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>`

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

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`

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`

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!
```


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` / `out` gleichwertig mit `printf` / `scanf` in C
  - aber leichter zu bedienen
  - keine Platzhalter + Pointer

Klassen

- Klassen
- Instanzen
- Objekte

- `class`
- `struct`
- `private, public`
- `string`
- `#include <cmath>`
- `#include <cstdio>`
- `#include <string>`

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.

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)

Beispiel 1/2

```
 1  class Dreieck {
 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 flaeche();
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 `flaeche` 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

Beispiel 2/2

```
 1  class Dreieck {
 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 getFlaeche();
12  };
13
14  int main() {
15    Dreieck 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 Dreieck deklarieren
- Zeile 17: Zugriff auf `private`-Member
- Beim Kompilieren tritt Fehler auf

```
dreieck2.cpp:17: error: 'x' is a private
member of 'Dreieck'
dreieck2.cpp:3: note: declared private here
```

- daher: `get/set`-Funktionen, falls nötig

Methoden implementieren 1/2

```
 1  #include <cmath>
 2
 3  class Dreieck {
 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 getFlaeche();
13  };
14
15  double Dreieck::getFlaeche() {
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

Methoden implementieren 2/2

```
1   #include <cmath>
2
3   class Dreieck {
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 getFlaeche();
14  };
15
16  void Dreieck::setX(double x0, double x1) {
17    x[0] = x0; x[1] = x1;
18  }
19
20  void Dreieck::setY(double y0, double y1) {
21    y[0] = y0; y[1] = y1;
22  }
23
24  void Dreieck::setZ(double z0, double z1) {
25    z[0] = z0; z[1] = z1;
26  }
27
28  double Dreieck::getFlaeche() {
29    return 0.5*fabs( (y[0]-x[0])*(z[1]-x[1])
30                     - (z[0]-x[0])*(y[1]-x[1]) );
31  }
```


Methoden aufrufen

```
1   #include <iostream>
2   #include "dreieck4.cpp" // Code von letzter Folie
3
4   using std::cout;
5   using std::endl;
6
7   // void Dreieck::setX(double x0, double x1)
8   // void Dreieck::setY(double y0, double y1)
9   // void Dreieck::setZ(double z0, double z1)
10
11  // double Dreieck::getFlaeche() {
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    Dreieck 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.getFlaeche() << endl;
22    return 0;
23  }
```

- `getFlaeche` agiert auf den Members von `tri`
  - d.h. `x[0]` in Implementierung entspricht `tri.x[0]`
- **Output:** `Flaeche= 0.5`

Methoden direkt implementieren

```
1   #include <cmath>
2
3   class Dreieck {
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 getFlaeche() {
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 $\Rightarrow$ besser nicht!

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` $\neq$ `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/

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

Naive Fehlerkontrolle

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

- `assert`
- `#include <cassert>`

Wozu Zugriffskontrolle? 1/2

- Fakt ist: alle Programmierer machen Fehler
  - Code läuft beim ersten Mal nie richtig
- Großteil der Entwicklungszeit geht in Fehlersuche
- "Profis" unterscheiden sich von "Anfängern" im Wesentlichen durch effizientere Fehlersuche
- Syntax-Fehler sind leicht einzugrenzen
  - es steht Zeilennummer dabei (Compiler!)
- Laufzeitfehler sind viel schwieriger zu finden
  - Programm läuft, tut aber nicht das Richtige
  - manchmal fällt der Fehler ewig nicht auf
    ⇒ sehr schlecht
- Möglichst viele Fehler bewusst abfangen!
  - Funktions-Input auf Konsistenz prüfen!
    - Fehler-Abbruch, falls inkonsistent!
  - Zugriff kontrollieren mittels `get` und `set`
    - reine Daten sollten immer `private` sein
    - Benutzer kann/darf Daten nicht verpfuschen!

Wozu Zugriffskontrolle? 2/2

```
1   class Bruch {
2   public:
3     int zaehler;
4     unsigned int nenner;
5   };
6
7   int main() {
8     Bruch meinBruch;
9     meinBruch.zaehler = -1000;
10    meinBruch.nenner = 0;
11
12    return 0;
13  }
```

- Wie sinnvolle Werte sicherstellen? (Zeile 10)
  - mögliche Fehlerquellen direkt ausschließen
  - Aufgabe des Programmierers
    - Programm bestimmt, was Nutzer darf
  - Laufzeitfehler möglichst früh unterbrechen
- Lösung: `get` und `set` Funktionen für Memberdaten `zaehler, nenner` einbauen
- Lösung: Verwendung von C-Bibliothek `assert.h`
  - Einbinden `#include <cassert>`
  - `assert(condition);` liefert Fehlerabbruch, falls `condition` falsch
  - mit Ausgabe der Zeilennummer im Source-Code

C-Bibliothek assert.h

```
 1  #include <iostream>
 2  #include <cassert>
 3  using std::cout;
 4
 5  class Bruch {
 6  private:
 7    int zaehler;
 8    unsigned int nenner;
 9  public:
10    int getZaehler() { return zaehler; };
11    unsigned int getNenner() { return nenner; };
12    void setZaehler(int z) { zaehler = z; };
13    void setNenner(unsigned int n) {
14      assert(n>0);
15      nenner = n;
16    }
17    void print() {
18      cout << zaehler << "/" << nenner << "\n";
19    }
20  };
21
22  int main() {
23    Bruch x;
24    x.setZaehler(1);
25    x.setNenner(3);
26    x.print();
27    x.setNenner(0);
28    x.print();
29    return 0;
30  }
```

- Output:

```
1/3
Assertion failed: (n>0), function setNenner,
file assert.cpp, line 14.
```


File-Konventionen

- Aufteilen von Source-Code auf mehrere Files
- Precompiler, Compiler, Linker
- Objekt-Code
- `name.hpp`
- `name.cpp`

- `g++ -c`
- `make`

Aufteilen von Source-Code

- längere Source-Codes auf mehrere Files aufteilen
- Vorteil:
  - übersichtlicher
  - Bildung von Bibliotheken
    - Wiederverwendung von alten Codes
    - vermeidet Fehler

- `g++ name1.cpp name2.cpp ...`
  - erstellt *ein* Exe aus mehreren Source-Codes
  - Reihenfolge der Codes nicht wichtig
  - analog zu `g++ all.cpp`
    - wenn `all.cpp` ganzen Source-Code enthält
  - insb. Funktionsnamen müssen eindeutig sein
  - `int main()` darf nur 1x vorkommen

- analog für C und `gcc`

Precompiler, Compiler & Linker

- Beim Kompilieren von Source-Code werden mehrere Stufen durchlaufen:

(1) Preprocessor-Befehle ausführen, z.B. `#include`

(2) Compiler erstellt Objekt-Code

(3) Objekt-Code aus Bibliotheken wird hinzugefügt

(4) Linker ersetzt symbolische Namen im Objekt-Code durch Adressen und erzeugt Executable

- Bibliotheken = vorkompilierter Objekt-Code
  - plus zugehöriges Header-File

- Standard-Linker in Unix ist `ld`

- Nur Schritt (3) fertig, d.h. Objekt-Code erzeugen
  - `g++ -c name.cpp` erzeugt Objekt-Code `name.o`
- Objekt-Code händisch hinzufügen + kompilieren
  - `g++ name.cpp bib1.o bib2.o ...`
  - `g++ name.o bib1.o bib2.o ...`
  - Reihenfolge + Anzahl der Objekt-Codes ist egal
- Ziel: selbst Bibliotheken erstellen
  - spart ggf. Zeit beim Kompilieren
  - vermeidet Fehler

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
- Source-File `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 MYCLASS
  #define MYCLASS
  ```
- Header-File endet mit

  ```
  #endif
  ```
- Dieses Vorgehen erlaubt mehrfache Einbindung!

dreieck.hpp

```
 1  #ifndef DREIECK
 2  #define DREIECK
 3
 4  #include <cmath>
 5
 6  // The class Dreieck stores a triangle in R2
 7
 8  class Dreieck {
 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 getFlaeche();
25  };
26
27  #endif
```


dreieck.cpp

```
 1  #include "dreieck.hpp"
 2
 3  void Dreieck::setX(double x0, double x1) {
 4      x[0] = x0; x[1] = x1;
 5  }
 6
 7  void Dreieck::setY(double y0, double y1) {
 8      y[0] = y0; y[1] = y1;
 9  }
10
11  void Dreieck::setZ(double z0, double z1) {
12      z[0] = z0; z[1] = z1;
13  }
14
15  double Dreieck::getFlaeche() {
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 dreieck.cpp` liefert `dreieck.o`
- Kompilieren `g++ dreieck.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
```


dreieck_main.cpp

```
 1  #include <iostream>
 2  #include "dreieck.hpp"
 3
 4  using std::cout;
 5  using std::endl;
 6
 7  int main() {
 8    Dreieck 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.getFlaeche() << endl;
13    return 0;
14  }
```

- Kompilieren mit `g++ dreieck_main.cpp dreieck.o`
  - erzeugt Objekt-Code aus `dreieck_main.cpp`
  - bindet zusätzlichen Objekt-Code `dreieck.o` ein
  - linkt den Code inkl. Standardbibliotheken

Statische Bibliotheken und make

```
1  exe : dreieck_main.o dreieck.o
2          g++ -o exe dreieck_main.o dreieck.o
3
4  dreieck_main.o : dreieck_main.cpp dreieck.hpp
5          g++ -c dreieck_main.cpp
6
7  dreieck.o : dreieck.cpp dreieck.hpp
8          g++ -c dreieck.cpp
```

- UNIX-Befehl `make` erlaubt Abhängigkeiten von Code automatisch zu handeln
  - Automatisierung spart Zeit für Kompilieren
  - Nur wenn Source-Code geändert wurde, wird neuer Objekt-Code erzeugt und abhängiger Code wird neu kompiliert
- Aufruf `make` befolgt Steuerdatei `Makefile`
- Aufruf `make -f filename` befolgt `filename`
- Datei zeigt Abhängigkeiten und Befehle, z.B.
  - Zeile 1 = Abhängigkeit (nicht eingerückt!)
    - Datei `exe` hängt ab von ...
  - Zeile 2 = Befehl (eine Tabulator-Einrückung!)
    - Falls `exe` älter ist als Abhängigkeiten, wird Befehl ausgeführt (und nur dann!)
- mehr zu `make` in Schmaranz C-Buch, Kapitel 15

Konstruktor & Destruktor

- Konstruktor
- Destruktor
- Überladen (Einführung)
- optionaler Input & Default-Parameter
- Schachtelung von Klassen

- `this`
- `ClassName(...)`
- `~ClassName()`
- Operator :
- `for(int j=0; j<dim; ++j) { ... }`

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 Standarddestruktor: `~className()`
    - kein Input, kein Output
- Überladen = ein Methoden-Name hat mehrere verschiedene Signaturen und Funktionalitäten
  - wichtig: Signaturen eindeutig verschieden!
  - später mehr!

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
```

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->

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
```


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
```


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
```

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    Class1 obj1;
13  public:
14     Class2() { cout << "Konstr Class2" << endl; };
15     ~Class2() { cout << "Destr Class2" << endl; };
16  };
17
18  int main() {
19    Class2 obj2;
20    return 0;
21  }
```

- 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
```


vector_first.hpp

```
 1  #ifndef VECTOR_FIRST
 2  #define VECTOR_FIRST
 3
 4  #include <cmath>
 5  #include <cstdlib>
 6  #include <cassert>
 7
 8  // The class Vector stores vectors in Rd
 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 dim, double init = 0);
21    ~Vector();
22
23    // return vector dimension
24    int size();
25
26    // read and write vector coefficients
27    void set(int k, double value);
28    double get(int k);
29
30    // compute Euclidean norm
31    double norm();
32  };
33
34  #endif
```


vector_first.cpp 1/2

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

- erstellt drei Konstruktoren (Zeile 5, Zeile 9)
  - Standardkonstruktor (Zeile 5)
  - Deklaration `Vector var(dim,init);`
  - Deklaration `Vector var(dim);` mit `init = 0`
  - optionaler Input durch Default-Parameter (Z. 9)
    - wird in `vector.hpp` angegeben (letzte Folie!)
- **ohne Destruktor:** nur Speicher von Pointer frei
- **Achtung:** `g++` erfordert expliziten Type Cast bei `malloc` (Zeile 12)

vector_first.cpp 2/2

```
24  int Vector::size() {
25    return dim;
26  }
27
28  void Vector::set(int k, double value) {
29    assert(k>=0 && k<dim);
30    coeff[k] = value;
31  }
32
33  double Vector::get(int k) {
34    assert(k>=0 && k<dim);
35    return coeff[k];
36  }
37
38  double Vector::norm() {
39    double norm = 0;
40    int j = 0;
41    for (j=0; j<dim; ++j) {
42      norm = norm + coeff[j]*coeff[j];
43    }
44    return sqrt(norm);
45  }
```

- kontrollierter Zugriff auf Koeffizienten (Z. 29, 34)
- in C++ darf man Variablen überall deklarieren
  - im ursprünglichen C nur am Blockanfang
  - ist kein guter Stil, da unübersichtlich
    - C-Stil möglichst beibehalten! Code wartbarer!
- **vernünftig:** `for (int j=0; j<dim; ++j) { ... }`
  - für lokale Zählvariablen (in Zeile 41–42)

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(10,4);
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:

```
Norm = 0
Norm = 0
Norm = 12.6491
free vector, length 10
free vector, length 20
free vector, length 0
```


Referenzen

- Definition
- Unterschied zwischen Referenz und Pointer
- direktes Call by Reference
- Referenzen als Funktions-Output

- `type&`

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
```


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 6)
  - 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
```

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`

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;
7     tmp = rx;
8     rx = ry;
9     ry = tmp;
10  }
11
12  int main() {
13    int x = 5;
14    int y = 10;
15    cout << "x = " << x << ", y = " << y << endl;
16    swap(x, y);
17    cout << "x = " << x << ", y = " << y << endl;
18    return 0;
19  }
```

- Output:

  ```
  x = 5, y = 10
  x = 10, y = 5
  ```

- echtes Call-by-Reference in C++
  - Funktion kriegt als Input Referenzen
  - Syntax: `type fctName( ..., type& ref, ... )`
    - dieser Input wird als Referenz übergeben
- `rx` ist lokaler Name (Zeile 5–10) für den Speicherbereich von `x` (Zeile 13–18)
- analog für `ry` und `y`

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

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
  ```

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, content = 10
```

- Auf Folie nichts Neues!
  - nur Motivation der folgenden Folie

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, content = 1
```

- Achtung: `private` Member wurde geändert
  - Das will man eigentlich nicht!
  - Das kann Laufzeitfehler produzieren!
- Beachte: Code von `getContent` gleich
  - nur andere Signatur

Schlüsselwort `const`

- Konstanten definieren
- read-only Referenzen

- `const`
- `const int*, int const*, int* const`
- `const int&`

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`

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
```


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:4:14: 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)

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` entspricht 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
```


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, content = 1
```

- Achtung: `private` Member wurde geändert

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, content = 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.

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!
- bad-hack Lösung: Signatur ändern auf
  - `double square(const double& x)`

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`

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 Rd
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`
- neue Syntax: Zeile 24, 28, 31

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*) NULL;
8   }
9   Vector::Vector(int dim, double init) {
10      this->dim = dim;
11      coeff = (double*) malloc(dim*sizeof(double));
12      for (int j=0; j<dim; ++j) {
13          coeff[j] = init;
14      }
15      // just for demonstration purposes
16      cout << "new vector, length " << dim << "\n";
17  }
18  Vector::~Vector() {
19    if (dim > 0) {
20      free(coeff);
21    }
22    // just for demonstration purposes
23    cout << "free vector, length " << dim << "\n";
24  }
```

- keine Änderungen!

Read-Only Refs als Input 4/5

```
24  int Vector::size() const {
25    return dim;
26  }
27
28  void Vector::set(int k, double value) {
29    assert(k>=0 && k<dim);
30    coeff[k] = value;
31  }
32
33  double Vector::get(int k) const {
34    assert(k>=0 && k<dim);
35    return coeff[k];
36  }
37
38  double Vector::norm() const {
39    double norm = 0;
40    for (int j=0; j<dim; ++j) {
41      norm = norm + coeff[j]*coeff[j];
42    }
43    return sqrt(norm);
44  }
```

- geändert: Zeile 24, 33, 38

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
```


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

Überladen von Funktionen

- Default-Parameter & Optionaler Input
- Überladen & `const` bei Variablen
- Überladen & `const` bei Referenzen
- Überladen & `const` bei Methoden

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 übergegeben
- 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

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 entweder in Zeile 4 oder 6
- Output nach Korrektur:

  ```
  x=1, y=0
  x=1, y=2
  ```

- **Konvention:** bei der Forward Declaration
  - d.h. Default-Parameter werden in `hpp` festgelegt
- brauche bei Forward Decl. keine Variablennamen
  - `void f(int, int = 0);` in Zeile 4 ist OK

Überladen von Funktionen 1/2

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

- Mehrere Funktionen gleichen Namens möglich
  - wie bei Konstruktoren
  - 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 Case
- Diesen Vorgang nennt man Überladen
- Reihenfolge bei der Deklaration ist unwichtig
  - d.h. kann Zeilen 1–5 beliebig permutieren
- Rückgabewerte können unterschiedlich sein
  - Also: unterschiedliche Output-Parameter und gleiche Input-Parameter geht nicht
    - Zeile 2: Syntax-Fehler, da Input gleich zu 1
    - Zeile 3: Syntax-Fehler, da optionaler Input
    - Zeile 4 + 5: OK

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)`

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`

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`

Überladen von Operatoren

- Kopierkonstruktor
- Type Casting
- Zuweisungsoperator
- Unäre und binäre Operatoren

- `operator`

Klasse für Komplexe Zahlen

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

- Default-Parameter sollten in der ersten Deklaration genannt werden
  - Zeile 10: Forward Declaration des Konstruktors
  - Zeile 17–20: Code des Konstruktors

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

Zuweisungsoperator

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

- `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;`
- 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
- wird automatisch erstellt (Shallow Copy), falls nicht explizit programmiert
  - hier formal unnötig, da nur statische Daten

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`

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 Member-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 Member-Methode der Klasse
- Aufruf später durch `~x`

complex_part.hpp

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

- Zeile 10: Forward Declaration mit Default-Input
- Zeile 10 + 20: Type Casts `Complex` vs. `double`

complex_part.cpp

```
1  #include "complex_part.hpp"
2  using std::cout;
3  Complex::Complex(double re, double im) {
4    this->re = re;
5    this->im = im;
6    cout << "Konstruktor\n";
7  }
8  Complex::Complex(const Complex& rhs) {
9    re = rhs.re;
10   im = rhs.im;
11   cout << "Kopierkonstruktor\n";
12 }
13 Complex::~Complex() {
14   cout << "Destruktor\n";
15 }
16 Complex& Complex::operator=(const Complex& rhs) {
17   re = rhs.re;
18   im = rhs.im;
19   return *this;
20 }
21 double Complex::real() const {
22   return re;
23 }
24 double Complex::imag() const {
25   return im;
26 }
27 double Complex::abs() const {
28     return sqrt(re*re + im*im);
29 }
30 void Complex::print() const {
31   cout << re << " + " << im << "*i";
32 }
33 Complex::operator double() const {
34   cout << "Complex -> double\n";
35   return re;
36 }
37 const Complex Complex::operator-() const {
38   return Complex(-re,-im);
39 }
40 const Complex Complex::operator~() const {
41   return Complex(re,-im);
42 }
```


Beispiel: Konstruktor

```
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 = ~y;
11   w.print(); cout << "\n";
12   x.print(); cout << "\n";
13   y.print(); cout << "\n";
14   z.print(); cout << "\n";
15   return 0;
16 }
```

- Output:

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

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
```


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   return Complex(x.real()/y, x.imag()/y);
24 }
25 const Complex operator/(const Complex& x, const Complex& y){
26   double norm = y.abs();
27   return x*~y / (norm*norm);
28 }
```

- 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 + 25: beachte $x/y = (x\overline{y})/(y\overline{y}) = x\overline{y}/|y|^2$

complex.hpp

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

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

complex.cpp 1/2

```
1  #include "complex.hpp"
2  using std::cout;
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   re = rhs.re;
19   im = rhs.im;
20   return *this;
21 }
22
23 double Complex::real() const {
24   return re;
25 }
26
27 double Complex::imag() const {
28   return im;
29 }
30
31 double Complex::abs() const {
32   return sqrt(re*re + im*im);
33 }
34
35 void Complex::print() const {
36   cout << re << " + " << im << "*i";
37 }
38
39 Complex::operator double() const {
40   return re;
41 }
```

complex.cpp 2/2

```
42  const Complex Complex::operator-() const {
43    return Complex(-re,-im);
44  }
45
46  const Complex Complex::operator~() const {
47    return Complex(re,-im);
48  }
49
50  const Complex operator+(const Complex& x, const Complex& y){
51    double xr = x.real();
52    double xi = x.imag();
53    double yr = y.real();
54    double yi = y.imag();
55    return Complex(xr + yr, xi + yi);
56  }
57
58  const Complex operator-(const Complex& x, const Complex& y){
59    double xr = x.real();
60    double xi = x.imag();
61    double yr = y.real();
62    double yi = y.imag();
63    return Complex(xr - yr, xi - yi);
64  }
65
66  const Complex operator*(const Complex& x, const Complex& y){
67    double xr = x.real();
68    double xi = x.imag();
69    double yr = y.real();
70    double yi = y.imag();
71    return Complex(xr*yr - xi*yi, xr*yi + xi*yr);
72  }
73
74  const Complex operator/(const Complex& x, const double y){
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    return x*~y / (norm*norm);
81  }
```


complex_main.cpp

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

- Output:

```
1 + 1*i
0 + 1*i
0 + -1*i
3.5 + 0.5*i
```


Zusammenfassung Syntax

- Konstruktor (= Type Cast auf `Class`)
  `Class::Class( ... input ... )`
- Destruktor
  `~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&)`
  - Aufruf durch `Class var(rhs);`
  - oder `Class var = rhs;`
- 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

Welche Operatoren überladen?

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

- 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!

- `https://www.c-plusplus.net/forum/232010-full`

Dynamische Speicherverwaltung

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

new vs. malloc

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

```
type* var = malloc(sizeof(type));
*var = ...;
```

- dynamischer Vektor von Objekten der Länge `N`

```
type* vec = malloc(N*sizeof(type));
vec[j] = ...;
```

- `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`

delete vs. free

- `free` gibt Speicher von `malloc` frei

```
type* vec = 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;
```


vector.hpp

```
1  #ifndef VECTOR
2  #define VECTOR
3  #include <cmath>
4  #include <cassert>
5
6  // The class Vector stores vectors in Rd
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 23
  - falls "normales Objekt", Methode aus Zeile 24

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

vector.cpp 1/3

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


vector.cpp 2/3

```
35 Vector& Vector::operator=(const Vector& rhs) {
36     dim = rhs.size();
37     delete[] coeff;
38     coeff = new double[dim];
39     for (int j=0; j<dim; ++j) {
40         coeff[j] = rhs[j];
41     }
42     cout << "deep copy, length " << dim << "\n";    //***
43     return *this;
44 }
45
46 int Vector::size() const {
47   return dim;
48 }
49
50 const double& Vector::operator[](int k) const {
51   assert(k>=0 && k<dim);
52   return coeff[k];
53 }
54
55 double& Vector::operator[](int k) {
56   assert(k>=0 && k<dim);
57   return coeff[k];
58 }
59
60 double Vector::norm() const {
61   double norm = 0;
62   for (int j=0; j<dim; ++j) {
63     norm = norm + coeff[j]*coeff[j];
64   }
65   return sqrt(norm);
66 }
```

- Zugriff über `[ ]` sowohl für Read-Only Vektoren als auch für Vektoren mit Schreibzugriff erlaubt
  - Zeile 50: Read-Only Vektoren
  - Zeile 55: Vektoren mit Schreibzugriff

vector.cpp 3/3

```
67 const Vector operator+(const Vector& rhs1,
68                        const Vector& rhs2) {
69     assert(rhs1.size() == rhs2.size());
70     Vector result(rhs1);
71     for (int j=0; j<result.size(); ++j) {
72         result[j] = result[j] + rhs2[j];
73     }
74     return result;
75 }
76
77 const Vector operator*(const double scalar,
78                        const Vector& input) {
79     Vector result(input);
80     for (int j=0; j<result.size(); ++j) {
81         result[j] = result[j] * scalar;
82     }
83     return result;
84 }
85
86 const Vector operator*(const Vector& input,
87                        const double scalar) {
88     return scalar*input;
89 }
90
91 const double operator*(const Vector& rhs1,
92                        const Vector& rhs2) {
93     double scalarproduct = 0;
94     assert(rhs1.size() == rhs2.size());
95     for (int j=0; j<rhs1.size(); ++j) {
96         scalarproduct = scalarproduct + rhs1[j]*rhs2[j];
97     }
98     return scalarproduct;
99 }
```

- Zeile 86: 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 94

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 }
```

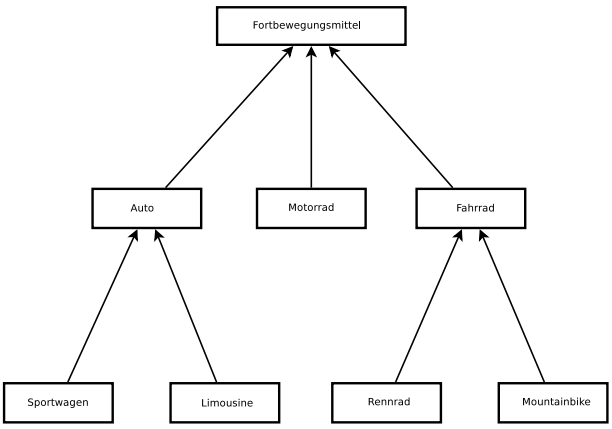
- Output:

```
constructor, empty
constructor, length 100
copy constructor, length 100
*** Addition
copy constructor, length 100
shallow 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
```


Vererbung

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

Was ist Vererbung?

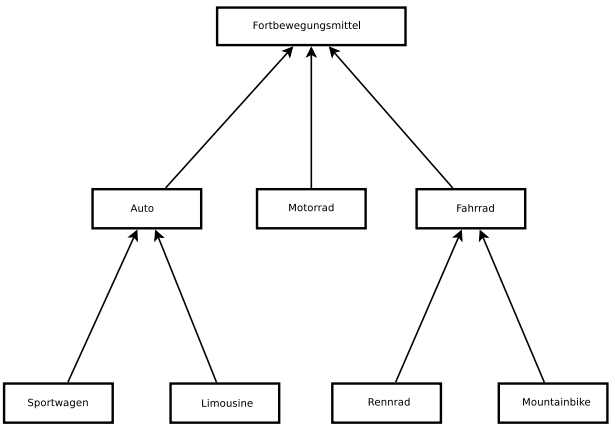


- im Alltag werden Objekte klassifiziert, z.B.
  - Jeder Sportwagen ist ein Auto
    - kann alles, was ein Auto kann, und noch mehr
  - Jedes Auto ist ein Fortbewegungsmittel
    - kann alles, was ein Fbm. kann, und noch mehr
- in C++ mittels Klassen abgebildet
  - Klasse (Fortbewegungsmittel) vererbt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

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

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 { ... };`

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
```


`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

`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!

Konstruktor & Desktruktor 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 };
```


Konstruktor & Desktruktor 2/4

```
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 }
```

- Anlegen eines Objekts vom Typ `Abgeleitet` ruft Konstruktoren 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()
```


Konstruktor & Desktruktor 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 };
```


Konstruktor & Desktruktor 4/4

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

- kann bewusst Konstruktor von `Basisklasse` wählen wenn Konstruktor von `Abgeleitet` aufgerufen wird
  - `Abgeleitet(...) : Basisklasse(...) {...};`
  - ruft Konstruktor von `Basisklasse`, welcher der Signatur entspricht ($\rightarrow$ Überladen)
- Output:

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

Ein weiteres Beispiel 1/3

```
1  #ifndef FORTBEWEGUNGSMITTEL
2  #define FORTBEWEGUNGSMITTEL
3
4  #include <iostream>
5  #include <string>
6
7  using std::string;
8
9  class Fortbewegungsmittel {
10 private:
11   double speed;
12 public:
13   Fortbewegungsmittel(double=0);
14   double getSpeed() const;
15   void setSpeed(double);
16   void bewegen() const;
17 };
18
19 class Auto : public Fortbewegungsmittel {
20 private:
21   string farbe;                 // zusaetzliche Eigenschaft
22 public:
23   Auto();
24   Auto(double, string);
25   string getFarbe() const;
26   void setFarbe(string);
27   void schalten() const;        // zusaetzliche Faehigkeit
28 };
29
30 class Sportwagen : public Auto {
31 public:
32   Sportwagen();
33   Sportwagen(double, string);
34   void kickstart() const;       // zusaetzliche Eigenschaft
35 };
36 #endif
```


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 }
```


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
```


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

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

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'?
```


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
```


Matrizen

- Klasse für Matrizen
- Vektoren als abgeleitete Klasse

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

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 $j, k = 0, 1, \ldots$
- 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[ell]` liefert a_ℓ

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

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  }
```

- $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times p} \quad \Rightarrow \quad AB \in \mathbb{R}^{m \times p}$
  - erfordert passende Dimension!
  - $(AB)_{ik} = \sum_{j=0}^{n-1} A_{ij} B_{jk}$

matrix.hpp

```
#ifndef MATRIX
#define MATRIX
#include <cmath>
#include <cassert>
#include <iostream>

class Matrix {
private:
  int m;
  int n;
  double* coeff;

public:
  // constructors, destructor, assignment
  Matrix();
  Matrix(int m, int n, double init=0);
  Matrix(const Matrix&);
  ~Matrix();
  Matrix& operator=(const Matrix&);

  // return size of matrix
  int size1() const;
  int size2() const;

  // read and write entries with matrix access A(j,k)
  const double& operator()(int j, int k) const;
  double& operator()(int j, int k);

  // read and write storage vector A[ell]
  const double& operator[](int ell) const;
  double& operator[](int ell);

  // compute norm
  double norm() const;
};

// matrix-matrix sum and product
const Matrix operator+(const Matrix&, const Matrix&);
const Matrix operator*(const Matrix&, const Matrix&);
#endif
```


matrix.cpp 1/3

```
#include "matrix.hpp"
using std::cout;

Matrix::Matrix() {
  m = 0;
  n = 0;
  coeff = (double*) 0;
  cout << "constructor, empty\n";
}

Matrix::Matrix(int m, int n, double init) {
  this->m = m;
  this->n = n;
  coeff = new double[m*n];
  for (int ell=0; ell<m*n; ++ell) {
    coeff[ell] = init;
  }
  cout << "constructor, " << m << " x " << n << "\n";
}

Matrix::Matrix(const Matrix& rhs) {
  m = rhs.size1();
  n = rhs.size2();
  coeff = new double[m*n];
  for (int ell=0; ell<m*n; ++ell) {
    coeff[ell] = rhs[ell];
  }
  cout << "copy constructor, " << m << " x " << n << "\n";
}

Matrix::~Matrix() {
  if (m > 0 && n > 0) {
    delete[] coeff;
  }
  cout << "destructor, " << m << " x " << n << "\n";
}
```


matrix.cpp 2/3

```
Matrix& Matrix::operator=(const Matrix& rhs) {
  if (m > 0 && n > 0) {
    delete[] coeff;
  }
  m = rhs.size1();
  n = rhs.size2();
  coeff = new double[m*n];
  for (int ell=0; ell<m*n; ++ell) {
    coeff[ell] = rhs[ell];
  }
  cout << "deep copy, " << m << " x " << n << "\n";
  return *this;
}

int Matrix::size1() const {
  return m;
}

int Matrix::size2() const {
  return n;
}

const double& Matrix::operator()(int j, int k) const {
  assert(j>=0 && j<m);
  assert(k>=0 && k<n);
  return coeff[j+k*m];
}

double& Matrix::operator()(int j, int k) {
  assert(j>=0 && j<m);
  assert(k>=0 && k<n);
  return coeff[j+k*m];
}

const double& Matrix::operator[](int ell) const {
  assert( ell>=0 && ell<m*n );
  return coeff[ell];
}

double& Matrix::operator[](int ell) {
  assert( ell>=0 && ell<m*n);
  return coeff[ell];
}
```


matrix.cpp 3/3

```
double Matrix::norm() const {
  int m = size1();
  int n = size2();
  double norm = 0;
  for (int j=0; j<m; ++j) {
    for (int k=0; k<n; ++k) {
      norm = norm + (*this)(j,k) * (*this)(j,k);
    }
  }
  return sqrt(norm);
}

const Matrix operator+(const Matrix& A, const Matrix& B) {
  int m = A.size1();
  int n = A.size2();
  assert(m == B.size1() );
  assert(n == B.size2() );
  Matrix sum = A;
  for (int j=0; j<m; ++j) {
    for (int k=0; k<n; ++k) {
      sum(j,k) = sum(j,k) + B(j,k);
    }
  }
  return sum;
}
const Matrix operator*(const Matrix& A, const Matrix& B) {
  int m = A.size1();
  int n = A.size2();
  int p = B.size2();
  double sum = 0;
  assert(n == B.size1() );
  Matrix product(m,p);
  for (int i=0; i<m; ++i) {
    for (int k=0; k<p; ++k) {
      sum = 0;
      for (int j=0; j<n; ++j) {
        sum = sum + A(i,j)*B(j,k);
      }
      product(i,k) = sum;
    }
  }
  return product;
}
```

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   Matrix C;
15   C = A + A;
16   for (int j=0; j<m; ++j) {
17     for (int k=0; k<n; ++k) {
18       cout << C(j,k) << " ";
19     }
20     cout << "\n";
21   }
22   return 0;
23 }
```

- Output:

```
constructor, 2 x 3
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
```


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(int m, double init=0);
10   Vector(const Matrix&);
11
12   // return size of vector
13   int size() const;
14
15   // read and write coefficients with access x(j)
16   const double& operator()(int j) const;
17   double& operator()(int j);
18 };
19 #endif
```

- Identifiziere $x \in \mathbb{R}^n \simeq \mathbb{R}^{n\times 1}$
  - d.h. Klasse `Vector` wird von `Matrix` abgeleitet
- erbe Standardkonstruktor + Destruktor von `Matrix`
- Konstruktoren `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]`

matrix_vector.cpp

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

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

Matrix-Vektor-Produkt

- $A \in \mathbb{R}^{m\times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n\times p} \quad \Rightarrow \quad AB \in \mathbb{R}^{m\times p}$,
  - $(AB)_{ik} = \sum_{j=0}^{n-1} A_{ij}B_{jk}$
- $A \in \mathbb{R}^{m\times n}$, $x \in \mathbb{R}^n \quad \Rightarrow \quad Ax \in \mathbb{R}^m$,
  - $(Ax)_i = \sum_{j=0}^{n-1} A_{ij}x_j$
  - 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`

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   Vector X(n,1);
12   Vector Y = A*X;
13   for (int j=0; j<n; ++j) {
14     cout << Y(j) << "\n";
15   }
16   return 0;
17 }
```

- Output:

```
constructor, 3 x 3
constructor, 3 x 1
vector constructor, size 3
constructor, 3 x 1
constructor, 3 x 1
Type Cast
destructor, 3 x 1
1
2
3
destructor, 3 x 1
destructor, 3 x 1
destructor, 3 x 3
```


Schlüsselwort `virtual`

- Polymorphie
- Virtuelle Methoden
- `virtual`

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:** Vektor ist vom Typ `Vector` und `Matrix`
- kann den jeweils passenden Typ verwenden
  - Diese Eigenschaft nennt man Polymorphie (*griech.* Vielgestaltigkeit)
- Das hat insbesondere Konsequenzen für Pointer!

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 20 ruft `print` aus `Basisklasse` auf
  - i.a. soll `print` aus `Abgeleitet` verwendet werden

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 20 ruft nun redefinierte Methode `print` auf

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!

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

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`

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 die Variante von `Basisklasse`

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

Abstrakte Klassen

- Manchmal werden Klassen nur zur Strukturierung / Vererben angelegt, aber Instanzierung ist nicht sinnvoll / gewollt
  - d.h. es soll keine Objekte der Basisklasse geben
  - sog. **abstrakte Klassen**
  - dient nur als Schablone für abgeleitete Klassen
- abstrakte Klassen können nicht instanziert 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