    return size1();
31 }
```

- ▶ Type Cast garantiert, dass $\text{rhs} \in \mathbb{R}^{m \times n}$ mit $m = n$
 - d.h. Konversion auf `SquareMatrix` ohne Verlust
- ▶ theoretisch auch Cast durch Abschneiden sinnvoll
 - hier aber anders!

367

Demo zu squareMatrix 1/5

```
1 #include "matrix.hpp"
2 #include "squareMatrix.hpp"
3
4 using std::cout;
5
6 int main() {
7     int n = 3;
8
9     cout << "*** init A\n";
10    SquareMatrix A(n);
11    for (int ell=0; ell<n*n; ++ell) {
12        A[ell] = ell;
13    }
14    cout << "A =" << A;
15
16    cout << "*** init B\n";
17    Matrix B = A;
18    cout << "B =" << B;
19
20    cout << "*** init C\n";
21    SquareMatrix C = A;
22    cout << "C =" << C;
23
24    cout << "*** C = A + A\n";
25    C = A + A;
26    cout << "C =" << C;
27
28    cout << "*** init D\n";
29    SquareMatrix D = A + B;
30    cout << "D =" << C;
31
32    cout << "*** terminate\n";
33    return 0;
34 }
```

- ▶ erwartetes Resultat:

- $A = \begin{pmatrix} 0 & 3 & 6 \\ 1 & 4 & 7 \\ 2 & 5 & 8 \end{pmatrix} = B, \quad C = \begin{pmatrix} 0 & 6 & 12 \\ 2 & 8 & 14 \\ 4 & 10 & 16 \end{pmatrix} = D,$

368

Demo zu squareMatrix 2/5

```
1 #include "matrix.hpp"
2 #include "squareMatrix.hpp"
3
4 using std::cout;
5
6 int main() {
7     int n = 3;
8
9     cout << "*** init A\n";
10    SquareMatrix A(n);
11    for (int ell=0; ell<n*n; ++ell) {
12        A[ell] = ell;
13    }
14    cout << "A =" << A;
```

► Output:

```
*** init A
Matrix: constructor, 3 x 3
SquareMatrix: constructor, 3
A =
0 3 6
1 4 7
2 5 8
```

► man sieht spaltenweise Speicherung von A

369

Demo zu squareMatrix 3/5

```
16 cout << "*** init B\n";
17 Matrix B = A;
18 cout << "B =" << B;
19
20 cout << "*** init C\n";
21 SquareMatrix C = A;
22 cout << "C =" << C;
```

► Output:

```
*** init B
Matrix: copy constructor, 3 x 3
B =
0 3 6
1 4 7
2 5 8
*** init C
Matrix: copy constructor, 3 x 3
SquareMatrix: copy constructor, 3
C =
0 3 6
1 4 7
2 5 8
```

370

Demo zu squareMatrix 4/5

```
24 cout << "*** C = A + A\n";
25 C = A + A;
26 cout << "C =" << C;
```

► Output:

```
*** C = A + A
Matrix: constructor, 3 x 3
Matrix: copy constructor, 3 x 3
type cast Matrix -> SquareMatrix
Matrix: deep copy, 3 x 3
SquareMatrix: destructor, 3
Matrix: destructor, 3 x 3
Matrix: destructor, 3 x 3
C =
0 6 12
2 8 14
4 10 16
```

371

Demo zu squareMatrix 5/5

```
28 cout << "*** init D\n";
29 SquareMatrix D = A + B;
30 cout << "D =" << C;
31
32 cout << "*** terminate\n";
33 return 0;
34 }
```

► Output:

```
*** init D
Matrix: constructor, 3 x 3
Matrix: copy constructor, 3 x 3
type cast Matrix -> SquareMatrix
Matrix: destructor, 3 x 3
D =
0 6 12
2 8 14
4 10 16
*** terminate
SquareMatrix: destructor, 3
Matrix: destructor, 3 x 3
SquareMatrix: destructor, 3
Matrix: destructor, 3 x 3
Matrix: destructor, 3 x 3
SquareMatrix: destructor, 3
Matrix: destructor, 3 x 3
```

372

lowerTriangularMatrix.hpp

```
1 #ifndef _LOWERTRIANGULARMATRIX_
2 #define _LOWERTRIANGULARMATRIX_
3 #include "squareMatrix.hpp"
4 #include <cassert>
5 #include <iostream>
6
7 class LowerTriangularMatrix : public SquareMatrix {
8 private:
9     double zero;
10    double const_zero;
11
12 public:
13    // constructors, destructor, type cast from Matrix
14    LowerTriangularMatrix();
15    LowerTriangularMatrix(int n, double init=0);
16    LowerTriangularMatrix(const LowerTriangularMatrix&);
17    ~LowerTriangularMatrix();
18    LowerTriangularMatrix(const Matrix&);
19
20    // assignment operator
21    LowerTriangularMatrix& operator=(
22        const LowerTriangularMatrix&);
23
24    // read and write entries with matrix access A(j,k)
25    virtual const double& operator()(int j, int k) const;
26    virtual double& operator()(int j, int k);
27 };
28 #endif
```

- ▶ eine Matrix $A \in \mathbb{R}^{n \times n}$ ist untere Dreiecksmatrix, falls $A_{jk} = 0$ für $k > j$

- d.h. $A = \begin{pmatrix} a_{11} & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & 0 \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{pmatrix}$ für $n = 3$

- ▶ muss nur $\frac{n(n+1)}{2} = \sum_{i=1}^n i$ Einträge speichern
- ▶ zeilenweise Speicherung: $A_{jk} = a_\ell$ mit $\ell = \frac{j(j+1)}{2} + k$
 - muss Matrix-Zugriff () redefinieren

373

lowerTriangularMatrix.cpp 1/4

```
1 #include "lowerTriangularMatrix.hpp"
2 using std::cout;
3
4 LowerTriangularMatrix::LowerTriangularMatrix() {
5     cout << "LowerTriangular: empty constructor\n";
6 }
7
8 LowerTriangularMatrix::LowerTriangularMatrix(int n,
9     double init) {
10    zero = 0;
11    const_zero = 0;
12    allocate(n, n, n*(n+1)/2, init);
13    cout << "LowerTriangular: constructor, " << n << "\n";
14 }
15
16 LowerTriangularMatrix::LowerTriangularMatrix(
17     const LowerTriangularMatrix& rhs) {
18    int n = rhs.size();
19    allocate(n, n, n*(n+1)/2, 0);
20    zero = 0;
21    const_zero = 0;
22    for (int ell=0; ell<n*(n+1)/2; ++ell) {
23        (*this)[ell] = rhs[ell];
24    }
25    cout << "LowerTriangular: copy constructor, "
26        << n << "\n";
27 }
```

- ▶ **private** Member **zero**, **const_zero** haben Wert 0
 - dienen für Zugriff auf $A_{jk} = 0$ für $k > j$
- ▶ Kopierkonstruktor für Objekte der eigenen Klasse
 - sonst würde Kopierkonstruktor der Basisklasse **SquareMatrix** verwendet!

374

lowerTriangularMatrix.cpp 2/4

```
29 LowerTriangularMatrix::LowerTriangularMatrix(
30     const Matrix& rhs) {
31    int n = rhs.size1();
32    assert(n == rhs.size2());
33    allocate(n, n, n*(n+1)/2, 0);
34    zero = 0;
35    const_zero = 0;
36    for (int j=0; j<n; ++j) {
37        for (int k=0; k<=j; ++k) {
38            (*this)(j,k) = rhs(j,k);
39        }
40        for (int k=j+1; k<n; ++k) {
41            assert( rhs(j,k) == 0);
42        }
43    }
44    cout << "type cast Matrix -> LowerTriangular\n";
45 }
46
47 LowerTriangularMatrix::~LowerTriangularMatrix() {
48    cout << "LowerTriangular: destructor, "
49        << size() << "\n";
50 }
```

- ▶ Type Cast kontrolliert, dass **rhs** $\in \mathbb{R}^{n \times n}$ eine untere Dreiecksmatrix ist
 - wird verwendet, falls **rhs** kein Objekt der Klasse **LowerTriangularMatrix**
- ▶ beachte unterschiedliche () in Zeile 38

375

lowerTriangularMatrix.cpp 3/4

```
52 LowerTriangularMatrix& LowerTriangularMatrix::operator=(
53     const LowerTriangularMatrix& rhs) {
54
55     if (this != &rhs) {
56         int n = rhs.size();
57         if (size() != n) {
58             if (size() > 0) {
59                 delete[] getCoeff();
60             }
61             allocate(n, n, n*(n+1)/2, 0);
62         }
63         for (int ell=0; ell<n*(n+1)/2; ++ell) {
64             (*this)[ell] = rhs[ell];
65         }
66         cout << "LowerTriangular: deep copy "
67             << size() << "\n";
68     }
69     return *this;
70 }
```

- ▶ Redefinition des Zuweisungsoperators nötig, da sonst geerbt von **Matrix**
 - Speichervektor von **LowerTriangularMatrix** ist anders als der von **Matrix**
- ▶ analog zu Kopierkonstruktor

376

lowerTriangularMatrix.cpp 4/4

```
72 const double& LowerTriangularMatrix::operator()(
73     int j, int k) const {
74     assert( j>=0 && j<size() );
75     assert( k>=0 && k<size() );
76     if ( j < k ) {
77         return const_zero;
78     }
79     else {
80         const double* coeff = getCoeff();
81         return coeff[j*(j+1)/2+k];
82     }
83 }
84
85 double& LowerTriangularMatrix::operator()(int j, int k) {
86     assert( j>=0 && j<size() );
87     assert( k>=0 && k<size() );
88     if ( j < k ) {
89         zero = 0;
90         return zero;
91     }
92     else {
93         double* coeff = getCoeff();
94         return coeff[j*(j+1)/2+k];
95     }
96 }
```

- ▶ Jedes Objekt der Klasse `LowerTriangularMatrix` ist auch Objekt der Klassen `SquareMatrix` und `Matrix`
- ▶ Redefinition von Matrix-Zugriff `A(j,k)`
- ▶ Garantiere $A_{jk} = 0$ für $k > j$, damit Methoden aus `Matrix` genutzt werden können
 - `const_zero` hat stets Wert 0 (durch Konstruktor)
 - * Benutzer kann nicht schreibend zugreifen
 - `zero` wird explizit immer auf 0 gesetzt
 - * Benutzer könnte auch schreibend zugreifen

377

Demo zu lowerTriangularMatrix 1/7

```
1 #include "matrix.hpp"
2 #include "squareMatrix.hpp"
3 #include "lowerTriangularMatrix.hpp"
4
5 using std::cout;
6
7 int main() {
8     int n = 3;
9
10    cout << "*** init A\n";
11    SquareMatrix A(n,1);
12    cout << "A =" << A;
```

▶ Output:

```
*** init A
Matrix: constructor, 3 x 3
SquareMatrix: constructor, 3
A =
1 1 1
1 1 1
1 1 1
```

378

Demo zu lowerTriangularMatrix 2/7

```
14 cout << "*** init B\n";
15 LowerTriangularMatrix B(n);
16 for (int ell=0; ell<n*(n+1)/2; ++ell) {
17     B[ell] = 2;
18 }
19 B(0,n-1) = 10; //*** hat keinen Effekt!
20 cout << "B =" << B;
```

▶ Output:

```
*** init B
Matrix: empty constructor
SquareMatrix: empty constructor
LowerTriangular: constructor, 3
B =
2 0 0
2 2 0
2 2 2
```

379

Demo zu lowerTriangularMatrix 3/7

```
22 cout << "*** init C\n";
23 Matrix C = A + B;
24 cout << "C =" << C;
25
26 cout << "*** init D\n";
27 LowerTriangularMatrix D(n);
28 for (int ell=0; ell<n*(n+1)/2; ++ell) {
29     D[ell] = ell;
30 }
31 cout << "D =" << D;
```

▶ Output:

```
*** init C
Matrix: constructor, 3 x 3
C =
3 1 1
3 3 1
3 3 3
*** init D
Matrix: empty constructor
SquareMatrix: empty constructor
LowerTriangular: constructor, 3
D =
0 0 0
1 2 0
3 4 5
```

▶ Erinnerung: $A = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}$, $B = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 2 \end{pmatrix}$

380

Demo zu lowerTriangularMatrix 4/7

```
32 cout << "--\n";
33 D = D + B;
34 cout << "--\n";
35 cout << "D =" << D;
```

► Output:

```
--
Matrix: constructor, 3 x 3
Matrix: empty constructor
SquareMatrix: empty constructor
type cast Matrix -> LowerTriangular
LowerTriangular: deep copy 3
LowerTriangular: destructor, 3
SquareMatrix: destructor, 3
Matrix: destructor, 3 x 3
Matrix: destructor, 3 x 3
--
D =
 2 0 0
 3 4 0
 5 6 7
```

► Erinnerung: $B = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 2 \end{pmatrix}$, $D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 3 & 4 & 5 \end{pmatrix}$

381

Demo zu lowerTriangularMatrix 5/7

```
37 cout << "*** init E\n";
38 LowerTriangularMatrix E = D;
39 cout << "E =" << E;
40
41 cout << "*** A = D\n";
42 A = D;
43 cout << "A =" << A;
```

► Output:

```
*** init E
Matrix: empty constructor
SquareMatrix: empty constructor
LowerTriangular: copy constructor, 3
E =
 2 0 0
 3 4 0
 5 6 7
*** A = D
Matrix: deep copy, 3 x 3
A =
 2 0 0
 3 4 0
 5 6 7
```

► Erinnerung: $D = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 3 & 4 & 0 \\ 5 & 6 & 7 \end{pmatrix}$

► A ist **SquareMatrix**

► D ist **LowerTriangularMatrix**

382

Demo zu lowerTriangularMatrix 6/7

```
45 cout << "*** B = D\n";
46 B = D;
47 cout << "B =" << B;
48
49 cout << "*** B = A\n";
50 B = A;
51 cout << "B =" << B;
```

► Output:

```
*** B = D
LowerTriangular: deep copy 3
B =
 2 0 0
 3 4 0
 5 6 7
*** B = A
Matrix: empty constructor
SquareMatrix: empty constructor
type cast Matrix -> LowerTriangular
LowerTriangular: deep copy 3
LowerTriangular: destructor, 3
SquareMatrix: destructor, 3
Matrix: destructor, 3 x 3
B =
 2 0 0
 3 4 0
 5 6 7
```

► Erinnerung: A ist **SquareMatrix**

► B und D sind **LowerTriangularMatrix**

383

Demo zu lowerTriangularMatrix 7/7

```
53 cout << "*** terminate\n";
54 return 0;
55 }
```

► Output:

```
*** terminate
LowerTriangular: destructor, 3
SquareMatrix: destructor, 3
Matrix: destructor, 3 x 3
LowerTriangular: destructor, 3
SquareMatrix: destructor, 3
Matrix: destructor, 3 x 3
Matrix: destructor, 3 x 3
LowerTriangular: destructor, 3
SquareMatrix: destructor, 3
Matrix: destructor, 3 x 3
SquareMatrix: destructor, 3
Matrix: destructor, 3 x 3
```

► Erinnerung: Allokationsreihenfolge

• A ist **SquareMatrix**

• B ist **LowerTriangularMatrix**

• C ist **Matrix**

• D ist **LowerTriangularMatrix**

• E ist **LowerTriangularMatrix**

384

Templates

- ▶ Was sind Templates?
- ▶ Funktionentemplates
- ▶ Klassentemplates
- ▶ `template`

385

Generische Programmierung

- ▶ Wieso Umstieg auf höhere Programmiersprache?
 - Mehr Funktionalität (Wiederverwendbarkeit/Wartbarkeit)
 - haben wir bei Vererbung ausgenutzt
- ▶ Ziele:
 - möglichst wenig Code selbst schreiben
 - Gemeinsamkeiten wiederverwenden
 - nur Modifikationen implementieren
- ▶ Oftmals ähnlicher Code für verschiedene Dinge
- ▶ Vererbung bietet sich oft nicht an
 - es liegt nicht immer Ist-Ein-Beziehung vor
- ▶ Idee: Code unabhängig vom Datentyp entwickeln
- ▶ Führt auf [generische Programmierung](#)

386

Beispiel: Maximum / Quadrieren

```
1 int max(int a, int b) {
2     if (a < b)
3         return b;
4     else
5         return a;
6 }
7
8 double max(double a, double b) {
9     if (a < b)
10        return b;
11    else
12        return a;
13 }
14
15 int square(int a) {
16     return a*a;
17 }
18
19 double square(double a) {
20     return a*a;
21 }
```

- ▶ **Ziel:** Maximum berechnen / quadrieren
- ▶ Gleicher Code für viele Probleme
 - Vererbung bietet sich hier nicht an
- ▶ **Lösung:** [Templates](#)

387

Funktionstemplate 1/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 template <typename Type>
6 Type square(const Type& var) {
7     return var*var;
8 }
9
10 int main() {
11     cout << square<double>(1.5) << endl;
12     cout << square(1.5) << endl;
13     cout << square<int>(1.5) << endl;
14 }
```

- ▶ `template <typename Type> RetType fct(input)`
 - analog zu normaler Funktionsdeklaration
 - `Type` ist dann variabler Input/Output-Datentyp
 - Referenzen und Pointer auf `Type` möglich
- ▶ theoretisch mehrere variable Datentypen möglich
 - `template <typename Type1, typename Type2> ...`
- ▶ Funktion `square` kann aufgerufen werden, falls
 - `var` Objekt vom Typ `Type`
 - Datentyp `Type` hat Multiplikation `*`
- ▶ bei Aufruf Datentyp in spitzen Klammern (Z. 11)
 - oder implizit (Zeile 12)
- ▶ Output:
 - 2.25
 - 2.25
 - 1

388

Funktionstemplate 2/2

- ▶ Was passiert eigentlich bei folgendem Code?

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 template <typename Type>
6 Type square(const Type& t) {
7     return t*t;
8 }
9
10 int main() {
11     int x = 2;
12     double y = 4.7;
13     cout << square(x) << endl;
14     cout << square(y) << endl;
15 }
```

- ▶ Compiler erkennt dass Fkt `square` einmal für Typ `int` und einmal für Typ `double` benötigt wird
- ▶ Compiler erzeugt ("programmiert") und kompiliert anhand von dieser Information, zwei(!) Funktionen mit der Signatur
 - `double square(double)`
 - `int square(int)`
- ▶ d.h. `square` automatisch durch Template generiert
 - also nur für die Typen, die wirklich benötigt

389

Klassentemplate 1/3

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4 using std::string;
5
6 template <typename Type>
7 class Pointer {
8     private:
9         Type* ptr;
10        //Die Klasse soll nicht kopierbar sein.
11        Pointer(const Pointer&);
12        Pointer& operator=(const Pointer&);
13    public:
14        Pointer(Type* ptr);
15        ~Pointer();
16        Type& operator*();
17        Type* operator->();
18    };

```

- ▶ kann auch Templates für Klassen machen
- ▶ z.B. automatische Speicherverwaltung bei Pointern, sog. *smart pointer*
- ▶ Idee: Speicher automatisch freigeben
 - verhindert Speicherlecks
 - sog. *Garbage Collection*
- ▶ def. Klasse `Pointer<Type>` für beliebigen Typ `Type`
- ▶ Um zu verhindern, dass Objekt der Klasse kopiert wird, schreibt man Kopierkonstruktor und Zuweisungsoperator in `private` Bereich (Zeile 11,12)
 - `Pointer pointer(ptr);` ruft Konstruktor
 - `Pointer pointer = ptr;` liefert Syntaxfehler

390

Klassentemplate 2/3

```
20 template <typename Type>
21 Pointer<Type>::Pointer(Type* ptr) {
22     this->ptr = ptr;
23     cout << "Konstruktor" << endl;
24 }
25
26 template <typename Type>
27 Pointer<Type>::~~Pointer() {
28     if ( ptr != (Type*) 0 ) {
29         delete ptr;
30     }
31     cout << "Destruktor" << endl;
32 }
33
34 template <typename Type>
35 Type& Pointer<Type>::operator*() {
36     return *ptr;
37 }
38
39 template <typename Type>
40 Type* Pointer<Type>::operator->() {
41     return ptr;
42 }

```

- ▶ Methoden der Klasse `Pointer<Type>`
 - voranstellen von `template <typename Type>`
- ▶ Implementierung wie gehabt
- ▶ Wichtig: dyn. Objekt wurde mit `new Type` erzeugt
 - sonst scheitert `delete` in Zeile 29
- ▶ Dereferenzieren (Z. 34-37) und Pfeil (Z. 39-42) werden auf gespeicherten Pointer weitergereicht
 - d.h. `*object` liefert `*(object.ptr)`
 - d.h. `object->` liefert `object.ptr->`

391

Klassentemplate 3/3

```
20 template <typename Type>
21 Pointer<Type>::Pointer(Type* ptr) {
22     this->ptr = ptr;
23     cout << "Konstruktor" << endl;
24 }
25
26 template <typename Type>
27 Pointer<Type>::~~Pointer() {
28     if ( ptr != (Type*) 0 ) {
29         delete ptr;
30     }
31     cout << "Destruktor" << endl;
32 }
33
34 template <typename Type>
35 Type& Pointer<Type>::operator*() {
36     return *ptr;
37 }
38
39 template <typename Type>
40 Type* Pointer<Type>::operator->() {
41     return ptr;
42 }
43
44 int main() {
45     Pointer<string> pointer(new string("Hallo"));
46     cout << *pointer << endl;
47     cout << "Laenge = " << pointer->length() << endl;
48 }

```

- ▶ Output
 - Konstruktor
 - Hallo
 - Laenge = 5
 - Destruktor
- ▶ Destruktor gibt dynamischen Speicher wieder frei

392

Warum Zuweisung `private`?

- ▶ Probleme bei Kopien von Smartpointern:

```
1 int main() {
2     Pointer<string> p(new string("blub"));
3     p->length();
4     {
5         Pointer<string> q = p;
6         q->length();
7     }
8     p->length();
9 }
```

- ▶ Pointer wird kopiert (Zeile 5)
 - Hier: nicht möglich, da Zuweisung `private`
- ▶ Speicher von `q` wird freigegeben (Zeile 7)
 - Problem: also Speicher von `p` freigegeben
 - Zugriffsfehler in Zeile 8
- ▶ **Mögliche Lösung:** Kopien zählen
 - Speicher nur freigeben wenn kein Zugriff mehr
 - wird hier nicht vertieft

393

C++ Standardcontainer

- ▶ C++ hat viele vordefinierte Klassen-Templates

- `list` (verkettete Listen)
- `queue` (first-in-first-out)
- `stack` (last-in-first-out)
- `deque` (*double ended queue*)
- `set`
- `multiset`
- `map`
- `multimap`
- `vector`

- ▶ Weitere C++ Bibliotheken

- Boost Library: Große Sammlung an Bib.
- <http://www.boost.org>

394

vector Template

vector Template

```
1 #include <iostream>
2 #include <string>
3 #include <vector>
4 using std::vector;
5 using std::string;
6 using std::cout;
7
8 class Eintrag {
9 public:
10     string name;
11 };
12
13 int main() {
14     vector<Eintrag> telbuch(2);
15     telbuch[0].name = "Peter Pan";
16     telbuch[1].name = "Wolverine";
17     cout << telbuch[1].name << "\n";
18     return 0;
19 }
```

- ▶ `vector` ist C++ Standardcontainer
 - kann beliebige Datentypen verwenden
 - dienen zum Verwalten von Datenmengen
- ▶ Zeile 12: Anlegen eines Vektors der Länge 2 mit Einträgen vom Typ `Eintrag`
- ▶ Anlegen `vector<type> name(size);`
- ▶ **Achtung**, nicht verwechseln:
 - 1000 Einträge: `vector<Eintrag> buch(1000);`
 - 1000 Vektoren: `vector<Eintrag> buch[1000];`
- ▶ Zugriff auf j -tes Element wie bei Arrays
 - `telbuch[j]` (Zeile 13–14)

395

396

Vektoren mittels vector 1/3

```
1 #include <iostream>
2 #include <vector>
3 #include <cassert>
4
5 using std::vector;
6 using std::cout;
7 using std::ostream;
8
9 class Vector {
10 private:
11     vector<double> coeff;
12
13 public:
14     Vector(int dim=0, double init=0);
15     int size() const;
16     const double& operator()(int k) const;
17     double& operator()(int k);
18     double norm() const;
19 };
```

► kein dynamischer Speicher, d.h. automatisch OK:

- Kopierkonstruktor
- Zuweisung
- Destruktor

397

Vektoren mittels vector 2/3

```
21 Vector::Vector(int dim, double init) : coeff(dim,init) {}
22
23 int Vector::size() const {
24     return coeff.size();
25 }
26
27 const double& Vector::operator()(int k) const {
28     assert(k>=0 && k<size());
29     return coeff[k];
30 }
31
32 double& Vector::operator()(int k) {
33     assert(k>=0 && k<size());
34     return coeff[k];
35 }
36
37 ostream& operator<<(ostream& output, const Vector& x) {
38     output << "\n";
39     if (x.size()==0) {
40         output << " empty vector";
41     }
42     else {
43         for (int j=0; j<x.size(); ++j) {
44             output << " " << x[j];
45         }
46     }
47     output << "\n";
48     return output;
49 }
```

► vector Template hat Methode size (Zeile 24)

► wird genutzt für Methode size für Klasse Vector

398

Vektoren mittels vector 3/3

```
37 ostream& operator<<(ostream& output, const Vector& x) {
38     output << "\n";
39     if (x.size()==0) {
40         output << " empty vector";
41     }
42     else {
43         for (int j=0; j<x.size(); ++j) {
44             output << " " << x[j];
45         }
46     }
47     output << "\n";
48     return output;
49 }
50
51 int main() {
52     Vector x(5,2);
53     Vector y;
54     cout << "x = " << x;
55     cout << "y = " << y;
56     y = x;
57     cout << "y = " << y;
58     return 0;
59 }
```

► Zuweisung funktioniert (implizit generiert!)

► Output:

```
x =
 2 2 2 2 2
y =
empty vector
y =
 2 2 2 2 2
```

399

Matrizen mittels vector 1/2

```
1 #include <iostream>
2 #include <vector>
3 #include <cassert>
4
5 using std::vector;
6 using std::cout;
7 using std::ostream;
8
9 class SquareMatrix {
10 private:
11     vector<vector<double> > coeff;
12
13 public:
14     SquareMatrix(int dim=0, double init=0);
15     int size() const;
16     const double& operator()(int j, int k) const;
17     double& operator()(int j, int k);
18     double norm() const;
19 };
20
21 SquareMatrix::SquareMatrix(int dim, double init) :
22     coeff(dim,vector<double>(dim,init)) {}
23
24 int SquareMatrix::size() const {
25     return coeff.size();
26 }
27
28 const double& SquareMatrix::operator()(int j,int k) const {
29     assert(j>=0 && j<size());
30     assert(k>=0 && k<size());
31     return coeff[j][k];
32 }
33
34 double& SquareMatrix::operator()(int j, int k) {
35     assert(j>=0 && j<size());
36     assert(k>=0 && k<size());
37     return coeff[j][k];
38 }
```

► Beachte vector<vector<double> > in Zeile 11

- >> statt > > wäre Operator für Input-Stream

400

Matrizen mittels vector 2/2

```
40 ostream& operator<<(ostream& output,
41                     const SquareMatrix& A) {
42     output << "\n";
43     int n = A.size();
44     if (n == 0) {
45         output << " empty matrix";
46     }
47     else {
48         for (int j=0; j<n; ++j) {
49             for (int k=0; k<n; ++k) {
50                 output << " " << A(j,k);
51             }
52             output << "\n";
53         }
54     }
55     output << "\n";
56     return output;
57 }
58
59 int main() {
60     SquareMatrix A(3,5);
61     SquareMatrix B;
62     cout << "B = " << B;
63     A(1,1) = 0;
64     B = A;
65     cout << "B = " << B;
66     return 0;
67 }
```

► Output:

```
B =
empty matrix
B =
5 5 5
5 0 5
5 5 5
```

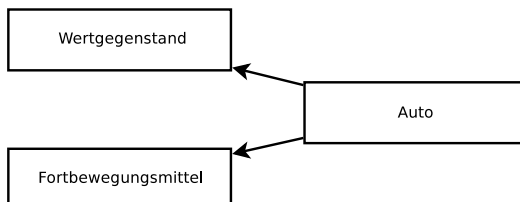
401

Mehrfachvererbung

402

Mehrfachvererbung

► C++ erlaubt Vererbung mit multiplen Basisklassen



► Syntax:

```
class Auto : public Wertgegenstand, public Fortbew {...}
```

► Vertieft Konzept der Objektorientierung

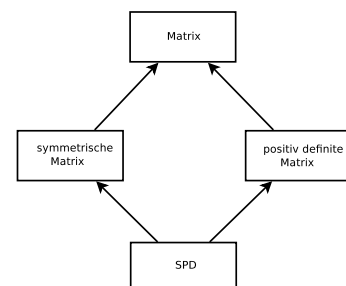
- erhöht Wiederverwendbarkeit von Code

► Problem: Mehrdeutigkeiten (nächste Folie)

403

Diamantvererbung 1/5

► Es könnte eine gemeinsame Oberklasse geben



► SPD = symmetrisch positiv definite Matrix

- **symmetrisch:** $A = A^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$
- **positiv definit:** $Ax \cdot x > 0$ für alle $x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$
 - * äquivalent: alle Eigenwerte sind strikt positiv

► Führt zu Mehrdeutigkeit

- Felder und Methoden sind mehrfach vorhanden
- Unklar worauf zugegriffen werden soll
- Speicherverschwendung
- Schlimmstenfalls: Objekte inkonsistent

404

Diamantvererbung 2/5

```
5 class Matrix{
6 private:
7   int n;
8 public:
9   void set(int n) {this->n = n;}
10  int get() {return n;}
11 };
12
13 class SMatrix : public Matrix {};
14
15 class PDMatrix : public Matrix {};
16
17 class SPDMatrix : public SMatrix, public PDMatrix {};
```

- ▶ Klasse `Matrix` hat Member `int n`
- ▶ beide abgeleiteten Klassen erben `int n`
- ▶ `SPDMatrix` erbt von zwei Klassen
 - `SPDMatrix` hat `int n` doppelt

- ▶ **naive Lösung:** Zugriff mittels vollem Namen
 - `SMatrix::n` bzw. `PDMatrix::n`
- ▶ unschön, da Speicher dennoch doppelt
 - unübersichtlich
 - fehleranfällig

- ▶ **bessere Lösung:** virtuelle Vererbung
 - z.B. `class SMatrix : virtual public Matrix`
- ▶ virtuelle Basisklasse wird nur einmal eingebunden

405

Diamantvererbung 3/5

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 class Matrix{
6 private:
7   int n;
8 public:
9   void set(int n) {this->n = n;}
10  int get() {return n;}
11 };
12
13 class SMatrix : public Matrix {};
14
15 class PDMatrix : public Matrix {};
16
17 class SPDMatrix : public SMatrix, public PDMatrix {};
```

```
18
19 int main() {
20   SPDMatrix A;
21   A.set(1);
22   cout << "n = " << A.get() << endl;
23
24   return 0;
25 }
```

- ▶ Kompilieren liefert Fehler

```
diamant1.cpp:21: error: non-static member 'set' found
in multiple base-class subobjects of type 'Matrix':
class SPDMatrix -> class SMatrix -> class Matrix
class SPDMatrix -> class PDMatrix -> class Matrix
```

- ▶ alle Datenfelder und Methoden sind doppelt!
 - Zugriff über vollständigen Namen möglich
 - z.B. `SMatrix::set` schreibt `SMatrix::n`

406

Diamantvererbung 4/5

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 class Matrix{
6 private:
7   int n;
8 public:
9   void set(int n) {this->n = n;}
10  int get() {return n;}
11 };
12
13 class SMatrix : public Matrix {};
14
15 class PDMatrix : public Matrix {};
16
17 class SPDMatrix : public SMatrix, public PDMatrix {};
```

```
18
19 int main() {
20   SPDMatrix A;
21   A.SMatrix::set(1);
22   A.PDMatrix::set(2);
23   cout << "n = " << A.SMatrix::get() << endl;
24   cout << "n = " << A.PDMatrix::get() << endl;
25
26   return 0;
27 }
```

- ▶ `SMatrix::n` und `PDMatrix::n` können verschiedene Werte haben
 - fehleranfällig!
- ▶ Output:
 - n = 1
 - n = 2

407

Diamantvererbung 5/5

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 class Matrix{
6 private:
7   int n;
8 public:
9   void set(int n) {this->n = n;}
10  int get() {return n;}
11 };
12
13 class SMatrix : virtual public Matrix {};
14
15 class PDMatrix : virtual public Matrix {};
16
17 class SPDMatrix : public SMatrix, public PDMatrix {};
```

```
18
19 int main() {
20   SPDMatrix A;
21   A.set(1);
22   A.SMatrix::set(2);
23   A.PDMatrix::set(3);
24   cout << "n = " << A.get() << endl;
25   cout << "n = " << A.SMatrix::get() << endl;
26
27   return 0;
28 }
```

- ▶ Vererbung `virtual` der Basisklasse (Zeile 13 + 15)
 - Members werden nur 1x an abg. Klassen vererbt
- ▶ Syntaxfehler, falls nur eine der Klassen `virtual!`
- ▶ Output:
 - n = 3
 - n = 3

408

Exception Handling

- ▶ try
- ▶ catch
- ▶ throw
- ▶ bad_alloc

409

Exception Handling 1/2

- ▶ Was tun bei falscher Benutzereingabe?
 - Programm sofort beenden?
 - Benutzer informieren und Programm beenden?
 - eingreifen, ohne Benutzer zu informieren?
 - dem Benutzer helfen, den Fehler zu korrigieren?
- ▶ bisher: sofort beenden mittels `assert`
- ▶ Exceptions sind Ausnahmestände
- ▶ Gründe für die Entstehung
 - falsche Eingabe durch Benutzer
 - kein Speicher mehr verfügbar
 - Dateizugriffsfehler
 - Division durch Null
 - etc.
- ▶ können diese „Fehler“ nicht verhindern
 - können sie aber antizipieren
 - an zentraler Stelle behandeln
- ▶ sofortiges Beenden ist i.a. keine Option!
 - Verlust eventuell korrekt berechneter Daten

410

Exception Handling 2/2

- ▶ Konzept des Exception Handling
 - Trennung von normalen Programmfluss und Behandlung von Fehlern
 - Fehler die in einem Teil auftauchen, werden zentral von aufrufender Funktion behandelt
 - Keine ständige Kontrolle ob Fehler aufgetreten
- ▶ Syntax in C++:
 - ▶ `try {...}` schließt risikobehafteten Code ein
 - d.h. hier werden eventuell Exceptions geworfen
 - * d.h. Fehler werden implizit / explizit erkannt
 - Sobald Exception geworfen wird, wird Code beim nächsten `catch` fortgesetzt
 - * Prg terminiert, falls kein passendes `catch`
 - ▶ `throw name;` wirft eine Exception
 - `name` ist Objekt vom Typ `type`
 - enthält Info über den aufgetretenen Fehler
 - ▶ `catch(type name) {...}` fängt `type` Exception
 - reagiert auf Exception, sog. `Exception Handler`

411

Beispiel zu throw

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 int main() {
5     cout << "*** throw\n";
6     throw int(1);
7     cout << "*** continue\n";
8     return 0;
9 }
```

- ▶ `throw` löst Exception aus
- ▶ da kein passendes `catch` folgt, wird Code beendet
 - Achtung: `catch` erfordert vorausgehendes `try`
- ▶ Output:

```
*** throw
terminating with uncaught exception of
type int
```

412

Beispiel zu try-catch 1/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 int main() {
5     cout << "*** throw\n";
6     try{
7         throw int(1);
8     }
9     catch(double x) {
10        cout << "*** catch\n";
11    }
12    cout << "*** continue\n";
13    return 0;
14 }
```

- ▶ **throw** löst Exception aus (vom Type **int**)
- ▶ da kein passendes **catch** folgt, wird Code beendet
- ▶ kein impliziter Type Cast, sondern Type sensitiv!
 - Exception vom Type **int** (Zeile 7)
 - **catch** aber nur für Type **double** (Zeile 9)
- ▶ Output:
 - *** throw
 - terminating with uncaught exception of
 - type int

413

Beispiel zu try-catch 2/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 int main() {
5     cout << "*** throw\n";
6     try{
7         throw int(1);
8     }
9     catch(int x) {
10        cout << "*** catch, x = " << x << "\n";
11    }
12    cout << "*** continue\n";
13    return 0;
14 }
```

- ▶ **throw** löst Exception aus (vom Type **int**)
- ▶ passendes **catch** fängt Exception (Zeile 9)
- ▶ Code wird danach normal fortgesetzt
- ▶ Output:
 - *** throw
 - *** catch, x = 1
 - *** continue

414

Eigene Klassen für Exceptions

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Error {
5 private:
6     int code;
7 public:
8     Error(int x) {
9         code = x;
10    }
11    void print() {
12        cout << "error code: " << code << "\n";
13    }
14 };
15
16 int main() {
17     cout << "*** throw\n";
18     try{
19         throw Error(1);
20     }
21     catch(Error info) {
22         info.print();
23     }
24     cout << "*** continue\n";
25     return 0;
26 }
```

- ▶ Kann beliebige Objekte als Exception werfen
 - erlaubt systematische Gliederung / Behandlung
- ▶ Output:
 - *** throw
 - error code: 1
 - *** continue

415

Abgeleitete Klassen 1/4

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::string;
4
5 class Error {
6 private:
7     int code;
8 public:
9     Error(int x) {
10        code = x;
11    }
12    void print() {
13        cout << "error code: " << code << "\n";
14    }
15    int getCode() {
16        return code;
17    }
18 };
19
20 class NewError : public Error {
21 private:
22     string message;
23 public:
24     NewError(int x, string txt) : Error(x) {
25         message = txt;
26     }
27     void print() {
28         cout << message << " (code: " << getCode() << ")\n";
29     }
30 };
```

- ▶ Kann beliebige Objekte als Exception werfen
 - zwei Klassen / Typen für Exceptions:
 - **Error** (Zeile 5–18), **NewError** (Zeile 20–30)

416

Abgeleitete Klassen 2/4

```
32 int main() {
33     cout << "*** throw\n";
34     try{
35         throw NewError(1,"exception");
36     }
37     catch(Error info) {
38         info.print();
39     }
40     cout << "*** continue\n";
41     return 0;
42 }
```

- ▶ jedes Objekt der abgeleiteten Klasse ist auch vom Typ der Basisklasse (Polymorphie)
- ▶ `catch(Error)` fängt Objekte vom Typ `Error` und Typ `NewError`
 - d.h. `Error::print()` in Zeile 38
- ▶ Output:

```
*** throw
error code: 1
*** continue
```

417

Abgeleitete Klassen 3/4

```
32 int main() {
33     cout << "*** throw\n";
34     try{
35         throw NewError(1,"exception");
36     }
37     catch(NewError info) {
38         info.print();
39     }
40     catch(Error info) {
41         info.print();
42     }
43     cout << "*** continue\n";
44     return 0;
45 }
```

- ▶ einem `try` können beliebig viele `catch` folgen
- ▶ erstes passendes `catch` fängt Exception
- ▶ alle anderen `catch` werden übergangen
- ▶ `catch(NewError)` fängt Objekte vom Typ `NewError`
- ▶ `catch(Error)` fängt alle übrigen vom Typ `Error`
- ▶ Output:

```
*** throw
exception (code: 1)
*** continue
```

418

Abgeleitete Klassen 4/4

```
32 int main() {
33     cout << "*** throw\n";
34     try{
35         throw int(1);
36     }
37     catch(NewError info) {
38         info.print();
39     }
40     catch(Error info) {
41         info.print();
42     }
43     catch(...) {
44         cout << "some unknown error occured\n";
45     }
46     cout << "*** continue\n";
47     return 0;
48 }
```

- ▶ einem `try` können beliebig viele `catch` folgen
- ▶ `catch(...)` fängt alle verbliebenen Exceptions
- ▶ Output:

```
*** throw
some unknown error occured
*** continue
```

419

Exception bei Speicherallokation

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::bad_alloc;
4
5 int main() {
6     double* ptr = (double*) 0;
7     try {
8         cout << "*** allocate memory\n";
9         while(1) {
10             ptr = new double[1024*1024*1024];
11         }
12     }
13     catch (bad_alloc) {
14         cout << "*** out of memory\n";
15     }
16     cout << "*** continue\n";
17     return 0;
18 }
```

- ▶ iterierte Allokation von jeweils 1 GB (Zeile 9–11)
- ▶ gescheitertes `new` wirft Exception `bad_alloc`
- ▶ Output:

```
*** allocate memory
*** out of memory
*** continue
```

420