

Einführung in das Programmieren für Technische Mathematik

Prof. Dr. Dirk Praetorius

Dr. Michele Ruggeri

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



Institut für Analysis
und Scientific Computing

Formalia

- ▶ Rechte & Pflichten
- ▶ Benotung
- ▶ Anwesenheitspflicht
- ▶ Literatur

1

EPROG-Homepages

- ▶ <http://www.asc.tuwien.ac.at/eprog/>
 - Regeln & Pflichten
 - Benotungsschema
 - Evaluation & Notenspiegel
- ▶ <https://tuwel.tuwien.ac.at/course/view.php?id=21247>
 - Regeln & Pflichten
 - Benotungsschema
 - freiwilliges UE-Material (alte Tests!)
 - Download der Folien & Übungsblätter
 - Termine der VO und UE

Literatur

- ▶ VO-Folien zum Download auf Homepage
 - vollständige Folien aus dem letzten Semester
 - aktuelle Folien wöchentlich jeweils vor Vorlesung
- ▶ formal keine weitere Literatur nötig
- ▶ zwei freie Bücher zum Download auf TUWEL
- ▶ weitere Literaturhinweise auf der nächsten Folie

2

freiwillige zusätzliche Literatur

- ▶ [Brian Kernighan, Dennis Ritchie](#)
Programmieren in C
- ▶ [Klaus Schmaranz](#)
Softwareentwicklung in C
- ▶ [Ralf Kirsch, Uwe Schmitt](#)
Programmieren in C, eine mathematikorientierte Einführung
- ▶ [Robert Klima, Siegfried Selberherr](#)
Programmieren in C
- ▶ [Bernd Brüggemann](#)
Programmieren lernen für Teens - mit C

- ▶ [Bjarne Stroustrup](#)
Die C++ Programmiersprache
- ▶ [Klaus Schmaranz](#)
Softwareentwicklung in C++
- ▶ [Jesse Liberty](#)
Jetzt lerne ich C++
- ▶ [Jesse Liberty](#)
C++ in 21 Tagen

3

Das erste C-Programm

- ▶ Programm & Algorithmus
- ▶ Source-Code & Executable
- ▶ Compiler & Interpreter
- ▶ Syntaxfehler & Laufzeitfehler
- ▶ Wie erstellt man ein C-Programm?

- ▶ `main`
- ▶ `printf` (Ausgabe von Text)
- ▶ `#include <stdio.h>`

4

Programm

- ▶ Ein **Computerprogramm** oder kurz **Programm** ist eine Folge von Anweisungen, die den Regeln einer Programmiersprache genügen, um auf einem Computer eine bestimmte Funktionalität, Aufgaben- oder Problemstellung bearbeiten oder lösen zu können.
 - Anweisungen = **Deklarationen** und **Instruktionen**
 - * **Deklaration** = z.B. Definition von Variablen
 - * **Instruktion** = „tue etwas“
 - BSP: Sei $x \in \mathbb{R}$
 - BSP: Definiere $f : \mathbb{R} \rightarrow \mathbb{R}, f(x) = x^3$
 - BSP: suche einen Telefonbucheintrag
 - BSP: berechne den Wert eines Integrals

Algorithmus

- ▶ Ein **Algorithmus** ist eine aus endlich vielen Schritten bestehende, eindeutige und ausführbare Handlungsvorschrift zur Lösung eines Problems oder einer Klasse von Problemen.
 - BSP: Berechne die Lösung eines linearen Gleichungssystems mittels Gauß-Elimination
 - BSP: Berechne die Nullstelle eines quadratischen Polynoms mittels p - q -Formel
- ▶ IdR. unendlich viele Algorithmen für ein Problem
 - IdR. sind Algorithmen unterschiedlich „gut“
 - * Was heißt „gut“? (später!)

5

Source-Code

- ▶ in Programmiersprache geschriebener Text eines Computerprogramms
- ▶ wird bei Ausführung bzw. Compilieren **schrittweise** abgearbeitet
- ▶ im einfachsten Fall: **sequentiell**
 - Programmzeile für Programmzeile
 - von oben nach unten

Programmiersprachen

- ▶ Grobe Unterscheidung in Interpreter- und Compiler-basierte Sprachen
- ▶ **Interpreter** führt Source-Code zeilenweise bei der Übersetzung aus
 - d.h. Übersetzen & Ausführen ist gleichzeitig
 - z.B. Matlab, Java, PHP, Python
- ▶ **Compiler** übersetzt Source-Code in ein ausführbares Programm (Executable)
 - Executable ist eigenständiges Programm
 - d.h. (1) Übersetzen, dann (2) Ausführen
 - z.B. C, C++, Fortran
- ▶ Alternative Unterscheidung (siehe Schmaranz)
 - **imperative Sprachen**, z.B. Matlab, C, Fortran
 - **objektorientierte**, z.B. C++, Java, Python
 - **funktionale**, z.B. Lisp

6

Achtung

- ▶ **C ist Compiler-basierte Programmiersprache**
- ▶ **Compilierter Code ist systemabhängig**,
 - d.h. Code läuft idR. nur auf dem System, auf dem er compiliert wurde
- ▶ **Source-Code ist systemunabhängig**,
 - d.h. er kann auch auf anderen Systemen compiliert werden.
- ▶ **C-Compiler unterscheiden sich leicht**
 - Bitte vor Übung alle Programme auf der lva.student.tuwien.ac.at mit dem Compiler **gcc** compilieren und testen
 - nicht-lauffähiger Code = schlechter Eindruck und ggf. schlechtere Note...

7

Wie erstellt man ein C-Programm?

- ▶ Öffne eine (ggf. neue) Datei `name.c` in einem Editor
 - Endung `.c` ist Kennung eines C-Programms
- ▶ Schreibe den sog. *Source-Code* (= C-Programm)
- ▶ Source-Code abspeichern
- ▶ Compilieren z.B. mit Eingabe `gcc name.c` in der Shell
- ▶ Falls Code fehlerfrei, erhält man *Executable* `a.out` unter Windows: `a.exe`
- ▶ Diese wird durch `a.out` bzw. `./a.out` gestartet
- ▶ Compilieren mit `gcc name.c -o output` erzeugt Executable `output` statt `a.out`

Texteditor Emacs

- ▶ Startet mit Eingabe `emacs &` in der Shell
 - Die wichtigsten Tastenkombinationen:
 - * `C-x C-f` = Datei öffnen
 - * `C-x C-s` = Datei speichern
 - * `C-x C-c` = Emacs beenden
- ▶ Eingabe `emacs name.c &` startet Emacs und öffnet Datei `name.c` (neu angelegt, falls nicht existent)

8

Das erste C-Programm

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     printf("Hello World!\n");
5 }
```

- ▶ Zeilennummern gehören *nicht* zum Code (sind lediglich Referenzen auf Folien)
- ▶ Jedes C-Programm besitzt die Zeilen 3 und 5.
- ▶ Die Ausführung eines C-Programms startet *immer* bei `main()` – egal, wo `main()` im Code steht
- ▶ Klammern `{...}` schließen in C sog. *Blöcke* ein
- ▶ Hauptprogramm `main()` bildet immer einen Block
- ▶ Logische Programmzeilen enden mit *Semikolon*, vgl. Zeile 4
- ▶ `printf` gibt Text aus (in *Anführungszeichen*),
 - `\n` macht einen Zeilenumbruch
- ▶ Anführungszeichen *müssen* in derselben Zeile sein
- ▶ Zeile 1: Einbinden der Standardbibliothek für Input-Output (später mehr!)

9

main() vs. int main()

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     printf("Hello World!\n");
5 }
```

- ▶ Sprache C hat sich über Jahre verändert
- ▶ `main() {` in Zeile 3 ist C89-Standard
- ▶ C99 und C++ erfordern `int main() {`

```
1 #include <stdio.h>
2
3 int main() {
4     printf("Hello World!\n");
5     return 0;
6 }
```

- ▶ Bedeutung:
 - `main()` kommuniziert mit Betriebssystem
 - Rückgabewert (`return`) gibt ggf. Fehlercode
 - Rückgabe Null = kein Fehler aufgetreten
- ▶ in diesem Fall auch `return 0;` sinnvoll
 - Genaueres später → Funktionen!
- ▶ Konsequenz:
 - Falls Ihr C-Compiler Code oben nicht akzeptiert, Code unten verwenden!
 - Code von Folien entsprechend anpassen!

10

Syntaxfehler

- ▶ **Syntax** = Wortschatz (Befehle) & Grammatik einer Sprache (Was man wie verbinden kann...)
- ▶ **Syntaxfehler** = Falsche Befehle oder Verwendung
 - merkt Compiler und gibt Fehlermeldung

```
1 main() {
2     printf("Hello World!\n");
3 }
```

- ▶ Warnung, weil Einbindung der `stdio.h` fehlt
`wrongworld1.c:2: warning: incompatible implicit declaration of built-in function printf`
- ▶ C++ Compiler liefert Fehler wegen `int main() {`
`wrongworld1.c:1: error: C++ requires a type specifier for all declarations`

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     printf("Hello World!\n")
5 }
```

- ▶ Fehlt Semikolon am Zeilenende 4
 - Compilieren liefert Fehlermeldung:
`wrongworld2.c:5: error: syntax error before } token`

Laufzeitfehler

- ▶ Fehler, der erst bei Programm-Ausführung auftritt
 - viel schwerer zu finden
 - durch sorgfältiges Arbeiten möglichst vermeiden

11

Variablen

- ▶ Was sind Variablen?
 - ▶ Deklaration & Initialisierung
 - ▶ Datentypen int und double
 - ▶ Zuweisungsoperator =
 - ▶ arithmetische Operatoren + - * / %
 - ▶ Type Casting
-
- ▶ int, double
 - ▶ printf (Ausgabe von Variablen)
 - ▶ scanf (Werte über Tastatur einlesen)

12

Variable

- ▶ Variable = symbolischer Name für Speicherbereich
- ▶ Variable in Math. und Informatik verschieden:
 - Mathematik: Sei $x \in \mathbb{R}$ fixiert x
 - Informatik: $x = 5$ weist x den Wert 5 zu, Zuweisung kann jederzeit geändert werden z.B. $x = 7$

Variablen-Namen

- ▶ bestehen aus Zeichen, Ziffern und Underscore _
 - maximale Länge = 31
 - erstes Zeichen darf keine Ziffer sein
- ▶ Klein- und Großschreibung wird unterschieden
 - d.h. `Var`, `var`, `VAR` sind 3 verschiedene Variablen
- ▶ **Konvention:** Namen sind `klein_mit_underscores`

Datentypen

- ▶ Bevor man Variable benutzen darf, muss man idR. erklären, welchen **Typ** Variable haben soll
- ▶ Elementare Datentypen:
 - Gleitkommazahlen (ersetzt \mathbb{Q} , \mathbb{R}), z.B. `double`
 - Integer, Ganzzahlen (ersetzt \mathbb{N} , \mathbb{Z}), z.B. `int`
 - Zeichen (Buchstaben) `char`
- ▶ `int x;` deklariert Variable `x` vom Typ `int`

13

Deklaration

- ▶ **Deklaration** = das Anlegen einer Variable
 - d.h. Zuweisung von Speicherbereich auf einen symbolischen Namen & Angabe des Datentyps
 - Zeile `int x;` deklariert Variable `x` vom Typ `int`
 - Zeile `double var;` deklariert `var` vom Typ `double`

Initialisierung

- ▶ Durch Deklaration einer Variablen wird lediglich Speicherbereich zugewiesen
- ▶ Falls noch kein konkreter Wert zugewiesen:
 - Wert einer Variable ist zufällig
- ▶ Deshalb direkt nach Deklaration der neuen Variable Wert zuweisen, sog. **Initialisierung**
 - `int x;` (Deklaration)
 - `x = 0;` (Initialisierung)
- ▶ Deklaration & Initialisierung auch in einer Zeile möglich: `int x = 0;`

14

Ein erstes Beispiel zu int

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int x = 0;
5
6     printf("Input: x=");
7     scanf("%d",&x);
8     printf("Output: x=%d\n",x);
9 }
```

- ▶ Einbinden der Input-Output-Funktionen (Zeile 1)
 - `printf` gibt Text (oder Wert einer Var.) aus
 - `scanf` liest Tastatureingabe ein in eine Variable
- ▶ Prozentzeichen % in Zeile 7/8 leitet Platzhalter ein

Datentyp	Platzhalter <code>printf</code>	Platzhalter <code>scanf</code>
int	<code>%d</code>	<code>%d</code>
double	<code>%f</code>	<code>%lf</code>
- ▶ Beachte `&` bei `scanf` in Zeile 7
 - `scanf("%d",&x)`
 - aber: `printf("%d",x)`
- ▶ Wenn man `&` vergisst \Rightarrow Laufzeitfehler
 - Compiler merkt Fehler nicht (kein Syntaxfehler!)
 - Sorgfältig arbeiten!

15

Dasselbe Beispiel zu double

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     double x = 0;
5
6     printf("Input: x=");
7     scanf("%lf",&x);
8     printf("Output: x=%f\n",x);
9 }
```

- ▶ Beachte Platzhalter in Zeile 7/8
 - `scanf("%lf",&x)`
 - aber: `printf("%f",x)`
- ▶ Verwendet man `%f` in 7 ⇒ Falsches Einlesen!
 - vermutlich Laufzeitfehler!
 - sorgfältig arbeiten!

16

Zuweisungsoperator

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int x = 1;
5     int y = 2;
6
7     int tmp = 0;
8
9     printf("a) x=%d, y=%d, tmp=%d\n",x,y,tmp);
10
11    tmp = x;
12    x = y;
13    y = tmp;
14
15    printf("b) x=%d, y=%d, tmp=%d\n",x,y,tmp);
16 }
```

- ▶ Das einfache Gleich `=` ist **Zuweisungsoperator**
 - **Zuweisung immer rechts nach links!**
- ▶ Zeile `x = 1;` weist den Wert auf der rechten Seite der Variablen x zu
- ▶ Zeile `x = y;` weist den Wert der Variablen y der Variablen x zu
 - insb. haben x und y danach denselben Wert
 - d.h. Vertauschen der Werte nur mit Hilfsvariable
- ▶ Output:
 - a) x=1, y=2, tmp=0
 - b) x=2, y=1, tmp=1

17

Arithmetische Operatoren

- ▶ Bedeutung eines Operators kann vom Datentyp abhängen!
- ▶ Operatoren auf Ganzzahlen:
 - `a=b`, `-a` (Vorzeichen)
 - `a+b`, `a-b`, `a*b`, `a/b` (Division ohne Rest),
`a%b` (Divisionsrest)
- ▶ Operatoren auf Gleitkommazahlen:
 - `a=b`, `-a` (Vorzeichen)
 - `a+b`, `a-b`, `a*b`, `a/b` ("normale" Division)
- ▶ **Achtung: `2/3` ist Ganzzahl-Division, also Null!**
- ▶ Notation für Gleitkommazahlen:
 - Vorzeichen -, falls negativ
 - Vorkommastellen
 - Dezimalpunkt
 - Nachkommastellen
 - `e` oder `E` mit *ganzzahligem* Exponenten (10er Potenz!), z.B. $2e2 = 2E2 = 2 \cdot 10^2 = 200$
 - * Wegfallen darf entweder Vor- oder Nachkommastelle (sonst sinnlos, da kein Wert!)
 - * Wegfallen darf entweder Dezimalpunkt oder `e` bzw. `E` mit Exponent (sonst wird die Zahl als Integer verstanden, vgl. `2/3`)
- ▶ **Also: `2./3.` ist Gleitkommadivision $\approx 0.\bar{6}$**

18

Type Casting

- ▶ Operatoren können auch Variablen verschiedener Datentypen verbinden
- ▶ Vor der Ausführung werden beide Variablen auf denselben Datentyp gebracht (**Type Casting**)

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int x = 1;
5     double y = 2.8;
6
7     int sum_int = x+y;
8     double sum_dbl = x+y;
9
10    printf("sum_int = %d\n",sum_int);
11    printf("sum_dbl = %f\n",sum_dbl);
12 }
```

- ▶ Welchen Datentyp hat `x+y` in Zeile 7, 8?
 - Den mächtigeren Datentyp, also **double!**
 - * so wie $\mathbb{Z} \subset \mathbb{R}$, so ist **double** mächtiger als **int**
 - Type Casting von Wert `x` auf **double**
- ▶ Zeile 7: Type Casting, da **double** auf **int** Zuweisung
 - durch Abschneiden, nicht durch Rundung!
- ▶ Output:
 - sum_int = 3
 - sum_dbl = 3.500000

19

Implizites Type Casting

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     double dbl1 = 2 / 3;
5     double dbl2 = 2 / 3.;
6     double dbl3 = 1E2;
7     int int1 = 2;
8     int int2 = 3;
9
10    printf("a) %f\n",dbl1);
11    printf("b) %f\n",dbl2);
12
13    printf("c) %f\n",dbl3 * int1 / int2);
14    printf("d) %f\n",dbl3 * (int1 / int2) );
15 }
```

▶ Output:

- a) 0.000000
- b) 0.666667
- c) 66.666667
- d) 0.000000

▶ Warum Ergebnis 0 in a) und d) ?

- 2, 3 sind **int** ⇒ 2/3 ist Ganzzahl-Division

▶ Werden Variablen verschiedenen Typs durch arith. Operator verbunden, Type Casting auf „gemeinsamen“ (mächtigeren) Datentyp

- vgl. Zeile 5, 13, 14
- 2 ist **int**, 3. ist **double** ⇒ 2/3. ergibt **double**

▶ Der C-Compiler setzt die kanonischen Regeln um:

- Punkt-Rechnung vor Strich-Rechnung
- gleichwertige Operatoren von links nach rechts
- * vgl. Zeile 13, 14

20

Explizites Type Casting

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int a = 2;
5     int b = 3;
6     double dbl1 = a / b;
7     double dbl2 = (double) (a / b);
8     double dbl3 = (double) a / b;
9     double dbl4 = a / (double) b;
10
11    printf("a) %f\n",dbl1);
12    printf("b) %f\n",dbl2);
13    printf("c) %f\n",dbl3);
14    printf("d) %f\n",dbl4);
15 }
```

▶ Kann dem Compiler mitteilen, in welcher Form eine Variable interpretiert werden muss

- Dazu Ziel-Typ in Klammern voranstellen!

▶ Output:

- a) 0.000000
- b) 0.000000
- c) 0.666667
- d) 0.666667

▶ In Zeile 7, 8, 9: Explizites Type Casting (jeweils von **int** zu **double**)

▶ In Zeile 6, 8, 9: Implizites Type Casting

21

Fehlerquelle beim Type Casting

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int a = 2;
5     int b = 3;
6     double dbl = (double) a / b;
7
8     int i = dbl;
9
10    printf("a) %f\n",dbl);
11    printf("b) %f\n",dbl*b);
12    printf("c) %d\n",i);
13    printf("d) %d\n",i*b);
14 }
```

▶ Output:

- a) 0.666667
- b) 2.000000
- c) 0
- d) 0

▶ Implizites Type Casting sollte man vermeiden!

- d.h. **Explizites Type Casting verwenden!**

▶ Bei Rechnungen Zwischenergebnisse in richtigen Typen speichern!

22

Einfache Verzweigung

▶ Logische Operatoren == != > >= < <=

▶ Logische Junktoren ! && ||

▶ Wahrheit und Falschheit bei Aussagen

▶ Verzweigung

▶ if

▶ if - else

23

Logische Operatoren

- ▶ Es seien a, b zwei Variablen (auch versch. Typs!)
 - Vergleich (z.B. `a < b`) liefert Wert **1**, falls wahr
 - bzw. **0**, falls falsch

- ▶ Übersicht über Vergleichsoperatoren:

<code>==</code>	Gleichheit (ACHTUNG mit Zuweisung!)
<code>!=</code>	Ungleichheit
<code>></code>	echt größer
<code>>=</code>	größer oder gleich
<code><</code>	echt kleiner
<code><=</code>	kleiner oder gleich

- ▶ Stets bei Vergleichen Klammer setzen!
 - häufig unnötig, aber oft besser lesbar!
- ▶ Weitere logische Junktoren:

<code>!</code>	nicht
<code>&&</code>	und
<code> </code>	oder

24

Logische Verkettung

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int result = 0;
5
6     int a = 3;
7     int b = 2;
8     int c = 1;
9
10    result = (a > b > c);
11    printf("a) result=%d\n", result);
12
13    result = (a > b) && (b > c);
14    printf("b) result=%d\n", result);
15 }
```

- ▶ Output:

a) result=0
b) result=1

- ▶ Warum ist Aussage in 10 falsch, aber in 13 wahr?

- Auswertung von links nach rechts:
 - * `a > b` ist wahr, also mit **1** bewertet
 - * `1 > c` ist falsch, also mit **0** bewertet
 - * Insgesamt wird `a > b > c` mit falsch bewertet!
- Aussage in 10 ist also nicht korrekt formuliert!

25

if-else

- ▶ einfache Verzweigung: *Wenn - Dann - Sonst*
- ▶ `if (condition) statementA else statementB`
- ▶ nach `if` steht Bedingung *stets in runden Klammern*
- ▶ nach Bedingung steht *nie Semikolon*
- ▶ Bedingung ist *falsch*, falls sie 0 ist bzw. mit 0 bewertet wird, sonst ist die Bedingung *wahr*
 - Bedingung wahr \Rightarrow `statementA` wird ausgeführt
 - Bedingung falsch \Rightarrow `statementB` wird ausgeführt
- ▶ Statement ist
 - entweder eine Zeile (d.h. bis zum Semikolon!)
 - oder mehrere Zeilen in geschwungenen Klammern `{ ... }`, sog. Block
- ▶ `else`-Zweig ist optional
 - d.h. `statementB` darf entfallen

26

Beispiel zu if

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int x = 0;
5
6     printf("Input x=");
7     scanf("%d", &x);
8
9     if (x < 0)
10        printf("x=%d is negative\n", x);
11
12    if (x > 0) {
13        printf("x=%d is positive\n", x);
14    }
15 }
```

- ▶ abhängige Zeilen einrücken (**Lesbarkeit!**)
- ▶ **WARNUNG:** Nicht-Verwendung von Blöcken `{...}` ist fehleranfällig
- ▶ könnte zusätzlich `else` in Zeile 11 schreiben
 - da `if`'s sich ausschließen

27

Beispiel zu if-else

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int var1 = -5;
5     double var2 = 1e-32;
6     int var3 = 5;
7
8     if (var1 >= 0) {
9         printf("var1 >= 0\n");
10    }
11    else {
12        printf("var1 < 0\n");
13    }
14
15    if (var2) {
16        printf("var2 != 0, i.e., cond. is true\n");
17    }
18    else {
19        printf("var2 == 0, i.e., cond. is false\n");
20    }
21
22    if ( (var1 < var2) && (var2 < var3) ) {
23        printf("var2 lies between the others\n");
24    }
25 }
```

- ▶ Eine Bedingung ist wahr, falls Wert $\neq 0$
 - z.B. Zeile 15, aber besser: `if (var2 != 0)`
- ▶ Output:
 - var1 < 0
 - var2 != 0, i.e., cond. is true
 - var2 lies between the others

28

Gerade oder Ungerade?

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int x = 0;
5
6     printf("Input x=");
7     scanf("%d",&x);
8
9     if (x > 0) {
10        if (x%2 != 0) {
11            printf("x=%d is odd\n",x);
12        }
13        else {
14            printf("x=%d is even\n",x);
15        }
16    }
17    else {
18        printf("Error: Input has to be positive!\n");
19    }
20 }
```

- ▶ Programm überprüft, ob eingegebene Zahl x gerade Zahl ist oder nicht
- ▶ Man kann Verzweigungen schachteln:
 - Einrückungen machen Code übersichtlicher
 - * formal nicht notwendig, **aber trotzdem!**
 - Abhängigkeiten werden verdeutlicht

29

Zwei Zahlen aufsteigend sortieren

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     double x1 = 0;
5     double x2 = 0;
6     double tmp = 0;
7
8     printf("Unsortierte Eingabe:\n");
9     printf(" x1=");
10    scanf("%lf",&x1);
11    printf(" x2=");
12    scanf("%lf",&x2);
13
14    if (x1 > x2) {
15        tmp = x1;
16        x1 = x2;
17        x2 = tmp;
18    }
19
20    printf("Aufsteigend sortierte Ausgabe:\n");
21    printf(" x1=%f\n",x1);
22    printf(" x2=%f\n",x2);
23 }
```

- ▶ Eingabe von zwei Zahlen $x_1, x_2 \in \mathbb{R}$
- ▶ Zahlen werden aufsteigend sortiert
 - ggf. vertauscht
- ▶ Ergebnis wird ausgegeben

30

Innen oder Außen?

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     double r = 0;
5     double x1 = 0;
6     double x2 = 0;
7     double z1 = 0;
8     double z2 = 0;
9     double dist2 = 0;
10
11    printf("Radius des Kreises r=");
12    scanf("%lf",&r);
13    printf("Mittelpunkt des Kreises x = (x1,x2)\n");
14    printf(" x1=");
15    scanf("%lf",&x1);
16    printf(" x2=");
17    scanf("%lf",&x2);
18    printf("Punkt in der Ebene z = (z1,z2)\n");
19    printf(" z1=");
20    scanf("%lf",&z1);
21    printf(" z2=");
22    scanf("%lf",&z2);
23
24    dist2 = (x1-z1)*(x1-z1) + (x2-z2)*(x2-z2);
25    if ( dist2 < r*r ) {
26        printf("z liegt im Kreis\n");
27    }
28    else {
29        if ( dist2 > r*r ) {
30            printf("z liegt ausserhalb vom Kreis\n");
31        }
32        else {
33            printf("z liegt auf dem Kreisrand\n");
34        }
35    }
36 }
```

- ▶ z liegt im Kreis um x mit Radius r , falls $\|x - z\| < r$
- ▶ z auf Kreisrand, falls $\|x - z\| = r$
- ▶ $\|x - z\|^2 = (x_1 - z_1)^2 + (x_2 - z_2)^2$

31

Gleichheit vs. Zuweisung

- ▶ Nur Erinnerung: `if (a==b)` vs. `if (a=b)`
 - beides ist syntaktisch korrekt!
 - `if (a==b)` ist Abfrage auf Gleichheit
 - * ist vermutlich so gewollt...
 - ABER: `if (a=b)`
 - * weist `a` den Wert von `b` zu
 - * Abfrage, ob `a ≠ 0`
 - * ist schlechter Programmierstil!

32

Blöcke

- ▶ Blöcke `{...}`
- ▶ Deklaration von Variablen
- ▶ Lifetime & Scope
- ▶ Lokale & globale Variablen

33

Lifetime & Scope

- ▶ **Lifetime** einer Variable
 - = Zeitraum, in dem Speicherplatz zugewiesen ist
 - = Zeitraum, in dem Variable existiert
- ▶ **Scope** einer Variable
 - = Zeitraum, in dem Variable sichtbar ist
 - = Zeitraum, in dem Variable gelesen/verändert werden kann
- ▶ $\text{Scope} \subseteq \text{Lifetime}$

Globale & Lokale Variablen

- ▶ **globale Variablen**
 - = Variablen, die globale Lifetime haben (bis Programm terminiert)
 - eventuell lokaler Scope
 - werden am Anfang **außerhalb von main** deklariert
- ▶ **lokale Variablen**
 - = Variablen, die nur lokale Lifetime haben
- ▶ **Konvention:** erkenne Variable am Namen
 - lokale Variablen sind `klein_mit_underscores`
 - globale Var. haben `auch_underscore_hinten_`

34

Blöcke

- ▶ Blöcke stehen innerhalb von `{ ... }`
- ▶ Jeder Block startet mit Deklaration zusätzlich benötigter Variablen
 - Variablen *sollten* nur am Anfang eines Blocks deklariert werden
- ▶ Die innerhalb des Blocks deklarierten Variablen werden nach Blockende vergessen (= gelöscht)
 - d.h. Lifetime endet
 - lokale Variablen
- ▶ Schachtelung `{ ... { ... } ... }`
 - beliebige Schachtelung ist möglich
 - Variablen aus äußerem Block können im inneren Block gelesen und verändert werden, umgekehrt *nicht*. Änderungen bleiben wirksam.
 - * d.h. Lifetime & Scope nur nach Innen vererbt
 - Wird im äußeren und im inneren Block Variable `var` deklariert, so wird das „äußere“ `var` überdeckt und ist erst wieder ansprechbar (mit gleichem Wert wie vorher), wenn der innere Block beendet wird.
 - * d.h. äußeres `var` ist nicht im inneren Scope
 - * **Das ist schlechter Programmierstil!**
 - * siehe die Beispiele auf den nächsten 2 Folien!

35

Einfaches Beispiel

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int x = 7;
5     printf("a) %d\n", x);
6     x = 9;
7     printf("b) %d\n", x);
8     {
9         int x = 17;
10        printf("c) %d\n", x);
11    }
12    printf("d) %d\n", x);
13 }
```

- ▶ zwei verschiedene *lokale* Variablen **x**
 - Deklaration + Initialisierung (Zeile 4, 9)
 - unterscheide von Zuweisung (Zeile 6)
- ▶ Output:
 - a) 7
 - b) 9
 - c) 17
 - d) 9

36

Komplizierteres Beispiel

```
1 #include <stdio.h>
2
3 int var0 = 5;
4
5 main() {
6     int var1 = 7;
7     int var2 = 9;
8
9     printf("a) %d, %d, %d\n", var0, var1, var2);
10    {
11        int var1 = 17;
12
13        printf("b) %d, %d, %d\n", var0, var1, var2);
14        var0 = 15;
15        var2 = 19;
16        printf("c) %d, %d, %d\n", var0, var1, var2);
17        {
18            int var0 = 25;
19            printf("d) %d, %d, %d\n", var0, var1, var2);
20        }
21    }
22    printf("e) %d, %d, %d\n", var0, var1, var2);
23 }
```

- ▶ Output:
 - a) 5, 7, 9
 - b) 5, 17, 9
 - c) 15, 17, 19
 - d) 25, 17, 19
 - e) 15, 7, 19
- ▶ zwei Variablen mit Name **var0** (Zeile 3 + 18)
 - Namenskonvention absichtlich verletzt
- ▶ zwei Variablen mit Name **var1** (Zeile 6 + 11)

37

Funktionen

- ▶ Funktion
- ▶ Eingabe- / Ausgabeparameter
- ▶ Call by Value / Call by Reference
- ▶ return
- ▶ void

38

Funktionen

- ▶ **Funktion** = Zusammenfassung mehrerer Anweisungen zu einem aufrufbaren Ganzen
 - **output = function(input)**
 - * Eingabeparameter input
 - * Ausgabeparameter (Return Value) **output**
- ▶ Warum Funktionen?
 - Zerlegung eines großen Problems in überschaubare kleine Teilprobleme
 - Strukturierung von Programmen (Abstraktionsebenen)
 - Wiederverwertung von Programm-Code
- ▶ Funktion besteht aus **Signatur** und **Rumpf** (Body)
 - **Signatur** = Fkt.name & Eingabe-/Ausgabepar.
 - * Anzahl & Reihenfolge ist wichtig!
 - **Rumpf** = Programmzeilen der Funktion

Namenskonvention

- ▶ lokale Variablen sind **klein_mit_underscores**
- ▶ globale Var. haben **auch_underscore_hinten_**
- ▶ Funktionen sind **erstesWortKleinKeineUnderscores**

39

Funktionen in C

- ▶ In C können Funktionen
 - mehrere (oder keinen) Parameter übernehmen
 - einen einzigen oder keinen Rückgabewert liefern
 - Rückgabewert muss elementarer Datentyp sein
 - * z.B. **double**, **int**
- ▶ Signatur hat folgenden Aufbau
`<type of return value> <function name>(parameters)`
 - Funktion ohne Rückgabewert:
 - * `<type of return value> = void`
 - Sonst: `<type of return value> = Variablentyp`
 - **parameters** = Liste der Übergabeparameter
 - * getrennt durch Kommata
 - * vor jedem Parameter Variablentyp angeben
 - * kein Parameter \Rightarrow leere Klammer `()`
- ▶ Rumpf ist ein Block
 - Rücksprung ins Hauptprogramm mit **return** oder bei Erreichen des Funktionsblock-Endes, falls Funktionstyp = void
 - Rücksprung ins Hauptprogramm mit **return output**, falls die Variable **output** zurückgegeben werden soll
 - Häufiger Fehler: **return vergessen**
 - * Dann Rückgabewert zufällig!
 - * \Rightarrow Irgendwann Chaos (Laufzeitfehler!)

40

Variablen

- ▶ Alle Variablen, die im Funktionsblock deklariert werden, sind lokale Variablen
- ▶ Alle elementaren Variablen, die in Signatur deklariert werden, sind lokale Variablen
- ▶ Funktion bekommt Input-Parameter als Werte, ggf. Type Casting!

Call by Value

- ▶ Dass bei Funktionsaufrufen Input-Parameter in lokale Variablen kopiert werden, bezeichnet man als **Call by Value**
 - Es wird neuer Speicher angelegt, der Wert der Eingabe-Parameter wird in diese kopiert

41

Beispiel: Quadrieren

```
1 #include <stdio.h>
2
3 double square(double x) {
4     return x*x;
5 }
6
7 main() {
8     double x = 0;
9     printf("Input x = ");
10    scanf("%lf",&x);
11    printf("%f^2 = %f\n",x,square(x));
12 }
```

- ▶ Compiler muss Funktion **vor Aufruf** kennen
 - d.h. Funktion vor aufrufender Zeile definieren
- ▶ Ausführung startet immer bei **main()**
- ▶ Die Variable **x** in Funktion square und die Variable **x** in Funktion main sind verschieden!
- ▶ Eingabe von 5 ergibt als Output
 - Input x = 5
 - 5² = 25.000000

42

Beispiel: Minimum zweier Zahlen

```
1 #include <stdio.h>
2
3 double min(double x, double y) {
4     if (x > y) {
5         return y;
6     }
7     else {
8         return x;
9     }
10 }
11
12 main() {
13     double x = 0;
14     double y = 0;
15
16     printf("Input x = ");
17     scanf("%lf",&x);
18     printf("Input y = ");
19     scanf("%lf",&y);
20     printf("min(x,y) = %f\n",min(x,y));
21 }
```

- ▶ Eingabe von 10 und 2 ergibt als Output
 - Input x = 10
 - Input y = 2
 - min(x,y) = 2.000000
- ▶ **Programm erfüllt Aufgabenstellung der UE:**
 - Funktion mit gewisser Funktionalität
 - aufrufendes Hauptprogramm mit
 - * Daten einlesen
 - * Funktion aufrufen
 - * Ergebnis ausgeben

43

Deklaration von Funktionen

```
1 #include <stdio.h>
2
3 double min(double, double);
4
5 main() {
6     double x = 0;
7     double y = 0;
8
9     printf("Input x = ");
10    scanf("%lf",&x);
11    printf("Input y = ");
12    scanf("%lf",&y);
13    printf("min(x,y) = %f\n",min(x,y));
14 }
15
16 double min(double x, double y) {
17     if (x > y) {
18         return y;
19     }
20     else {
21         return x;
22     }
23 }
```

- ▶ Bei vielen Funktionen wird Code unübersichtlich
 - Alle Funktionen oben deklarieren, vgl. Zeile 3
 - * Compiler weiß dann, wie Funktion agiert
 - vollständiger Fkt.code folgt, vgl. Zeile 16-23
- ▶ Alternative Deklaration = Fkt.code ohne Rumpf
 - `double min(double x, double y);`
vgl. Zeile 3, 16
- ▶ in Literatur: *Forward Declaration* und *Prototyp*

44

Call by Value

```
1 #include <stdio.h>
2
3 void test(int x) {
4     printf("a) x=%d\n", x);
5     x = 43;
6     printf("b) x=%d\n", x);
7 }
8
9
10 main() {
11     int x = 12;
12     printf("c) x=%d\n", x);
13     test(x);
14     printf("d) x=%d\n", x);
15 }
```

- ▶ Output:
 - c) x=12
 - a) x=12
 - b) x=43
 - d) x=12

45

Call by Reference

- ▶ Bei manchen Sprachen, wird nicht der Wert eines Input-Parameters an eine Fkt. übergeben, sondern dessen Speicheradresse ggf. unter einem neuen symbolischen Namen (**Call by Reference**)
 - d.h. Änderungen an der Variable sind auch außerhalb der Funktion sichtbar

```
1 void test(int y) {
2     printf("a) y=%d\n", y);
3     y = 43;
4     printf("b) y=%d\n", y);
5 }
6
7
8 main() {
9     int x = 12;
10    printf("c) x=%d\n", x);
11    test(x);
12    printf("d) x=%d\n", x);
13 }
```

- ▶ Ziel: nur **was-wäre-wenn** erklären!
- ▶ **Call by Reference** würde folgenden Output liefern:
 - c) x=12
 - a) y=12
 - b) y=43
 - d) x=43
- ▶ **aber: Call by Value in C** liefert folgenden Output:
 - c) x=12
 - a) y=12
 - b) y=43
 - d) x=12

46

Type Casting & Call by Value

```
1 #include <stdio.h>
2
3 double divide(double, double);
4
5 main() {
6     int int1 = 2;
7     int int2 = 3;
8
9     printf("a) %f\n", int1 / int2 );
10    printf("b) %f\n", divide(int1,int2));
11 }
12
13 double divide(double dbl1, double dbl2) {
14     return(dbl1 / dbl2);
15 }
```

- ▶ Type Casting von int auf double bei Übergabe
- ▶ Output:
 - a) 0.000000
 - b) 0.666667

47

Type Casting (Negativbeispiel!)

```
1 #include <stdio.h>
2
3 int isEqual(int, int);
4
5 main() {
6     double x = 4.1;
7     double y = 4.9;
8
9     if (isEqual(x,y)) {
10        printf("x == y\n");
11    }
12    else {
13        printf("x != y\n");
14    }
15 }
16
17 int isEqual(int x, int y) {
18     if (x == y) {
19         return 1;
20     }
21     else {
22         return 0;
23     }
24 }
```

- ▶ Output:
x == y
- ▶ Aber eigentlich $x \neq y$!
 - Implizites Type Casting von double auf int durch Abschneiden, denn Input-Parameter sind int
- ▶ **Achtung mit Type Casting bei Funktionen!**

48

Kommentarzeilen

- ▶ wozu Kommentarzeilen?

```
▶ //
▶ /* ... */
```

49

Kommentarzeilen

- ▶ werden vom Interpreter/Compiler ausgelassen
- ▶ nur für den Leser des Programmcodes
- ▶ notwendig, um eigene Programme auch später noch zu begreifen
 - **deshalb brauchbar für Übung!**
- ▶ notwendig, damit andere den Code verstehen
 - soziale Komponente der Übung?
- ▶ extrem brauchbar zum debuggen
 - Teile des Source-Code „auskommentieren“, sehen was passiert...
 - vor allem bei Fehlermeldungen des Parser
- ▶ Wichtige Regeln:
 - nie dt. Sonderzeichen verwenden
 - nicht zu viel und nicht zu wenig
 - * jetzt am Anfang mehr, später weniger!
 - zu Beginn des Source-Codes stets Autor & letzte Änderung kommentieren
 - * vermeidet das Arbeiten an alten Versionen...

50

Kommentarzeilen in C

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     // printf("1 ");
5     printf("2 ");
6     /*
7     printf("3");
8     printf("4");
9     */
10    printf("5");
11    printf("\n");
12 }
```

- ▶ Gibt in C zwei Typen von Kommentaren:
 - **einzeiliger Kommentar**
 - * eingeleitet durch //, geht bis Zeilenende
 - * z.B. Zeile 4
 - * stammt eigentlich aus C++
 - **mehrzeiliger Kommentar**
 - * alles zwischen /* (Anfang) und */ (Ende)
 - * z.B. Zeile 6–9
 - * darf nicht geschachtelt werden!
 - d.h. /* ... /* ... */ ... */ ist Syntaxfehler
- ▶ Vorschlag
 - Verwende // für echte Kommentare
 - Verwende /* ... */ zum Debuggen
- ▶ Output:
2 5

51

Beispiel:

```
1 // Aufgabe 0.1 -- beispielhaftes Kommentieren
2 // author: Dirk Praetorius
3 // last modified: 11.03.2020
4
5 #include <stdio.h>
6
7 double min(double, double);
8
9 main() {
10     double x = 0;
11     double y = 0;
12
13     // Einlesen von Eingabe x
14     printf("Input x = ");
15     scanf("%lf",&x);
16
17     // Einlesen von Eingabe y
18     printf("Input y = ");
19     scanf("%lf",&y);
20
21     // Minimum bestimmen und ausgeben
22     printf("min(x,y) = %f\n",min(x,y));
23 }
24
25 // Die Funktion min bestimmt das Minimum zweier
26 // double Werte x und y
27
28 double min(double x, double y) {
29     if (x > y) {
30         // falls x > y, so gilt min(x,y) = y
31         return y;
32     }
33     else {
34         // anderenfalls gilt x <= y und min(x,y) = x
35         return x;
36     }
37 }
```

52

Rekursion

- ▶ Was ist eine rekursive Funktion?
- ▶ Beispiel: Berechnung der Faktorielle
- ▶ Beispiel: Bisektionsverfahren

53

Rekursive Funktion

- ▶ Funktion ist **rekursiv**, wenn sie sich selber aufruft
- ▶ natürliches Konzept in der Mathematik:
 - $n! = n \cdot (n - 1)!$
- ▶ d.h. Rückführung eines Problems auf einfacheres Problem derselben Art
- ▶ Achtung:
 - Rekursion darf nicht endlos sein
 - d.h. **Abbruchbedingung** für Rekursion ist wichtig
 - z.B. $1! = 1$
- ▶ häufig Schleifen statt Rekursion möglich (später!)
 - idR. Rekursion eleganter
 - idR. Schleifen effizienter

54

Beispiel: Faktorielle

```
1 #include <stdio.h>
2
3 // Die Funktion factorial berechnet die Faktorielle
4 // einer nicht-negativen ganzen Zahl n rekursiv
5
6 int factorial(int n) {
7     if (n <= -1) {
8         // Faktorielle nicht definiert fuer n <= -1
9         return -1;
10    }
11    else {
12        if (n > 1) {
13            // Rekursionsschritt n! = n*(n-1)!
14            return n*factorial(n-1);
15        }
16        else {
17            // Abbruchbedingung 0! = 1 = 1!
18            return 1;
19        }
20    }
21 }
22
23 main() {
24     int n = 0;
25     int nfac = 0;
26     printf("n=");
27     scanf("%d",&n);
28     nfac = factorial(n);
29     if (nfac <= 0) {
30         printf("Fehleingabe!\n");
31     }
32     else {
33         printf("%d!=%d\n",n,nfac);
34     }
35 }
```

55

Bisektionsverfahren

- ▶ **Gegeben:** stetiges $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(a)f(b) \leq 0$
 - Toleranz $\tau > 0$
- ▶ **Tatsache:** Zwischenwertsatz \Rightarrow mind. eine Nst
 - denn $f(a)$ und $f(b)$ haben versch. Vorzeichen
- ▶ **Gesucht:** $x_0 \in [a, b]$ mit folgender Eigenschaft
 - $\exists \tilde{x}_0 \in [a, b]$ $f(\tilde{x}_0) = 0$ und $|x_0 - \tilde{x}_0| \leq \tau$
- ▶ **Bisektionsverfahren = iterierte Intervallhalbierung**
 - Solange Intervallbreite $|b - a| > 2\tau$
 - * Berechne Intervallmittelpunkt m und $f(m)$
 - * Falls $f(a)f(m) \leq 0$, betrachte Intervall $[a, m]$
 - * sonst betrachte halbiertes Intervall $[m, b]$
 - $x_0 := m$ ist schließlich gesuchte Approximation
- ▶ Verfahren basiert nur auf Zwischenwertsatz
- ▶ terminiert nach endlich vielen Schritten, da jeweils Intervall halbiert wird
- ▶ Konvergenz gegen Nst. \tilde{x}_0 für $\tau = 0$.

56

Beispiel: Bisektionsverfahren

```
1 #include <stdio.h>
2
3 double f(double x) {
4     return x*x + 1/(2 + x) - 2;
5 }
6
7 double bisection(double a, double b, double tol){
8     double m = 0.5*(a+b);
9     if ( b - a <= 2*tol ) {
10        return m;
11    }
12    else {
13        if ( f(a)*f(m) <= 0 ) {
14            return bisection(a,m,tol);
15        }
16        else {
17            return bisection(m,b,tol);
18        }
19    }
20 }
21
22 main() {
23     double a = 0;
24     double b = 10;
25     double tol = 1e-12;
26     double x = bisection(a,b,tol);
27
28     printf("Nullstelle x=%g\n",x);
29     printf("Funktionswert f(x)=%g\n",f(x));
30 }
```

- ▶ Platzhalter bei `printf` für `double`
 - `%f` als Fixpunktdarstellung `1.30278`
 - `%e` als Exponentialdarstellung `-5.64659e-13`
 - `%g` wähle geeignetere Darstellung `%f` bzw. `%e`
- ▶ siehe auch UNIX Manual Pages mittels Shell-Befehl
 - `man 3 printf`

57

Mathematische Funktionen

- ▶ Preprocessor, Compiler, Linker
 - ▶ Object-Code
 - ▶ Bibliotheken
 - ▶ mathematische Funktionen
-
- ▶ `#define`
 - ▶ `#include`

58

Preprocessor, Compiler & Linker

- ▶ Ein Compiler besteht aus mehreren Komponenten, die nacheinander abgearbeitet werden
- ▶ **Preprocessor** wird intern gestartet, *bevor* der Source-Code compiliert wird
 - Ersetzt Text im Code durch anderen Text
 - **Preprocessor-Befehle beginnen immer mit # und enden nie mit Semikolon**, z.B.
 - * `#define text replacement`
 - in allen nachfolgenden Zeilen wird der Text `text` durch `replacement` ersetzt
 - zur Definition von Konstanten
 - **Konvention:** `GROSS_MIT_UNDERSCORES`
 - * `#include file`
 - einfügen der Datei `file`
- ▶ **Compiler** übersetzt (Source-)Code in **Object-Code**
 - Object-Code = Maschinencode, bei dem symbolische Namen (z.B. Funktionsnamen) noch vorhanden sind
- ▶ Weiterer Object-Code wird zusätzlich eingebunden
 - z.B. Bibliotheken (= Sammlungen von Fktn)
- ▶ **Linker** ersetzt symbolische Namen im Object-Code durch Adressen und erstellt dadurch ein ausführbares Programm, sog. **Executable**

59

Bibliotheken & Header-Files

- ▶ (Funktions-) **Bibliothek** (z.B. math. Funktionen) besteht immer aus 2 Dateien
 - **Object-Code**
 - zugehöriges **Header-File**
- ▶ Im Header-File steht die Deklaration aller Fktn, die in der Bibliothek vorhanden sind
- ▶ Will man Bibliothek verwenden, muss man zugehöriges **Header-File einbinden**
 - **#include <header>** bindet Header-File **header** aus Standardverzeichnis **/usr/include/** ein,
 - * z.B. **math.h** (Header-File zur math. Bib.)
 - **#include "datei"** bindet Datei aus **aktuellem** Verzeichnis ein (z.B. Downloads vom Internet)
 - idR. führt C-Compiler **#include <stdio.h>** von allein aus (in zugehöriger Bib. liegt z.B. **printf**)
- ▶ Ferner muss man den Object-Code der Bibliothek **hinzulinken**
 - Wo Object-Code der Bibliothek liegt, muss **gcc** mittels Option **-l** (und **-L**) mitgeteilt werden
 - z.B. **gcc file.c -lm** linkt math. Bibliothek
 - Standardbibliotheken automatisch gelinkt, z.B. **stdio** (also keine zusätzliche Option nötig)

60

Mathematische Funktionen

- ▶ Deklaration der math. Funktionen in **math.h**
 - Input & Output der Fktn sind vom Typ **double**
- ▶ Wenn diese Funktionen benötigt werden
 - im Source-Code: **#include <math.h>**
 - Compilieren des Source-Code mit **zusätzlicher** Linker-Option **-lm**, d.h.
gcc file.c -o output -lm
erzeugt Executable **output**
- ▶ Diese Bibliothek stellt u.a. zur Verfügung
 - Trigonometrische Funktionen
 - * **cos, sin, tan, acos, asin, atan, cosh, sinh, tanh**
 - Exponentialfunktion und Logarithmus
 - * **exp, log, log10**
 - Potenz- und Wurzelfunktion
 - * **pow, sqrt** (wobei $x^y = \text{pow}(x, y)$)
 - * Häufig ist explizite Berechnung effizienter:
 - * BSP: x^3 mittels **x*x*x** berechnen
 - * BSP: $(-1)^n$ über **if...else** berechnen:
 $(-1)^n = 1$ falls n gerade, sonst $(-1)^n = -1$
 - Absolutbetrag **fabs**
 - Rundung auf ganze Zahlen: **round, floor, ceil**
- ▶ **ACHTUNG:** In der Bibliothek **stdlib.h** gibt es **abs**
 - **abs** ist Absolutbetrag für **int** (ggf. type cast!)
 - **fabs** ist Absolutbetrag für **double**

61

Elementares Beispiel

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <math.h>
3
4 main() {
5     double x = 2.;
6     double y = sqrt(x);
7     printf("sqrt(%f)=%f\n", x, y);
8 }
```

- ▶ Preprocessor-Befehle in 1, 2 **ohne Semikolon**
- ▶ Compilieren mit **gcc sqrt.c -lm**
- ▶ Vergisst man **-lm** \Rightarrow Fehlermeldung des Linkers
In function 'main'
sqrt.c:(.text+0x24): undefined reference to 'sqrt'
collect2: ld returned 1 exit status
- ▶ Output:
sqrt(2.000000)=1.414214

62

Bedingungsschleifen

- ▶ Bedingungsschleife
- ▶ kopfgesteuert vs. fußgesteuert
- ▶ Operatoren **++** und **--**
- ▶ **while**
- ▶ **do - while**

63

Schleifen

- ▶ Schleifen führen einen oder mehrere Befehle wiederholt aus
- ▶ In Aufgabenstellung häufig Hinweise, wie
 - Vektoren & Matrizen
 - Laufvariablen $j = 1, \dots, n$
 - Summen $\sum_{j=1}^n a_j := a_1 + a_2 + \dots + a_n$
 - Produkte $\prod_{j=1}^n a_j := a_1 \cdot a_2 \cdot \dots \cdot a_n$
 - Text wie z.B. *solange bis* oder *solange wie*
- ▶ Man unterscheidet
 - **Zählschleifen (for)**: Wiederhole etwas eine gewisse Anzahl oft
 - **Bedingungsschleifen (while, do...while)**: Wiederhole etwas solange, wie eine Bdg. gilt oder bis eine Bedingung gilt

64

Die while-Schleife

- ▶ Formal: **while(condition) statement**
 - „Solange wie etwas gilt, tue Folgendes:“
- ▶ Vor jedem Durchlauf wird **condition** geprüft & Abbruch, falls nicht erfüllt
 - sog. **kopfgesteuerte Schleife**
- ▶ Eventuell also kein einziger Durchlauf!
- ▶ **statement** kann Block sein

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int counter = 5;
5
6     while (counter > 0) {
7         printf("%d ", counter);
8         counter = counter-1;
9     }
10    printf("\n");
11 }
```

- ▶ Output:
5 4 3 2 1

65

Operatoren ++

- ▶ **++a** und **a++** sind arithmetisch äquivalent zu **a=a+1**
- ▶ Zusätzlich aber **Auswertung** von Variable **a**
- ▶ Präinkrement **++a**
 - Erst erhöhen, dann auswerten
- ▶ Postinkrement **a++**
 - Erst auswerten, dann erhöhen

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int a = 0;
5     int b = 43;
6
7     printf("1) a=%d, b=%d\n", a, b);
8
9     b = a++;
10    printf("2) a=%d, b=%d\n", a, b);
11
12    b = ++a;
13    printf("3) a=%d, b=%d\n", a, b);
14 }
```

- ▶ Output:
 - 1) a=0, b=43
 - 2) a=1, b=0
 - 3) a=2, b=2

66

Operatoren ++ und --

- ▶ Analog zu **a++** und **++a** gibt es
 - Prädecrement **--a**
 - * Erst verringern, dann auswerten
 - Postdecrement **a--**
 - * Erst auswerten, dann verringern
- ▶ **Beachte Unterschied in Bedingungsschleife!**

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int counter = 5;
5
6     while (--counter>0) {
7         printf("%d ", counter);
8     }
9     printf("\n");
10 }
```

- ▶ Output: 4 3 2 1 (für **--counter** in 6)
- ▶ Output: 4 3 2 1 0 (für **counter--** in 6)

67

Bisektionsverfahren (= Folie 56)

- ▶ **Gegeben:** stetiges $f : [a, b] \rightarrow \mathbb{R}$ mit $f(a)f(b) \leq 0$
 - Toleranz $\tau > 0$
- ▶ **Tatsache:** Zwischenwertsatz \Rightarrow mind. eine Nst
 - denn $f(a)$ und $f(b)$ haben versch. Vorzeichen
- ▶ **Gesucht:** $x_0 \in [a, b]$ mit folgender Eigenschaft
 - $\exists \tilde{x}_0 \in [a, b] \quad f(\tilde{x}_0) = 0$ und $|x_0 - \tilde{x}_0| \leq \tau$
- ▶ **Bisektionsverfahren = iterierte Intervallhalbierung**
 - Solange Intervallbreite $|b - a| > 2\tau$
 - * Berechne Intervallmittelpunkt m und $f(m)$
 - * Falls $f(a)f(m) \leq 0$, betrachte Intervall $[a, m]$
 - * sonst betrachte halbiertes Intervall $[m, b]$
 - $x_0 := m$ ist schließlich gesuchte Approximation
- ▶ Verfahren basiert nur auf Zwischenwertsatz
- ▶ terminiert nach endlich vielen Schritten, da jeweils Intervall halbiert wird
- ▶ Konvergenz gegen Nst. \tilde{x}_0 für $\tau = 0$.

68

Bisektionsverfahren (vgl. Folie 57)

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <math.h>
3
4 double f(double x) {
5     return x*x + 1/(2 + x) - 2;
6 }
7
8 double bisection(double a, double b, double tol){
9     double fa = f(a);
10    double m = 0.5*(a+b);
11    double fm = 0;
12
13    while ( b - a > 2*tol ) {
14        m = 0.5*(a+b);
15        fm = f(m);
16        if ( fa*fm <= 0 ) {
17            b = m;
18        }
19        else {
20            a = m;
21            fa = fm;
22        }
23    }
24    return 0.5*(a+b);
25 }
26
27 main() {
28    double a = 0;
29    double b = 10;
30    double tol = 1e-12;
31    double x = bisection(a,b,tol);
32
33    printf("Nullstelle x=%g\n",x);
34    printf("Funktionswert f(x)=%g\n",f(x));
35 }
```

- ▶ Verwendung von Variablen **fa** und **fm** vermeidet doppelte Funktionsauswertung
- ▶ Schleife ist idR. effizienter als Rekursion!

69

Euklids Algorithmus

- ▶ **Gegeben:** zwei ganze Zahlen $a, b \in \mathbb{N}$
- ▶ **Gesucht:** größter gemeinsamer Teiler $ggT(a, b) \in \mathbb{N}$
- ▶ **Euklidischer Algorithmus:**
 - Falls $a = b$, gilt $ggT(a, b) = a$
 - Vertausche a und b , falls $a < b$
 - Dann gilt $ggT(a, b) = ggT(a - b, b)$, denn:
 - * Sei g Teiler von a, b
 - * d.h. $ga_0 = a$ und $gb_0 = b$ mit $a_0, b_0 \in \mathbb{N}$, $g \in \mathbb{N}$
 - * also $g(a_0 - b_0) = a - b$ und $a_0 - b_0 \in \mathbb{N}$
 - * d.h. g teilt b und $a - b$
 - * d.h. $ggT(a, b) \leq ggT(a - b, b)$
 - * analog $ggT(a - b, b) \leq ggT(a, b)$
 - Ersetze a durch $a - b$, wiederhole diese Schritte
- ▶ Erhalte $ggT(a, b)$ nach endlich vielen Schritten:
 - Falls $a \neq b$, wird also $n := \max\{a, b\} \in \mathbb{N}$ pro Schritt um mindestens 1 kleiner
 - Nach endl. Schritten gilt also nicht mehr $a \neq b$

70

Euklid-Algorithmus

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int a = 200;
5     int b = 110;
6     int tmp = 0;
7
8     printf("ggT(%d,%d)=", a, b);
9
10    while (a != b) {
11        if ( a < b ) {
12            tmp = a;
13            a = b;
14            b = tmp;
15        }
16        a = a - b;
17    }
18
19    printf("%d\n", a);
20 }
```

- ▶ berechnet ggT von $a, b \in \mathbb{N}$
- ▶ basiert auf $ggT(a, b) = ggT(a - b, b)$ für $a > b$
- ▶ Für $a = b$ gilt $ggT(a, b) = a = b$
- ▶ Output:
ggT(200, 110)=10

71

Euklid-Algorithmus (verbessert)

- ▶ Kernstück des Euklid-Algorithmus

```
10 while (a != b) {
11     if ( a < b) {
12         tmp = a;
13         a = b;
14         b = tmp;
15     }
16     a = a-b;
17 }
```

- ▶ Erinnerung: $a \% b$ ist Divisionsrest von a/b

- ▶ Euklid-Algorithmus iteriert $a := a - b$ bis $a \leq b$

- d.h. bis $a = a \% b$
- falls fertig, gilt $a = 0$ und Ergebnis $b = ggT$

```
10 while (a != 0) {
11     if ( a < b) {
12         tmp = a;
13         a = b;
14         b = tmp;
15     }
16     a = a%b;
17 }
```

- ▶ Divisionsrest erfüllt immer $a \% b < b$

- d.h. es wird immer vertauscht nach Rechnung
- falls fertig, gilt $b = 0$ und Ergebnis $a = ggT$

```
10 while (b != 0) {
11     tmp = a%b;
12     a = b;
13     b = tmp;
14 }
```

72

Beispiel: Euklids Algorithmus

```
1 // author: Dirk Praetorius
2 // last modified: 15.03.2020
3
4 #include <stdio.h>
5
6 // Euklids Algorithmus zur Berechnung des ggT
7 // basiert auf ggT(a,b) = ggT(a-b,b) fuer a>b
8 // und ggT(a,b) = ggT(b,a)
9
10 int euklid(int a, int b) {
11     int tmp = 0;
12
13     // iteriert Uebergang ggT(a,b) = ggT(a-b,b),
14     // realisiert mittels Divisionsrest, bis
15     // b = 0. Dann war a==b, also ggT = a
16
17     while (b != 0) {
18         tmp = b;
19         b = a%b;
20         a = tmp;
21     }
22
23     return a;
24 }
25
26 main() {
27     int a = 200;
28     int b = 110;
29     int tmp = 0;
30
31     printf("ggT(%d,%d)=%d\n",a,b,euklid(a,b));
32 }
```

73

Die do-while-Schleife

- ▶ Formal: `do statement while(condition);`

- „Tue Folgendes, solange wie etwas gilt:“

- ▶ Nach jedem Durchlauf wird `condition` geprüft & Abbruch, falls nicht erfüllt

- sog. **fußgesteuerte Schleife**

- ▶ Also *mindestens ein* Durchlauf!

- ▶ `statement` kann Block sein

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int counter = 5;
5
6     do {
7         printf("%d ",counter);
8     }
9     while (--counter>0);
10    printf("\n");
11 }
```

- ▶ Output:

5 4 3 2 1

- ▶ `counter--` in 9 liefert Output: 5 4 3 2 1 0

74

Ein weiteres Beispiel

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int x0 = 0;
5     int x1 = 1;
6     int tmp = 0;
7     int c = 0;
8
9     printf("c=");
10    scanf("%d",&c);
11
12    printf("%d %d ",x0,x1);
13
14    do {
15        tmp = x0 + x1;
16        x0 = x1;
17        x1 = tmp;
18        printf("%d ",x1);
19    }
20    while(x1 <= c);
21
22    printf("\n");
23 }
```

- ▶ **Fibonacci-Folge** strebt gegen unendlich

- $x_0 := 0, x_1 := 1$ und $x_{n+1} := x_{n-1} + x_n$ für $n \in \mathbb{N}$

- ▶ Ziel: Berechne erstes Folgenglied mit $x_n > c$ für gegebene Schranke $c \in \mathbb{N}$

- ▶ für Eingabe $c = 1000$ erhalte Output:

```
c=1000
0 1 1 2 3 5 8 13 21 34 55 89 144 233 377 610 987
1597
```

- ▶ Obwohl komplette Folge berechnet wird, werden immer nur zwei Folgenglieder gespeichert

75

„solange wie“ vs. „solange bis“

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int a = 200;
5     int b = 110;
6     int tmp = 0;
7
8     printf("ggT(%d,%d)=", a,b);
9
10    // Euklid Algorithmus mit Endlosschleife + break
11    while (1) {
12        if (a == b) {
13            break;
14        }
15        else if ( a < b) {
16            tmp = a;
17            a = b;
18            b = tmp;
19        }
20        a = a-b;
21    }
22
23    printf("%d\n",b);
24 }
```

- ▶ **break** beendet die aktuelle Schleife
- ▶ **while** hat Laufbedingung **condition**
 - d.h. Schleife läuft, solange **condition** wahr
- ▶ Algorithmen haben idR. Abbruchbedingung **done**
 - d.h. Abbruch, falls **done** wahr
 - d.h. **condition** = Negation von **done**
- ▶ einfache Realisierung über Endlosschleife mit **break**
 - Bedingung in Zeile 11 ist immer wahr!
 - Abbruch erfolgt nur durch **break** in Zeile 13

76

Naive Fehlerkontrolle

- ▶ Vermeidung von Laufzeitfehlern!
- ▶ bewusster Fehlerabbruch
- ▶ gcc -c
- ▶ gcc -c -Wall
- ▶ assert
- ▶ #include <assert.h>

77

Motivation

- ▶ 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!)
 - **Tipp:** Verwende während des Programmierens zum Syntax-Test regelmäßig (Details später!)
 - * gcc -c name.c nur Objekt-Code
 - * gcc -c -Wall name.c alle Warnungen
- ▶ **Laufzeitfehler** sind **viel schwieriger** zu finden
 - Programm läuft, tut aber nicht das Richtige
 - manchmal fällt der Fehler ewig nicht auf
 - ⇒ sehr schlecht

78

Fehler vermeiden!

- ▶ **Programmier-Konventionen beachten**
 - z.B. bei Namen für Variablen, Funktionen etc.
- ▶ **Kommentarzeilen dort, wo im Code etwas passiert**
 - z.B. Verzweigung mit nicht offensichtlicher Bdg.
 - z.B. Funktionen (Zweck, Input, Output)
- ▶ **jede Funktion hat nur eine Funktionalität**
 - jede Funktion einzeln & sofort testen
 - Wenn später Funktion verwendet wird, kann ein etwaiger Fehler dort nicht mehr sein!
 - d.h. kann Fehler im Prg schneller lokalisieren!
- ▶ **jede Funktionalität hat eigene Funktion**
 - Prg. in überschaubare Funktionen zerlegen!
- ▶ **nicht alles auf einmal programmieren!**
 - **Achtung:** Häufiger Anfängerfehler!
- ▶ **Möglichst viele Fehler bewusst abfangen!**
 - Funktions-Input auf Konsistenz prüfen!
 - * Fehler-Abbruch, falls inkonsistent!
 - garantieren, dass Funktions-Output zulässig!

79

Bibliothek assert.h

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <assert.h>
3
4 void test(int x, int y) {
5     assert(x<y);
6     printf("It holds x < y\n");
7 }
8
9 main() {
10     int x = 0;
11     int y = 0;
12
13     printf("x = ");
14     scanf("%d",&x);
15
16     printf("y = ");
17     scanf("%d",&y);
18
19     test(x,y);
20 }
```

- ▶ **Ziel:** Sofortabbruch mit Fehlermeldung, sobald Funktion merkt, dass Input / Output unzulässig
- ▶ `#include <assert.h>`
 - `assert(condition);` liefert Fehlerabbruch, falls `condition` falsch
 - mit Ausgabe der Zeilennummer im Source-Code
- ▶ **Input:**
 - x = 2
 - y = 1
- ▶ **Output:**
 - Assertion failed: (x<y), function test, file assert.c, line 5.

80

Beispiel: Euklids Algorithmus

```
1 // author: Dirk Praetorius
2 // last modified: 30.03.2017
3
4 // Euklids Algorithmus zur Berechnung des ggT
5 // basiert auf ggT(a,b) = ggT(a-b,b) fuer a>b
6 // und ggT(a,b) = ggT(b,a)
7
8 int euklid(int a, int b) {
9     assert(a>0);
10    assert(b>0);
11    int tmp = 0;
12
13    // iteriert Uebergang ggT(a,b) = ggT(b,a-b),
14    // realisiert mittels Divisionsrest, bis
15    // b = 0. Dann war a==b, also ggT = a
16
17    while (b != 0) {
18        tmp = a%b;
19        a = b;
20        b = tmp;
21    }
22
23    return a;
24 }
```

- ▶ `assert` stellt sicher, dass Input zulässig
 - d.h. $a, b \in \mathbb{N}$ ist notwendig!

81

Testen

- ▶ Motivation
- ▶ Qualitätssicherung
- ▶ Arten von Tests

82

Motivation



- ▶ Ariane 5 Explosion ('96)
 - Konversion `double` → `int`
 - Schaden ca. 500 Mio. Dollar
- ▶ Patriot Missile Fehler, Golfkrieg ('91)
 - Zeitmessung falsch berechnet & Rundungsfehler
- ▶ „kleine BUGs, große GAUs“
 - <http://www5.in.tum.de/~huckle/bugs.html>

83

Qualitätssicherung

- ▶ Software entsteht durch menschliche Hand
- ▶ Fehler zu machen, ist menschlich!
- ▶ Software wird deshalb Fehler enthalten
- ▶ **Ziel:** (Laufzeit-) Fehler finden vor großem Schaden
- ▶ **Je später Fehler entdeckt werden, desto aufwändiger ist ihre Behebung!**
- ▶ Schon beim Implementieren auf Qualität achten
 - siehe oben: Fehler vermeiden!
- ▶ wünschenswert: je 1/3 Zeit für
 - Programmieren
 - Testen
 - Dokumentieren
- ▶ wünschenswert: Dokumentation der Tests!
 - damit reproduzierbar
- ▶ In der Praxis meist viel Programmieren, wenig Testen, noch weniger Dokumentieren ;-)

84

Testen

- ▶ **Testen ist der Prozess, ein Programm mit der Absicht auszuführen, Fehler zu finden!**
 - Glenford Myers: Art of Software Testing (1979)
- ▶ Test ist der Vergleich des Verhaltens eines Prg (**Ist**) mit dem erwarteten Verhalten eines Systems (**Soll**)
- ▶ **Es ist praktisch nicht möglich, alle Prg.funktionen und alle möglichen Werte in den Eingabedaten in allen Kombinationen zu testen.**
 - d.h. Tests sind idR. unvollständig!
- ▶ **Probleme beim unvollständigen Testen**
 - Tests erlauben nur das Auffinden von Fehlern
 - Tests können Korrektheit nicht beweisen
 - Fehlerursache ist durch Soll-Ist-Vergleich nicht zwangsläufig klar
 - Testfälle können selbst fehlerhaft sein!
- ▶ **Vorteile beim unvollständigen Testen**
 - Zeitaufwand vertretbar
 - Tests beziehen sich idR. auf „realistischen Input“
 - Tests sind idR. reproduzierbar

85

Arten von Tests

- ▶ **strukturelle Tests** (für jede Funktion)
 - Werden alle Anweisungen ausgeführt oder gibt es toten Code?
 - Treten Fehler auf, wenn **if ... else** mit *wahr / falsch* durchlaufen werden?
 - Treten Fehler auf, wenn **if ... else** in allen Kombinationen mit *wahr/falsch* durchlaufen?
- ▶ **funktionale Tests** (für jede Fkt. und Programm)
 - Tut jede Funktion mit zulässigen Parametern das Richtige? (d.h. Ergebnis korrekt?)
 - Tut das Programm (bzw. Teilabschnitte) das Richtige? (d.h. Ergebnis korrekt?)
 - Werden unzulässige Parameter erkannt?
 - Werden Grenzfälle / Sonderfälle korrekt erkannt und liefern das Richtige?
 - Was passiert bei Fehleingaben, d.h. bei Fehler des Benutzers?

86

Wie testen?

- ▶ **Ziel:** Tut Funktion / Programm das Richtige?
- ▶ **funktionale Tests brauchen Testfälle**
 - mit bekanntem Ergebnis / Output
- ▶ Was sind generische Fälle / Parameter?
 - Bei welchen Fällen treten Verzweigungen auf?
 - Möglichst viele Verzweigungen abdecken!
- ▶ Welche Fälle sind kritisch?
 - Zahlen werden im Rechner **nicht exakt** dargestellt (später mehr!)
 - Außerdem keine exakte Arithmetik bei **double**!
 - * jede **double**-Rechnung hat Rechenfehler!
 - Wo können aufgrund solcher Rechenfehler andere Ergebnisse auftreten?
 - * z.B. Ist ein Punkt auf dem Kreisrand?
- ▶ **früh mit dem Testen beginnen**
 - nach Implementierung jeder Funktion!
 - nicht erst dann, wenn Prg komplett fertig!
- ▶ nach Code-Korrektur alle(!) Tests wiederholen
 - deshalb Dokumentation der Tests!
- ▶ **Ab jetzt in der UE stets:** Wie wurde getestet?
 - allerdings nur inhaltlich
 - d.h. ohne Fehleingaben des Nutzers

87

Arrays (=Felder)

- ▶ Vektoren, Matrizen
- ▶ Operator [...]
- ▶ Matrix-Vektor-Multiplikation
- ▶ Lineare Gleichungssysteme

88

Vektoren

- ▶ Deklaration eines Vektors $x = (x_0, \dots, x_{N-1}) \in \mathbb{R}^N$:
 - `double x[N];` \mapsto `x` ist double-Vektor
- ▶ Zugriff auf Komponenten:
 - `x[j]` entspricht x_j
 - Jedes `x[j]` ist vom Typ `double`
- ▶ Analoge Deklaration für andere Datentypen
 - `int y[N];` \mapsto `y` ist int-Vektor
- ▶ ACHTUNG mit der Indizierung der Komponenten
 - Indizes $0, \dots, N-1$ in C
 - idR. Indizes $1, \dots, N$ in Mathematik
- ▶ Initialisierung bei Deklaration möglich:
 - `double x[3] = {1,2,3};` dekl. $x = (1, 2, 3) \in \mathbb{R}^3$
- ▶ Vektor-Initialisierung nur bei Deklaration erlaubt
 - Später zwingend komponentenweises Schreiben!
 - * d.h. `x[0] = 1; x[1] = 2; x[2] = 3;` ist OK!
 - * `x = {1,2,3}` ist verboten!

89

Beispiel: Einlesen eines Vektors

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     double x[3] = {0,0,0};
5
6     printf("Einlesen eines Vektors x in R^3:\n");
7
8     // Einlesen von x0
9     printf("x_0 = ");
10    scanf("%lf",&x[0]);
11
12    // Einlesen von x1
13    printf("x_1 = ");
14    scanf("%lf",&x[1]);
15
16    // Einlesen von x2
17    printf("x_2 = ");
18    scanf("%lf",&x[2]);
19
20    printf("x = (%f, %f, %f)\n",x[0],x[1],x[2]);
21 }
```

- ▶ Ausgabe `double` über `printf` mit Platzhalter `%f`
- ▶ Einlesen `double` über `scanf` mit Platzhalter `%lf`

90

Achtung: Statische Arrays

- ▶ Die Länge von Arrays ist statisch
 - nicht veränderbar während Programmablauf
 - $x \in \mathbb{R}^3$ kann nicht zu $x \in \mathbb{R}^5$ erweitert werden
- ▶ Programm kann nicht selbständig herausfinden, wie groß ein Array ist
 - d.h. Programm weiß bei Ablauf nicht, dass Vektor $x \in \mathbb{R}^3$ Länge 3 hat
 - Aufgabe des Programmierers!
- ▶ Achtung mit Indizierung!
 - Indizes laufen $0, \dots, N-1$ in C
 - Prg kann nicht wissen, ob `x[j]` definiert ist
 - * `x` muss mindestens Länge $j+1$ haben!
 - * falsche Indizierung ist kein Syntaxfehler!
 - * sondern ggf. ein Laufzeitfehler!
- ▶ Arrays dürfen nicht Output einer Funktion sein!
 - Das ist auch kein Problem, denn:
- ▶ Arrays werden mit Call by Reference an eine Funktion übergeben!
 - Erklärung folgt später (\rightarrow Pointer!)

91

Arrays & Call by Reference

```

1 #include <stdio.h>
2
3 void callByReference(double y[3]) {
4     printf("a) y = (%f, %f, %f)\n",y[0],y[1],y[2]);
5     y[0] = 1;
6     y[1] = 2;
7     y[2] = 3;
8     printf("b) y = (%f, %f, %f)\n",y[0],y[1],y[2]);
9 }
10
11 main() {
12     double x[3] = {0,0,0};
13
14     printf("c) x = (%f, %f, %f)\n",x[0],x[1],x[2]);
15
16     // der Funktionsaufruf aendert die Koeffizienten!
17     callByReference(x);
18     printf("d) x = (%f, %f, %f)\n",x[0],x[1],x[2]);
19 }

```

► Output:

```

c) x = (0.000000, 0.000000, 0.000000)
a) y = (0.000000, 0.000000, 0.000000)
b) y = (1.000000, 2.000000, 3.000000)
d) x = (1.000000, 2.000000, 3.000000)

```

- Man sieht: **Call by Reference bei Vektoren!**
 - Erklärung folgt später (→ Pointer!)
- in Fkt.signatur darf man Vektorlänge weglassen
 - Programmierer für korrekten Zugriff zuständig!
 - `void callByReference(double y[])` auch OK!

92

Falsche Indizierung von Vektoren

```

1 #include <stdio.h>
2 #define WRONG 1000
3
4 main() {
5     int x[3] = {0,1,2};
6
7     // dieser Koeffizient hat keinen reservierten Speicher!
8     x[WRONG] = 43;
9
10    // trotzdem kann man schreiben und lesen!
11    printf("x = (%d, %d, %d), x[%d] = %d\n",
12           x[0],x[1],x[2],WRONG,x[WRONG]);
13 }

```

- Zeile 2 definiert Konstante **WRONG**
 - **Konvention:** Konst. sind **GROSS_MIT_UNDERScores**
- Zeile 7, 9-10: Falscher Zugriff auf Vektor **x**,
 - d.h. Laufzeitfehler
 - * ggf. werden andere Daten überschrieben!
 - Trotzdem keine Fehlermeldung/Warnung vom Compiler!
 - Für korrekte Indizes sorgt der Programmierer!
- Output:


```
x = (0, 1, 2), x[1000] = 43
```
- Für **WRONG** klein ⇒ i.a. keine Fehlermeldung
- Für **WRONG** groß genug ⇒ Programmabbruch
 - weil Betriebssystem merkt, dass das Programm „aus dem Ruder läuft“!
 - d.h. Programm greift auf Speicherbereiche zu, die ihm nicht zugeordnet / erlaubt sind.

93

Matrizen

- Matrix $A \in \mathbb{R}^{M \times N}$ ist rechteckiges Schema

$$A = \begin{pmatrix} A_{00} & A_{01} & A_{02} & \dots & A_{0,N-1} \\ A_{10} & A_{11} & A_{12} & \dots & A_{1,N-1} \\ A_{20} & A_{21} & A_{22} & \dots & A_{2,N-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \dots & \vdots \\ A_{M-1,0} & A_{M-1,1} & A_{M-1,2} & \dots & A_{M-1,N-1} \end{pmatrix}$$

mit Koeffizienten $A_{jk} \in \mathbb{R}$

- zentrale math. Objekte der Linearen Algebra
- Deklaration einer Matrix $A \in \mathbb{R}^{M \times N}$:
 - `double A[M][N]`; ⇒ **A** ist double-Matrix
- Zugriff auf Komponenten:
 - `A[j][k]` entspricht A_{jk}
 - Jedes `A[j][k]` ist vom Typ `double`
- zeilenweise Initialisierung bei Deklaration möglich:
 - `double A[2][3] = {{1,2,3},{4,5,6}};`

deklariert + initialisiert $A = \begin{pmatrix} 1 & 2 & 3 \\ 4 & 5 & 6 \end{pmatrix}$

 - Nur bei gleichzeitiger Deklaration erlaubt, vgl. Vektoren

94

Allgemeine Arrays

- Vektor ist ein 1-dim. Array
- Matrix ist ein 2-dim. Array
- Ist **type** Datentyp, so deklariert
 - `type x[N]`; einen Vektor der Länge N
 - Koeffizienten `x[j]` sind Variablen vom Typ **type**
- Ist **type** Datentyp, so deklariert
 - `type x[M][N]`; eine $M \times N$ Matrix
 - `x[j]` ist Vektor vom Typ **type** (der Länge N)
 - Koeff. `x[j][k]` sind Variablen vom Typ **type**
- Auch mehr Indizes möglich
 - `type x[M][N][P]`; deklariert 3-dim. Array
 - `x[j]` ist $N \times P$ Matrix vom Typ **type**
 - `x[j][k]` ist Vektor vom Typ **type** (der Länge P)
 - Koeff. `x[j][k][p]` sind Variablen vom Typ **type**
- etc.
- Arrays dürfen nicht Output einer Funktion sein!
- Arrays werden mit Call by Reference an eine Funktion übergeben!

95

Zählschleife for

▶ Mathematische Symbole $\sum_{j=1}^n$ und $\prod_{j=1}^n$

▶ Zählschleife

▶ for

96

Die for-Schleife

▶ for (init. ; cond. ; step-expr.) statement

▶ Ablauf einer for-Schleife

- (1) Ausführen der Initialisierung **init.**
- (2) Abbruch, falls Bedingung **cond.** nicht erfüllt
- (3) Ausführen von **statement**
- (4) Ausführen von **step-expr.**
- (5) Sprung nach (2)

▶ **statement** ist

- entweder eine logische Programmzeile
- oder mehrere Prg.zeilen als Block **{...}**,

▶ in C ist **for** eigentlich eine Bedingungsschleife

- **trotzdem immer for verwenden**, um Statement „eine fixe Anzahl“ oft zu wiederholen

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int j = 0;
5
6     for (j=5; j>0 ; j--) {
7         printf("%d ",j);
8     }
9
10    printf("\n");
11 }
```

▶ Output:

5 4 3 2 1

97

Vektor einlesen & ausgeben

```
1 #include <stdio.h>
2
3 // Einlesen eines double-Vektors der Laenge dim
4 // uber die Tastatur
5
6 void scanVector(double input[], int dim) {
7     int j = 0;
8     // ueber alle Indizes des Vektors iterieren
9     for (j=0; j<dim; j++) {
10        // j-ten Koeffizienten initialisieren
11        input[j] = 0;
12        // j-ten Koeffizienten einlesen
13        printf("%d: ",j);
14        scanf("%lf",&input[j]);
15    }
16 }
17
18 // Ausgeben eines double-Vektors der Laenge dim
19 // in der Shell
20
21 void printVector(double output[], int dim) {
22     int j = 0;
23     // ueber alle Indizes des Vektors iterieren
24     for (j=0; j<dim; j++) {
25        // j-ten Koeffizienten ausgeben
26        printf("%f ",output[j]);
27    }
28    printf("\n");
29 }
30
31 main() {
32     double x[5];
33     // Erinnerung: Call-by-Reference fuer Vektoren
34     scanVector(x,5);
35     printVector(x,5);
36 }
```

▶ Funktionen müssen Länge von Arrays kennen!

- d.h. zusätzlicher Input-Parameter nötig

▶ Arrays werden mit Call by Reference übergeben!

98

Minimum eines Vektors

```
1 #include <stdio.h>
2 #define DIM 5
3
4 void scanVector(double input[], int dim) {
5     int j = 0;
6     for (j=0; j<dim; j++) {
7         input[j] = 0;
8         printf("%d: ",j);
9         scanf("%lf",&input[j]);
10    }
11 }
12
13 // Die Funktion min gibt das Minimum eines double-Vektors
14 // der Laenge dim zurueck
15
16 double min(double input[], int dim) {
17     int j = 0;
18     // Start-Vermutung: Minimum steht bei input[0]
19     double minval = input[0];
20     // ueber alle Indizes des Vektors iterieren
21     for (j=1; j<dim; j++) {
22        // falls kleinerer Wert gefunden, Minimum updaten
23        if (input[j] < minval) {
24            minval = input[j];
25        }
26    }
27    return minval;
28 }
29
30 main() {
31     double x[DIM];
32     scanVector(x,DIM);
33     printf("Minimum des Vektors ist %f\n", min(x,DIM));
34 }
```

▶ **Hinweise zur Realisierung (vgl. UE)**

- Vektorlänge ist Konstante im Hauptprogramm
 - * d.h. Länge im Hauptprg nicht veränderbar
- aber Input z.B. der Funktion scanVector
 - * d.h. Funktion arbeitet für beliebige Länge

99

Beispiel: Summensymbol Σ

- ▶ Berechnung der Summe $S = \sum_{j=1}^N a_j$:
 - Abkürzung $\sum_{j=1}^N a_j := a_1 + a_2 + \dots + a_N$
- ▶ Definiere theoretische Hilfsgröße $S_k = \sum_{j=1}^k a_j$
- ▶ Dann gilt
 - $S_1 = a_1$
 - $S_2 = S_1 + a_2$
 - $S_3 = S_2 + a_3$ etc.
- ▶ Realisierung also durch N -maliges Aufsummieren
 - **ACHTUNG:** Zuweisung, keine Gleichheit
 - * $S = a_1$
 - * $S = S + a_2$
 - * $S = S + a_3$ etc.

100

Beispiel: Summensymbol Σ

```

1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int j = 0;
5     int n = 100;
6
7     int sum = 0;
8
9     for (j=1; j<=n; j++) {
10        sum = sum+j;
11    }
12
13    printf("sum_{j=1}^{%d} j = %d\n",n,sum);
14 }
```

- ▶ Programm berechnet $\sum_{j=1}^n j$ für $n = 100$.
- ▶ Output:


```
sum_{j=1}^{100} j = 5050
```
- ▶ **ACHTUNG:** Bei iterierter Summation nicht vergessen, Ergebnisvariable auf Null zu setzen vgl. Zeile 7
 - Anderenfalls: Falsches/Zufälliges Ergebnis!
- ▶ statt `sum = sum + j;`
 - Kurzschreibweise `sum += j;`

101

Beispiel: Produktsymbol \prod

```

1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int j = 0;
5     int n = 5;
6
7     int factorial = 1;
8
9     for (j=1; j<=n; j++) {
10        factorial = factorial*j;
11    }
12
13    printf("%d! = %d\n",n,factorial);
14 }
```

- ▶ Prg berechnet Faktorielle $n! = \prod_{j=1}^n j$ für $n = 5$.
- ▶ Output:


```
5! = 120
```
- ▶ **ACHTUNG:** Bei iteriertem Produkt nicht vergessen, Ergebnisvariable auf Eins zu setzen vgl. Zeile 7
 - Anderenfalls: Falsches/Zufälliges Ergebnis!
- ▶ statt `factorial = factorial*j;`
 - Kurzschreibweise `factorial *= j;`

102

Matrix-Vektor-Multiplikation

- ▶ Man darf for-Schleifen schachteln
 - Typisches Beispiel: Matrix-Vektor-Multiplikation
- ▶ Seien $A \in \mathbb{R}^{M \times N}$ Matrix, $x \in \mathbb{R}^N$ Vektor
- ▶ Def $b := Ax \in \mathbb{R}^M$ durch $b_j = \sum_{k=0}^{N-1} A_{jk}x_k$
 - Indizierung in C startet bei 0
 - Achtung: In Mathematik Indizierung idR. ab 1!
- ▶ $b = Ax$ ist also Schreibweise für lineares GLS

$$\begin{array}{rcl}
 b_0 & = & A_{00}x_0 + A_{01}x_1 + \dots + A_{0,N-1}x_{N-1} \\
 b_1 & = & A_{10}x_0 + A_{11}x_1 + \dots + A_{1,N-1}x_{N-1} \\
 b_2 & = & A_{20}x_0 + A_{21}x_1 + \dots + A_{2,N-1}x_{N-1} \\
 \vdots & & \vdots \\
 b_{M-1} & = & A_{M-1,0}x_0 + A_{M-1,1}x_1 + \dots + A_{M-1,N-1}x_{N-1}
 \end{array}$$

- ▶ Implementierung
 - äußere Schleife über j , innere für Summe


```

for (j=0; j<M; j++) {
    b[j] = 0;
    for (k=0; k<N; k++) {
        b[j] = b[j] + A[j][k]*x[k];
    }
}
```
- ▶ **ACHTUNG:** Init. $b[j] = 0$ nicht vergessen!

103

Matrix spaltenweise speichern 1/2

- ▶ mathematische Bibliotheken speichern Matrizen idR. spaltenweise als Vektor
 - $A \in \mathbb{R}^{M \times N}$, gespeichert als $a \in \mathbb{R}^{MN}$
 - $a = (A_{00}, A_{10}, \dots, A_{M-1,0}, A_{01}, A_{11}, \dots, A_{M-1,N-1})$
 - A_{jk} entspricht also a_ℓ mit $\ell = j + k \cdot M$
- ▶ **Beachte:** C indiziert $j = 0, \dots, M-1, k = 0, \dots, N-1$
 - A_{jk} ist $(j+1)$ -tes Element der $(k+1)$ -ten Spalte
 - also vorher k Spalten mit $k \cdot M$ Speicherplätzen
 - plus j Speicherplätze in der $(k+1)$ -ten Spalte
- ▶ **gezeigt:** $A_{jk} = a_\ell$ mit $\ell = j + k \cdot M$
- ▶ muss Matrix spaltenweise speichern, wenn ich solche Bibliotheken nutzen will
 - diese Bibliotheken (aus historischen Gründen) meist in Fortran programmiert
- ▶ BSP. **BLAS** (basic linear algebra subroutines)
 - alles, was man mit Vektoren machen kann...
 - elementare Operationen mit Matrizen...
- ▶ BSP. **LAPACK** (linear algebra package)
 - lineare Gleichungssysteme lösen
 - Eigenwerte berechnen

104

Matrix spaltenweise speichern 2/2

- ▶ Erinnerung:
 - $A \in \mathbb{R}^{M \times N}$, gespeichert als $a \in \mathbb{R}^{MN}$
 - A_{jk} entspricht also a_ℓ mit $\ell = j + k \cdot M$
- ▶ Matrix-Vektor-Produkt
 - $b := Ax \in \mathbb{R}^M, b_j = \sum_{k=0}^{N-1} A_{jk}x_k$
 - mit `double A[M][N];`

```
for (j=0; j<M; j++) {
    b[j] = 0;
    for (k=0; k<N; k++) {
        b[j] = b[j] + A[j][k]*x[k];
    }
}
```
- ▶ Matrix-Vektor-Produkt (**spaltenweise gespeichert**)
 - mit `double A[M*N];`

```
for (j=0; j<M; j++) {
    b[j] = 0;
    for (k=0; k<N; k++) {
        b[j] = b[j] + A[j+k*M]*x[k];
    }
}
```

105

MinSort (= Selection Sort)

- ▶ **Gegeben:** Ein Vektor $x \in \mathbb{R}^n$
- ▶ **Ziel:** Sortiere x , sodass $x_1 \leq x_2 \leq \dots \leq x_n$
- ▶ Algorithmus (1. Schritt)
 - suche Minimum x_k von x_1, \dots, x_n
 - vertausche x_1 und x_k , d.h. x_1 ist kleinstes Elt.
- ▶ Algorithmus (2. Schritt)
 - suche Minimum x_k von x_2, \dots, x_n
 - vertausche x_2 und x_k , d.h. x_2 zweit kleinstes Elt.
- ▶ nach $n-1$ Schritten ist x sortiert
- ▶ **Hinweise zur Realisierung (vgl. UE)**
 - Länge n ist Konstante im Hauptprogramm
 - * d.h. n ist im Hauptprg nicht veränderbar
 - aber n ist Inputparameter der Funktion `minsort`
 - * d.h. Funktion arbeitet für beliebige Länge

106

MinSort 1/2

```
1 #include <stdio.h>
2 #define DIM 5
3
4 // double-Vektor der Laenge dim ueber Tastatur einlesen
5 void scanVector(double input[], int dim);
6
7 // double-Vektor der Laenge dim in der Shell ausgeben
8 void printVector(double output[], int dim);
9
10 // double-Vektor der Laenge dim aufsteigend sortieren
11 void minsort(double vector[], int dim);
12
13 main() {
14     double x[DIM];
15     scanVector(x,DIM);
16     minsort(x,DIM);
17     printVector(x,DIM);
18 }
19
20 void scanVector(double input[], int dim) {
21     int j = 0;
22     for (j=0; j<dim; j++) {
23         input[j] = 0;
24         printf("%d: ",j);
25         scanf("%lf",&input[j]);
26     }
27 }
28
29 void printVector(double output[], int dim) {
30     int j = 0;
31     for (j=0; j<dim; j++) {
32         printf("%f ",output[j]);
33     }
34     printf("\n");
35 }
```

107

MinSort 2/2

```
37 void minsort(double vector[], int dim) {
38     int j = 0;
39     int k = 0;
40     int argmin = 0;
41     double tmp = 0;
42
43     // ueber alle Indizes des Vektors iterieren
44     for (j=0; j<dim-1; j++) {
45         // Index vom Minimum in (vector[j],...,vector[dim-1])
46         // bestimmen, Start-Vermutung: vector[j] ist Minimum
47         argmin = j;
48         for (k=j+1; k<dim; k++) {
49             if (vector[argmin] > vector[k]) {
50                 argmin = k;
51             }
52         }
53         // jetzt ist vector[argmin] Minimum im Restvektor
54         // ggf. vertauschen, damit vector[j] minimal
55         if (argmin > j) {
56             tmp = vector[argmin];
57             vector[argmin] = vector[j];
58             vector[j] = tmp;
59         }
60     }
61 }
```

108

break und continue

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int j = 0;
5     int k = 0;
6
7     for (j=0; j<4; ++j) {
8         if (j%2 == 0) {
9             continue;
10        }
11        for (k=0; k < 10; ++k) {
12            printf("j=%d, k=%d\n",j,k);
13            if (k > 1) {
14                break;
15            }
16        }
17    }
18    printf("Ende: j=%d, k=%d\n",j,k);
19
20 }
```

- ▶ **continue** und **break** im **statement** von Schleifen
 - **continue** beendet aktuellen Durchlauf
 - **break** beendet die aktuelle Schleife

- ▶ Code ist schlecht programmiertes Beispiel!

- ▶ Output:

```
j=1, k=0
j=1, k=1
j=1, k=2
j=3, k=0
j=3, k=1
j=3, k=2
Ende: j=4, k=2
```

109

Aufwand

- ▶ Aufwand von Algorithmen
- ▶ Landau-Symbol \mathcal{O}
- ▶ `time.h`, `clock_t`, `clock()`

110

Aufwand eines Algorithmus

- ▶ wichtige Kenngröße für Algorithmen
 - um Algorithmen zu bewerten / vergleichen
- ▶ **Aufwand = Anzahl benötigter Operationen**
 - Zuweisungen
 - Vergleiche
 - arithmetische Operationen
- ▶ programmspezifische Operationen nicht gezählt
 - Deklarationen & Initialisierungen
 - Schleifen, Verzweigungen etc.
 - Zählvariablen in Schleifen
- ▶ Aufwand wird durch „einfaches“ Zählen ermittelt
- ▶ **Konventionen zum Zählen nicht einheitlich**
- ▶ in EPROG ist Aufwand für **worst case** interessant
 - d.h. maximaler Aufwand im schlechtesten Fall
- ▶ häufig ist auch „mittlerer Aufwand“ interessant (d.h. Erwartungswert des Aufwands)
 - mathematisch komplizierter
 - deshalb nicht in EPROG
- ▶ in EPROG (maximal) benötigte Formeln:

$$\sum_{j=1}^n 1 = n, \quad \sum_{j=1}^n j = \frac{n(n+1)}{2}, \quad \sum_{j=1}^n j^2 = \frac{n(n+1)(2n+1)}{6}$$

111

Beispiel: Maximum suchen

```

1 double maximum(double vector[], int n) {
2     int i = 0;
3     double max = 0;
4
5     max = vector[0];
6     for (i=1; i<n; i++) {
7         if (vector[i] > max) {
8             max = vector[i];
9         }
10    }
11
12    return max;
13 }

```

▶ Beim Zählen wird jede Schleife zu einer Summe!

- d.h. **for** in Zeile 6 ist $\sum_{i=1}^{n-1}$

▶ Aufwand:

- **1 Zuweisung** \rightsquigarrow Zeile 5
- In jedem Schritt der **for**-Schleife \rightsquigarrow Zeile 6–10
 - * **1 Vergleich** \rightsquigarrow Zeile 7
 - * **1 Zuweisung** (worst case!) \rightsquigarrow Zeile 8

▶ insgesamt Operationen

$$1 + \sum_{i=1}^{n-1} 2 = 1 + 2(n-1) = 2n - 1$$

▶ wobei Zählvariable in Aufwand eingeht, d.h. nur Statement der **for**-Schleife wird berücksichtigt

112

Landau-Symbol \mathcal{O} (= groß-O)

▶ oft nur **Größenordnung** des Aufwands interessant

▶ Schreibweise $f = \mathcal{O}(g)$ für $x \rightarrow x_0$

- heißt $\limsup_{x \rightarrow x_0} \left| \frac{f(x)}{g(x)} \right| < \infty$
- d.h. es existiert eine Konstante $C > 0$ mit
 - * $|f(x)| \leq C |g(x)|$ für $x \rightarrow x_0$.
- d.h. f wächst höchstens so schnell wie g

▶ Beispiel: Maximum suchen

- Aufwand $2n - 1 = \mathcal{O}(n)$ für $n \rightarrow \infty$

▶ häufig entfällt „für $x \rightarrow x_0$ “

- dann Grenzwert x_0 kanonisch z.B. $2n - 1 = \mathcal{O}(n)$

▶ Sprechweise (nur Beispiele):

- Algorithmus hat **linearen Aufwand**, falls Aufwand $\mathcal{O}(n)$ bei Problemgröße n
 - * Maximumssuche hat linearen Aufwand
- Algorithmus hat **fastlinearen Aufwand**, falls Aufwand $\mathcal{O}(n \log n)$ bei Problemgröße n
- Algorithmus hat **quadratischen Aufwand**, falls Aufwand $\mathcal{O}(n^2)$ bei Problemgröße n
- Algorithmus hat **kubischen Aufwand**, falls Aufwand $\mathcal{O}(n^3)$ bei Problemgröße n

113

Matrix-Vektor Multiplikation

```

1 void MVM(double A[], double x[], double b[],
2         int m, int n) {
3     int i = 0;
4     int j = 0;
5
6     for (j=0; j<m; j++) {
7         b[j] = 0;
8         for (k=0; k<n; k++) {
9             b[j] = b[j] + A[j+k*m]*x[k];
10        }
11    }
12 }

```

▶ In jedem Schritt der j -Schleife \rightsquigarrow Zeile 6–11

- **1 Zuweisung** \rightsquigarrow Zeile 7
- In jedem Schritt der k -Schleife \rightsquigarrow Zeile 8–10
 - * **2 Multiplikationen** \rightsquigarrow Zeile 9
 - * **2 Additionen** \rightsquigarrow Zeile 9
 - * **1 Zuweisung** \rightsquigarrow Zeile 9

▶ insgesamt Operationen

$$\sum_{j=0}^{m-1} \left(1 + \sum_{k=0}^{n-1} 5 \right) = m + 5mn$$

▶ Aufwand $\mathcal{O}(mn)$

- bzw. Aufwand $\mathcal{O}(n^2)$ für $m = n$
- d.h. quadratischer Aufwand für $m = n$

114

Suchen im Vektor

```

1 int search(int vector[], int value, int n) {
2
3     int j = 0;
4
5     for (j=0; j<n; j++) {
6         if (vector[j] == value) {
7             return j;
8         }
9     }
10
11    return -1;
12 }

```

▶ Aufgabe:

- Suche Index j mit $\text{vector}[j] = \text{value}$
- Rückgabe **-1**, falls solcher nicht existiert

▶ in jedem Schritt der j -Schleife

- **1 Vergleich**

▶ Insgesamt Operationen

$$\sum_{j=0}^{n-1} 1 = n$$

▶ Aufwand $\mathcal{O}(n)$ im worst case

115

Binäre Suche im sortierten Vektor

```
1 int binsearch(int vector[], int value, int n) {
2
3     int j = 0;
4     int start = 0;
5     int end = n-1;
6
7     while (start <= end) {
8         j = 0.5*(end + start);
9         if (vector[j] == value) {
10            return j;
11        }
12        else if (vector[j] > value) {
13            end = j-1;
14        }
15        else {
16            start = j+1;
17        }
18    }
19
20    return -1;
21 }
```

- ▶ **Voraussetzung: Vektor ist aufsteigend sortiert**
- ▶ Modifiziere Idee des Bisektionsverfahrens
 - d.h. natürliche Suche im Telefonbuch
 - Betrachte halben Vektor, falls $\text{vector}[j] \neq \text{value}$
- ▶ **Frage:** Wieviele Iterationen hat der Algorithmus?
 - jeder Schritt halbiert Vektor
 - Falls n Zweierpotenz, gilt $n/2^k = 1$
 - dann maximal $1 + \log_2 n$ Schritte
 - * je 2 Vergl. + 2 Zuw. + 1 Mult. + 2 Add./Subtr.
- ▶ Aufwand $\mathcal{O}(\log_2 n)$, d.h. logarithmischer Aufwand
 - sog. sublinearer Aufwand $\mathcal{O}(\log_2 n) \ll \mathcal{O}(n)$

116

Minsort

```
1 void minsort(int vector[], int n) {
2     int j = 0;
3     int k = 0;
4     int argmin = 0;
5     double tmp = 0;
6
7     for (j=0; j<n-1; j++) {
8         argmin = j;
9         for (k=j+1; k<n; k++) {
10            if (vector[argmin] > vector[k]) {
11                argmin = k;
12            }
13        }
14        if (argmin > j) {
15            tmp = vector[argmin];
16            vector[argmin] = vector[j];
17            vector[j] = tmp;
18        }
19    }
20 }
```

- ▶ In jedem Schritt der j -Schleife
 - **1 Zuweisung**
 - In jedem Schritt der k -Schleife
 - * **1 Vergleich**
 - * **1 Zuweisung** (worst case!)
 - jeweils **1 Vergleich**
 - jeweils **3 Zuweisungen** (worst case!)

- ▶ quadratischer Aufwand $\mathcal{O}(n^2)$, weil:

$$\sum_{j=0}^{n-2} \left(5 + \sum_{k=j+1}^{n-1} 2 \right) = 5(n-1) + \sum_{j=0}^{n-2} ((n-(j+1))2)$$
$$= 5(n-1) + 2 \sum_{k=1}^{n-1} k = 5(n-1) + 2 \frac{n(n-1)}{2}$$

117

Aufwand & Rechenzeit

- ▶ Jede Operation kostet Rechenzeit
 - d.h. Aufwand korrespondiert zu Rechenzeit
- ▶ **Frage:** Welche Rechenzeit kann ich erwarten?
 - Antwort kann nur eine relative Größe sein, da Rechner unterschiedlich schnell
- ▶ theoretische Voraussagen
 - **linearer Aufwand**
 - * Problemgröße $n \Rightarrow Cn$ Operationen
 - * Problemgröße $kn \Rightarrow Ckn$ Operationen
 - * d.h. $3 \times$ Problemgröße $\Rightarrow 3 \times$ Rechenzeit
 - **quadratischer Aufwand**
 - * Problemgröße $n \Rightarrow Cn^2$ Operationen
 - * Problemgröße $kn \Rightarrow Ck^2n^2$ Operationen
 - * d.h. $3 \times$ Problemgröße $\Rightarrow 9 \times$ Rechenzeit
 - etc.
- ▶ BSP. Code braucht 1 Sekunde für $n = 1000$
 - Aufwand $\mathcal{O}(n) \Rightarrow 10$ Sekunden für $n = 10000$
 - Aufwand $\mathcal{O}(n^2) \Rightarrow 100$ Sekunden für $n = 10000$
 - Aufwand $\mathcal{O}(n^3) \Rightarrow 1000$ Sek. für $n = 10000$

118

Zeitmessung

- ▶ Wozu Zeitmessung?
 - Vergleich von Algorithmen / Implementierungen
 - Überprüfen theoretischer Voraussagen
- ▶ Bibliothek **time.h**
 - Datentyp **clock_t** für Zeitvariablen für Ausgabe Typecast nicht vergessen!
 - Funktion **clock()** liefert Rechenzeit seit Programmbeginn
 - Konstante **CLOCKS_PER_SEC** zum Umrechnen: **Zeitvariable/CLOCKS_PER_SEC** liefert Angabe in Sekunden

119

Beispiel: Zeitmessung 1/2

```

1 // include some libraries
2 #include <stdio.h>
3 #include <math.h>
4 #include <time.h>
5
6 // include library for dynamic storage allocation
7 // see line 27-29 below
8 #include <stdlib.h>
9
10 // define minimal and maximal problem size
11 #define NMIN (int)1e3
12 #define NMAX (int)1e9
13
14 // include codes from last slides
15 #include "aufwand_search.c"
16 #include "aufwand_binsearch.c"
17 #include "aufwand_minsort.c"
18
19 main() {
20     int n = NMIN;
21     int j = 0;
22     int tmp;
23     clock_t start = 0;
24     clock_t runtime = 0;
25     clock_t previous_runtime = 0;
26
27     // allocate dynamic vector ==> int vector[NMAX];
28     printf("*** allocate integer vector, length=%d\n", NMAX);
29     int vector[] = malloc( NMAX*sizeof(int) );
30
31     // initialize vector with deterministic data
32     printf("*** initialize vector\n");
33     for (j=0; j<NMAX; ++j) {
34         vector[j] = j;
35     }

```

- ▶ einbinden Codes von Folie 115–117 (Zeile 15–17)
- ▶ dynamische Vektoren (Zeile 27–29) → später!
 - ersetzt nur `int vector[NMAX];`

120

Beispiel: Zeitmessung 2/2

```

37 /*
38 // alternative: initialize vector with random numbers
39 srand(time(NULL));
40 // fill the vector with non-negative random numbers
41 printf("*** generate random numbers\n");
42 for (j=0; j<NMAX; ++j) {
43     vector[j] = rand();
44 }
45 */
46
47 // print the runtime for various vector lengths
48 printf("*** determine computing times\n");
49 for (n = NMIN; n <= NMAX; n = 2*n) {
50     // save start time, call function, determine runtime
51     start = clock();
52
53     // tmp = search(vector,-1,n); // linear complexity
54     // tmp = binsearch(vector,-1,n); // logarithmic compl.
55     minsort(vector,n); // quadratic complexity
56
57     runtime = clock() - start;
58
59     // print runtime (and relative increase of runtime)
60     if (n == NMIN) {
61         printf("n=%d, runtime=%1.2f\n", n,
62             (double) runtime/CLOCKS_PER_SEC);
63     }
64     else {
65         printf("n=%d, runtime=%1.2f, factor=%1.2f\n",
66             n, (double) runtime/CLOCKS_PER_SEC,
67             (double) runtime/previous_runtime);
68     }
69     previous_runtime = runtime;
70 }
71 }

```

- ▶ auch Test mit Zufallszahlen manchmal sinnvoll
 - hier auskommentiert (Zeile 38–44)
- ▶ Vektor-Länge wächst = $\times 2$
 - Zeit wächst $\times 2$ linear bzw. $\times 4$ quadratisch

121

Vergleich von Laufzeit

	$\mathcal{O}(n)$	$\mathcal{O}(n^2)$	$\mathcal{O}(\log_2 n)$
n	search	minsort	binsearch
1.000	0.00	0.00	0.00
2.000	0.00	0.00	0.00
4.000	0.00	0.01	0.00
8.000	0.00	0.06	0.00
16.000	0.00	0.25	0.00
32.000	0.00	1.03	0.00
64.000	0.00	4.12	0.00
128.000	0.00	16.55	0.00
256.000	0.00	64.31	0.00
512.000	0.00	257.25	0.00
1.024.000	0.00	$\geq 18\text{min}$	0.00
2.048.000	0.01	$\geq 72\text{min}$	0.00
4.096.000	0.01	$\geq 4,5\text{h}$	0.00
8.192.000	0.02	$\geq 18\text{h}$	0.00
16.384.000	0.04	$\geq 3\text{d}$	0.00
32.768.000	0.08	$\geq 12\text{d}$	0.00
65.536.000	0.15	$\geq 1,5\text{m}$	0.00
131.072.000	0.29	$\geq 6\text{m}$	0.00
262.144.000	0.60	$\geq 2\text{y}$	0.00
524.288.000	1.18	$\geq 8\text{y}$	0.00
1.048.576.000	2.53	$\geq 32\text{y}$	0.00

- ▶ log. Aufwand perfekt, denn $2^{30} > 1.048.576.000$
- ▶ auch linearer Aufwand liefert sehr gute Rechenzeit
- ▶ Quadratischer Aufwand für große n spürbar
- ▶ Fazit: Algorithmen sollen kleinen Aufwand haben
 - Ziel der numerischen Mathematik
 - aber nicht immer möglich

122

Pointer

- ▶ Variable vs. Pointer
- ▶ Dereferenzieren
- ▶ Address-of Operator `&`
- ▶ Dereference Operator `*`
- ▶ Call by Reference

123

Variablen

- ▶ **Variable** = symbolischer Name für Speicherbereich
 - + Information, wie Speicherbereich interpretiert werden muss (Datentyp laut Deklaration)
- ▶ Compiler übersetzt Namen in Referenz auf Speicherbereich und merkt sich, wie dieser interpretiert werden muss

Pointer

- ▶ **Pointer** = Variable, die Adresse eines Speicherbereichs enthält
- ▶ **Dereferenzieren** = Zugriff auf den Inhalt eines Speicherbereichs mittels Pointer
 - d.h. Schreiben eines Wertes an diese Adresse
 - bzw. Auslesen des dort gespeicherten Wertes
 - Beim Dereferenzieren muss Compiler wissen, welcher Var.typ im gegebenen Speicherbereich liegt, d.h. wie Speicherbereich interpretiert werden muss

124

Pointer in C

- ▶ Pointer & Variablen sind in C eng verknüpft:
 - **var** Variable \Rightarrow **&var** ist zugehöriger Pointer
 - **ptr** Pointer \Rightarrow ***ptr** ist zugehörige Variable
 - insbesondere ***&var = var** sowie **&*ptr = ptr**
- ▶ Bei Deklaration muss **Typ des Pointers** angegeben werden, da ***ptr** eine Variable sein soll!
 - **int* ptr;** deklariert **ptr** als **Pointer auf int**
 - d.h. **ptr** speichert eine Adresse, an welcher ein **int** im Speicher abgelegt ist
- ▶ Wie üblich gleichzeitige Initialisierung möglich
 - **int var;** deklariert Variable **var** vom Typ **int**
 - **int* ptr = &var;** deklariert **ptr** und weist Speicheradresse der Variable **var** zu
 - * Bei solchen Zuweisungen muss der Typ von Pointer und Variable passen, sonst passiert Unglück!
 - I.a. gibt Compiler eine Warnung aus, z.B. **incompatible pointer type**
 - * Diese Warnung nie ignorieren, sondern Code checken, da 99% Garantie auf Laufzeitfehler!
- ▶ Analog für andere Datentypen, z.B. **double**

125

Ein elementares Beispiel

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int var = 1;
5     int* ptr = &var;
6
7     printf("a) var = %d, *ptr = %d\n",var,*ptr);
8
9     var = 2;
10    printf("b) var = %d, *ptr = %d\n",var,*ptr);
11
12    *ptr = 3;
13    printf("c) var = %d, *ptr = %d\n",var,*ptr);
14
15    var = 47;
16    printf("d) *(&var) = %d,*,*(&var));
17    printf("*&var = %d\n",*&var);
18
19    printf("e) &var = %p\n", &var);
20 }
```

- ▶ **%p** Platzhalter für **printf** für Adresse
 - manchmal sinnvoll zum Finden von Fehlern, dass man Werte von Variablen ausgibt!
- ▶ Output:
 - a) var = 1, *ptr = 1
 - b) var = 2, *ptr = 2
 - c) var = 3, *ptr = 3
 - d) *(&var) = 47,*&var = 47
 - e) &var = 0x7fff518baba8

126

Begrifflichkeiten

- ▶ **Call by Value**
 - Funktionen erhalten **Werte** der Input-Parameter und speichern diese in lokalen Variablen
 - Änderungen an den Input-Parameter wirken sich **nicht außerhalb** der Funktion aus
- ▶ **Call by Reference**
 - Funktionen erhalten **Variablen** als Input ggf. unter lokal neuem Namen
 - Änderungen an den Input-Parametern wirken sich **außerhalb** der Funktion aus

Call by Value / Reference in C

- ▶ In C gibt es nur Call by Value
- ▶ Kann Call by Reference mittels Pointern realisieren
- ▶ Vektoren werden mit Call by Reference übergeben
 - kein Widerspruch, Erklärung folgt gleich!

127

Call by Reference in C

- ▶ Elementare Datentypen werden in C mit *Call by Value* an Funktionen übergeben
 - z.B. int, double, Pointer

- ▶ *Call by Reference* ist über Pointer realisierbar:

```
1 #include <stdio.h>
2
3 void test(int* y) {
4     printf("a) *y=%d\n", *y);
5     *y = 43;
6     printf("b) *y=%d\n", *y);
7 }
8
9 main() {
10    int x = 12;
11    printf("c) x=%d\n", x);
12    test(&x);
13    printf("d) x=%d\n", x);
14 }
```

- ▶ Die Funktion `test` ändert den Wert der Variable `x`, da mittels Pointer `y` direkt auf den Speicher zugegriffen wird.

- ▶ Output:

- c) x=12
- a) *y=12
- b) *y=43
- d) x=43

128

Beispiel 1/2

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <assert.h>
3 #define DIM 5
4
5 // The function scanVector reads the coefficients
6 // of a double vector of length dim from the keyboard
7 void scanVector(double input[], int dim);
8
9 // The function determineMinMax returns the minimum
10 // and maximum of a double vector of length dim. We
11 // use Call-by-Reference because of 2 return values.
12
13 void determineMinMax(double vector[],int dim,
14                     double* min, double* max);
15
16 main() {
17     double x[DIM];
18     double max = 0;
19     double min = 0;
20     scanVector(x,DIM);
21     determineMinMax(x,DIM, &min, &max);
22     printf("min(x) = %f\n",min);
23     printf("max(x) = %f\n",max);
24 }
```

- ▶ `determineMinMax` soll Minimum und Maximum eines Vektors finden
 - d.h. zwei Rückgabe-Parameter
 - in C maximal ein Rückgabe-Parameter erlaubt
 - * Verwende Pointer für Call by Reference
- ▶ mehr als eine Funktionalität = schlechter Stil:
 - jede Funktion hat genau eine Funktionalität
 - jede Funktionalität erfordert eine Funktion
- ▶ oft trotzdem verwendet, weil effizienter:
 - hier nur eine Schleife, statt zwei!

129

Beispiel 2/2

```
26 void scanVector(double input[], int dim) {
27     assert(dim > 0);
28     int j = 0;
29     for (j=0; j<dim; ++j) {
30         input[j] = 0;
31         printf("%d: ",j);
32         scanf("%lf",&input[j]);
33     }
34 }
35
36 void determineMinMax(double vector[],int dim,
37                     double* min, double* max) {
38     int j = 0;
39     assert(dim > 0);
40
41     // First guess for minimum as well as maximum is the
42     // first vector coefficient.
43     // Recall that, e.g., max is double* so that *max is
44     // a double variable.
45     *max = vector[0];
46     *min = vector[0];
47
48     // iterate through vector and search for smaller resp.
49     // larger elements to determine minimum and maximum.
50     for (j=1; j<dim; ++j) {
51         if (vector[j] < *min) {
52             *min = vector[j];
53         }
54         else if (vector[j] > *max) {
55             *max = vector[j];
56         }
57     }
58 }
```

130

Anmerkungen zu Pointern

- ▶ **Standard-Notation** zur Deklaration ist anders als meine Sichtweise:
 - `int *pointer` deklariert Pointer auf `int`
- ▶ Von den C-Erfindern wurden Pointer *nicht* als Variablen verstanden
- ▶ Für das Verständnis scheint mir aber „variable“ Sichtweise einfacher
- ▶ Leerzeichen wird vom Compiler ignoriert:
 - `int* pointer`, `int *pointer`, `int*pointer`
- ▶ * wird nur auf den folgenden Namen bezogen
- ▶ **ACHTUNG** bei Deklaration von Listen:
 - `int* pointer, var;` deklariert Pointer auf `int` und Variable vom Typ `int`
 - `int *pointer1, *pointer2;` deklariert zwei Pointer auf `int`
- ▶ **ALSO** Listen von Pointern vermeiden!
 - auch zwecks **Lesbarkeit!**

Pointer & Arrays

- ▶ Deklaration `int array[N];` generiert intern Pointer `array` vom Typ `int*`
- ▶ Deklaration `int array[];` dasselbe wie `int* array;`

131

Elementare Datentypen

- ▶ Arrays & Pointer
- ▶ sizeof

132

Elementare Datentypen

- ▶ Datentyp für Zeichen (z.B. Buchstaben)
 - `char`
- ▶ Datentypen für Ganzzahlen:
 - `int`
- ▶ Datentypen für Gleitkommazahlen:
 - `float`
 - `double`
- ▶ Alle Pointer gelten als elementare Datentypen

Qualifier (nicht in EPROG!)

- ▶ `signed` und `unsigned` für `char` und `int`
- ▶ `long` und `short` für `int`
- ▶ `long` für `double`
 - z.B. Datentyp `signed char`, `unsigned long int`
 - siehe <https://en.wikipedia.org/wiki/C.data.types>

Bemerkungen

- ▶ Deklaration und Gebrauch wie bisher
- ▶ Man kann Arrays & Pointer bilden
- ▶ Für UE: nur `char`, `int`, `double` & Pointer
- ▶ Genaueres zu den Typen später!

133

Funktionen

- ▶ Elementare Datentypen werden an Funktionen mit Call by Value übergeben
- ▶ Return Value darf nur void oder elementar sein

Arrays

- ▶ Streng genommen, gibt es in C keine Arrays!
 - Deklaration `int array[N];`
 - * legt Pointer `array` vom Typ `int*` an
 - * organisiert ab der Adresse `array` Speicher, um N-mal einen `int` zu speichern
 - * d.h. `array` enthält Adresse von `array[0]`
 - * d.h. `array = &array[0]`
 - * d.h. `*array = array[0]`
 - Da Pointer als elementare Datentypen mittels Call by Value übergeben werden, werden Arrays augenscheinlich mit Call by Reference übergeben
- ▶ Pointerarithmetik: `array + j = &array[j]`
 - d.h. `*(array + j) = array[j]`

134

Laufzeitfehler!

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <assert.h>
3
4 double* scanVector(int length) {
5     assert(length > 0);
6     double vector[length];
7     int j = 0;
8     for (j=0; j<length; ++j) {
9         vector[j] = 0;
10        printf("vector[%d] = ",j);
11        scanf("%lf",&vector[j]);
12    }
13    return vector;
14 }
15
16 main() {
17     double* x;
18     int j = 0;
19     int dim = 0;
20
21     printf("dim = ");
22     scanf("%d",&dim);
23
24     x = scanVector(dim);
25
26     for (j=0; j<dim; ++j) {
27         printf("x[%d] = %f\n",j,x[j]);
28     }
29 }
```

- ▶ Ziel: `scanVector` soll Vektor anlegen & initialisieren
- ▶ Syntax des Programms ist OK, aber Laufzeitfehler!
- ▶ Problem: Speicher zu `x` mit Blockende 14 aufgelöst
 - d.h. Pointer aus 6/13 zeigt auf Irgendwas
- ▶ Abhilfe: Call by Reference (vorher!) oder händische Speicherverwaltung (gleich!)

135

Der Befehl sizeof

```
1 #include <stdio.h>
2
3 void printSizeOf(double vector[]) {
4     printf("sizeof(vector) = %d\n", sizeof(vector));
5 }
6
7 main() {
8     int var = 43;
9     double array[12];
10    double* ptr = array;
11
12    printf("sizeof(var) = %d\n", sizeof(var));
13    printf("sizeof(double) = %d\n", sizeof(double));
14    printf("sizeof(array) = %d\n", sizeof(array));
15    printf("sizeof(ptr) = %d\n", sizeof(ptr));
16    printSizeOf(array);
17 }
```

- ▶ Ist **var** eine Variable eines elementaren Datentyps, gibt **sizeof(var)** die Größe der Var. in Bytes zurück
- ▶ Ist **type** ein Datentyp, so gibt **sizeof(type)** die Größe einer Variable dieses Typs in Bytes zurück
- ▶ Ist **array** *lokales statisches Array im selben Block*, so liefert **sizeof(array)** Größe des Arrays in Bytes
- ▶ Intern sind **ptr** und **array** zwei **double** Pointer und enthalten (= zeigen auf) dieselbe Speicheradresse!
- ▶ Output:
 - sizeof(var) = 4
 - sizeof(double) = 8
 - sizeof(array) = 96
 - sizeof(ptr) = 8
 - sizeof(vector) = 8

136

Dynamische Vektoren

- ▶ statische & dynamische Vektoren
- ▶ Vektoren & Pointer
- ▶ dynamische Speicherverwaltung

- ▶ `stdlib.h`
- ▶ `NULL`
- ▶ `malloc`, `realloc`, `free`

- ▶ `#ifndef ... #endif`

137

Statische Vektoren

- ▶ **double array[N];** deklariert statischen Vektor **array** der Länge **N** mit **double**-Komponenten
 - Indizierung **array[j]** mit $0 \leq j \leq N - 1$
 - **array** ist intern vom Typ **double***
 - * enthält Adr. von **array[0]**, sog. *Base Pointer*
 - Länge **N** kann während Programmablauf nicht verändert werden
- ▶ Funktionen können Länge **N** nicht herausfinden
 - Länge **N** als Input-Parameter übergeben:
- ▶ **theoretisch möglich:** im selben Block wie die Deklaration
 - **double x[N];**
 - erhalte **N** durch **sizeof(x)/sizeof(double)**
- ▶ **praktisch unmöglich:** sofern Funktionen verwendet werden, siehe Folie 136

138

Speicher allokieren

- ▶ **Jetzt:** händische Speicherverwaltung von Arrays
 - dadurch Vektoren dynamischer Länge möglich
- ▶ Einbinden der Standard-Bibl: **#include <stdlib.h>**
 - wichtige Befehle **malloc**, **free**, **realloc**
- ▶ **pointer = malloc(N*sizeof(type));**
 - allokiert Speicher für Vektor der Länge **N** mit Komponenten vom Typ **type**
 - * **malloc** kriegt Angabe in Bytes → **sizeof**
 - **pointer** muss vom Typ **type*** sein
 - * Base Pointer **pointer** bekommt Adresse der ersten Komponente **pointer[0]**
 - **pointer** und **N** muss sich Programm merken!
- ▶ **Häufiger Laufzeitfehler:** **sizeof** vergessen!
- ▶ **Achtung:** Allokierter Speicher ist uninitialized!
- ▶ **Konvention:** Pointer ohne Speicher bekommen den Wert **NULL** zugewiesen
 - führt sofort auf Speicherzugriffsfehler bei Zugriff
- ▶ **malloc** liefert **NULL**, falls Fehler bei Allokation
 - d.h. Speicher konnte nicht allokiert werden

139

Speicher freigeben

- ▶ `free(pointer)`
 - gibt Speicher eines dyn. Vektors frei
 - `pointer` muss Output von `malloc` sein
- ▶ **Achtung:** Speicher wird freigegeben, aber `pointer` existiert weiter
 - Erneuter Zugriff führt (irgendwann) auf Laufzeitfehler
- ▶ **Achtung:** Speicher freigeben, nicht vergessen!
 - und Pointer auf `NULL` setzen!

140

Beispiel

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include <assert.h>
4
5 // scanVector allocates a double vector of prescribed
6 // length and reads the coefficients from the keyboard
7 double* scanVector(int length) {
8     int j = 0;
9     double* vector = NULL;
10    // ensure that given length is admissible
11    assert(length > 0);
12
13    // allocate memory and ensure that this was successful
14    vector = malloc(length*sizeof(double));
15    assert(vector != NULL);
16
17    // read coefficients from keyboard
18    for (j=0; j<length; ++j) {
19        vector[j] = 0;
20        printf("vector[%d] = ",j);
21        scanf("%lf",&vector[j]);
22    }
23    // return base pointer of dynamic vector
24    return vector;
25 }
```

- ▶ **Ziel:** `scanVector` soll Vektor anlegen & einlesen
 - siehe Folie 135!
- ▶ Jetzt aber Code OK, da Funktion den Vektor dynamisch mit `malloc` allokiert
 - Vektor existiert (d.h. Speicher ist reserviert), bis Basepointer mit `free` freigegeben!

141

Beispiel

```
27 // printVector prints vector of given length in the shell
28 void printVector(double* vector, int length) {
29     int j = 0;
30     // ensure that vector and length are admissible
31     assert(vector != NULL);
32     assert(length > 0);
33
34     // print coefficients to shell
35     for (j=0; j<length; ++j) {
36         printf("vector[%d] = %f\n",j,vector[j]);
37     }
38 }
39
40 main() {
41     // always set pointers to NULL, if not bound to memory
42     double* x = NULL;
43     int dim = 0;
44
45     // read vector length from keyboard
46     printf("dim = ");
47     scanf("%d",&dim);
48
49     // allocate vector, read coefficients, and print vector
50     x = scanVector(dim);
51     printVector(x,dim);
52
53     // do not forget to free memory
54     free(x);
55     // set pointer x to NULL, since not bound to memory
56     x = NULL;
57 }
```

142

Dynamische Vektoren

- ▶ `pointer = realloc(pointer,Nnew*sizeof(type))`
 - verändert Speicherallokation
 - * zusätzliche Allokation für `Nnew > N`
 - * Speicherbereich kürzen für `Nnew < N`
 - Alter Inhalt bleibt (soweit möglich) erhalten
 - Rückgabe `NULL` bei Fehler

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include <assert.h>
4
5 main() {
6     int N = 5;
7     int Nnew = 10;
8     int j = 0;
9
10    int* array = malloc(N*sizeof(int));
11    assert(array != NULL);
12    for (j=0; j<N; ++j){
13        array[j] = j;
14    }
15
16    array = realloc(array,Nnew*sizeof(int));
17    assert(array != NULL);
18    for (j=N; j<Nnew; ++j){
19        array[j] = 10*j;
20    }
21
22    for (j=0; j<Nnew; ++j){
23        printf("%d ",array[j]);
24    }
25    printf("\n");
26    free(array);
27    array = NULL;
28 }
```

- ▶ Output:

0 1 2 3 4 50 60 70 80 90

143

Bemerkungen

- ▶ Base Pointer (= Output von `malloc` bzw. `realloc`) merken & nicht verändern
 - notwendig für fehlerfreies `free` und `realloc`
- ▶ bei `malloc` und `realloc` nicht `sizeof` vergessen
 - Typ des Base Pointers muss zum `sizeof` passen!
- ▶ Output von `malloc` und `realloc` auf `NULL` checken
 - sicherstellen, dass Speicher allokiert wurde!
- ▶ allokiertes Speicherbereich ist stets uninitialized
 - nach Allokation stets initialisieren
- ▶ Länge des dynamischen Arrays merken
 - kann Programm nicht herausfinden!
- ▶ Nicht mehr benötigten Speicher freigeben
 - insb. vor Blockende `}`, da dann Base Pointer weg
- ▶ Pointer auf `NULL` setzen, wenn ohne Speicher
 - Fehlermeldung, falls Programm "aus Versehen" auf Komponente `array[j]` zugreift
- ▶ Nie `realloc`, `free` auf statisches Array anwenden
 - Führt auf Laufzeitfehler, da Compiler `free` selbständig hinzugefügt hat!
- ▶ Ansonsten gleicher Zugriff auf Komponenten wie bei statischen Arrays
 - Indizierung `array[j]` für $0 \leq j \leq N - 1$

144

Vektor-Bibliothek

- ▶ Aufteilen von Source-Code auf mehrere Files
 - ▶ Preprocessor, Compiler, Linker
 - ▶ Objekt-Code
-
- ▶ `gcc -c`
 - ▶ `make`

145

Aufteilen von Source-Code

- ▶ längere Source-Codes auf mehrere Files aufteilen
- ▶ Vorteil:
 - übersichtlicher
 - Bildung von Bibliotheken
 - * Wiederverwendung von alten Codes
 - * vermeidet Fehler
- ▶ `gcc name1.c name2.c ...`
 - erstellt *ein* Executable aus Source-Codes
 - Reihenfolge der Codes nicht wichtig
 - analog zu `gcc all.c`
 - * wenn `all.c` ganzen Source-Code enthält
 - insb. Funktionsnamen müssen eindeutig sein
 - `main()` darf nur 1x vorkommen

146

Preprocessor, 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
 - `gcc -c name.c` erzeugt Objekt-Code `name.o`
 - gut zum Debuggen von Syntax-Fehlern!
 - ▶ Objekt-Code händisch hinzufügen + kompilieren
 - `gcc name.c bib1.o bib2.o ...`
 - `gcc name.o bib1.o bib2.o ...`
 - Reihenfolge + Anzahl der Objekt-Codes ist egal
 - ▶ **Ziel:** selbst Bibliotheken erstellen
 - spart ggf. Zeit beim Kompilieren
 - vermeidet Fehler

147

Eine erste Bibliothek

```
1 #ifndef INCLUDE_DYNAMICVECTORS_
2 #define INCLUDE_DYNAMICVECTORS_
3
4 #include <stdio.h>
5 #include <stdlib.h>
6 #include <assert.h>
7
8 // allocate + initialize dynamic double vector of length n
9 double* mallocVector(int n);
10
11 // free a dynamic vector and set the pointer to NULL
12 double* freeVector(double* vector);
13
14 // extend dynamic double vector and initialize new entries
15 double* reallocVector(double* vector, int n, int nnew);
16
17 // allocate dynamic double vector of length n and read
18 // entries from keyboard
19 double* scanVector(int n);
20
21 // print dynamic double vector of length n to shell
22 void printVector(double* vector, int n);
23
24 #endif
```

- ▶ Header-File `dynamicvectors.h` zur Bibliothek
 - enthält alle Funktionssignaturen
 - enthält Kommentare zu den Funktionen
- ▶ sog. **Include Guard**: Header-File beginnt mit

```
#ifndef NAME
#define NAME
```
- ▶ Header-File ended mit

```
#endif
```
- ▶ keine erneute Deklaration bei mehrfachen `#include`
 - `NAME` wird in der Regel zufällig erzeugt

148

Source-Code 1/2

```
1 #include "dynamicvectors.h"
2
3 double* mallocVector(int n) {
4     int j = 0;
5     double* vector = NULL;
6     assert(n > 0);
7
8     vector = malloc(n*sizeof(double));
9     assert(vector != NULL);
10
11     for (j=0; j<n; ++j) {
12         vector[j] = 0;
13     }
14     return vector;
15 }
16
17 double* freeVector(double* vector) {
18     free(vector);
19     return NULL;
20 }
21
22 double* reallocVector(double* vector, int n, int nnew) {
23     int j = 0;
24     assert(vector != NULL);
25     assert(n > 0);
26     assert(nnew > 0);
27
28     vector = realloc(vector, nnew*sizeof(double));
29     assert(vector != NULL);
30     for (j=n; j<nnew; ++j) {
31         vector[j] = 0;
32     }
33     return vector;
34 }
```

- ▶ Einbinden des Header-Files (Zeile 1)
 - `#include "..."` mit Angabe des Verzeichnis
 - `#include <...>` für Standard-Verzeichnis

149

Source-Code 2/2

```
36 double* scanVector(int n) {
37     int j = 0;
38     double* vector = NULL;
39     assert(n > 0);
40
41     vector = mallocVector(n);
42     assert(vector != NULL);
43
44     for (j=0; j<n; ++j) {
45         printf("vector[%d] = ", j);
46         scanf("%lf", &vector[j]);
47     }
48     return vector;
49 }
50
51 void printVector(double* vector, int n) {
52     int j = 0;
53     assert(vector != NULL);
54     assert(n > 0);
55
56     for (j=0; j<n; ++j) {
57         printf("%d: %f\n", j, vector[j]);
58     }
59 }
```

150

Hauptprogramm

```
1 #include "dynamicvectors.h"
2
3 main() {
4     double* x = NULL;
5     int n = 10;
6     int j = 0;
7     x = mallocVector(n);
8     for (j=0; j<n; ++j) {
9         x[j] = j;
10    }
11    x = reallocVector(x, n, 2*n);
12    for (j=n; j<2*n; ++j) {
13        x[j] = 10*j;
14    }
15    printVector(x, 2*n);
16    x = freeVector(x);
17 }
```

- ▶ Hauptprogramm bindet Header der Bibliothek ein
- ▶ Kompilieren mittels
 - `gcc -c dynamicvectors.c`
 - * erzeugt Object-Code `dynamicvectors.o`
 - `gcc dynamicvectors_main.c dynamicvectors.o`
 - * erzeugt Executable `a.out`

151

Statische Bibliotheken und make

```
1 exe : main.o dynamicvectors.o
2     gcc -o exe main.o dynamicvectors.o
3
4 main.o : dynamicvectors_main.c dynamicvectors.h
5     gcc -c dynamicvectors_main.c -o main.o
6
7 dynamicvectors.o : dynamicvectors.c dynamicvectors.h
8     gcc -c dynamicvectors.c
```

- ▶ 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

152

Strings

- ▶ statische & dynamische Strings
- ▶ **"..."** vs. **'...'**
- ▶ **string.h**

153

Strings (= Zeichenketten)

- ▶ Strings = **char**-Arrays, also 2 Definitionen möglich
 - statisch: **char array[N];**
 - * **N** = statische Länge
 - * Deklaration & Initialisierung möglich
char array[] = "text";
 - dynamisch (wie oben, Typ: **char***)
- ▶ Fixe Strings in Anführungszeichen **"..."**
- ▶ Einzelnes Zeichen in Hochkommata **'...'**
- ▶ Zugriff auf Teil-Strings nicht möglich!
- ▶ Achtung bei dynamischen Strings:
 - als Standard enden alle Strings mit Null-Byte **\0**
 - * Länge eines Strings dadurch bestimmen!
 - Bei statischen Arrays geschieht das automatisch (also wirkliche Länge **N+1** und **array[N]='\0'**)
 - * Bei dyn. Strings also 1 Byte mehr reservieren!
 - * und **\0** nicht vergessen
- ▶ An Funktionen können auch fixe Strings (in Anführungszeichen) übergeben werden
 - z.B. **printf("Hello World!\n");**

154

Funktionen zur String-Manipulation

- ▶ Wichtigste Funktionen in **stdio.h**
 - **sprintf** / **sscanf** agieren wie **printf** / **scanf**, aber Output / Input = String
- ▶ zahlreiche Funktionen in **stdlib.h**, z.B.
 - **atof**: konvertiert String → **double**
 - **atoi**: konvertiert String → **int**
- ▶ oder in **string.h**, z.B.
 - **strchr**, **memchr**: Suche **char** innerhalb String
 - **strcmp**, **memcmp**: Vergleiche zwei Strings
 - **strcpy**, **memcpy**: Kopieren von Strings
 - **strlen**: Länge eines Strings (ohne Null-Byte)
- ▶ Header-Files mit **#include <name>** einbinden!
- ▶ Gute Referenz mit allen Befehlen & Erklärungen
 - <https://en.wikibooks.org/wiki/C.Programming/>
 - z.B. <https://en.wikibooks.org/wiki/C.Programming/string.h/Function.reference/>
- ▶ Details zu den Befehlen in UNIX mit **man 3 befehl**
 - sog. **UNIX programmer's manual**
 - z.B. Eingabe **man 3 strcpy** in der Shell
- ▶ **ACHTUNG** mit String-Befehlen: Befehle können nicht wissen, ob für den Output-String genügend Speicher allokiert ist (→ Laufzeitfehler!)

155

Beispiel

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <stdlib.h>
3 #include <string.h>
4 #include <assert.h>
5
6 char* stringCopy(char* source) {
7     int length = 0;
8     char* result = NULL;
9     // ensure that source string exists
10    assert(source != NULL);
11
12    // determine length and allocate memory
13    length = strlen(source);
14    result = malloc((length+1)*sizeof(char));
15    // copy source string and return copy
16    strcpy(result,source);
17    return result;
18 }
19
20 main() {
21     char* string1 = "Hello World?";
22     char* string2 = stringCopy(string1);
23     string2[11] = '!';
24     printf("%s %s\n",string1,string2);
25     free(string2);
26     string2=NULL;
27 }
```

- ▶ Output:
Hello World? Hello World!
- ▶ Fixe Strings in Anführungszeichen "... " (Zeile 21)
 - erzeugt statisches Array mit zusätzlichem Null-Byte am Ende
- ▶ Zugriff auf einzelnes Zeichen eines Strings mit einfachen Hochkommata '...' (Zeile 23)
- ▶ Platzhalter für Strings in `printf` ist `%s` (Zeile 24)

156

Funktionspointer

- ▶ Deklaration
- ▶ Alles ist Pointer!

157

Funktionspointer

- ▶ Funktionsaufruf ist Sprung an eine Adresse
 - Pointer speichern Adressen
 - kann daher Fkt-Aufruf mit Pointer realisieren
- ▶ Deklaration eines Funktionspointers:
 - `<return value> (*pointer)(<input>);` deklariert Pointer `pointer` für Funktionen mit Parametern `<input>` und Ergebnis vom Typ `<return value>`
 - Notation entspricht der C-Denkweise:
 - * Was bekommt man, wenn man `pointer` dereferenziert? Funktion `fct` mit Signatur `<return value> fct(<input>)`
- ▶ Bei Zuweisung müssen Pointer `pointer` und Funktion denselben Aufbau haben
 - gleicher Return-Value
 - gleiche Input-Parameter-Liste
- ▶ Aufruf einer Funktion über Pointer wie bei normalem Funktionsaufruf!

158

Elementares Beispiel

```
1 #include <stdio.h>
2
3 void output1(char* string) {
4     printf("%s*\n",string);
5 }
6
7 void output2(char* string) {
8     printf("#s#\n",string);
9 }
10
11 main() {
12     char string[] = "Hello World";
13     void (*output)(char* string) = NULL;
14
15     // call function output1 via function pointer
16     output = output1;
17     output(string);
18
19     // call function output2 via function pointer
20     output = output2;
21     output(string);
22 }
```

- ▶ Deklaration eines Funktionspointers in Zeile 13
- ▶ Zuweisung auf Fkt.pointer in Zeile 16 + 20
- ▶ Fkt.aufruf über Pointer in Zeile 17 + 21
- ▶ Output:
Hello World
#Hello World#

159

Bisektionsverfahren 1/2

```
1 #include <stdio.h>
2 #include <assert.h>
3 #include <math.h>
4
5 // bisection returns an approximate root x0 of a
6 // continuous real-valued scalar function fct with
7 // fct(a) * fct(b) <= 0, for which the mean value
8 // theorem yields the existence of a root.
9 //
10 // bisection takes the function pointer of the function
11 // fct: [a,b] -> R and a tolerance tol and returns x0
12 // in (a,b) such that |x0 - x| <= tol, where fct(x) = 0.
13
14 double bisection(double (*fct)(double x),
15                 double a, double b, double tol);
16
17 // demo function f
18 double f(double x) {
19     return x*x + exp(x) - 2;
20 }
21
22 main() {
23     double a = 0;
24     double b = 10;
25     double tol = 1e-12;
26
27     double x = bisection(f,a,b,tol);
28     printf("Nullstelle x=%1.15e\n",x);
29 }
```

- ▶ Approximation der Nullstelle von $f(x) = x^2 + e^x - 2$ auf dem Intervall $[0, 10]$ auf Genauigkeit 10^{-12}
 - $f(0) = -1 < 0 < 98 + e^{10} = f(10)$

160

Bisektionsverfahren 2/2

```
31 double bisection(double (*fct)(double x),
32                 double a, double b, double tol) {
33     double m = 0;
34     double fa = 0;
35     double fm = 0;
36
37     // ensure that input is admissible
38     assert(a < b);
39     fa = fct(a);
40     assert(fa*fct(b) <= 0);
41
42     // iterate by interval bisection
43     while ( b-a > 2*tol) {
44         // compute interval midpoint and evaluate fct
45         m = (a+b)/2;
46         fm = fct(m);
47         if ( fa*fm <= 0 ) {
48             // the mean value theorem guarantees root in [a,m]
49             b = m;
50         }
51         else {
52             // the mean value theorem guarantees root in [m,b]
53             a = m;
54             fa = fm;
55         }
56     }
57     // as loop terminates, x in [a,b] and |b-a| <= 2*tol
58     // so that |x-m| <= tol for the midpoint m.
59     return m;
60 }
```

161

Strukturen

- ▶ Warum Strukturen?
- ▶ Members
- ▶ Punktoperator .
- ▶ Pfeiloperator ->
- ▶ Shallow Copy vs. Deep Copy

- ▶ struct
- ▶ typedef

162

Deklaration von Strukturen

- ▶ **Funktionen**
 - Zusammenfassung von versch. Befehlen, um Abstraktionsebenen zu schaffen
- ▶ **Strukturen**
 - Zusammenfassung von Variablen versch. Typs zu einem neuen Datentyp
 - Abstraktionsebenen bei Daten
- ▶ **Beispiel:** Verwaltung der EPROG-Teilnehmer
 - pro Student jeweils denselben Datensatz

```
1 // declaration of structure
2 struct _Student_ {
3     char* firstname; // Vorname
4     char* lastname;  // Nachname
5     int studentID;   // Matrikelnummer
6     int studiesID;   // Studienkennzahl
7     double final_test; // Punkte im Abschlusstest
8     double short_test; // Punkte in Kurztests
9     double exercise;  // Punkte in der Uebung
10 };
11
12 // declaration of corresponding data type
13 typedef struct _Student_ Student;
```

- ▶ Semikolon nach Struktur-Deklarations-Block
- ▶ erzeugt neuen Variablen-Typ Student

163

Strukturen & Members

- ▶ Datentypen einer Struktur heißen **Members**
- ▶ Zugriff auf Members mit Punkt-Operator
 - **var** Variable vom Typ **Student**
 - z.B. Member **var.firstname**

```
1 // declaration of structure
2 struct _Student_ {
3     char* firstname; // Vorname
4     char* lastname;  // Nachname
5     int studentID;   // Matrikelnummer
6     int studiesID;   // Studienkennzahl
7     double final_test; // Punkte im Abschlusstest
8     double short_test; // Punkte in Kurztests
9     double exercise; // Punkte in der Uebung
10 };
11
12 // declaration of corresponding data type
13 typedef struct _Student_ Student;
14
15 main() {
16     // declaration of variable var of type Student
17     Student var;
18     // assign values to members of struct variable
19     var.firstname = "Dirk";
20     var.lastname = "Praetorius";
21     var.studentID = 0;
22     var.studiesID = 680;
23     var.final_test = 25.;
24     var.short_test = 30.;
25     var.exercise = 35.;
26 }
```

164

Kombinierte Deklaration

```
1 // declaration of structure and corresponding data type
2 typedef struct _Student_ {
3     char* firstname;
4     char* lastname;
5     int studentID;
6     int studiesID;
7     double final_test;
8     double short_test;
9     double exercise;
10 } Student;
11
12 main() {
13     // declaration of variable var of type Student
14     Student var;
15     // assign values to members of struct variable
16     var.firstname = "Dirk";
17     var.lastname = "Praetorius";
18     var.studentID = 0;
19     var.studiesID = 680;
20     var.final_test = 25.;
21     var.short_test = 30.;
22     var.exercise = 35.;
23 }
```

- ▶ gleichzeitige Deklaration von **struct** und **typedef**
- ▶ anstelle von

```
struct _Student_ { ... };
typedef struct _Student_ Student;
```
- ▶ einfach

```
typedef struct _Student_ { ... } Student;
```

165

Bemerkungen zu Strukturen

- ▶ laut erstem C-Standard **verboten**:
 - Struktur als Input-Parameter einer Funktion
 - Struktur als Output-Parameter einer Funktion
 - Zuweisungsoperator (=) für gesamte Struktur
- ▶ in der Zwischenzeit **erlaubt, aber trotzdem**:
 - idR. Strukturen dynamisch über Pointer
 - Zuweisung (= Kopieren) selbst schreiben
 - Zuweisung (=) macht sog. *shallow copy*
- ▶ **Shallow copy**:
 - nur die oberste Ebene wird kopiert
 - d.h. Werte bei elementaren Variablen
 - d.h. Adressen bei Pointern
 - **also**: Kopie hat (physisch!) dieselben dynamischen Daten
- ▶ **Deep copy**:
 - alle Ebenen der Struktur werden kopiert
 - d.h. alle Werte bei elementaren Variablen
 - plus Kopie der dynamischen Inhalte (d.h. durch Pointer adressierter Speicher)

166

Strukturen: Speicher allokiieren

- ▶ Also Funktionen anlegen
 - **newStudent**: Allokieren und Initialisieren
 - **freeStudent**: Freigeben des Speichers
 - **cloneStudent**: Vollständige Kopie der Struktur inkl. dyn. Felder, z.B. Member **firstname** (sog. *deep copy*)
 - **copyStudent**: Kopie der obersten Ebene exkl. dynamischer Felder (sog. *shallow copy*)

```
1 Student* newStudent() {
2
3     // allocate memory for struct variable as before.
4     // Do not forget to use sizeof within malloc!
5
6     Student* pointer = malloc(sizeof(Student));
7     assert( pointer != NULL);
8
9     // dereferencing of the pointer yields a struct variable
10    // of type Student. The use of brackets is mandatory!
11
12    (*pointer).firstname = NULL;
13    (*pointer).lastname = NULL;
14    (*pointer).studentID = 0;
15    (*pointer).studiesID = 0;
16    (*pointer).final_test = 0.;
17    (*pointer).short_test = 0.;
18    (*pointer).exercise = 0.;
19
20    return pointer;
21 }
```

167

Strukturen & Pfeiloperator

- ▶ Im Programm ist `pointer` vom Typ `Student*`
- ▶ Zugriff auf Members, z.B. `(*pointer).firstname`
 - Bessere Schreibweise dafür `pointer->firstname`
- ▶ Strukturen **nie** statisch, **sondern stets** dynamisch
 - Verwende gleich `student` für Typ `Student*`
- ▶ Funktion `newStudent` lautet besser wie folgt

```
5 // declaration of structure and corresponding data type
6 typedef struct _Student_ {
7     char* firstname;
8     char* lastname;
9     int studentID;
10    int studiesID;
11    double final_test;
12    double short_test;
13    double exercise;
14 } Student;
15
16 // allocate and initialize new student
17 Student* newStudent() {
18     Student* student = malloc(sizeof(Student));
19     assert(student != NULL);
20
21     student->firstname = NULL;
22     student->lastname = NULL;
23     student->studentID = 0;
24     student->studiesID = 0;
25     student->final_test = 0.;
26     student->short_test = 0.;
27     student->exercise = 0.;
28
29     return student;
30 }
```

168

Strukturen: Speicher freigeben

- ▶ **Freigeben** einer dynamisch erzeugten Struktur-Variable vom Typ `Student`
- ▶ **Achtung:** Zugewiesenen dynamischen Speicher vor Freigabe des Strukturpointers freigeben
 - hier: `firstname`, `lastname`
 - alle anderen Members sind elementar

```
32 // free memory allocation
33 Student* delStudent(Student* student) {
34     assert(student != NULL);
35
36     // delete firstname, if memory has been allocated
37     if (student->firstname != NULL) {
38         free(student->firstname);
39     }
40
41     // delete lastname, if memory has been allocated
42     if (student->lastname != NULL) {
43         free(student->lastname);
44     }
45
46     // delete memory of struct variable and return NULL
47     free(student);
48     return NULL;
49 }
```

169

Shallow Copy

- ▶ **Kopieren** einer dynamisch erzeugten Struktur-Variable vom Typ `Student`
 - Kopieren der obersten Ebene einer Struktur exklusive dynamischen Speicher (Members!)

```
51 // shallow copy of student
52 Student* copyStudent(Student* student) {
53     Student* copy = newStudent();
54     assert(student != NULL);
55
56     // ACHTUNG: Pointer!
57     copy->firstname = student->firstname;
58     copy->lastname = student->lastname;
59
60     // Kopieren der harmlosen Daten
61     copy->studentID = student->studentID;
62     copy->studiesID = student->studiesID;
63     copy->final_test = student->final_test;
64     copy->short_test = student->short_test;
65     copy->exercise = student->exercise;
66
67     return copy;
68 }
```

- ▶ **ACHTUNG:** Original und Shallow-Kopie teilen sich die dynamischen Felder
 - d.h. physisch **derselbe** `firstname` und `lastname`
 - Änderung `firstname` vom Original ändert auch `firstname` der Shallow-Kopie
 - Anwendung von `freeStudent` auf Kopie und Shallow-Kopie liefert Laufzeitfehler
 - * Nach erstem Aufruf ist bereits Speicher von `firstname` und `lastname` freigegeben

170

Deep Copy

- ▶ **Kopieren** einer dynamisch erzeugten Struktur-Variable vom Typ `Student`
- ▶ Vollständige Kopie, inkl. dynamischem Speicher
- ▶ **Achtung:** Zugewiesenen dynamischen Speicher mitkopieren

```
70 // deep copy of student
71 Student* cloneStudent(Student* student) {
72     Student* copy = newStudent();
73     int length = 0;
74     assert(student != NULL);
75
76     // full copy of firstname
77     if (student->firstname != NULL) {
78         length = strlen(student->firstname);
79         copy->firstname = malloc((length+1)*sizeof(char));
80         assert(copy->firstname != NULL);
81         strcpy(copy->firstname, student->firstname);
82     }
83
84     // full copy of lastname
85     if (student->lastname != NULL) {
86         length = strlen(student->lastname);
87         copy->lastname = malloc((length+1)*sizeof(char));
88         assert(copy->lastname != NULL);
89         strcpy(copy->lastname, student->lastname);
90     }
91
92     // copy of elementary data
93     copy->studentID = student->studentID;
94     copy->studiesID = student->studiesID;
95     copy->final_test = student->final_test;
96     copy->short_test = student->short_test;
97     copy->exercise = student->exercise;
98
99     return copy;
100 }
```

171

Arrays von Strukturen

- ▶ Ziel: Array mit Teilnehmern von EPROG erstellen
- ▶ keine statischen Arrays verwenden, sondern dynamische Arrays
 - Studenten-Daten sind vom Typ `Student`
 - also intern verwaltet mittels Typ `Student*`
 - also Array vom Typ `Student**`

```
1 // Declare array.
2 Student** participant = malloc(N*sizeof(Student*));
3
4 // Allocate memory for participants
5 for (j=0; j<N; ++j){
6     participant[j] = newStudent();
7 }
```

- ▶ Zugriff auf Members wie vorher
 - `participant[j]` ist vom Typ `Student*`
 - also z.B. `participant[j]->firstname`

172

Schachtelung von Strukturen

```
1 typedef struct _Address_ {
2     char* street;
3     char* number;
4     char* city;
5     char* zip;
6 } Address;
7
8 typedef struct _Employee_ {
9     char* firstname;
10    char* lastname;
11    char* title;
12    Address* home;
13    Address* office;
14 } Employee;
```

- ▶ Mitarbeiterdaten strukturieren
 - Name, Wohnadresse, Büroadresse
- ▶ Für `employee` vom Typ `Employee*`
 - `employee->home` Pointer auf `Address`
 - also z.B. `employee->home->city`
- ▶ Achtung beim Allokieren, Freigeben, Kopieren

173

Strukturen & Math

- ▶ Strukturen für mathematische Objekte:
 - Punkte im \mathbb{R}^3
 - allgemeine Vektoren
 - Matrizen

Abstand zweier Punkte im \mathbb{R}^3

```
1 #include <stdlib.h>
2 #include <stdio.h>
3 #include <assert.h>
4 #include <math.h>
5
6 typedef struct _Vector3_ {
7     double x;
8     double y;
9     double z;
10 } Vector3;
11
12 Vector3* newVector3(double x, double y, double z) {
13     Vector3* v = malloc(sizeof(Vector3));
14     assert(v != NULL); // falls Fehler bei Allokation
15     v->x = x;
16     v->y = y;
17     v->z = z;
18     return v;
19 }
20
21 Vector3* delVector3(Vector3* v) {
22     assert(v != NULL); // falls Vektor nicht existiert
23     free(v);
24     return NULL;
25 }
26
27 double dist(Vector3* v, Vector3* w) {
28     assert(v != NULL); // falls Vektor v nicht existiert
29     assert(w != NULL); // falls Vektor w nicht existiert
30     return sqrt( (v->x - w->x)*(v->x - w->x)
31                + (v->y - w->y)*(v->y - w->y)
32                + (v->z - w->z)*(v->z - w->z) );
33 }
34
35 main() {
36     Vector3* v = newVector3(1,1,1);
37     Vector3* w = newVector3(1,2,3);
38     printf("dist(x,y) = %f\n", dist(v,w));
39     v = delVector3(v);
40     w = delVector3(w);
41 }
```

174

175

Strukturen und Vektoren

```
1 #ifndef INCLUDE_VECTOR_
2 #define INCLUDE_VECTOR_
3
4 #include <stdio.h>
5 #include <stdlib.h>
6 #include <assert.h>
7 #include <math.h>
8
9 // declaration of new data type Vector
10 typedef struct _Vector_ {
11     int n;           // Dimension
12     double* entry;  // Vector coefficients
13 } Vector;
14
15 // allocate and initialize new vector of length n
16 Vector* newVector(int n);
17
18 // free storage of allocated vector and return NULL
19 Vector* delVector(Vector* X);
20
21 // return length of a vector
22 int getVectorN(Vector* X);
23
24 // return coefficient Xi of vector X
25 double getVectorEntry(Vector* X, int i);
26
27 // assign new value to coefficient Xi of vector X
28 void setVectorEntry(Vector* X, int i, double Xi);
29
30 // some example functions...
31 Vector* inputVector();
32 double normVector(Vector* X);
33 double productVector(Vector* X, Vector* Y);
34
35 #endif
```

- ▶ Datentyp zur Speicherung von $x \in \mathbb{R}^n$
 - Dimension n vom Typ `int`
 - Datenfeld x_j zur Speicherung von `double`

176

Allokieren eines Vektors

- ▶ Funktion bekommt Länge $n \in \mathbb{N}$ des Vektors
- ▶ allokiert Struktur, weist Dimension n zu
- ▶ allokiert und initialisiert Datenfeld

```
3 Vector* newVector(int n) {
4     int i = 0;
5     Vector* X = NULL;
6
7     assert(n > 0);
8
9     X = malloc(sizeof(Vector));
10    assert(X != NULL);
11
12    X->n = n;
13    X->entry = malloc(n*sizeof(double));
14    assert(X->entry != NULL);
15
16    for (i=0; i<n; ++i) {
17        X->entry[i] = 0;
18    }
19    return X;
20 }
```

Freigeben eines Vektors

- ▶ Datenfeld freigeben
- ▶ Struktur freigeben
- ▶ `NULL` zurückgeben

```
22 Vector* delVector(Vector* X) {
23     assert(X != NULL);
24     free(X->entry);
25     free(X);
26
27     return NULL;
28 }
```

177

Zugriff auf Strukturen

- ▶ Es ist guter (aber seltener) Programmierstil, auf Members einer Struktur nicht direkt zuzugreifen
- ▶ Stattdessen lieber
 - für jeden Member `set` und `get` schreiben

```
30 int getVectorN(Vector* X) {
31     assert(X != NULL);
32     return X->n;
33 }
34
35 double getVectorEntry(Vector* X, int i) {
36     assert(X != NULL);
37     assert((i >= 0) && (i < X->n));
38     return X->entry[i];
39 }
40
41 void setVectorEntry(Vector* X, int i, double Xi){
42     assert(X != NULL);
43     assert((i >= 0) && (i < X->n));
44     X->entry[i] = Xi;
45 }
```

- ▶ Wenn kein `set`, dann Schreiben nicht erlaubt!
- ▶ Wenn kein `get`, dann Lesen nicht erlaubt!
- ▶ Dieses Vorgehen erlaubt leichte Umstellung der Datenstruktur bei späteren Modifikationen
- ▶ Dieses Vorgehen vermeidet Inkonsistenzen der Daten und insbesondere Laufzeitfehler

178

Beispiel: Vektor einlesen

```
47 Vector* inputVector() {
48     Vector* X = NULL;
49     int i = 0;
50     int n = 0;
51     double input = 0;
52
53     printf("Dimension des Vektors n=");
54     scanf("%d", &n);
55     assert(n > 0);
56
57     X = newVector(n);
58     assert(X != NULL);
59
60     for (i=0; i<n; ++i) {
61         input = 0;
62         printf("x[%d]=", i);
63         scanf("%lf", &input);
64         setVectorEntry(X, i, input);
65     }
66
67     return X;
68 }
69 }
```

- ▶ Einlesen von $n \in \mathbb{N}$ und eines Vektors $x \in \mathbb{R}^n$

179

Beispiel: Euklidische Norm

```
71 double normVector(Vector* X) {
72
73     double Xi = 0;
74     double norm = 0;
75     int n = 0;
76     int i = 0;
77
78     assert(X != NULL);
79
80     n = getVectorN(X);
81
82     for (i=0; i<n; ++i) {
83         Xi = getVectorEntry(X,i);
84         norm = norm + Xi*Xi;
85     }
86     norm = sqrt(norm);
87
88     return norm;
89 }
```

► Berechne $\|x\| := \left(\sum_{j=1}^n x_j^2 \right)^{1/2}$ für $x \in \mathbb{R}^n$

180

Beispiel: Skalarprodukt

```
91 double productVector(Vector* X, Vector* Y) {
92
93     double Xi = 0;
94     double Yi = 0;
95     double product = 0;
96     int n = 0;
97     int i = 0;
98
99     assert(X != NULL);
100    assert(Y != NULL);
101
102    n = getVectorN(X);
103    assert(n == getVectorN(Y));
104
105    for (i=0; i<n; ++i) {
106        Xi = getVectorEntry(X,i);
107        Yi = getVectorEntry(Y,i);
108        product = product + Xi*Yi;
109    }
110
111    return product;
112 }
```

► Berechne $x \cdot y := \sum_{j=1}^n x_j y_j$ für $x, y \in \mathbb{R}^n$

181

Ganzzahlen

► Bits, Bytes etc.

► short, int, long

► unsigned

182

Speichereinheiten

- 1 Bit = 1 b = kleinste Einheit, speichert 0 oder 1
- 1 Byte = 1 B = Zusammenfassung von 8 Bit
- 1 Kilobyte = 1 KB = 1024 Byte
 - 1024 = 2^{10} nächste 2er Potenz an 1000
- 1 Megabyte = 1 MB = 1024 KB
- 1 Gigabyte = 1 GB = 1024 MB
- 1 Terabyte = 1 TB = 1024 GB

Speicherung von Zahlen

- Zur Speicherung von Zahlen wird je nach Datentyp fixe Anzahl an Bytes verwendet
- **Konsequenz:**
 - pro Datentyp gibt es nur endlich viele Zahlen
 - * es gibt jeweils größte und kleinste Zahl!

Ganzzahlen

- Mit n Bits kann man 2^n Ganzzahlen darstellen
- Standardmäßig betrachtet man
 - entweder alle ganzen Zahlen in $[0, 2^n - 1]$
 - oder alle ganzen Zahlen in $[-2^{n-1}, 2^{n-1} - 1]$

183

Integer-Arithmetik

- ▶ exakte Arithmetik innerhalb `[intmin, intmax]`
- ▶ **Überlauf**: Ergebnis von Rechnung $> \text{intmax}$
- ▶ **Unterlauf**: Ergebnis von Rechnung $< \text{intmin}$
- ▶ Integer-Arithmetik ist i.d.R. **Modulo-Arithmetik**
 - d.h. Zahlenbereich ist geschlossen
 - * `intmax + 1` liefert `intmin`
 - * `intmin - 1` liefert `intmax`
 - nicht im C-Standard festgelegt!

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int j = 0;
5     int n = 8*sizeof(int); // number bits per int
6     int min = 1;
7
8     // compute 2^(n-1)
9     for (j=1; j<n; ++j) {
10        min = 2*min;
11    }
12    printf("n=%d, min=%d, max=%d\n",n,min,min-1);
13 }
```

- ▶ man beobachtet $[-2^{n-1}, 2^{n-1} - 1]$ mit $n = 32$
- ▶ Output:
n=32, min=-2147483648, max=2147483647

2 Milliarden sind nicht viel!

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     int n = 1;
5     int factorial = 1;
6
7     do {
8         ++n;
9         factorial = n*factorial;
10        printf("n=%d, n!=%d\n",n,factorial);
11    } while (factorial < n*factorial);
12
13    printf("n=%d, n!>%d\n",n+1,n*factorial);
14 }
```

▶ Output:

```
n=2, n!=2
n=3, n!=6
n=4, n!=24
n=5, n!=120
n=6, n!=720
n=7, n!=5040
n=8, n!=40320
n=9, n!=362880
n=10, n!=3628800
n=11, n!=39916800
n=12, n!=479001600
n=13, n!=1932053504
n=14, n!>-653108224
```

- ▶ **Achtung**: $13! = 13 \cdot 12! > 13 \cdot 479 \cdot 10^6 > 6$ Milliarden

Variablentypen short, int, long

- ▶ n Bits $\Rightarrow 2^n$ Ganzzahlen
- ▶ In C sind **short**, **int**, **long** mit Vorzeichen
 - d.h. ganze Zahlen in $[-2^{n-1}, 2^{n-1} - 1]$
- ▶ Ganzzahlen ≥ 0 durch zusätzliches **unsigned**
 - d.h. ganze Zahlen in $[0, 2^n - 1]$
 - z.B. `unsigned int var1 = 0;`
- ▶ Es gilt stets `short ≤ int ≤ long ≤ long long`
 - Standardlängen:
 - * 2 Byte (**short**)
 - * 4 Byte (**int**)
 - * 8 Byte (**long long**, seit C99)
 - In der Regel gilt `int = long`
- ▶ Platzhalter in **printf** und **scanf**

Datentyp	printf	scanf
short	%hi	%hi
int	%d / %i	%d / %i
long long	%lli	%lli
unsigned short	%hu	%hu
unsigned int	%u	%u
unsigned long long	%lli	%llu

- ▶ <https://en.wikipedia.org/wiki/C.data.types>
- ▶ Für die UE nur **int** verwenden

Variablentypen char

- ▶ **char** ist Ganzzahl-Typ, idR. 1 Byte
- ▶ Zeichen sind intern Ganzzahlen zugeordnet
 - idR. ASCII-Code
 - siehe z.B. <http://www.asciitable.com/>
- ▶ ASCII-Code eines Buchstabens erhält man durch einfache Hochkommata
 - Deklaration `char var = 'A'`; weist `var` ASCII-Code des Buchstabens `A` zu
- ▶ Platzhalter eines Zeichens für **printf** und **scanf**
 - `%c` als Zeichen
 - `%d` als Ganzzahl
- ▶ **ACHTUNG**: `'A'` erzeugt **char**, `"A"` erzeugt **char***

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4     char var = 'A';
5
6     printf("sizeof(var) = %d\n", sizeof(var));
7     printf("%c %d\n",var,var);
8 }
```

▶ Output:

```
sizeof(var) = 1
A 65
```

Gleitkommazahlen

- ▶ analytische Binärdarstellung
 - ▶ Gleitkomma-Zahlsystem $\mathbb{F}(2, M, e_{\min}, e_{\max})$
 - ▶ schlecht gestellte Probleme
 - ▶ Rechenfehler und Gleichheit
- ▶ float, double

188

Gleitkommadarstellung 1/3

- ▶ **SATZ:** Zu $x \in \mathbb{R}$ existieren
- Vorzeichen $\sigma \in \{\pm 1\}$
 - Ziffern $a_k \in \{0, 1\}$
 - Exponent $e \in \mathbb{Z}$
- sodass gilt $x = \sigma \left(\sum_{k=1}^{\infty} a_k 2^{-k} \right) 2^e$
- ▶ Darstellung ist nicht eindeutig, da z.B. $1 = \sum_{k=1}^{\infty} 2^{-k}$
- geometrische Reihe: $\sum_{k=0}^{\infty} 2^{-k} = \frac{1}{1 - 1/2} = 2$
 - z.B. $\left(\sum_{k=1}^{\infty} 2^{-k} \right) 2^0 = \sum_{k=1}^{\infty} 2^{-k} = 1 = \left(\sum_{k=2}^{\infty} 2^{-k} \right) 2^1$

Bemerkungen zum Dezimalsystem

- ▶ Satz gilt für jede Basis $b \in \mathbb{N}_{\geq 2}$
- Ziffern dann $a_j \in \{0, 1, \dots, b-1\}$
- ▶ Dezimalsystem $b = 10$ ist übliches System
- $47.11 = (4 \cdot 10^{-1} + 7 \cdot 10^{-2} + 1 \cdot 10^{-3} + 1 \cdot 10^{-4}) \cdot 10^2$
 - * $a_1 = 4, a_2 = 7, a_3 = 1, a_4 = 1, e = 2$
- ▶ Nichteindeutigkeit im Dezimalsystem: $0.\bar{9} = 1$

189

Gleitkommadarstellung 2/3

- ▶ **SATZ:** Zu $x \in \mathbb{R}$ existieren
- Vorzeichen $\sigma \in \{\pm 1\}$
 - Ziffern $a_k \in \{0, 1\}$
 - Exponent $e \in \mathbb{Z}$
- sodass gilt $x = \sigma \left(\sum_{k=1}^{\infty} a_k 2^{-k} \right) 2^e$
- ▶ Darstellung ist nicht eindeutig, da z.B. $1 = \sum_{k=1}^{\infty} 2^{-k}$

Bemerkungen zum Binärsystem

- ▶ Mit $b = 2$ sind gekürzte Brüche genau dann als endliche Summe darstellbar (nicht als unendliche Reihe), wenn der Nenner Zweierpotenz ist:
- $\sum_{k=1}^M a_k 2^{-k}$ hat Nenner mit Zweierpotenz
 - Eindeutigkeit der Primfaktorzerlegung
 - formaler Beweis = (leichte) freiwillige Übung
- ▶ z.B. keine exakte Darstellung für $1/10$ für $b = 2$

190

Gleitkommadarstellung 3/3

- ▶ **SATZ:** Zu $x \in \mathbb{R}$ existieren
- Vorzeichen $\sigma \in \{\pm 1\}$
 - Ziffern $a_k \in \{0, 1\}$
 - Exponent $e \in \mathbb{Z}$
- sodass gilt $x = \sigma \left(\sum_{k=1}^{\infty} a_k 2^{-k} \right) 2^e$
- ▶ Darstellung ist nicht eindeutig, da z.B. $1 = \sum_{k=1}^{\infty} 2^{-k}$

Gleitkommazahlen

- ▶ Gleitkommazahlsystem $\mathbb{F}(2, M, e_{\min}, e_{\max}) \subset \mathbb{Q}$
- endliche Teilmenge!
 - Mantissenlänge $M \in \mathbb{N}$
 - Exponentialschranken $e_{\min} < 0 < e_{\max}$
- ▶ $x \in \mathbb{F}$ hat Darstellung $x = \sigma \left(\sum_{k=1}^M a_k 2^{-k} \right) 2^e$ mit
- Vorzeichen $\sigma \in \{\pm 1\}$
 - Ziffern $a_j \in \{0, 1\}$ mit $a_1 = 1$ oder $e = e_{\min}$
 - * normalisierte Gleitkommazahl ($a_1 = 1$)
 - * denormalisierte Gleitkommazahl ($e = e_{\min}$)
 - Exponent $e \in \mathbb{Z}$ mit $e_{\min} \leq e \leq e_{\max}$
- ▶ Darstellung von $x \in \mathbb{F}$ ist eindeutig (Übung!)
- ▶ Ziffer a_1 muss nicht gespeichert werden
- implizites erstes Bit

191

Beweis von Satz

- ▶ o.B.d.A. $x \geq 0$ — Multipliziere ggf. mit $\sigma = -1$.
- ▶ Sei $e \in \mathbb{N}_0$ mit $0 \leq x < 2^e$
- ▶ o.B.d.A. $x < 1$ — Teile durch 2^e
- ▶ Konstruktion der Ziffern a_j durch Bisektion:
- ▶ **Induktionsbehauptung:** Ex. Ziffern $a_j \in \{0, 1\}$
 - sodass $x_n := \sum_{k=1}^n a_k 2^{-k}$ erfüllt $x \in [x_n, x_n + 2^{-n})$
- ▶ **Induktionsanfang:** Es gilt $x \in [0, 1)$
 - falls $x \in [0, 1/2)$, wähle $a_1 = 0$, d.h. $x_1 = 0$
 - falls $x \in [1/2, 1)$, wähle $a_1 = 1$, d.h. $x_1 = 1/2$
 - * $x_1 = a_1/2 \leq x$
 - * $x < (a_1 + 1)/2 = x_1 + 2^{-1}$
- ▶ **Induktionsschritt:** Es gilt $x \in [x_n, x_n + 2^{-n})$
 - falls $x \in [x_n, x_n + 2^{-(n+1)})$, wähle $a_{n+1} = 0$, d.h. $x_{n+1} = x_n$
 - falls $x \in [x_n + 2^{-(n+1)}, x_n + 2^{-n})$, wähle $a_{n+1} = 1$
 - * $x_{n+1} = x_n + a_{n+1}2^{-(n+1)} \leq x$
 - * $x < x_n + (a_{n+1} + 1)2^{-(n+1)} = x_{n+1} + 2^{-(n+1)}$
- ▶ Es folgt $|x_n - x| \leq 2^{-n}$, also $x = \sum_{k=1}^{\infty} a_k 2^{-k}$

192

Arithmetik für Gleitkommazahlen

- ▶ Ergebnis **Inf**, **-Inf** bei Überlauf (oder **1./0.**)
 - $+\infty$ (Inf), $-\infty$ (-Inf)
- ▶ Ergebnis **NaN**, falls nicht definiert (z.B. **0./0.**)
 - *not a number* (NaN)
- ▶ Arithmetik ist approximativ, nicht exakt

Schlechte Kondition

- ▶ Eine Aufgabe ist **numerisch schlecht gestellt** bzw. **schlecht konditioniert**, falls kleine Änderungen der Daten auf große Änderungen im Ergebnis führen
 - z.B. hat Dreieck mit gegebenen Seitenlängen einen rechten Winkel?
 - z.B. liegt gegebener Punkt auf Kreisrand?
- ▶ **Implementierung sinnlos, weil Ergebnis zufällig!**
- ▶ bessere Fragestellungen:
 - Hat ein Dreieck mit gegebenen Seitenlängen einen Winkel $\approx 90^\circ$?
 - Liegt ein Punkt in einem ε -Schlauch um den Kreisrand?

193

Rechenfehler

- ▶ **Aufgrund von Rechenfehlern darf man Gleitkommazahlen nie auf Gleichheit überprüfen**
 - Statt $x = y$ prüfen, ob Fehler $|x - y|$ klein ist
 - z.B. $|x - y| \leq \varepsilon \cdot \max\{|x|, |y|\}$ mit $\varepsilon = 10^{-13}$

```

1 #include <stdio.h>
2 #include <math.h>
3
4 main() {
5     double x = (116./100.)*100.;
6
7     printf("x=%f\n", x);
8     printf("floor(x)=%f\n", floor(x));
9
10    if (x==116.) {
11        printf("There holds x==116\n");
12    }
13    else {
14        printf("Surprise, surprise!\n");
15    }
16 }
```

- ▶ Output:

```

x=116.000000
floor(x)=115.000000
Surprise, surprise!
```

- ▶ Begründung: $116./100. < \frac{116}{100}$
 - also $116./100.*100. < 116$

194

Variablentypen float, double

```

1 #include <stdio.h>
2 main() {
3     double x = 2./3.;
4     float y = 2./3.;
5     printf("%f, %1.16e\n", x, x);
6     printf("%f, %1.7e\n", y, y);
7 }
```

- ▶ **float** ist idR. einfache Genauigkeit nach IEEE-754-Standard
 - $\mathbb{F}(2, 24, -126, 127) \rightarrow 4 \text{ Byte} = 32 \text{ Bit}$
 - * $32\text{b} = 8\text{b Exp.} + 23\text{b Mantisse} + 1\text{b Vorz.}$
 - sog. *single precision*
 - ca. 7 signifikante Dezimalstellen
- ▶ **double** ist idR. doppelte Genauigkeit nach IEEE-754-Standard
 - $\mathbb{F}(2, 53, -1022, 1023) \rightarrow 8 \text{ Byte} = 64 \text{ Bit}$
 - * $64\text{b} = 11\text{b Exp.} + 52\text{b Mantisse} + 1\text{b Vorz.}$
 - sog. *double precision*
 - ca. 16 signifikante Dezimalstellen

- ▶ Platzhalter in **printf** und **scanf**

Datentyp	printf	scanf
float	%f	%f
double	%f	%lf

- Platzhalter **%1.16e** für Gleitkommadarstellung
- siehe **man 3 printf**

- ▶ Output:

```

0.666667, 6.666666666666666666666666e-01
0.666667, 6.6666669e-01
```

195

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>

196

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>

197

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**

198

Hello World!

```
1 #include <iostream>
2
3 int main() {
4     std::cout << "Hello World!" << std::endl;
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**
 - Durch Konzept **nachname::vorname** kann man Funktionsnamen **vorname** mehrfach verwenden!
 - * bei verschiedenen **nachname**
- ▶ **std::cout** ist die Standard-Ausgabe (= Shell)
 - Operator **<<** übergibt rechtes Argument
 - kann mehrere **<<** mit einem **std::cout** verwenden
- ▶ **std::endl** erzeugt neue Zeile (end of line)
 - ersetzt **\n** aus C
- ▶ Output:
Hello World!

199

Verwendung von using

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 int main() {
6     cout << "Hello World!" << endl;
7     return 0;
8 }
```

- ▶ Zeile 2: `using std::cout;`
 - `cout` gehört zum *Name Space std*
 - darf im Folgenden abkürzen `cout` statt `std::cout`
- ▶ Zeile 3: `using std::endl;` analog
- ▶ Output:
Hello World!

200

Shell-Input für main

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

- ▶ `<<` arbeitet mit verschiedenen Typen
- ▶ kann mehrfache Ausgabe machen `<<`
- ▶ 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!
```

201

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 << "Please enter an integer value: ";
12     cin >> x;
13     cout << "Please enter two double values: ";
14     cin >> y >> z;
15
16     cout << x << " * " << y << " / " << z;
17     cout << " = " << x*y/z << endl;
18
19     return 0;
20 }
```

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

202

Datentyp bool

- ▶ `bool`
- ▶ `true`
- ▶ `false`

203

Datentyp bool

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

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

204

Klassen

- ▶ Klassen
- ▶ Instanzen
- ▶ Objekte

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

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

205

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.

206

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
 - wird in der VO später behandelt (\leadsto Vererbung)

207

Beispiel 1/2

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

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

208

Beispiel 2/2

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

- ▶ Zeile 8–11: Deklaration von `public`-Methoden
- ▶ Zeile 15: Objekt `tri` vom Typ `Triangle` deklarieren
- ▶ Zeile 17: Zugriff auf `private`-Member
- ▶ Beim Kompilieren tritt Fehler auf
 - `triangle2.cpp:17: error: 'x' is a private member of 'Triangle'`
 - `triangle2.cpp:3: note: declared private here`
- ▶ daher: `get/set`-Funktionen, falls nötig

209

Methoden implementieren

```
1 #include <cmath>
2 #include <iostream>
3
4 class Triangle {
5 private:
6     double x[2];
7     double y[2];
8     double z[2];
9
10 public:
11     // methods to access vertices
12     void setX(double, double);
13     void setY(double, double);
14     void setZ(double, double);
15     // method to compute the area of the triangle
16     double getArea();
17 };
18
19 void Triangle::setX(double x0, double x1) {
20     x[0] = x0;
21     x[1] = x1;
22 }
```

- ▶ Implementierung wie bei anderen Funktionen
 - **aber**: direkter Zugriff auf Members der Klasse
- ▶ Signatur: `type ClassName::fctName(input)`
 - `type` ist Rückgabewert (`void, double` etc.)
 - `input` = Übergabeparameter wie in C
- ▶ **Wichtig** (Zeile 19): `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

210

Methoden aufrufen 1/2

```
1 #include <cmath>
2 #include <iostream>
3
4 class Triangle {
5 private:
6     double x[2];
7     double y[2];
8     double z[2];
9
10 public:
11     // methods to access vertices
12     void setX(double, double);
13     void setY(double, double);
14     void setZ(double, double);
15     // method to compute the area of the triangle
16     double getArea();
17 };
18
19 void Triangle::setX(double x0, double x1) {
20     x[0] = x0;
21     x[1] = x1;
22 }
23
24 void Triangle::setY(double y0, double y1) {
25     y[0] = y0;
26     y[1] = y1;
27 }
28
29 void Triangle::setZ(double z0, double z1) {
30     z[0] = z0;
31     z[1] = z1;
32 }
33
34 double Triangle::getArea() {
35     // use the 2x2 determinant formula to compute the area
36     return 0.5*fabs( (y[0]-x[0])*(z[1]-x[1])
37                    - (z[0]-x[0])*(y[1]-x[1]) );
38 }
```

211

Methoden aufrufen 2/2

▶ Klassendeklaration

```
4 class Triangle {
5 private:
6     double x[2];
7     double y[2];
8     double z[2];
9
10 public:
11     // methods to access vertices
12     void setX(double, double);
13     void setY(double, double);
14     void setZ(double, double);
15     // method to compute the area of the triangle
16     double getArea();
17 };
```

▶ Methoden aufrufen

```
40 using std::cout;
41 using std::endl;
42
43 int main() {
44     Triangle tri;
45     tri.setX(0.0,0.0);
46     tri.setY(1.0,0.0);
47     tri.setZ(0.0,1.0);
48     cout << "area = " << tri.getArea() << endl;
49     return 0;
50 }
```

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

212

Methoden direkt implementieren

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

- ▶ kann Methoden auch in Klasse implementieren
- ▶ ist aber unübersichtlicher ⇒ **besser nicht!**
 - verhindert Bilden vernünftiger Bibliotheken
 - d.h. **Trennung von Header-File und Source-Code**

213

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 = "Hello";
9     string str2 = "World";
10    string str3 = str1 + " " + str2;
11
12    cout << str3 << "! ";
13    str3.replace(6,5, "Peter");
14    cout << str3 << "! ";
15
16    printf("%s?\n",str3.c_str());
17
18    return 0;
19 }
```

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

214

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 error: x is private in MyClass
27     var3.x[0] = 0;
28
29     return 0;
30 }
```

- ▶ Strukturen = Klassen, wobei alle Members **public**
 - d.h. `MyStruct` = `MyStructClass`
- ▶ besser direkt **class** verwenden
- ▶ Default-Qualifier in Klassen ist **private**
 - vgl. `MyClass` und Syntax-Fehler in Zeile 26

215

Funktionen

- ▶ Default-Parameter & Optionaler Input
- ▶ Überladen

216

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
 - in der Signatur durch `= wert`
 - der Input-Parameter ist dann optional
 - bekommt Default-Wert, falls nicht übergeben
- ▶ Beispiel: Zeile 1 erlaubt Aufrufe
 - `f(x,y,z)`
 - `f(x,y)` und `z` bekommt implizit den Wert `z = 0`

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

- ▶ darf nur für hintere Parameter verwendet werden
 - d.h. nach optionalem Parameter darf kein obligatorischer Parameter mehr folgen
 - damit für den Compiler die Zuordnung der Übergabe-Parameter eindeutig ist anhand der Anzahl!

217

Default-Parameter 2/2

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

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

218

Überladen von Funktionen 1/2

```
1 void f(char*);
2 double f(char*, double);
3 int f(char*, char*, int = 1);
4 int f(char*); // syntax error
5 double f(char*, int = 0); // syntax error
```

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

219

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)

220

Überladen vs. Default-Parameter

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

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

221

Naive Fehlerkontrolle

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

- assert
- #include <cassert>

222

Wozu Zugriffskontrolle?

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

- Großteil der Entwicklungszeit geht in Fehlersuche von Laufzeitfehlern!
- **Möglichst viele Fehler bewusst abfangen!**
 - Fkt-Input auf Konsistenz prüfen, ggf. Abbruch
 - garantieren, dass Funktions-Output zulässig!
 - Zugriff kontrollieren mittels **get** und **set**
 - * reine Daten sollten immer **private** sein
 - * Benutzer kann/darf Daten nicht verpfuschen!
 - * **in C = soll nicht, in C++ = kann nicht!**
- Wie sinnvolle Werte sicherstellen?
 - Zeile 10: Nenner eines Bruchs muss $\neq 0$ sein
 - mögliche Fehlerquellen direkt ausschließen
 - Programm bestimmt, was Nutzer darf!
- kontrollierter Abbruch mit C-Bibliothek **assert.h**
 - Einbinden **#include <cassert>**
 - Abbruch mit Ausgabe der Zeile im Source-Code

223

C-Bibliothek assert.h 1/2

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

- ▶ Zeile 2: Einbinden der C-Bibliothek `assert.h`

224

C-Bibliothek assert.h 2/2

```
34 void Fraction::setDenominator(int n) {
35     // ensure that denominator is not 0
36     assert(n != 0);
37
38     // ensure that sign of fraction is stored in numerator,
39     // i.e., the denominator is always positive
40     if (n > 0) {
41         denominator = n;
42     }
43     else {
44         denominator = -n;
45         numerator = -numerator;
46     }
47 }
48
49 int main() {
50     Fraction x;
51     x.setNumerator(1);
52     x.setDenominator(3);
53     x.print();
54     x.setDenominator(0);
55     return 0;
56 }
```

- ▶ `assert(condition)`; bricht ab, falls `condition` falsch
 - d.h. kontrollierter Fehlerabbruch mit Hinweis zur Fehlersuche
- ▶ Output:
 - 1/3
 - Assertion failed: (n>0), function setDenominator, file assert.cpp, line 36.

225

Konventionen

- ▶ Namens-Konventionen
 - ▶ Deklaration von Variablen
 - ▶ File-Konventionen
- ```
▶ for(int j=0; j<dim; ++j) { ... }
```

226

## Namens-Konventionen

- ▶ lokale Variablen
  - `klein_mit_underscores`
- ▶ globale Variablen
  - `klein_mit_underscore_hinten_`
- ▶ Präprozessor-Konstanten
  - `GROSS_MIT_UNDERSCORE`
- ▶ in Header-Files (als Include-Guard)
  - `INCLUDE_NAME_DER_KLASSE_`
- ▶ Funktionen / Methoden
  - `erstesWortKleinKeineUnderscores`
- ▶ Strukturen / Klassen
  - `ErstesWortGrossKeineUnderscores`

227

## Variablen-Deklaration

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

- ▶ in C++ überall erlaubt, aber schlechter Stil!
  - wird schnell unübersichtlich!
- ▶ **Konvention:** Deklaration nur am Blockanfang
  - ist übersichtlicher!
- ▶ **zwei Ausnahmen:**
  - Zählvariable bei **for**-Schleife
    - \* üblicherweise im Schleifen-Kopf deklariert
    - \* ist lokale Variable, bis Schleife terminiert
  - **assert** vor Deklaration ist OK!

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

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

228

## File-Konventionen

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

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

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

229

## triangle.hpp

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

230

## triangle.cpp

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

- ▶ Erzeuge Objekt-Code aus Source (Option **-c**)
  - **g++ -c triangle.cpp** liefert **triangle.o**
- ▶ Kompilieren **g++ triangle.cpp** liefert Fehler
  - Linker **ld** scheitert, da kein **main** vorhanden

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

231

## triangle\_main.cpp

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

- ▶ Wh: Kompilieren der Bibliothek
  - `g++ -c triangle.cpp`
    - \* erzeugt Objekt-Code `triangle.o`
- ▶ Kompilieren des Hauptprogramms
  - `g++ triangle_main.cpp triangle.o`
    - \* kompiliert Source-Code
    - \* bindet Objekt-Code `triangle.o` ein
    - \* linkt den Code inkl. Standardbibliotheken
- ▶ oder Verwendung von `make` analog zu C
- ▶ **Output:** area = 0.5

232

## Konstruktor & Destruktor

- ▶ Konstruktor
- ▶ Destruktor
- ▶ Überladen von Methoden
- ▶ optionaler Input & Default-Parameter
- ▶ Schachtelung von Klassen
  
- ▶ `this`
- ▶ `ClassName(...)`
- ▶ `~ClassName()`
- ▶ Operator :

233

## Konstruktor & Destruktor

- ▶ Konstruktor = **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()`
- ▶ Konstruktor kann überladen werden, z.B.
  - kein Input  $\Rightarrow$  Vektor der Länge Null
  - ein Input `dim`  $\Rightarrow$  Null-Vektor der Länge `dim`
  - Input `dim, val`  $\Rightarrow$  Vektor der Länge `dim` mit Einträgen `val`
- ▶ Destruktor = **automatisch bei Lifetime-Ende**
  - Freigabe von dynamischem Speicher
  - es gibt nur Standarddestruitor: `~className()`
    - \* kein Input, kein Output
    - \* kann insbesondere nicht überladen werden

234

## 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 registered\n";
13 }
14 Student(string name, int id) {
15 lastname = name;
16 student_id = id;
17 cout << "student registered (" << lastname;
18 cout << ", " << student_id << ")\n";
19 }
20 };
21
22 int main() {
23 Student demo;
24 Student var("Praetorius",12345678);
25 return 0;
26 }
```

- ▶ Konstruktor hat keine Rückgabe (Zeile 11 + 14)
  - `className(input)`
  - Standardkonstruktor ohne Input (Zeile 11)
- ▶ **Output:**
  - student registered
  - student registered (Praetorius, 12345678)

235

## 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 registered\n";
13 }
14 Student(string lastname, int student_id) {
15 this->lastname = lastname;
16 this->student_id = student_id;
17 cout << "student registered (" << lastname;
18 cout << ", " << student_id << ")\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-Variablen heißen wie Members der Klasse
    - \* d.h. Members verlieren Scope (Zeile 14-19)
  - Zeile 14–16: Lösen des Konflikts mittels **this->**
- ▶ **Output:**  
Student (Praetorius, 12345678) angemeldet  
Student (Praetorius, 12345678) abgemeldet

236

## 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 registered\n";
13 }
14 Student(string lastname, int student_id) {
15 this->lastname = lastname;
16 this->student_id = student_id;
17 cout << "student registered (" << lastname;
18 cout << ", " << student_id << ")\n";
19 }
20 ~Student() {
21 cout << "student deleted (" << lastname << ", ";
22 cout << student_id << ")\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 registered (Praetorius, 12345678)  
student deleted (Praetorius, 12345678)

237

## 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 registered\n";
13 }
14 Student(string name, int id) :
15 lastname(name), student_id(id) {
16 cout << "student registered (" << lastname;
17 cout << ", " << student_id << ")\n";
18 }
19 ~Student() {
20 cout << "student deleted (" << lastname << ", ";
21 cout << student_id << ")\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 registered  
student deleted (nobody, 0)

238

## 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 }
```

- ▶ **Output:**  
Name Objekt1  
Name Standard  
Name Objekt3  
Loesche Objekt3  
Loesche Standard  
Blockende  
Loesche Objekt1

239

## Schachtelung von Klassen

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

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

240

## vector\_first.hpp

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

241

## vector\_first.cpp 1/2

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

- ▶ erstellt drei Konstruktoren (Zeile 3, Zeile 9)
  - Standardkonstruktor (Zeile 3)
  - Deklaration `Vector var(dim,init);`
  - Deklaration `Vector var(dim);` mit `init = 0`
  - optionaler Input mit Default (Zeile 9)
    - \* wird nur in `vector.hpp` angegeben
- ▶ **Achtung:** `g++` erfordert expliziten Type Cast bei Pointern, z.B. `malloc` (Zeile 12)
- ▶ in C++ darf man Variablen überall deklarieren
  - ist kein guter Stil, da unübersichtlich
- ▶ **vernünftig:** `for (int j=0; j<dim; ++j) { ... }`
  - für lokale Zählvariablen (in Zeile 14)
- ▶ normalerweise kein `std::cout` in Methoden
  - in VO nur für Präsentation (z.B. Zeile 6 + 17)

242

## vector\_first.cpp 2/2

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

- ▶ **ohne Destruktor:** nur Speicher von Pointer frei
  - wäre Laufzeitfehler, da Speicherbedarf wächst!

243

## vector\_first\_main.cpp

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

### ► Kompilieren mit

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

### ► Output:

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

244

## Referenzen

### ► Definition

### ► Unterschied zwischen Referenz und Pointer

### ► direktes Call by Reference

### ► Referenzen als Funktions-Output

### ► type&

245

## 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

- d.h. kein neuer Speicher
- nur zusätzlicher Name für existierendes Objekt

### ► 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
```

246

## 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 + Initialisierung (Zeile 7)

- sind nur Alias-Name für denselben Speicher
- d.h. `ref` und `var` sind symbolische Namen für dieselbe Adresse

### ► Output:

```
var = 5
ref = 5
Adresse von var = 0x7fff532e8b48
Adresse von ref = 0x7fff532e8b48
```

247

## 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`

248

## Funktionsargumente als Referenz

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

### ► Output:

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

### ► echtes Call-by-Reference in C++

- Funktion kriegt Input als Referenzen
- Syntax: `type fName( ..., type& ref, ... )`
  - \* Input `ref` wird als Referenz übergeben
  - \* Call-by-Value und Call-by-Reference für verschiedene Parameter möglich!

### ► `rx` ist lokaler Name (Zeile 5–9) für den Speicherbereich von `x` (Zeile 12–17)

### ► analog für `ry` und `y`

### ► **Achtung:** Bei Aufruf einer Funktion sieht man nicht, ob Call-by-Value oder Call-by-Reference

249

## Referenzen vs. Pointer

- Referenzen sind Aliasnamen für Variablen
  - müssen bei Deklaration initialisiert werden
  - kann Referenzen nicht nachträglich zuordnen!
- keine vollständige Alternative zu Pointern, da ...
  - 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 Pointern nicht
- **Wann Call by Reference sinnvoll?**
  - falls Input-Daten umfangreich
    - \* z.B. „große“ Matrizen oder „lange“ Vektoren
    - \* denn Call by Value kopiert Daten
  - dann Funktionsaufruf billiger

250

## 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

- nur sinnvoll bei Objekten (gleich!)

### ► 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
```

251

## Refs als Funktions-Output 2/3

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

### ▶ Output:

x = 1, val = 10

### ▶ Auf Folie nichts Neues!

- nur Motivation der folgenden Folie

252

## Refs als Funktions-Output 3/3

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

### ▶ Output:

x = 1, val = 1

### ▶ Achtung: **private** Member wurde geändert

- Das will man eigentlich nicht!
- Das kann Laufzeitfehler produzieren!

### ▶ Beachte: Code von `getContent` gleich

- nur andere Signatur
- Änderungen nur in Zeile 12, 19

253

## Schlüsselwort `const`

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

254

## 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!
    - \* d.h. `*ptr` ist vom Typ `const int`
    - \* d.h. `*ptr` kann nur lesen, nicht schreiben!
  - `int* const ptr` ist konstanter Pointer auf `int`
    - \* d.h. `ptr` kann nicht geändert werden
    - \* aber `*ptr` kann lesen und schreiben!

255



## Beispiel 1/2

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

- ▶ `var` ist nur lesbar
- ▶ 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 }
```

- ▶ `var` ist nur lesbar, `*ptr` ist nur lesbar
- ▶ Syntax-Fehler beim Kompilieren:  
const\_pointer.cpp:6: error: read-only variable is not assignable

256

## 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 }
```

- ▶ `var` ist `const double`, aber `*ptr` ist `double`
- ▶ Syntax-Fehler beim Kompilieren:  
const\_pointer2.cpp:4: error: cannot initialize a variable of type 'double \*const' with an rvalue of type 'const double \*'  
\* Der Pointer `ptr` hat falschen Typ (Zeile 4)

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

- ▶ zwei Syntax-Fehler beim Kompilieren:  
const\_pointer3.cpp:5: error: read-only variable is not assignable  
const\_pointer3.cpp:6: error: read-only variable is not assignable  
\* Zuweisung auf Pointer `ptr` (Zeile 5)  
\* Dereferenzieren und Schreiben (Zeile 6)

257

## 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 Referenz auf `const type`  
\* alternative Syntax: `type const& cref`
  - d.h. `cref` ist wie Variable vom Typ `const type`
  - Zugriff über Referenz nur **lesend** möglich
- ▶ **Output:**  
var = 5, ref = 5, cref = 5  
var = 7, ref = 7, cref = 7
- ▶ Zeile 16: `cref = 9;` würde Syntaxfehler liefern  
error: read-only variable is not assignable

258

## Read-Only Refs als Output 1/2

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

- ▶ **Output:**  
x = 1, val = 1
- ▶ Achtung: `private` Member wurde geändert
- ▶ selber Code wie oben (nur Wiederholung!)

259

## Read-Only Refs als Output 2/2

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

### ► Output:

x = 10, val = 10

- Zeile 16: `x = 1;` würde Syntax-Fehler liefern  
error: read-only variable is not assignable
- Änderung in Zeile 15: `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.

260

## Type Casting

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

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

261

## Read-Only Refs als Input

```
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.  
vector\_first\_main\_const.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`

262

## vector\_new.hpp

```
1 #ifndef INCLUDE_VECTOR_NEW_
2 #define INCLUDE_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
  - d.h. Methode greift nur lesend auf Daten zu
  - `className::fct(... input ...) const { ... }`
- neue Syntax: Zeile 24, 28, 31

263

## vector\_new.cpp 1/2

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

► keine Änderungen im Vergleich zu [vector\\_first.cpp](#)

264

## vector\_new.cpp 2/2

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

► geändert: Zeile 29, 38, 43

265

## vector\_new\_main.cpp

```
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 }
```

► Kompilieren:

- `g++ -c vector_new.cpp`
- `g++ vector_new_main.cpp vector_new.o`

► 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
```

266

## Zusammenfassung Syntax

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

267

## 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 Call-by-Value nicht berücksichtigt
  - Syntax-Fehler beim Kompilieren:  
overload\_const.cpp:5: 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 Call-by-Reference
  - Kompilieren OK und **Output:**  
int  
const int

268

## 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

269

## Überladen von Operatoren

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

270

## Klasse für Komplexe Zahlen

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

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

271

## 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 äquivalent auch `Complex lhs(rhs);`
- ▶ **Funktionalität des Kopierkonstruktors:**
  - Deklaration eines neuen Objekts `lhs` und Kopieren aller Daten von `rhs`
  - also Input als konstante Referenz (read-only)
- ▶ wird automatisch erstellt (als Shallow Copy), falls nicht explizit programmiert
  - hier formal unnötig, da nur statische Daten
  - wichtig, falls Klasse dynamische Daten enthält
    - \* sonst Laufzeitfehler (siehe später!)

272

## Zuweisungsoperator

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

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

273

## 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
- ▶ Verwendet implizit ggf. bekannte Type Casts
 - implizit von `int` auf `double`
 - oder implizit von `double` auf `int`
 - etc.
 - * deshalb Vorsicht mit neuen Type Casts!

274

Unäre Operatoren

- ▶ unäre Operatoren = Operat. mit einem Argument
 - z.B. Vorzeichen $-x$
 - z.B. \bar{x} komplexe Konjugation
 - * $\bar{x} = a - bi$ für $x = a + bi$

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

- ▶ Vorzeichenwechsel `-` (Minus)
 - `const Complex Complex::operator-() const`
 - * Output ist vom Typ `const Complex`
 - * Methode agiert nur auf aktuellen Members
 - * Methode ist read-only auf aktuellen Daten
 - wird Methode der Klasse
- ▶ Aufruf später durch `-x`
- ```
1 const Complex Complex::operator~() const {
2 return Complex(re, -im);
3 }
```
- ▶ komplexe Konjugation `~` (Tilde)
  - `const Complex Complex::operator~() const`
    - \* Output ist vom Typ `const Complex`
    - \* Methode agiert nur auf aktuellen Members
    - \* Methode ist read-only auf aktuellen Daten
  - wird Methode der Klasse
- ▶ Aufruf später durch `~x`

275

## complex\_part.hpp

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

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

276

## complex\_part.cpp 1/2

```
1 #include "complex_part.hpp"
2
3 using std::cout;
4 using std::endl;
5
6 Complex::Complex(double re, double im) {
7 this->re = re;
8 this->im = im;
9 cout << "constructor" << endl;
10 }
11
12 Complex::Complex(const Complex& rhs) {
13 re = rhs.re;
14 im = rhs.im;
15 cout << "copy constructor" << endl;
16 }
17
18 Complex::~Complex() {
19 cout << "destructor" << endl;
20 }
21
22 Complex& Complex::operator=(const Complex& rhs) {
23 if (this != &rhs) {
24 re = rhs.re;
25 im = rhs.im;
26 cout << "assignment" << endl;
27 }
28 else {
29 cout << "self assignment" << endl;
30 }
31 return *this;
32 }
```

- ▶ **cout** nur für Demonstration der Funktionalität in der Vorlesung
- ▶ kein **using** in der **hpp** verwenden, aber OK im **cpp**!

277

## complex\_part.cpp 2/2

```
34 double Complex::real() const {
35 return re;
36 }
37
38 double Complex::imag() const {
39 return im;
40 }
41
42 double Complex::abs() const {
43 return sqrt(re*re + im*im);
44 }
45
46 void Complex::print() const {
47 cout << re << " + " << im << "*i" << endl;
48 }
49
50 Complex::operator double() const {
51 cout << "Complex -> double" << endl;
52 return re;
53 }
54
55 const Complex Complex::operator-() const {
56 return Complex(-re, -im);
57 }
58
59 const Complex Complex::operator~() const {
60 return Complex(re, -im);
61 }
```

278

## complex\_part\_main.cpp

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

- ▶ Output:
  - constructor
  - constructor
  - constructor
  - copy constructor
  - self assignment
  - constructor
  - assignment
  - destructor
  - 1 + 0\*i
  - 1 + -1\*i
  - 1 + 1\*i
  - 1 + 1\*i
  - destructor
  - destructor
  - destructor
  - destructor

279

## complex\_part\_typecast.cpp

```
1 #include <iostream>
2 #include "complex_part.hpp"
3 using std::cout;
4 using std::endl;
5
6 int main() {
7 Complex z((int) 2.3, (int) 1);
8 double x = z;
9 z.print();
10 cout << x << endl;
11 return 0;
12 }
```

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

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

► Output:

```
constructor
Complex -> double
2 + 1*i
2
destructor
```

280

## Binäre Operatoren 1/2

```
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
9 const Complex operator-(const Complex& x,const Complex& y){
10 double xr = x.real();
11 double xi = x.imag();
12 double yr = y.real();
13 double yi = y.imag();
14 return Complex(xr - yr, xi - yi);
15 }
```

► binäre Operatoren = Oper. mit zwei Argumenten

- z.B. normale Arithmetik **+**, **-**, **\***, **/**

► **außerhalb der Klassendefinition als Funktion**

- formal: **const type operator+(const type& rhs1, const type& rhs2)**
- **Achtung:** kein **type::** da kein Teil der Klasse!

281

## Binäre Operatoren 2/2

```
17 const Complex operator*(const Complex& x,const Complex& y){
18 double xr = x.real();
19 double xi = x.imag();
20 double yr = y.real();
21 double yi = y.imag();
22 return Complex(xr*yr - xi*yi, xr*yi + xi*yr);
23 }
24
25 const Complex operator/(const Complex& x,const double y){
26 assert(y != 0)
27 return Complex(x.real()/y, x.imag()/y);
28 }
29 const Complex operator/(const Complex& x,const Complex& y){
30 double norm = y.abs();
31 assert(norm > 0);
32 return x*-y / (norm*norm);
33 }
```

► Multiplikation (Zeile 17–23):

- $(a + bi)(A + Bi) = (aA - bB) + i(aB + Ab)$

► Division (Zeile 25–33):

- $x/y = (x\bar{y})/(y\bar{y}) = x\bar{y}/|y|^2$ 
  - \* d.h. **Complex/Complex** führt auf **Complex/double**
- realisiert mittels Überladung von **/**
- mittels **assert** sicherstellen, dass Nenner  $\neq 0$

282

## Operator <<

```
1 std::ostream& operator<<(std::ostream& output,
2 const Complex& x) {
3 if (x.imag() == 0) {
4 return output << x.real();
5 }
6 else if (x.real() == 0) {
7 return output << x.imag() << "i";
8 }
9 else if (x.imag() > 0) {
10 return output << x.real() << " + " << x.imag() << "i";
11 }
12 else {
13 return output << x.real() << " - " << -x.imag() << "i";
14 }
15 }
```

► **cout**-Ausgabe erfolgt über Klasse **std::ostream**

► weitere Ausgabe wird einfach angehängt mit **<<**

- kann insbesondere **for**-Schleife verwenden, um z.B. Vektoren / Matrizen mit **cout** auszugeben (siehe später!)

283

## complex.hpp

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

► „vollständige Bibliothek“ ohne unnötige `cout`  
im folgende `cpp` Source-Code

284

## complex.cpp 1/3

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

285

## complex.cpp 2/3

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

286

## complex.cpp 3/3

```
73 const Complex operator/(const Complex& x, const double y) {
74 assert(y != 0);
75 return Complex(x.real()/y, x.imag()/y);
76 }
77
78 const Complex operator/(const Complex& x, const Complex& y) {
79 double norm = y.abs();
80 assert(norm > 0);
81 return x~/y / (norm*norm);
82 }
83
84 std::ostream& operator<<(std::ostream& output,
85 const Complex& x) {
86 if (x.imag() == 0) {
87 return output << x.real();
88 }
89 else if (x.real() == 0) {
90 return output << x.imag() << "i";
91 }
92 else if (x.imag() > 0) {
93 return output << x.real() << " + " << x.imag() << "i";
94 }
95 else {
96 return output << x.real() << " - " << -x.imag() << "i";
97 }
98 }
```

287



## complex\_main.cpp

```
1 #include "complex.hpp"
2 #include <iostream>
3 using std::cout;
4 using std::endl;
5
6 int main() {
7 Complex w;
8 Complex x(1,0);
9 Complex y(0,1);
10 Complex z(3,4);
11
12 w = x + y;
13 cout << w << endl;
14
15 w = x*y;
16 cout << w << endl;
17
18 w = x/y;
19 cout << w << endl;
20
21 w = z/(x + y);
22 cout << w << endl;
23 cout << ~w << endl;
24
25 w = w.abs();
26 cout << w << endl;
27
28 return 0;
29 }
```

### ► Output:

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

288

## Funktionsaufruf & Kopierkonstruktor 1/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 class Demo {
6 private:
7 int data;
8 public:
9 Demo(int data = 0) {
10 cout << "constructor" << endl;
11 this->data = data;
12 }
13
14 Demo(const Demo& rhs) {
15 cout << "copy constructor" << endl;
16 data = rhs.data;
17 }
18
19 Demo& operator=(const Demo& rhs) {
20 cout << "assignment" << endl;
21 data = rhs.data;
22 return *this;
23 }
24
25 ~Demo() {
26 cout << "destructor" << endl;
27 }
28 }
29 ;
```

- Bei Funktionsaufruf mit Call by Value werden die Daten immer mittels Kopierkonstruktor an die Funktion übergeben

289

## Funktionsaufruf & Kopierkonstruktor 2/2

```
31 void function(Demo input) {
32 cout << "call by value" << endl;
33 }
34
35 void function2(Demo& input) {
36 cout << "call by reference" << endl;
37 }
38
39 int main() {
40 Demo x;
41 Demo y = x;
42 cout << "*** use call by value" << endl;
43 function(y);
44 cout << "*** use call by reference" << endl;
45 function2(x);
46 cout << "*** program terminates" << endl;
47 return 0;
48 }
```

- Bei Funktionsaufruf werden Daten mittels Kopierkonstruktor an Funktion übergeben

### ► Output:

```
constructor
copy constructor
*** use call by value
copy constructor
call by value
destructor
*** use call by reference
call by reference
*** program terminates
destructor
destructor
```

290

## Zusammenfassung Syntax

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

291

## Binäre Operatoren in der Klasse

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

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

292

## Welche Operatoren überladen?

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

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

293

## Dynamische Speicherverwaltung

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

294

## new vs. malloc

- ▶ `malloc` reserviert nur Speicher
  - **Nachteil:** Konstruktor werden nicht aufgerufen
    - \* d.h. Initialisierung händisch
- ▶ ein dynamisches Objekt  
`type* var = (type*) malloc(sizeof(type));`  
`*var = ...;`
- ▶ dynamischer Vektor von Objekten der Länge N  
`type* vec = (type*) malloc(N*sizeof(type));`  
`vec[j] = ...;`
- ▶ in C++ ist Type Cast bei `malloc` zwingend!
- ▶ `new` reserviert Speicher + ruft Konstruktoren auf
- ▶ ein dynamisches Objekt (mit Standardkonstruktor)  
`type* var = new type;`
- ▶ ein dynamisches Objekt (mit Konstruktor)  
`type* var = new type(... input ... );`
- ▶ dyn. Vektor der Länge N (mit Standardkonstruktor)  
`type* vec = new type[N];`
  - \* Standardkonstruktor für jeden Koeffizienten
- ▶ **Konvention:** besser `new` verwenden!
  - Im Test: `new` oder `malloc`, aber konsistent!
- ▶ Aber: Es gibt keine C++ Variante von `realloc`

295

## delete vs. free

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

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

  - unabhängig von Objekt / Vektor von Objekten
  - nur auf Output von **malloc** anwenden!
- ▶ **delete** ruft Destruktor auf und gibt Speicher von **new** frei

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

  - für ein dynamisch erzeugtes Objekt
  - nur auf Output von **new** anwenden!
- ▶ **delete[]** ruft Destruktor für jeden Koeffizienten auf und gibt Speicher von **new ...[N]** frei

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

  - für einen dynamischen Vektor von Objekten
  - nur auf Output von **new ...[N]** anwenden!
- ▶ **Konvention:** Falls Pointer auf keinen dynamischen Speicher zeigt, wird er händisch auf **NULL** gesetzt
  - d.h. nach **free**, **delete**, **delete[]** folgt

```
* vec = (type*) NULL;
```
  - \* in C++ häufiger: **vec = (type\*) 0;**

296

## 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
    - \* insbesondere bei Funktionsaufruf mit Call by Value (nächste Folien!)

297

## Missachtung der Dreierregel 1/3

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

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

298

## Missachtung der Dreierregel 2/3

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

- ▶ Zeile 59 ruft Kopierkonstruktor
  - nur Shallow Copy
  - d.h. **x.data = y.data** enthält dieselbe Adresse

### ▶ Output:

```
x = 2 2 2 2 , y = 2 2 2 2
x = 3 3 3 3 , y = 3 3 3 3
```

299

## Missachtung der Dreierregel 3/3

```
57 int main() {
58 Demo x(4,2);
59 Demo y = x;
60 cout << "x = " << x << ", y = " << y << "\n";
61 y.set(3);
62 cout << "x = " << x << ", y = " << y << "\n";
63 print(x);
64 x.set(5);
65 cout << "x = " << x << ", y = " << y << "\n";
66 return 0;
67 }
```

- ▶ Zeile 63 ruft Kopierkonstruktor bei Fkt.aufruf
  - nur Shallow Copy
  - d.h. `x.data = z.data` enthält dieselbe Adresse
  - Funktionsende ruft Destruktor für `z`
    - \* d.h. `x.data = y.data` zeigt auf bereits freigegebenen Speicherbereich
- ▶ Programmende ruft Destruktor für `y` (und `x`)
  - Destruktor für `y` liefert Speicherzugriffsfehler
  - durch versuchte Freigabe von `y.data` (nicht mehr existent)

### Output:

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

300

## vector.hpp

```
1 #ifndef INCLUDE_VECTOR_
2 #define INCLUDE_VECTOR_
3
4 #include <cmath>
5 #include <cassert>
6 #include <iostream>
7
8 // The class Vector stores vectors in Rd
9 class Vector {
10 private:
11 int dim;
12 double* coeff;
13
14 public:
15 // constructors, destructor, assignment
16 Vector();
17 Vector(int dim, double init=0);
18 Vector(const Vector&);
19 ~Vector();
20 Vector& operator=(const Vector&);
21 // return length of vector
22 int size() const;
23 // read and write entries
24 const double& operator[](int k) const;
25 double& operator[](int k);
26 // compute Euclidean norm
27 double norm() const;
28 };
29
30 std::ostream& operator<<(std::ostream& output,
31 const Vector& x);
32 // addition of vectors
33 const Vector operator+(const Vector&, const Vector&);
34 // scalar multiplication
35 const Vector operator*(const double, const Vector&);
36 const Vector operator*(const Vector&, const double);
37 // scalar product
38 const double operator*(const Vector&, const Vector&);
39
40 #endif
```

301

## vector.cpp 1/4

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

- ▶ Beachte verschiedene Operatoren [ ] in Zeile 35

302

## vector.cpp 2/4

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

- ▶ Beachte verschiedene Operatoren [ ] in Zeile 65
  - `coeff[j]` ist normaler Vektorzugriff
  - `rhs[j]` ist Operator der Klasse `Vector`

303

## vector.cpp 3/4

```
77 const double& Vector::operator[](int k) const {
78 assert(k>=0 && k<dim);
79 return coeff[k];
80 }
81
82 double& Vector::operator[](int k) {
83 assert(k>=0 && k<dim);
84 return coeff[k];
85 }
86
87 double Vector::norm() const {
88 double sum = 0;
89 for (int j=0; j<dim; ++j) {
90 sum = sum + coeff[j]*coeff[j];
91 }
92 return sqrt(sum);
93 }
94
95 std::ostream& operator<<(std::ostream& output,
96 const Vector& x) {
97 output << "(";
98 for (int j=0; j<x.size(); ++j) {
99 output << x[j];
100 if (j < x.size()-1) {
101 output << ", ";
102 }
103 }
104 return output << ")" << std::endl;
105 }
106
107 const Vector operator+(const Vector& rhs1,
108 const Vector& rhs2) {
109 assert(rhs1.size() == rhs2.size());
110 Vector result(rhs1);
111 for (int j=0; j<result.size(); ++j) {
112 result[j] += rhs2[j];
113 }
114 return result;
115 }
▶ Zugriff auf Vektor-Koeffizienten über []

- konstante (Z. 77) vs. allgemeine (Z. 82)

```

304

## vector.cpp 4/4

```
117 const Vector operator*(const double scalar,
118 const Vector& input) {
119 Vector result(input);
120 for (int j=0; j<result.size(); ++j) {
121 result[j] *= scalar;
122 }
123 return result;
124 }
125
126 const Vector operator*(const Vector& input,
127 const double scalar) {
128 return scalar*input;
129 }
130
131 const double operator*(const Vector& rhs1,
132 const Vector& rhs2) {
133 double scalarproduct = 0;
134 assert(rhs1.size() == rhs2.size());
135 for (int j=0; j<rhs1.size(); ++j) {
136 scalarproduct += rhs1[j]*rhs2[j];
137 }
138 return scalarproduct;
139 }
```

- ▶ Zeile 126: Falls man **Vector \* double** nicht implementiert, kriegt man bei etwaiger Verwendung einen kryptischen Laufzeitfehler:
  - impliziter Type Cast **double** auf **int**
  - Aufruf Konstruktor mit einem **int**-Argument
  - vermutlich **assert**-Abbruch in Zeile 134
- ▶ Operator **\*** dreifach überladen:
  - **Vector \* double** Skalarmultiplikation
  - **double \* Vector** Skalarmultiplikation
  - **Vector \* Vector** Skalarprodukt

305

## vector\_main.cpp 1/2

```
1 #include "vector.hpp"
2 #include <iostream>
3 using std::cout;
4
5 int main() {
6 Vector vector1(3);
7 vector1[1] = 1;
8 vector1[2] = 2;
9 cout << "vector1 = " << vector1;
10 Vector vector2(100,4);
11 Vector vector3 = 4*vector2;
```

### ▶ Output:

```
constructor, length 3
vector1 = (0, 1, 2)
constructor, length 100
copy constructor, length 100
```

306

## vector\_main.cpp 2/2

```
12 cout << "*** add\n";
13 vector1 = vector2 + vector2;
14 cout << "Norm1 = " << vector1.norm() << "\n";
15 cout << "Norm2 = " << vector2.norm() << "\n";
16 cout << "Norm3 = " << vector3.norm() << "\n";
17 cout << "Skalarprodukt = " << vector2*vector3 << "\n";
18 cout << "Norm " << (4*vector3).norm() << "\n";
19 cout << "*** terminate\n";
20 return 0;
21 }
```

### ▶ Output:

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

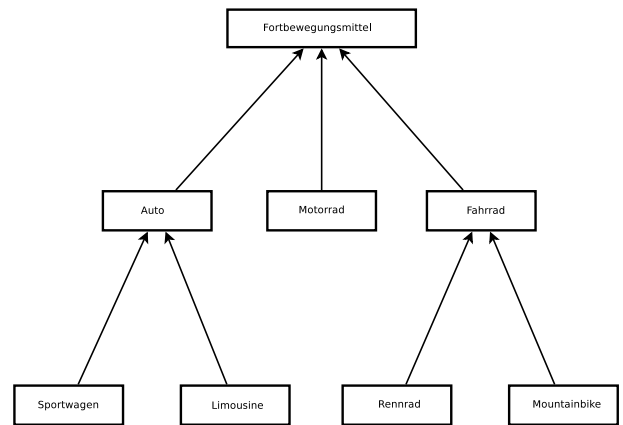
307

# Vererbung

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

308

## 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:  $\mathbb{Q} \subset \mathbb{R} \subset \mathbb{C}$

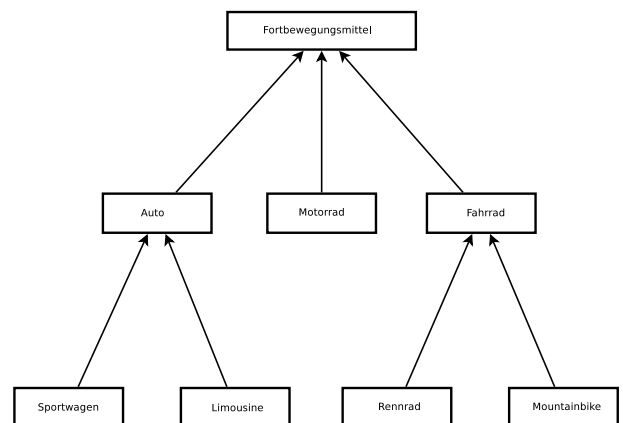
309

## 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

310

## 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 { ... };`

311

## 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
```

312

## 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

313

## 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!

314

## Konstruktor & Destruktor 1/4

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

315

## Konstruktor & Destruktor 2/4

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

- ▶ Anlegen eines Objekts vom Typ **Abgeleitet** ruft Constructoren von **Basisklasse** und **Abgeleitet** auf
  - automatisch wird Standard-Konstr. aufgerufen!
- ▶ Freigabe eines Objekts vom Typ **Abgeleitet** ruft Destruktoren von **Abgeleitet** und **Basisklasse**

### ▶ Output:

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

316

## Konstruktor & Destruktor 3/4

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

317

## Konstruktor & Destruktor 4/4

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

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

### ▶ Output:

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

318

## Ein weiteres Beispiel 1/3

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

319



## 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 }

```

320

## 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

```

321

## 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

322

## private, protected, public 2/2

```

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

```

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

```

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

```

323

## 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'?

324

## 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

325

## Matrizen

- ▶ Klasse für Matrizen
- ▶ Vektoren als abgeleitete Klasse

326

## 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

327

## Koeffizientenzugriff

```

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

```

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

328

## Summe

```

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

```

- ▶  $A+B$  nur definiert für Matrizen gleicher Dimension
  - $(A+B)_{jk} = A_{jk} + B_{jk}$
- ▶ könnte auch Speichervektoren addieren, aber...
  - führt auf Fehler, falls zwei Matrizen unterschiedlich gespeichert sind!
    - \* z.B. quadratische Matrix + untere  $\Delta$ -Matrix

329

## Produkt

```

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

```

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

330

## matrix.hpp

```

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

```

331

## matrix.cpp 1/4

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

332

## matrix.cpp 2/4

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

333

## matrix.cpp 3/4

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

334

## matrix.cpp 4/4

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

335

## Testbeispiel

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

### ► Output:

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

336

## matrix-vector.hpp

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

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

337

## matrix-vector.cpp

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

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

338

## Matrix-Vektor-Produkt

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

339

## Testbeispiel

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

### ► Output:

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

340

## Schlüsselwort virtual

- Polymorphie
- Virtuelle Methoden

- virtual

341

## Polymorphie

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

342

## Pointer und virtual 1/3

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

### ► Output:

```
Abgeleitet
Basisklasse
```

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

343

## 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 Basisklasse* pA = &a;
17 Basisklasse* pB = &a;
18 pA->print();
19 pB->print();
20 return 0;
21 }
```

### ► Output:

Abgeleitet  
Abgeleitet

### ► Zeile 6: neues Schlüsselwort **virtual**

- vor Signatur der Methode **print** (in Basisklasse!)
- deklariert virtuelle Methode
- zur Laufzeit wird korrekte Methode aufgerufen
  - \* **Varianten müssen gleiche Signatur haben**
- Zeile 19 ruft nun redefinierte Methode **print** auf

344

## 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!

345

## 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

346

## 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

347

## 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 {};
```

### ▶ Output:

```
Ich bin Basisklasse
Ich bin Basisklasse
Ich bin Basisklasse
```

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

348

## 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 {};
```

### ▶ 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

349

## Abstrakte Klassen

- ▶ Manchmal werden Klassen nur zur Strukturierung / zum Vererben angelegt, aber Instanzierung ist nicht sinnvoll / nicht gewollt
  - d.h. es soll keine Objekte der Basisklasse geben
  - sog. **abstrakte Klassen**
  - dient nur als Schablone für abgeleitete Klassen
- ▶ abstrakte Klassen können nicht instanziiert werden
  - Compiler liefert Fehlermeldung!
- ▶ In C++ ist eine Klasse abstrakt, falls eine Methode existiert der Form `virtual return-type method( ... ) = 0;`
  - Diese sog. **abstrakte Methode** muss in allen abgeleiteten Klassen implementiert werden
    - \* wird nicht in Basisklasse implementiert

350

## Beispiel zu abstrakten Klassen

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

### ▶ Abstrakte Klasse `Figure`

- durch abstrakte Methode `getArea` (Zeile 6)

### ▶ abgeleitete Klassen `Circle`, `Triangle`

### ▶ `Circle` und `Triangle` redefinieren `getArea`

- alle abstrakten Meth. müssen redefiniert werden

351



## Beispiel zu virtual: Matrizen

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

352

## matrix.hpp 1/3

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

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

353

## matrix.hpp 2/3

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

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

354

## matrix.hpp 3/3

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

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

355

## matrix.cpp 1/5

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

356

## matrix.cpp 2/5

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

357

## matrix.cpp 3/5

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

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

358

## matrix.cpp 4/5

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

359

## matrix.cpp 5/5

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

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

360

## Bemerkungen

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

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

besser ersetzen durch

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

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

361

## squareMatrix.hpp

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

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

362

## squareMatrix.cpp

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

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

363

## Demo zu squareMatrix 1/5

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

► erwartetes Resultat:

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

364

## Demo zu squareMatrix 2/5

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

► Output:

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

► man sieht spaltenweise Speicherung von A

365

## Demo zu squareMatrix 3/5

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

► Output:

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

366

## Demo zu squareMatrix 4/5

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

► Output:

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

367

## Demo zu squareMatrix 5/5

```

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

```

### ► Output:

```

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

```

368

## LowerTriangularMatrix.hpp

```

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

```

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

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

► muss nur  $\frac{n(n+1)}{2} = \sum_{i=1}^n i$  Einträge speichern

► zeilenweise Speicherung:  $A_{jk} = a_\ell$  mit  $\ell = \frac{j(j+1)}{2} + k$

- muss Matrix-Zugriff ( ) redefinieren

369

## LowerTriangularMatrix.cpp 1/4

```

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

```

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

370

## LowerTriangularMatrix.cpp 2/4

```

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

```

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

371

## lowerTriangularMatrix.cpp 3/4

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

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

372

## lowerTriangularMatrix.cpp 4/4

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

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

373

## Demo zu lowerTriangularMatrix 1/7

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

- ▶ Output:

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

374

## Demo zu lowerTriangularMatrix 2/7

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

- ▶ Output:

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

375

## Demo zu lowerTriangularMatrix 3/7

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

### ► Output:

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

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

376

## Demo zu lowerTriangularMatrix 4/7

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

### ► Output:

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

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

377

## Demo zu lowerTriangularMatrix 5/7

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

### ► Output:

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

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

► A ist **SquareMatrix**

► D ist **LowerTriangularMatrix**

378

## Demo zu lowerTriangularMatrix 6/7

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

### ► Output:

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

► Erinnerung: A ist **SquareMatrix**

► B und D sind **LowerTriangularMatrix**

379

## Demo zu lowerTriangularMatrix 7/7

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

### ▶ Output:

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

### ▶ Erinnerung: Allokationsreihenfolge

- A ist **SquareMatrix**
- B ist **LowerTriangularMatrix**
- C ist **Matrix**
- D ist **LowerTriangularMatrix**
- E ist **LowerTriangularMatrix**

380

# Templates

### ▶ Was sind Templates?

### ▶ Funktionentemplates

### ▶ Klassentemplates

### ▶ template

381

## Generische Programmierung

### ▶ Wieso Umstieg auf höhere Programmiersprache?

- Mehr Funktionalität  
(Wiederverwendbarkeit/Wartbarkeit)
- haben wir bei Vererbung ausgenutzt

### ▶ Ziele:

- möglichst wenig Code selbst schreiben
- Gemeinsamkeiten wiederverwenden
- nur Modifikationen implementieren

### ▶ Oftmals ähnlicher Code für verschiedene Dinge

### ▶ Vererbung bietet sich oft nicht an

- es liegt nicht immer Ist-Ein-Beziehung vor

### ▶ Idee: Code unabhängig vom Datentyp entwickeln

### ▶ Führt auf **generische Programmierung**

382

## Beispiel: Maximum / Quadrieren

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

### ▶ Ziel: Maximum berechnen / quadrieren

### ▶ Gleicher Code für viele Probleme

- Vererbung bietet sich hier nicht an

### ▶ Lösung: **Templates**

383



## Funktionstemplate 1/2

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

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

384

## Funktionstemplate 2/2

- ▶ Was passiert eigentlich bei folgendem Code?

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

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

385

## Klassentemplate 1/3

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

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

386

## Klassentemplate 2/3

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

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

387

## Klassentemplate 3/3

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

### ► Output

```
Konstruktor
Hallo
Laenge = 5
Destruktor
```

### ► Destruktor gibt dynamischen Speicher wieder frei

388

## Warum Zuweisung **private**?

### ► Probleme bei Kopien von Smartpointern:

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

### ► Pointer wird kopiert (Zeile 5)

- Hier: nicht möglich, da Zuweisung **private**

### ► Speicher von **q** wird freigegeben (Zeile 7)

- Problem: also Speicher von **p** freigegeben
- Zugriffsfehler in Zeile 8

### ► **Mögliche Lösung:** Kopien zählen

- Speicher nur freigegeben wenn kein Zugriff mehr
- wird hier nicht vertieft

389

## C++ Standardcontainer

### ► C++ hat viele vordefinierte Klassen-Templates

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

### ► Weitere C++ Bibliotheken

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

390

## vector Template

391

## vector Template

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

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

392

## Vektoren mittels vector 1/3

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

- ▶ kein dynamischer Speicher, d.h. automatisch OK:
  - Kopierkonstruktor
  - Zuweisung
  - Destruktor

393

## Vektoren mittels vector 2/3

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

- ▶ **vector** Template hat Methode **size** (Zeile 24)
- ▶ wird genutzt für Methode **size** für Klasse **Vector**

394

## Vektoren mittels vector 3/3

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

- ▶ Zuweisung funktioniert (implizit generiert!)

- ▶ Output:

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

395

## Matrizen mittels vector 1/2

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

- ▶ Beachte `vector<vector<double> >` in Zeile 11
  - `>>` statt `>` wäre Operator für Input-Stream

396

## Matrizen mittels vector 2/2

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

### ▶ Output:

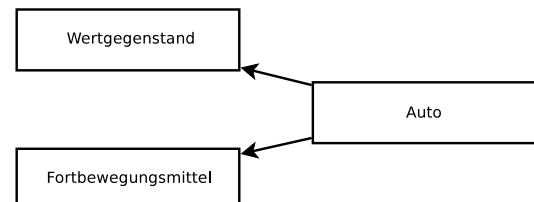
```
B =
empty matrix
B =
5 5 5
5 0 5
5 5 5
```

397

## Mehrfachvererbung

## Mehrfachvererbung

- ▶ C++ erlaubt Vererbung mit multiplen Basisklassen



- ▶ Syntax:

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

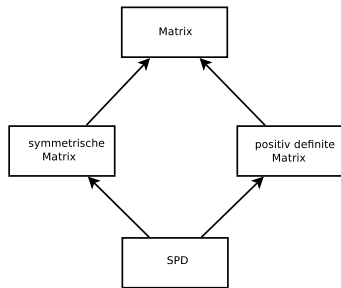
- ▶ Vertieft Konzept der Objektorientierung
  - erhöht Wiederverwendbarkeit von Code
- ▶ Problem: Mehrdeutigkeiten (nächste Folie)

398

399

## Diamantvererbung 1/5

- ▶ Es könnte eine gemeinsame Oberklasse geben



- ▶ SPD = symmetrisch positiv definite Matrix
  - **symmetrisch:**  $A = A^T \in \mathbb{R}^{n \times n}$
  - **positiv definit:**  $Ax \cdot x > 0$  für alle  $x \in \mathbb{R}^n \setminus \{0\}$ 
    - \* äquivalent: alle Eigenwerte sind strikt positiv
- ▶ Führt zu Mehrdeutigkeit
  - Felder und Methoden sind mehrfach vorhanden
  - Unklar worauf zugegriffen werden soll
  - Speicherverschwendung
  - Schlimmstenfalls: Objekte inkonsistent

400

## Diamantvererbung 2/5

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

- ▶ Klasse **Matrix** hat Member **int n**
- ▶ beide abgeleiteten Klassen erben **int n**
- ▶ **SPDMatrix** erbt von zwei Klassen
  - **SPDMatrix** hat **int n** doppelt
- ▶ **naive Lösung:** Zugriff mittels vollem Namen
  - **SMatrix::n** bzw. **PDMatrix::n**
- ▶ unschön, da Speicher dennoch doppelt
  - unübersichtlich
  - fehleranfällig
- ▶ **bessere Lösung:** virtuelle Vererbung
  - z.B. **class SMatrix : virtual public Matrix**
- ▶ virtuelle Basisklasse wird nur einmal eingebunden

401

## Diamantvererbung 3/5

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

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

- ▶ Kompilieren liefert Fehler

```
diamant1.cpp:21: error: non-static member 'set' found
in multiple base-class subobjects of type 'Matrix':
class SPDMatrix -> class SMatrix -> class Matrix
class SPDMatrix -> class PDMatrix -> class Matrix
```
- ▶ alle Datenfelder und Methoden sind doppelt!
  - Zugriff über vollständigen Namen möglich
  - z.B. **SMatrix::set** schreibt **SMatrix::n**

402

## Diamantvererbung 4/5

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

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

- ▶ **SMatrix::n** und **PDMatrix::n** können verschiedene Werte haben
  - fehleranfällig!
- ▶ Output:

```
n = 1
n = 2
```

403

## Diamantvererbung 5/5

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 class Matrix{
6 private:
7 int n;
8 public:
9 void set(int n) {this->n = n;}
10 int get() {return n;}
11 };
12
13 class SMatrix : virtual public Matrix {};
14
15 class PDMatrix : virtual public Matrix {};
16
17 class SPDMatrix : public SMatrix, public PDMatrix {};
18
19 int main() {
20 SPDMatrix A;
21 A.set(1);
22 A.SMatrix::set(2);
23 A.PDMatrix::set(3);
24 cout << "n = " << A.get() << endl;
25 cout << "n = " << A.SMatrix::get() << endl;
26
27 return 0;
28 }
```

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

404

## Exception Handling

- ▶ try
- ▶ catch
- ▶ throw
- ▶ bad\_alloc

405

## Exception Handling 1/2

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

406

## Exception Handling 2/2

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

407

## Beispiel zu throw

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

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

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

408

## Beispiel zu try-catch 1/2

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

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

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

409

## Beispiel zu try-catch 2/2

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

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

```
*** throw
*** catch, x = 1
*** continue
```

410

## Eigene Klassen für Exceptions

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

- ▶ Kann beliebige Objekte als Exception werfen
  - erlaubt systematische Gliederung / Behandlung
- ▶ Output:

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

411

## Abgeleitete Klassen 1/4

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

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

412

## Abgeleitete Klassen 2/4

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

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

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

413

## Abgeleitete Klassen 3/4

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

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

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

414

## Abgeleitete Klassen 4/4

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

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

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

415



## Exception bei Speicherallokation

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

▶ iterierte Allokation von jeweils 1 GB (Zeile 9–11)

▶ gescheitertes `new` wirft Exception `bad_alloc`

▶ Output:

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