

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
- ▶ Homepage
- ▶ LVA-Material

Organisatorisches

- ▶ **Probetest am Sa. 16.01.2021 (morgen!)**
 - individueller Beginn : 00:00 – 21:00 Uhr
 - Bearbeitungszeit : 180 Minuten
 - Aufgaben entsprechen in Umfang und Art & Weise dem Abschlusstest
 - * Multiple Choice
 - * Drag-and-Drop Programmieren
 - * Normales Programmieren im Textfeld
 - **Ziel:** Vorbereitung auf Look-and-Feel
 - **Ziel:** Üben des Umgangs mit Tests in TUWEL
- ▶ **Abschlusstest am Fr. 22.01.2021**
 - Treffen in ZOOM um 13:45 Uhr
 - * jede UE-Gruppe hat ZOOM-Link in TUWEL
 - Test 14:00 – 16:00 Uhr
 - **Teilnahme obligatorisch**
 - **Hinweise zum Test-Setup auf TUWEL**
- ▶ **Nach dem Test**
 - Ergebnisse & EPROG-Noten am Di. 26.01.2021
 - **Bitte EPROG evaluieren auf TISS!**
 - TU Best Teaching Awards im SS 21 ; -D



Link zur
Evaluation

EPROG

- ▶ **freiwillig:**
 - **Teilnahme an Vorlesung**, Fr. 10:00 - 12:00 Uhr
 - * Präsenz: Hörsaal FH 8
 - * Live-Stream in TUWEL
 - **Teilnahme im Tutorium**
 - * Präsenz: Mo. + Di. 10:00 - 12:00 Uhr
 - * Online auf Zoom: Di. 16:00 - 17:00 Uhr
- ▶ **obligatorisch:**
 - **Teilnahme an Ihrer Online UE-Gruppe**
 - * fixe Gruppe gemäß Anmeldung
 - * maximal 1x Fehlen!
 - * **Beginn: heute**
 - * Zoom-Links in TUWEL

Live Stream

- ▶ Link auf TUWEL
- ▶ ca. 30 Sekunden verzögert
- ▶ kann pausiert werden
 - bitte 10 Sek. Pause, falls Live-Stream ruckelt
- ▶ **TISS-Forum** nutzen bei Fragen zur VO
 - immer Foliennummer nennen!
 - TUWEL-Forum ist 5 Minuten verzögert

EPROG-Homepages

- ▶ <http://www.asc.tuwien.ac.at/eprog/>
 - Lernziele
 - Regeln & Pflichten
 - Benotungsschema
 - Evaluation & Notenspiegel
- ▶ <https://tuwel.tuwien.ac.at/course/view.php?id=30964>
 - Download der Folien & Übungsblätter
 - freiwilliges UE-Material (alte Tests!)
 - Termine
 - Zoom-Links zu Tutorium und UE-Gruppen

Literatur

- ▶ VO-Folien aus SS2020 auf EPROG-Homepage
- ▶ aktuelle Folien wöchentlich auf TUWEL
- ▶ formal keine weitere Literatur nötig
- ▶ mehrere Bücher zum Download auf TUWEL, z.B.
 - [Ralf Kirsch, Uwe Schmitt](#)
Programmieren in C, eine mathematikorientierte Einführung
 - [Klaus Schmaranz](#)
Softwareentwicklung in C / C++

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

- ▶ **Wikipedia:** 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

5

Algorithmus

- ▶ **Wikipedia:** 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!)

6

Source-Code

- ▶ Source-Code ist der 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
- ▶ bessere Unterscheidung (siehe Schmaranz)
 - **imperative Sprachen**, z.B. Matlab, C, Fortran
 - **objektorientierte**, z.B. C++, Java, Python
 - **funktionale**, z.B. Lisp

7

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**
 - C ist eine sehr alte Sprache (erschien 1972)
 - vielfach weiterentwickelt
 - in der VO: ANSI-C = C89 (Standard von 1989)

8

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**

9

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!)

10

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!

11

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

12

## 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)

13

## 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`

14

## 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;`

15

## 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> |
|---------------------|---------------------------------|--------------------------------|
| <code>int</code>    | <code>%d</code>                 | <code>%d</code>                |
| <code>double</code> | <code>%f</code>                 | <code>%lf</code>               |

- ▶ Beachte `&` bei `scanf` in Zeile 7
  - `scanf("%d",&x)`
  - aber: `printf("%d",x)`
- ▶ Wenn man `&` vergisst ⇒ Laufzeitfehler
  - Compiler merkt Fehler nicht (kein Syntaxfehler!)
  - Sorgfältig arbeiten!

16

## 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!

17

## 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`

18

## 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  $\approx 0.\bar{6}$**

19

## 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 = 3.800000

20

## 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**  $\Rightarrow 2/3$  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**  $\Rightarrow 2/3.$  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

21

## 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**

22

## 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!

23

## Einfache Verzweigung

### ▶ Logische Operatoren ! == != > >= < <=

### ▶ Logische Junktoren && ||

### ▶ Wahrheit und Falschheit bei Aussagen

### ▶ Verzweigung

### ▶ if

### ▶ if - else

24

## 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:

|              |                                     |
|--------------|-------------------------------------|
| <b>==</b>    | Gleichheit (ACHTUNG mit Zuweisung!) |
| <b>!=</b>    | Ungleichheit                        |
| <b>&gt;</b>  | echt größer                         |
| <b>&gt;=</b> | größer oder gleich                  |
| <b>&lt;</b>  | echt kleiner                        |
| <b>&lt;=</b> | kleiner oder gleich                 |

### ▶ Stets bei Vergleichen Klammer setzen!

- häufig unnötig, aber oft besser lesbar!

### ▶ Weitere logische Operatoren:

|                   |       |
|-------------------|-------|
| <b>!</b>          | nicht |
| <b>&amp;&amp;</b> | und   |
| <b>  </b>         | oder  |

25

## 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
  - \* Also wird **a > b > c** mit falsch bewertet!
- Aussage in 10 ist also nicht korrekt formuliert!

26

## 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. `else statementB` darf entfallen

27

## 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 (Zeile 9–10)
  - besser: Block (analog zu Zeile 12–14)
- ▶ könnte zusätzlich `else` in Zeile 11 schreiben
  - da `if`'s sich ausschließen

28

## 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

29

## 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

30



## 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("Unsorted input:\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("Sorted output (ascending order):\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

31

## 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 of the circle: r=");
12 scanf("%lf",&r);
13 printf("Center of the circle: x = (x1,x2)\n");
14 printf(" x1=");
15 scanf("%lf",&x1);
16 printf(" x2=");
17 scanf("%lf",&x2);
18 printf("Point in the plane: 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 is inside the circle\n");
27 }
28 else {
29 if (dist2 > r*r) {
30 printf("z is outside of the circle\n");
31 }
32 else {
33 printf("z lies on the boundary of the circle\n");
34 }
35 }
36 }
```

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

32

## 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
  - dann Abfrage, ob  $a \neq 0$
- ▶ Letzteres ist schlechter Programmierstil!
  - da zwei Aktionen in einer Programmzeile

33

## Blöcke

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

34

## 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
- ▶ Scope  $\subseteq$  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\_**

35

## 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!

36

## 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

37

## 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)

38

# Funktionen

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

39

## 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**

40

## 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 ⇒ 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!
    - \* ⇒ Irgendwann Chaos (Laufzeitfehler!)

41

## 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

42

## 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
  - 5<sup>2</sup> = 25.000000

43

## 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

44

## 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*

45

## 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 main() {
10 int x = 12;
11 printf("c) x=%d\n", x);
12 test(x);
13 printf("d) x=%d\n", x);
14 }
```

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

46

## 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

47

## 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

48

## 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!**

49

## Kommentarzeilen

- ▶ wozu Kommentarzeilen?

- ▶ //
- ▶ /\* ... \*/

50

## 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...

51

## 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

52

## Beispiel

```
1 // Exercise 0.1 -- how to comment a program
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 // read input x
14 printf("Input x = ");
15 scanf("%lf",&x);
16
17 // read input y
18 printf("Input y = ");
19 scanf("%lf",&y);
20
21 // determine and print minimum
22 printf("min(x,y) = %f\n",min(x,y));
23 }
24
25 // The function min determines the minimum of two
26 // double values x and y
27
28 double min(double x, double y) {
29 if (x > y) {
30 // if x > y, then min(x,y) = y
31 return y;
32 }
33 else {
34 // otherwise, x <= y and min(x,y) = x
35 return x;
36 }
37 }
```

53

## Rekursion

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

54

## 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

55

## Beispiel: Faktorielle

```
1 #include <stdio.h>
2
3 // The function factorial computes the factorial
4 // of a nonnegative integer n recursively
5
6 int factorial(int n) {
7 if (n <= -1) {
8 // factorial not defined for n <= -1
9 return -1;
10 }
11 else {
12 if (n > 1) {
13 // recursive step n! = n*(n-1)!
14 return n*factorial(n-1);
15 }
16 else {
17 // stopping criterion 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("Wrong input!\n");
31 }
32 else {
33 printf("%d!=%d\n",n,nfac);
34 }
35 }
```

56

## 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
  - $\exists \tilde{x}_0 \in [a, b] \quad f(\tilde{x}_0) = 0$  und  $|x_0 - \tilde{x}_0| \leq \tau$
- ▶ **Bisektionsverfahren = iterierte Intervallhalbierung**
  - Solange wie 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  $\tau = 0$ .

57

## 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("Approximate zero of the function x=%g\n",x);
29 printf("Function value 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**

58

# Mathematische Funktionen

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

59

## 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**

60

## 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)

61

## 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**

62



## 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` ⇒ 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

63

## Bedingungsschleifen

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

64

## 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

65

## 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

66

## 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

67

## 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)

68

## Bisektionsverfahren (= Folie 57)

- ▶ **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 wie 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  $\tau = 0$ .

69

## Bisektionsverfahren (vgl. Folie 58)

```
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 m;
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("Approximate zero of the function x=%g\n",x);
34 printf("Function value f(x)=%g\n",f(x));
35 }
```

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

70

## Euklids Algorithmus

- ▶ **Gegeben:** zwei ganze Zahlen  $a, b \in \mathbb{N}$
- ▶ **Gesucht:** größter gemeinsamer Teiler  $\text{gcd}(a, b) \in \mathbb{N}$ 
  - engl. greatest common divisor (gcd)
- ▶ **Euklidischer Algorithmus:**
  - Falls  $a = b$ , gilt  $\text{gcd}(a, b) = a$
  - Vertausche  $a$  und  $b$ , falls  $a < b$
  - Dann gilt  $\text{gcd}(a, b) = \text{gcd}(a - b, b)$ , 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.  $\text{gcd}(a, b) \leq \text{gcd}(a - b, b)$
    - \* analog  $\text{gcd}(a - b, b) \leq \text{gcd}(a, b)$
  - Ersetze  $a$  durch  $a - b$ , wiederhole diese Schritte
- ▶ Erhalte  $\text{gcd}(a, b)$  nach endlich vielen Schritten:
  - Falls  $a \neq b$ , wird also  $n := \max\{a, b\} \in \mathbb{N}$  pro Schritt um mindestens 1 kleiner
  - Nach endlichen vielen Schritten kann also nicht mehr  $a \neq b$  gelten
  - d.h. Algorithmus terminiert

71

## Euklid-Algorithmus

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4 int a = 200;
5 int b = 110;
6 int tmp = 0;
7
8 printf("gcd(%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 printf("%d\n", a);
19 }
20 }
```

- ▶ berechnet gcd von  $a, b \in \mathbb{N}$
- ▶ basiert auf  $\text{gcd}(a, b) = \text{gcd}(a - b, b)$  für  $a > b$
- ▶ Für  $a = b$  terminiert **while** mit  $\text{gcd}(a, b) = a = b$
- ▶ Output:  
gcd(200,110)=10

72

## 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  $b = \text{gcd}$

```
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  $a = \text{gcd}$

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

73

## Beispiel: Euklids Algorithmus

```
1 // author: Dirk Praetorius
2 // last modified: 15.03.2020
3
4 #include <stdio.h>
5
6 // The Euclidean algorithm to compute the greatest
7 // common divisor (gcd) is based on $\text{gcd}(a, b) = \text{gcd}(a-b, b)$
8 // for $a > b$ and $\text{gcd}(a, b) = \text{gcd}(b, a)$.
9
10 int euclid(int a, int b) {
11 int tmp = 0;
12
13 // iteration $\text{gcd}(a, b) = \text{gcd}(a-b, b)$, realized
14 // using division with remainder, until $b = 0$.
15 // Then, since it was $a=b$, it holds $\text{gcd} = a$.
16
17 while (b != 0) {
18 tmp = a%b;
19 a = b;
20 b = 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("gcd(%d,%d)=%d\n", a,b,euclid(a,b));
32 }
```

74

## 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

75

## 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

76

## „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("gcd(%d,%d)=",a,b);
9
10 // Euclidean algorithm with infinite loop + break
11 while (1) {
12 if (b == 0) {
13 break;
14 }
15 else {
16 tmp = a%b;
17 a = b;
18 b = tmp;
19 }
20 }
21
22 printf("%d\n",a);
23 }
```

- ▶ `break` beendet die aktuelle Schleife
- ▶ `while` hat Laufbedingung `condition`
  - d.h. Schleife läuft, solange wie `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

77

## Naive Fehlerkontrolle

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

78

## 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

79

## 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!

80

## 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.

81

## Beispiel: Euklids Algorithmus

```
1 // author: Dirk Praetorius
2 // last modified: 30.03.2017
3
4 // The Euclidean algorithm to compute the greatest
5 // common divisor (gcd) is based on gcd(a,b) = gcd(a-b,b)
6 // for a>b and gcd(a,b) = gcd(b,a).
7
8 int euclid(int a, int b) {
9 assert(a > 0);
10 assert(b > 0);
11 int tmp = 0;
12
13 // iteration gcd(a,b) = gcd(a-b,b), realized
14 // using division with remainder, until b = 0.
15 // Then, since it was a==b, it holds gcd = 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!

82

# Testen

- ▶ Motivation
- ▶ Qualitätssicherung
- ▶ Arten von Tests

83

## 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>

84

## 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 ;-)

85

## 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

86

## 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?

87

## Funktionale Tests?

- ▶ **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

88

## Arrays (=Felder)

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

89

## 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!

90

## Beispiel: Einlesen eines Vektors

```
1 #include <stdio.h>
2
3 main() {
4 double x[3] = {0,0,0};
5
6 printf("Read a vector x in R^3 from keyboard:\n");
7
8 // read x0
9 printf("x_0 = ");
10 scanf("%lf",&x[0]);
11
12 // read x1
13 printf("x_1 = ");
14 scanf("%lf",&x[1]);
15
16 // read x2
17 printf("x_2 = ");
18 scanf("%lf",&x[2]);
19
20 // print vector (componentwise)
21 printf("x = (%f, %f, %f)\n",x[0],x[1],x[2]);
22 }
```

- ▶ Ausgabe double über `printf` mit Platzhalter `%f`
- ▶ Einlesen double über `scanf` mit Platzhalter `%lf`
- ▶ Es gibt keine Möglichkeit, Vektoren als Ganzes einzulesen / auszugeben!

91

## 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 (→ Pointer!)

92

## 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 // function call modifies the coefficients!
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!

93

## Falsche Indizierung von Vektoren

```
1 #include <stdio.h>
2 #define WRONG 1000
3
4 main() {
5 int x[3] = {0,1,2};
6
7 // this coefficient has no reserved memory!
8 x[WRONG] = 43;
9
10 // nevertheless, writing and reading is possible!
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 8, 11-12: 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  $\Rightarrow$  i.a. keine Fehlermeldung
- ▶ Für `WRONG` groß genug  $\Rightarrow$  Programmabbruch
  - weil Betriebssystem merkt, dass das Programm „aus dem Ruder läuft“!
  - d.h. Programm greift auf Speicherbereiche zu, die ihm nicht zugeordnet / erlaubt sind.

94



## Matrizen

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

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

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];`  $\mapsto$  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

95

## 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!

96

## Zählschleife for

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

- ▶ `for`

97

## 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 Bedingungschleife
  - trotzdem immer `for` verwenden, um Statement „eine fixe Anzahl“ oft zu wiederholen
  - gut programmiert = leicht verständlicher Code!

```
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

98

## Vektor einlesen & ausgeben

```
1 #include <stdio.h>
2
3 // Read from the keyboard a double vector
4 // of length dim
5
6 void scanVector(double input[], int dim) {
7 int j = 0;
8 // iterate over all indices of the vector
9 for (j=0; j<dim; j++) {
10 // initialize j-th coefficient
11 input[j] = 0;
12 // read j-th coefficient
13 printf("%d: ",j);
14 scanf("%lf",&input[j]);
15 }
16 }
17
18 // Print to the screen a double vector
19 // of length dim
20
21 void printVector(double output[], int dim) {
22 int j = 0;
23 // iterate over all indices of the vector
24 for (j=0; j<dim; j++) {
25 // print j-th coefficient
26 printf("%f ",output[j]);
27 }
28 printf("\n");
29 }
30
31 main() {
32 double x[5];
33 // recall: call by reference for arrays
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!

99

## 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 // The function returns the minimum of a double vector
14 // of length dim
15
16 double min(double input[], int dim) {
17 int j = 0;
18 // initial guess: the minimum is located at input[0]
19 double minval = input[0];
20 // iterate over all entries of the vector
21 for (j=1; j<dim; j++) {
22 // if a smaller value is found, update minimum
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("The minimum of the vector is %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

100

## Beispiel: Summensymbol $\sum$

▶ 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.

101

## Beispiel: Summensymbol $\sum$

```
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  $sum += j$ ;

102

## 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;`

103

## 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

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

▶ 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!

104

## Matrix spaltenweise speichern 1/2

▶ mathematische Bibliotheken speichern Matrizen idR. spaltenweise als Vektor

- $A \in \mathbb{R}^{M \times N}$ , gespeichert als  $a \in \mathbb{R}^{MN}$
- $a = (A_{00}, A_{10}, \dots, A_{M-1,0}, A_{01}, A_{11}, \dots, A_{M-1,N-1})$

▶ muss Matrix spaltenweise speichern, wenn ich solche Bibliotheken nutzen will

- diese Bibliotheken (aus historischen Gründen) meist in Fortran programmiert

▶ **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  $\ell = j + k \cdot M$

▶ 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

105

## Matrix spaltenweise speichern 2/2

▶ Erinnerung:

- $A \in \mathbb{R}^{M \times N}$ , gespeichert als  $a \in \mathbb{R}^{MN}$
- $A_{jk}$  entspricht also  $a_\ell$  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];
 }
}

```

106

## 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 Eit.
- ▶ 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 Eit.
- ▶ 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

107

## MinSort 1/2

```
1 #include <stdio.h>
2 #define DIM 5
3
4 // read a double vector of length dim from the keyboard
5 void scanVector(double input[], int dim);
6
7 // print a double vector of length dim to the screen
8 void printVector(double output[], int dim);
9
10 // sort a double vector of length dim in ascending order
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 }
```

- ▶ **üblich:** Kommentar, was eine Funktion tut, bei Vorwärts-Deklaration (Zeile 4–11)

108

## 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 // iterate over all indices of the vector
44 for (j=0; j<dim-1; j++) {
45 // determine minimum in (vector[j],...,vector[dim-1])
46 // initial guess: minimum is located at vector[j]
47 argmin = j;
48 for (k=j+1; k<dim; k++) {
49 if (vector[argmin] > vector[k]) {
50 argmin = k;
51 }
52 }
53 // now vector[argmin] is minimum in the remainder
54 // if needed, swap with j so that vector[j] is minimum
55 if (argmin > j) {
56 tmp = vector[argmin];
57 vector[argmin] = vector[j];
58 vector[j] = tmp;
59 }
60 }
61 }
```

109

## 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("End: j=%d, k=%d\n",j,k);
19
20 }
```

- ▶ **continue** und **break** im **statement** von Schleifen
  - **continue** beendet aktuellen Durchlauf
  - **break** beendet nur 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
End: j=4, k=2
```

110

# Aufwand

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

111

## 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:

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

112

## 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

113

## 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  $n$

114

## 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  $m = n$

115

## 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

116

## 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  $\mathcal{O}(\log_2 n) \ll \mathcal{O}(n)$

117

## 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:

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

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

118

## 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  $n = 10000$

119

## 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

120

## Beispiel: Zeitmessung 1/3

```
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)  $\rightarrow$  später!
  - ersetzt nur **int vector[NMAX];**

121

## Beispiel: Zeitmessung 2/3

```
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 */
```

- ▶ auch Test mit Zufallszahlen manchmal sinnvoll
  - hier auskommentiert (Zeile 38–44)
- ▶ Bibliothek **time.h**
  - **time(NULL)** gibt Zeit seit 01.01.1970 in Sekunden
- ▶ Bibliothek **stdlib.h**
  - **srand(time(NULL))** : Initialisierung des Zufallszahlen-Generators
  - **RAND\_MAX** : maximale Zufallszahl (Konstante)
  - **rand()** liefert **int** Zufallszahl von 0 bis **RAND\_MAX**

122

## Beispiel: Zeitmessung 3/3

```

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 }

```

- ▶ Vektor-Länge wächst =  $\times 2$ 
  - Zeit wächst  $\times 2$  linear bzw.  $\times 4$  quadratisch

123

## 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             | > 18min            | 0.00                    |
| 2.048.000     | 0.01             | > 72min            | 0.00                    |
| 4.096.000     | 0.01             | > 4,5h             | 0.00                    |
| 8.192.000     | 0.02             | > 18h              | 0.00                    |
| 16.384.000    | 0.04             | > 3d               | 0.00                    |
| 32.768.000    | 0.08             | > 12d              | 0.00                    |
| 65.536.000    | 0.15             | > 1,5m             | 0.00                    |
| 131.072.000   | 0.29             | > 6m               | 0.00                    |
| 262.144.000   | 0.60             | > 2y               | 0.00                    |
| 524.288.000   | 1.18             | > 8y               | 0.00                    |
| 1.048.576.000 | 2.53             | > 32y              | 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

124

## Pointer

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

125

## 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

126



## Pointer in C

- ▶ Pointer & Variablen sind in C eng verknüpft:
  - **var** Variable ⇒ **&var** ist zugehöriger Pointer
  - **ptr** Pointer ⇒ **\*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**

127

## 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

128

## 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!

129

## 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

130

## 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!

131

## 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 }
```

132

## 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`;

133

## Elementare Datentypen

- ▶ Arrays & Pointer
- ▶ `sizeof`

134

## 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](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!

135

## 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]`

136

## 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!)

137

## 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`

138

# Dynamische Vektoren

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

- ▶ `stdlib.h`
- ▶ `NULL`
- ▶ `malloc`, `realloc`, `free`
  
- ▶ `#ifndef ... #endif`

139

# 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 138

140

# Speicher allokieren

- ▶ **Jetzt**: händische Speicherverwaltung von Arrays
  - dadurch Vektoren dynamischer Länge möglich
  
- ▶ Einbinden der Standard-Bibl: `#include <stdlib.h>`
  - 3 neue Befehle: `malloc`, `free`, `realloc`
  - neue Konstante: `NULL`
  
- ▶ `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

141

# 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!

142

## Beispiel 1/2

```
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 137!
- ▶ Jetzt aber Code OK, da Funktion den Vektor dynamisch mit `malloc` allokiert
  - Vektor existiert (d.h. Speicher ist reserviert), bis Basepointer mit `free` freigegeben!

143

## Beispiel 2/2

```
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 }
```

144

## Dynamische Vektoren

- ▶ `pointer = realloc(pointer,Nnew*sizeof(type))`
  - verändert Speicherallokation
    - \* zusätzliche Allokation für  $N_{\text{new}} > N$
    - \* Speicherbereich kürzen für  $N_{\text{new}} < N$
  - 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

145

## 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  $0 \leq j \leq N - 1$

146

# Vektor-Bibliothek

- ▶ Aufteilen von Source-Code auf mehrere Files
- ▶ Preprocessor, Compiler, Linker
- ▶ Objekt-Code

- ▶ gcc -c
- ▶ make

147

## 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

148

## 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

149

## 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

150

## 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 Verzeichnisses
- `#include <...>` für Standard-Verzeichnis

151

## 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 }
```

152

## Hauptprogramm

```
1 #include "dynamicvectors.h"
2
3 main() {
4 double* x = NULL;
5 int n = 10;
6 int j = 0;
7
8 x = mallocVector(n);
9 for (j=0; j<n; ++j) {
10 x[j] = j;
11 }
12
13 x = reallocVector(x, n, 2*n);
14 for (j=n; j<2*n; ++j) {
15 x[j] = 10*j;
16 }
17
18 printVector(x, 2*n);
19 x = freeVector(x);
20 }
```

### ► 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`

153

## 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

154

# Strings

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

155

# 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`
    - \* kann 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");`

156

# 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/](https://en.wikibooks.org/wiki/C_Programming/)
  - z.B. [https://en.wikibooks.org/wiki/C\\_Programming/string.h/Function\\_reference/](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!)

157

# 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)

158



# Funktionspointer

- ▶ Deklaration
- ▶ Alles ist Pointer!

159

# 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!

160

# 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#

161

# 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 intermediate
8 // value 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("Approximate zero of the function x=%1.15e\n",x);
29 }
```

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

162

## 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 // theorem guarantees root in [a,m]
49 b = m;
50 }
51 else {
52 // 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 }
```

163

## Strukturen

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

164

## Deklaration von Strukturen

- ▶ **Funktionen**
  - Zusammenfassung von verschiedenen Befehlen, um Abstraktionsebenen zu schaffen
- ▶ **Strukturen**
  - Zusammenfassung von Variablen verschiedener Datentypen 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; // first name
4 char* lastname; // last name
5 int studentID; // student ID
6 int studiesID; // studies ID
7 double final_test; // points in final test
8 double quick_quiz; // points in quick quiz
9 double exercise; // points in exercises
10 };
11
12 // declaration of corresponding data type
13 typedef struct _Student_ Student;
```

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

165

## 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; // first name
4 char* lastname; // last name
5 int studentID; // student ID
6 int studiesID; // studies ID
7 double final_test; // points in final test
8 double quick_quiz; // points in quick quiz
9 double exercise; // points in exercises
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.quick_quiz = 30.;
25 var.exercise = 35.;
26 }
```

166

## 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 quick_quiz;
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.quick_quiz = 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;
```

167

## 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)

168

## Strukturen: Speicher allokiert

- ▶ 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).quick_quiz = 0.;
18 (*pointer).exercise = 0.;
19
20 return pointer;
21 }
```

169

## 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 quick_quiz;
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->quick_quiz = 0.;
27 student->exercise = 0.;
28
29 return student;
30 }
```

170

## 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 }
```

171

## 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 // note: for pointers, only addresses are copied
57 copy->firstname = student->firstname;
58 copy->lastname = student->lastname;
59
60 // copy of elementary data
61 copy->studentID = student->studentID;
62 copy->studiesID = student->studiesID;
63 copy->final_test = student->final_test;
64 copy->quick_quiz = student->quick_quiz;
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

172

## 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->quick_quiz = student->quick_quiz;
97 copy->exercise = student->exercise;
98
99 return copy;
100 }
```

173

## 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`

174

## 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

175

## Strukturen & Math

- ▶ Strukturen für mathematische Objekte:

- Punkte im  $\mathbb{R}^3$
- allgemeine Vektoren

176

## 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); // ensure proper memory allocation
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); // ensure that vector v exists
23 free(v);
24 return NULL;
25 }
26
27 double dist(Vector3* v, Vector3* w) {
28 assert(v != NULL); // ensure that vector v exists
29 assert(w != NULL); // ensure that vector w exists
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 }
```

177

## 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`

178

## 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 }
```

179

## 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**

180

## Beispiel: Vektor einlesen

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

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

181

## 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  $x \in \mathbb{R}^n$

182

## 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  $x, y \in \mathbb{R}^n$

183

## Ganzzahlen

- ▶ Bits, Bytes etc.

- ▶ short, int, long

- ▶ unsigned

184

## 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  $[-2^{n-1}, 2^{n-1} - 1]$

185

## Integer-Arithmetik

- ▶ exakte Arithmetik innerhalb  $[\text{intmin}, \text{intmax}]$
- ▶ **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
    - \*  $\text{intmax} + 1$  liefert  $\text{intmin}$
    - \*  $\text{intmin} - 1$  liefert  $\text{intmax}$
  - 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:  
 $n=32, \text{min}=-2147483648, \text{max}=2147483647$

186

## 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

187

## 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  $\geq 0$  durch zusätzliches **unsigned**
  - d.h. ganze Zahlen in  $[0, 2^n - 1]$
  - z.B. **unsigned int var1 = 0;**
- ▶ Es gilt stets **short**  $\leq$  **int**  $\leq$  **long**  $\leq$  **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 | %llu    | %llu    |

- ▶ [https://en.wikipedia.org/wiki/C\\_data\\_types](https://en.wikipedia.org/wiki/C_data_types)
- ▶ Für die UE nur **int** verwenden

188

## 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
```

189

## Gleitkommazahlen

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

190



## 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:  $0.\bar{9} = 1$

191

## 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  $b = 2$

192

## 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

► Gleitkommazahlensystem  $\mathbb{F}(2, M, e_{\min}, e_{\max}) \subset \mathbb{Q}$

- 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

193

## 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.  $x_1 = 1/2$ 
  - \*  $x_1 = a_1/2 \leq x$
  - \*  $x < a_1/2 + 1/2 = x_1 + 2^{-1}$

► **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  $a_{n+1} = 1$ 
  - \*  $x_{n+1} = x_n + a_{n+1} 2^{-(n+1)} \leq x$
  - \*  $x < x_n + a_{n+1} 2^{-(n+1)} + 2^{-(n+1)} = x_{n+1} + 2^{-(n+1)}$

► Es folgt  $|x_n - x| \leq 2^{-n}$ , also  $x = \sum_{k=1}^{\infty} a_k 2^{-k}$

194

## 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  $\varepsilon$ -Schlauch um den Kreisrand?

195

## 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  $116./100.*100. < 116$

196

## 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, 6.6666666666666663e-01
0.666667, 6.6666669e-01
```

197

## 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>**

198

## 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>

199

## Wie erstellt man ein C++ Prg?

- ▶ Öffne eine (ggf. neue) Datei **name.cpp**
  - Endung **.cpp** ist Kennung für C++ Programm
- ▶ Schreibe *Source-Code* (= C++ Programm)
- ▶ Source-Code abspeichern
- ▶ 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**

200

## 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 **lastname::firstname** kann man Funktionsnamen **firstname** mehrfach verwenden!
    - \* bei verschiedenen **lastname**
- ▶ **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!

201

## 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!

202

## 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!
```

203

## 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:  
Please enter an integer value: 2  
Please enter two double values: 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>
    - \*  $\rightarrow$  `ostream::operator<<`

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 (≈ 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

## 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 **c**lass verwenden
- Default-Qualifier in Klassen ist **private**
  - vgl. `MyClass` und Syntax-Fehler in Zeile 26

214

## 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`  $\neq$  `char*`, sondern mächtiger!
- ▶ liefert eine Reihe nützlicher Methoden
  - '+' zum Zusammenfügen
  - `replace` zum Ersetzen von Teilstrings
  - `length` zum Auslesen der Länge u.v.m.
  - `c_str` liefert Pointer auf `char*`
- ▶ <http://www.cplusplus.com/reference/string/string/>

215

## Naive Fehlerkontrolle

- ▶ Wozu Zugriffskontrolle?
- ▶ Vermeidung von Laufzeitfehlern!
- ▶ bewusster Fehlerabbruch
- ▶ `assert`
- ▶ `#include <cassert>`

216

## 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

217

## 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;
32 };
```

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

218

## 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 fraction_assert.cpp, line 36.
Abort trap: 6
```

219

## Konventionen

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

220

## 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`

221

## 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

222



## 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 (später!)
- ▶ `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::...`

223

## 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
```

224

## 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
```

225

## 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

226

# Datentyp bool

- ▶ bool
- ▶ true
- ▶ false

227

## 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
```

228

# Funktionen

- ▶ Default-Parameter & Optionaler Input
- ▶ Überladen

229

## 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 **= value**
  - 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!

230

## 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 von Zeile 6:  
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

231

## Überladen von Funktionen

```
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

232

## Überladen von Methoden

```
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 travelled" << endl;
14 }
15
16 void Car::drive(int km) {
17 cout << km << " km travelled" << endl;
18 }
19
20 void Car::drive(int km, int h) {
21 cout << km << " km travelled in " << h
22 << " hour(s)" << 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 }
```

- ▶ **Output:**  
10 km travelled  
35 km travelled  
50 km travelled in 1 hour(s)

233

## 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 travelled";
12 if (h > 0) {
13 cout << " in " << h << " hour(s)";
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 }
```

- ▶ **Output:**  
10km travelled  
35km travelled  
50km travelled in 1 hour(s)

234

# Konstruktor & Destruktor

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

235

# 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 Standarddestruktor: `~ClassName()`
    - \* kein Input, kein Output
    - \* kann insbesondere nicht überladen werden

236

## 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)

237

## 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 registered
  - student registered (Praetorius, 12345678)

238

## 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)
```

239

## 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)
```

240

## 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("Default") { print(); }
14 Test(string n) : name(n) { print(); }
15 ~Test() {
16 cout << "delete " << name << "\n";
17 }
18 };
19
20 int main() {
21 Test t1("Object1");
22 {
23 Test t2;
24 Test t3("Object3");
25 }
26 cout << "end of block" << "\n";
27 return 0;
28 }
```

### ▶ Output:

```
name Object1
name Default
name Object3
delete Object3
delete Default
end of block
delete Object1
```

241

## Schachtelung von Klassen

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 class Class1 {
6 public:
7 Class1() { cout << "constr Class1" << endl; }
8 ~Class1() { cout << "destr Class1" << endl; }
9 };
10
11 class Class2 {
12 private:
13 Class1 obj1;
14 public:
15 Class2() { cout << "constr 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

### ▶ Output:

```
constr Class1
constr Class2
destr Class2
destr Class1
```

242

## 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
```

243

## 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:** C++ 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)

244

## 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!

245

## 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
```

246

# Referenzen

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

247

# 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

248

# 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 << "address of var = " << &var << endl;
12 cout << "address of 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
  - address of var = 0x7ffef06ea98
  - address of ref = 0x7ffef06ea98

249

# 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**

250

## 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

251

## 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

252

## 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
```

253

## 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

254



## 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

255

## 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&

256

## 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!

257

## 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

258

## 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)

259

## 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

260

## 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!)

261

## 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.

262

## 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\_casting.cpp:12 error: no matching function for call to 'square'  
const\_casting.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)**

263

## 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**

264

## vector\_second.hpp

```
1 #ifndef INCLUDE_VECTOR_SECOND__
2 #define INCLUDE_VECTOR_SECOND__
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

265

## vector\_second.cpp 1/2

```
1 #include "vector_second.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**

266

## vector\_second.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

267

## vector\_second\_main.cpp

```
1 #include "vector_second.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_second.cpp`
- `g++ vector_second_main.cpp vector_second.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
```

268

## 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

269

## 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`

270

## 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 << "non-const object\n"; };
10 void f() const { cout << "const object\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:

```
non-const object
const object
```

271

## Kopierkonstruktor & Zuweisungsoperator

- ▶ Kopierkonstruktor
- ▶ Zuweisungsoperator
- ▶ Dreierregel

- ▶ `ClassName::ClassName(const ClassName&)`
- ▶ `ClassName& ClassName::operator=(const ClassName&)`

272

## Kopierkonstruktor

- ▶ `ClassName::ClassName(const ClassName& rhs)`
  - erzeugt ein neues Objekt der Klasse
  - als Kopie eines Objektes `rhs`
    - \* also Input als Referenz auf konstantes Objekt
- ▶ spezieller Konstruktor für den Aufruf
  - `ClassName lhs = rhs;`
  - oder äquivalent: `ClassName lhs(rhs);`
- ▶ wird auch bei Funktionen / Methoden verwendet
  - für Call by Value für Input-Parameter
  - für Rückgabe (wenn Wert und nicht Referenz)
- ▶ wird automatisch erstellt (als Shallow Copy), falls nicht explizit programmiert
  - Fehlen liefert in der Regel Laufzeitfehler, falls die Klasse dynamische Daten hat

273

## Zuweisungsoperator

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

- ▶ `ClassName& ClassName::operator=(const ClassName&)`
- ▶ Falls `ClassName lhs, rhs;` bereits deklariert:
  - Implementierung der Zuweisung `lhs = rhs;`
  - Input als konstante Referenz (read-only)
  - Rückgabe `return *this;` 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!
- ▶ **Achtung:** Zuweisungsoperator
  - muss ggf. dynamischen Speicher von `lhs` freigeben, da sonst toter Speicher entsteht
  - muss Selbstzuweisung `a = a;` absichern
  - muss `return *this;` zurückgeben
- ▶ wird automatisch erstellt (als Shallow Copy), falls nicht explizit programmiert
  - Fehlen liefert in der Regel Laufzeitfehler, falls die Klasse dynamische Daten hat

274

## 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!)
- ▶ **Guter Stil:** Bei jeder Klasse sofort programmieren
  - Standardkonstruktor
  - Kopierkonstruktor
  - Destruktor
  - Zuweisungsoperator

275

## Missachtung der Dreierregel 1/3

```
1 #include <iostream>
2 #include <cstdlib>
3 using std::cout;
4
5 class Demo {
6 private:
7 int n;
8 double* data;
9 public:
10 Demo(int n, double input);
11 ~Demo();
12 void set(double input);
13 void print();
14 };
15
16 Demo::Demo(int n, double input) {
17 cout << "constructor, length " << n << "\n";
18 this->n = n;
19 data = (double*) malloc(n*sizeof(double));
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 free(data);
28 }
29
30 void Demo::print() {
31 for (int j=0; j<n; ++j) {
32 cout << data[j] << " ";
33 }
34 cout << "\n";
35 }
```

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

276

## Missachtung der Dreierregel 2/3

```
37 void Demo::set(double input) {
38 for (int j=0; j<n; ++j) {
39 data[j] = input;
40 }
41 }
42
43 void print(Demo z) {
44 cout << "print: ";
45 z.print();
46 }
47
48 int main() {
49 Demo x(4,2);
50 Demo y = x;
51 x.print();
52 y.print();
53 cout << "----\n";
54 y.set(3);
55 x.print();
56 y.print();
57 cout << "----\n";
```

- ▶ Zeile 50 ruft Kopierkonstruktor
  - nur Shallow Copy
  - d.h. `x.data = y.data` enthält dieselbe Adresse
- ▶ **Output:**

```
constructor, length 4
2 2 2 2
2 2 2 2

3 3 3 3
3 3 3 3

```

277

## Missachtung der Dreierregel 3/3

```
58 print(x);
59 cout << "----\n";
60 x.set(5);
61 x.print();
62 y.print();
63 return 0;
64 }
```

- ▶ Zeile 58 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:**

```
constructor, length 4
print: 3 3 3 3
destructor, length 4

5 5 5 5
5 5 5 5
destructor, length 4
error: pointer being freed was not allocated
```

278

## Funktionen & Kopierkonstruktor 1/3

```
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 if (this != &rhs) {
22 data = rhs.data;
23 return *this;
24 }
25 }
26
27 ~Demo() {
28 cout << "destructor" << endl;
29 }
30 };
```

- ▶ Bei Funktionsaufruf mit Call by Value werden die Daten immer mittels Kopierkonstruktor an die Funktion übergeben
- ▶ Rückgabe erfordert Kopierkonstruktor und/oder Zuweisungsoperator

279

## Funktionen & Kopierkonstruktor 2/3

```
32 void function(Demo input) {
33 cout << "call by value" << endl;
34 }
35
36 void function2(Demo& input) {
37 cout << "call by reference" << endl;
38 }
39
40 Demo function3(int data) {
41 Demo output(data);
42 return output;
43 }
44
45 int main() {
46 Demo x;
47 Demo y = x;
48 cout << "*** use call by value" << endl;
49 function(y);
50 cout << "*** use call by reference" << endl;
51 function2(x);
52 cout << "*** check data return" << endl;
53 y = function3(10);
54 cout << "*** program terminates" << endl;
55 return 0;
56 }
```

- ▶ Call by Value (Zeile 32 & 49)
- ▶ Call by Reference (Zeile 36 & 51)
- ▶ Rückgabe (Zeile 40 & 53)

280

## Funktionen & Kopierkonstruktor 3/3

```
45 int main() {
46 Demo x;
47 Demo y = x;
48 cout << "*** use call by value" << endl;
49 function(y);
50 cout << "*** use call by reference" << endl;
51 function2(x);
52 cout << "*** check data return" << endl;
53 y = function3(10);
54 cout << "*** program terminates" << endl;
55 return 0;
56 }
```

### ▶ Output:

```
constructor
copy constructor
*** use call by value
copy constructor
call by value
destructor
*** use call by reference
call by reference
*** check data return
constructor
assignment
destructor
*** program terminates
destructor
destructor
```

281

## vector\_third.hpp

```
1 #ifndef INCLUDE_VECTOR_THIRD__
2 #define INCLUDE_VECTOR_THIRD__
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, destructor, assignment operator
20 Vector();
21 Vector(int dim, double init = 0);
22 Vector(const Vector& rhs);
23 ~Vector();
24 Vector& operator=(const Vector& rhs);
25
26 // return vector dimension
27 int size() const;
28
29 // read and write vector coefficients
30 void set(int k, double value);
31 double get(int k) const;
32
33 // compute Euclidean norm
34 double norm() const;
35 };
36
37 #endif
```

- ▶ neu: Kopierkonstruktor (Zeile 22)
- ▶ neu: Zuweisungsoperator (Zeile 24)

282

## vector\_third.cpp 1/2

```
1 #include "vector_third.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 }
19
20 Vector::~Vector() {
21 if (dim > 0) {
22 free(coeff);
23 }
24 std::cout << "free vector, 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 // copy coefficient vector
34 coeff = (double*) malloc(dim*sizeof(double));
35 for (int j=0; j<dim; ++j) {
36 coeff[j] = rhs.coeff[j];
37 }
38 }
39 std::cout << "copy constructor, length " << dim << "\n";
40 }
```

283

## vector\_third.cpp 2/2

```
42 Vector& Vector::operator=(const Vector& rhs) {
43 // check for self-assignment
44 if (this != &rhs) {
45 // if necessary, free memory and allocate new memory
46 if (dim != rhs.dim) {
47 free(coeff);
48 dim = rhs.dim;
49 coeff = (double*) malloc(dim*sizeof(double));
50 }
51 // copy coefficient vector
52 for (int j=0; j<dim; ++j) {
53 coeff[j] = rhs.coeff[j];
54 }
55 }
56 std::cout << "assignment, length " << dim << "\n";
57 // return self-reference for assignment chains
58 return *this;
59 }
60
61 int Vector::size() const {
62 return dim;
63 }
64
65 void Vector::set(int k, double value) {
66 assert(k>=0 && k<dim);
67 coeff[k] = value;
68 }
69
70 double Vector::get(int k) const {
71 assert(k>=0 && k<dim);
72 return coeff[k];
73 }
74
75 double Vector::norm() const {
76 double norm = 0;
77 for (int j=0; j<dim; ++j) {
78 norm = norm + coeff[j]*coeff[j];
79 }
80 return sqrt(norm);
81 }
```

284

## vector\_third\_main.cpp

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

### ► Output:

```
allocate vector, length 100
allocate vector, length 5
copy constructor, length 5
3 3 3 3 3
free vector, length 5
assignment, length 100
norm(y) = 20
free vector, length 100
free vector, length 100
```

- Achtung: Call by Value in Zeile 7 ist ineffizient
  - besser: Call by Reference!

285

## Überladen von Operatoren

- Type Casting
- Unäre und binäre Operatoren
- Stream Operator <<
- Übersicht über Operatoren
- operator

286



## 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

287

## Kopierkonstruktor

```
Complex::Complex(const Complex& rhs) {
 re = rhs.re;
 im = rhs.im;
}
```

- ▶ `className::className(const className& rhs)`
- ▶ Spezieller Konstruktor für den Aufruf
  - `Complex lhs = rhs;`
  - oder äquivalent auch `Complex lhs(rhs);`

## Zuweisungsoperator

```
Complex& Complex::operator=(const Complex& rhs) {
 if (this != &rhs) {
 re = rhs.re;
 im = rhs.im;
 }
 return *this;
}
```

- ▶ `className& className::operator=(const className& rhs)`
- ▶ Falls `Complex lhs, rhs;` bereits deklariert
  - Zuweisung `lhs = rhs;`

288

## Type Casting

- ▶ Deklaration im Header-File  
`Complex(double=0, double=0);`
- ▶ Source-Code  

```
Complex::Complex(double re, double im) {
 this->re = re;
 this->im = im;
}
```
- ▶ Konstruktor gibt Type Cast `double` auf `Complex`
  - d.h.  $x \in \mathbb{R}$  entspricht  $x + 0i \in \mathbb{C}$
- ```
Complex::operator double() const {
    return re;
}
```
- ▶ 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!

289

Unäre Operatoren

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

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

- ▶ 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`

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

- ▶ komplexe Konjugation \sim (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`

290

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**

291

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**!

292

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 }
```

293

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

294

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
```

295

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!

- **Achtung:** kein direkter Zugriff auf Datenfelder, da kein Teil der Klasse!

► Addition (Zeile 1–7):

- $(a + bi) + (A + Bi) = (a + A) + (b + B)i$

► Subtraktion (Zeile 9–15):

- $(a + bi) - (A + Bi) = (a - A) + (b - B)i$

296

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 $\neq 0$

297

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!)

298

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

299

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 }
```

300

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 }
```

301

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 }
```

302

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
```

303

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;`
 - implizit 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)`

304

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)`

305

Welche Operatoren überladen?

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

- `++` als 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++

306

Dynamische Speicherverwaltung

▶ dynamische Speicherverwaltung in C++

- ▶ new, new ... []
- ▶ delete, delete[]

307

new vs. malloc

- ▶ **malloc** reserviert nur Speicher
 - **Nachteil:** Konstruktor wird 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**

308

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;**

309

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 R^d
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
```

310

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

311

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`

312

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 << ")";
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 Obj. (Zeile 77) vs. allgemeine (Z. 82)

313

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

314

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 << "\n";
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
```

315

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 << "scalar product = " << 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
scalar product = 6400
norm copy constructor, length 100
6400
free vector, length 100
*** terminate
free vector, length 100
free vector, length 100
free vector, length 100
```

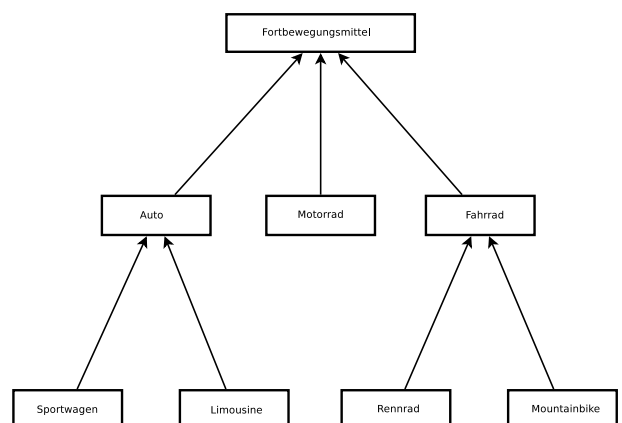
316

Vererbung

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

317

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

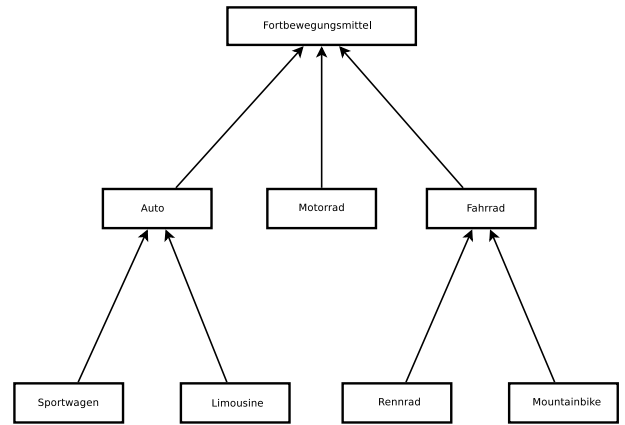
318

public-Vererbung

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

319

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 { ... };`

320

Ein erstes C++ Beispiel

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Parent {
5 private:
6     double x;
7 public:
8     double getX() const { return x; }
9     void setX(double input) { x = input; }
10 };
11
12 class Child : public Parent {
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     Parent var1;
22     Child 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`

321

private Members vererben 1/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Parent {
5 private:
6     double x;
7 public:
8     Parent() { x = 0; }
9     Parent(double inx) { x = inx; }
10    double getX() const { return x; }
11    void setX(double inx) { x = inx; }
12 };
13
14 class Child : public Parent {
15 private:
16     double y;
17 public:
18     Child() { x = 0; y = 0; };
19     Child(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     Parent var1(5);
26     Child 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 'Parent'
- ▶ Zugriff auf `private` Members nur in eigener Klasse, nicht im Scope bei Objekten abgeleiteter Klassen

322

private Members vererben 2/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Parent {
5 private:
6     double x;
7 public:
8     Parent() { x = 0; }
9     Parent(double inx) { x = inx; }
10    double getX() const { return x; }
11    void setX(double inx) { x = inx; }
12 };
13
14 class Child : public Parent {
15 private:
16     double y;
17 public:
18     Child() { setX(0); y = 0; };
19     Child(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     Parent var1(5);
26     Child 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 **Parent** erlaubt Zugriff auf **private**-Members von **Parent** auch für Objekte der Klasse **Child**
- ▶ **x** ist in **Child** nicht im Scope, aber existiert!

323

Konstruktor & Destruktor 1/4

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

324

Konstruktor & Destruktor 2/4

```
44 int main() {
45     Parent var1(5);
46     Child 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 **Child** ruft Konstruktoren von **Parent** und **Child** auf
 - automatisch wird Standard-Konstr. aufgerufen!
- ▶ Freigabe eines Objekts vom Typ **Child** ruft Destruktoren von **Child** und **Parent**
- ▶ **Output:**
Parent(5)
Parent()
Child(1,2)
var1.x = 5, var2.x = 1, var2.y = 2
~Child()
~Parent()
~Parent()

325

Konstruktor & Destruktor 3/4

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

326

Konstruktor & Destruktor 4/4

```
43 int main() {
44     Parent var1(5);
45     Child 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 **Parent** wählen wenn Konstruktor von **Child** aufgerufen wird
 - **Abgeleitet(...)** : **Basisklasse(...)** {...};
 - ruft Konstruktor von **Parent**, welcher der Signatur entspricht (→ Überladen)

▶ Output:

```
Parent(5)
Parent(1)
Child(1,2)
var1.x = 5, var2.x = 1, var2.y = 2
~Child()
~Parent()
~Parent()
```

327

Ein weiteres Beispiel 1/3

```
1 #ifndef INCLUDE_MEANSOFTRANSPORT__
2 #define INCLUDE_MEANSOFTRANSPORT__
3
4 #include <iostream>
5 #include <string>
6
7 class MeansOfTransport {
8 private:
9     double speed;
10 public:
11     MeansOfTransport(double = 0);
12     double getSpeed() const;
13     void setSpeed(double);
14     void move() const;
15 };
16
17 class Car : public MeansOfTransport {
18 private:
19     std::string color;           // additional feature
20 public:
21     Car();
22     Car(double, std::string);
23     std::string getColor() const;
24     void setColor(std::string);
25     void shift() const;         // additional feature
26 };
27
28 class Sportscar : public Car {
29 public:
30     Sportscar();
31     Sportscar(double, std::string);
32     void kickstart() const;    // additional feature
33 };
34 #endif
```

328

Ein weiteres Beispiel 2/3

```
1 #include "meansoftransport.hpp"
2 using std::string;
3 using std::cout;
4
5 MeansOfTransport::MeansOfTransport(double s) {
6     cout << "MeansOfTransport(" << s << ")\n";
7     speed = s;
8 }
9 double MeansOfTransport::getSpeed() const {
10     return speed;
11 }
12 void MeansOfTransport::setSpeed(double s) {
13     speed = s;
14 }
15 void MeansOfTransport::move() const {
16     cout << "I am travelling " << speed << " km per hour\n";
17 }
18
19 Car::Car() { cout << "Car()\n"; };
20 Car::Car(double s, string c) : MeansOfTransport(s) {
21     cout << "Car(" << s << ", " << c << ")\n";
22     color = c;
23 }
24 string Car::getColor() const {
25     return color;
26 }
27 void Car::setColor(string c) {
28     color = c;
29 }
30 void Car::shift() const {
31     cout << "Shifted!\n";
32 }
33
34 Sportscar::Sportscar() { cout << "Sportscar()\n"; };
35 Sportscar::Sportscar(double s, string c) : Car(s,c) {
36     cout << "Sportscar(" << s << ", " << c << ")\n";
37 }
38 void Sportscar::kickstart() const {
39     cout << "Roar\n";
40 }
```

329

Ein weiteres Beispiel 3/3

```
1 #include "meansoftransport.hpp"
2
3 int main() {
4     MeansOfTransport bike(10);
5     Car cabrio(100,"red");
6     Sportscar porsche(230,"black");
7
8     bike.move();
9     cabrio.move();
10    porsche.move();
11
12    cabrio.shift();
13    porsche.kickstart();
14
15    return 0;
16 }
```

▶ Output:

```
MeansOfTransport(10)
MeansOfTransport(100)
Car(100,red)
MeansOfTransport(230)
Car(230,black)
Sportscar(230,black)
I am travelling 10 km per hour
I am travelling 100 km per hour
I am travelling 230 km per hour
Shifted!
Roar
```

330

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 Child : public Parent {...};`

Parent	Child		
	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

331

private, protected, public 2/2

```
1 class Parent {
2 private:
3   int a;
4 protected:
5   int b;
6 public:
7   int c;
8 };
9
10 class Child : public Parent {
11 public:
12   void method() {
13     a = 10; // not OK as a is hidden
14     b = 10; // OK as b is protected
15     c = 10; // OK as c is public
16   }
17 };
18
19 int main() {
20   Parent parent;
21   parent.a = 10; // not OK as a is private
22   parent.b = 10; // not OK as b is protected
23   parent.c = 10; // OK as c is public
24
25   Child child;
26   child.a = 10; // not OK as a is hidden
27   child.b = 10; // not OK as b is protected
28   child.c = 10; // OK as c is 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 'Parent'
protected.cpp:3: note: declared private here
```

332

Methoden redefinieren 1/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Parent {
5 public:
6   void print() { cout << "no input\n"; }
7   void print(int x) { cout << "input = " << x << "\n"; }
8 };
9
10 class Child : public Parent {
11 public:
12   void print() { cout << "Child: no input\n"; }
13 };
14
15 int main() {
16   Parent var1;
17   Child 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:

```
redefine1.cpp:22: error: too many arguments to function call, expected 0, have 1; did you mean 'Parent::print'?
```

333

Methoden redefinieren 2/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Parent {
5 public:
6   void print() { cout << "no input\n"; }
7   void print(int x) { cout << "input = " << x << "\n"; }
8 };
9
10 class Child : public Parent {
11 public:
12   void print() { cout << "Child: no input\n"; }
13 };
14
15 int main() {
16   Parent var1;
17   Child var2;
18
19   var1.print();
20   var1.print(1);
21   var2.print();
22   var2.Parent::print(2); // only change in this line
23   return 0;
24 }
```

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

```
no input
input = 1
Child: no input
input = 2
```

334

Matrizen

- ▶ Klasse für Matrizen
- ▶ Vektoren als abgeleitete Klasse

335

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

336

Koeffizientenzugriff

```
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 }
```

- ▶ 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_ℓ

337

Summe

```
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 }
```

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

338

Produkt

```
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 }
```

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

- erfordert passende Dimension!

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

339

matrix_first.hpp

```
1 #ifndef INCLUDE_MATRIX_FIRST__
2 #define INCLUDE_MATRIX_FIRST__
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
```

340

matrix_first.cpp 1/4

```
1 #include "matrix_first.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 }
```

341

matrix_first.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 }
```

342

matrix_first.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 }
```

343

matrix_first.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 }
```

344

matrix_first_test.cpp

```
1 #include "matrix_first.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
```

345

matrix_first-vector.hpp

```
1 #ifndef INCLUDE_MATRIX_VECTOR_
2 #define INCLUDE_MATRIX_VECTOR_
3
4 #include "matrix_first.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!

346

matrix_first-vector.cpp

```
1 #include "matrix_first-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 $\mathbb{R}^{n \times 1}$

347

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**

348

matrix_first-vector_test.cpp 1/2

```
1 #include "matrix_first.hpp"
2 #include "matrix_first-vector.hpp"
3 using std::cout;
4
5 void callByValue(Vector Z) {
6     cout << "call by value\n";
7 }
8
9 int main() {
10     int n = 3;
11     Matrix A(n,n);
12     for (int j=0; j<n; ++j) {
13         A(j,j) = j+1;
14     }
15     cout << A;
16     Vector X(n,1);
```

▶ Output:

```
constructor, 3 x 3
1 0 0
0 2 0
0 0 3
constructor, 3 x 1
vector constructor, size 3
```

349

matrix_first-vector_test.cpp 2/2

```
17     cout << "*** matrix-vector multiplication\n";
18     Vector Y = A*X;
19     cout << Y;
20     cout << "*** assignment\n";
21     X = Y;
22     cout << "*** function call\n";
23     callByValue(Y);
24     cout << "*** terminate\n";
25     return 0;
26 }
```

▶ Output:

```
*** matrix-vector multiplication
constructor, 3 x 1
constructor, 3 x 1
type cast Matrix -> Vector
destructor, 3 x 1
1
2
3
*** assignment
deep copy, 3 x 1
*** function call
copy constructor, 3 x 1
call by value
destructor, 3 x 1
*** terminate
destructor, 3 x 1
destructor, 3 x 1
destructor, 3 x 3
```

350

Schlüsselwort virtual

- ▶ Polymorphie
- ▶ Virtuelle Methoden
- ▶ virtual

351

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!

352

Pointer und virtual 1/3

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

▶ Output:

Child
Parent

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

353

Pointer und virtual 2/3

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

▶ Output:

Child
Child

- ▶ 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

354

Pointer und virtual 3/3

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Parent {
5 public:
6     virtual void print() {cout << "Parent\n";}
7 };
8
9 class Child1 : public Parent {
10 public:
11     void print() {cout << "Child1\n";}
12 };
13
14 class Child2 : public Parent {
15 public:
16     void print() {cout << "Child2\n";}
17 };
18
19 int main() {
20     Parent* var[2];
21     var[0] = new Child1;
22     var[1] = new Child2;
23
24     for (int j=0; j<2; ++j) {
25         var[j]->print();
26     }
27     return 0;
28 }
```

► Output:

```
Child1
Child2
```

- `var` ist Vektor mit Objekten verschiedener Typen!

355

Destruktor und virtual 1/2

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

► Output:

```
~Parent()
```

- Destruktor von `Child` wird nicht aufgerufen!
 - ggf. entsteht toter Speicher, falls `Child` zusätzlichen dynamischen Speicher anlegt
- Destruktoren werden deshalb üblicherweise als `virtual` deklariert

356

Destruktor und virtual 2/2

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

► Output:

```
~Child()
~Parent()
```

- Destruktor von `Child` wird aufgerufen
 - ruft implizit Destruktor von `Parent` auf

357

Virtuelle Methoden 1/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Parent {
5 public:
6     void ego() { cout << "Parent\n"; }
7     void print() { cout << "I am "; ego(); }
8 };
9
10 class Child1: public Parent {
11 public:
12     void ego() { cout << "Child1\n"; }
13 };
14
15 class Child2: public Parent {};
16
17 int main() {
18     Parent var0;
19     Child1 var1;
20     Child2 var2;
21     var0.print();
22     var1.print();
23     var2.print();
24     return 0;
25 }
```

► Output:

```
I am Parent
I am Parent
I am Parent
```

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

358

Virtuelle Methoden 2/2

```
1 #include <iostream>
2 using std::cout;
3
4 class Parent {
5 public:
6     virtual void ego() { cout << "Parent\n"; }
7     void print() { cout << "I am "; ego(); }
8 };
9
10 class Child1: public Parent {
11 public:
12     void ego() { cout << "Child1\n"; }
13 };
14
15 class Child2: public Parent {};
16
17 int main() {
18     Parent var0;
19     Child1 var1;
20     Child2 var2;
21     var0.print();
22     var1.print();
23     var2.print();
24     return 0;
25 }
```

▶ Output:

```
I am Parent
I am Child1
I am Parent
```

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

359

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

360

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

361

Templates

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

362

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](#)

363

Beispiel: Maximum / Quadrieren

```
1 int max(int a, int b) {
2   if (a < b) {
3     return b;
4   }
5   else {
6     return a;
7   }
8 }
9
10 double max(double a, double b) {
11   if (a < b) {
12     return b;
13   }
14   else {
15     return a;
16   }
17 }
18
19 int square(int a) {
20   return a*a;
21 }
22
23 double square(double a) {
24   return a*a;
25 }
```

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

364

Funktionstemplate 1/2

```
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   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

365

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(const double&)`
 - `int square(const int&)`
- ▶ d.h. `square` automatisch durch Template generiert
 - also nur für die Typen, die wirklich benötigt

366

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    //objects of this class cannot be copied
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

367

Klassentemplate 2/3

```
20 template <typename Type>
21 Pointer<Type>::Pointer(Type* ptr) {
22     this->ptr = ptr;
23     cout << "constructor" << endl;
24 }
25
26 template <typename Type>
27 Pointer<Type>::~~Pointer() {
28     if ( ptr != (Type*) 0 ) {
29         delete ptr;
30     }
31     cout << "destructor" << 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->`

368

Klassentemplate 3/3

```
20 template <typename Type>
21 Pointer<Type>::Pointer(Type* ptr) {
22     this->ptr = ptr;
23     cout << "constructor" << endl;
24 }
25
26 template <typename Type>
27 Pointer<Type>::~~Pointer() {
28     if ( ptr != (Type*) 0 ) {
29         delete ptr;
30     }
31     cout << "destructor" << 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("Hello World!"));
46     cout << *pointer << endl;
47     cout << "length = " << pointer->length() << endl;
48     return 0;
49 }
```

- ▶ **Output:**
constructor
Hello World!
length = 12
destructor
- ▶ Destruktor gibt dynamischen Speicher wieder frei

369

Warum Zuweisung `private`?

- ▶ Probleme bei Kopien von Smartpointern:

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

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

370

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>

371

vector Template

372

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 Entry {
9 public:
10  string name;
11 };
12
13 int main() {
14  vector<Entry> telephoneBook(2);
15  telephoneBook[0].name = "Peter Pan";
16  telephoneBook[1].name = "Wolverine";
17  cout << telephoneBook[1].name << "\n";
18  return 0;
19 }
```

▶ **vector** ist C++ Standardcontainer

- kann beliebige Datentypen verwenden
- dienen zum Verwalten von Datenmengen

▶ Zeile 14: Anlegen eines Vektors der Länge 2 mit Einträgen vom Typ **Entry**

▶ Anlegen **vector<type> name(size);**

▶ **Achtung**, nicht verwechseln:

- 1000 Einträge: **vector<Entry> buch(1000);**
- 1000 Vektoren: **vector<Entry> buch[1000];**

▶ Zugriff auf *j*-tes Element wie bei Arrays

- **telephoneBook[j]** (Zeile 15–17)

373

Vektoren mittels vector 1/3

```
1 #include <iostream>
2 #include <vector>
3 #include <cassert>
4 #include <cmath>
5
6 using std::vector;
7 using std::cout;
8 using std::ostream;
9
10 class Vector {
11 private:
12  vector<double> coeff;
13
14 public:
15  Vector(int dim=0, double init=0);
16  int size() const;
17  const double& operator()(int k) const;
18  double& operator()(int k);
19  double norm() const;
20 };
```

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

- Kopierkonstruktor
- Zuweisung
- Destruktor

374

Vektoren mittels vector 2/3

```
22 Vector::Vector(int dim, double init) : coeff(dim,init) {}
23
24 int Vector::size() const {
25     return coeff.size();
26 }
27
28 const double& Vector::operator()(int k) const {
29     assert(k>=0 && k<size());
30     return coeff[k];
31 }
32
33 double& Vector::operator()(int k) {
34     assert(k>=0 && k<size());
35     return coeff[k];
36 }
37
38 double Vector::norm() const {
39     double sum = 0;
40     for (int j=0; j<size(); ++j) {
41         sum = sum + coeff[j]*coeff[j];
42     }
43     return sqrt(sum);
44 }
```

- ▶ **vector** Template hat Methode **size** (Zeile 25)
- ▶ wird genutzt für Methode **size** für Klasse **Vector**

375

Vektoren mittels vector 3/3

```
46 ostream& operator<<(ostream& output, const Vector& x) {
47     output << "\n";
48     if (x.size()==0) {
49         output << " empty vector";
50     }
51     else {
52         for (int j=0; j<x.size(); ++j) {
53             output << " " << x[j];
54         }
55     }
56     output << "\n";
57     return output;
58 }
59
60 int main() {
61     Vector x(5,2);
62     Vector y;
63     cout << "x = " << x;
64     cout << "y = " << y;
65     y = x;
66     x(4) = 0;
67     cout << "x = " << x;
68     cout << "y = " << y;
```

- ▶ Zuweisung funktioniert (implizit generiert!)

▶ Output:

```
x =
2 2 2 2 2
y =
empty vector
x =
2 2 2 2 0
y =
2 2 2 2 2
```

376

Matrizen 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::endl;
8 using std::ostream;
9
10 class SquareMatrix {
11 private:
12     vector<vector<double> > coeff;
13
14 public:
15     SquareMatrix(int dim=0, double init=0);
16     int size() const;
17     const double& operator()(int j, int k) const;
18     double& operator()(int j, int k);
19     double norm() const;
20 };
21
22 SquareMatrix::SquareMatrix(int dim, double init) :
23     coeff(dim,vector<double>(dim,init)) {}
24
25 int SquareMatrix::size() const {
26     return coeff.size();
27 }
```

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

377

Matrizen mittels vector 2/3

```
29 const double& SquareMatrix::operator()(int j,int k) const {
30     assert(j>=0 && j<size());
31     assert(k>=0 && k<size());
32     return coeff[j][k];
33 }
34
35 double& SquareMatrix::operator()(int j, int k) {
36     assert(j>=0 && j<size());
37     assert(k>=0 && k<size());
38     return coeff[j][k];
39 }
40
41 double SquareMatrix::norm() const {
42     double sum = 0;
43     for (int j=0; j<size(); ++j) {
44         for (int k=0; k<size(); ++k) {
45             sum = sum + coeff[j][k]*coeff[j][k];
46         }
47     }
48     return sqrt(sum);
49 }
50
51 ostream& operator<<(ostream& output,
52     const SquareMatrix& A) {
53     output << endl;
54     int n = A.size();
55     if (n == 0) {
56         output << " empty matrix" << endl;
57     }
58     else {
59         for (int j=0; j<n; ++j) {
60             for (int k=0; k<n; ++k) {
61                 output << " " << A(j,k);
62             }
63             output << endl;
64         }
65     }
66     output << endl;
67     return output;
68 }
```

378

Matrizen mittels vector 3/3

```
70 int main() {
71     SquareMatrix A(3,5);
72     SquareMatrix B;
73     cout << "B = " << B;
74     B = A;
75     A(1,1) = 0;
76     cout << "A = " << A;
77     cout << "B = " << B;
78     cout << "norm(B) = " << B.norm() << endl;
79     return 0;
80 }
```

► Output:

```
B =
empty matrix
```

```
A =
5 5 5
5 0 5
5 5 5
```

```
B =
5 5 5
5 5 5
5 5 5
```

```
norm(B) = 15
```

379

Beispiel: Matrix-Klasse

380

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

381

matrix.hpp 1/3

```
1 #ifndef INCLUDE_MATRIX__
2 #define INCLUDE_MATRIX__
3 #include <vector>
4 #include <cmath>
5 #include <cassert>
6 #include <iostream>
7
8 class Matrix {
9 private:
10     int m;
11     int n;
12     std::vector<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=0);
17     const std::vector<double>& accessCoeff() const;
18     std::vector<double>& accessCoeff();
```

- abgeleitete Klassen, z.B. `LowerTriangularMatrix` 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!)
- `LowerTriangularMatrix` braucht weniger Speicher
 - muss Allokation als Methode bereitstellen
 - * $m \cdot n$ Speicherplätze für $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$
 - * nur $\frac{n(n+1)}{2} = \sum_{i=1}^n i$, wenn $A_{ij} = 0$ für $j > i$

382

matrix.hpp 2/3

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

383

matrix.hpp 3/3

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

384

matrix.cpp 1/5

```
1 #include "matrix.hpp"
2 using std::vector;
3 using std::cout;
4 using std::endl;
5 using std::ostream;
6
7 const vector<double>& Matrix::accessCoeff() const {
8     return coeff;
9 }
10
11 vector<double>& Matrix::accessCoeff() {
12     return coeff;
13 }
14
15 void Matrix::allocate(int m, int n, int storage,
16                      double init) {
17     assert( m >= 0 );
18     assert( n >= 0 );
19     assert( (storage >= 0) && (storage <= m*n) );
20     this->m = m;
21     this->n = n;
22     coeff = vector<double>(storage, init);
23     cout << "Matrix: allocate " << storage << endl;
24 }
25
26 Matrix::Matrix() {
27     allocate(0,0,0,0);
28     cout << "Matrix: empty constructor" << endl;
29 }
30
31 Matrix::Matrix(int m, int n, double init) {
32     allocate(m,n,m*n,init);
33     cout << "Matrix: constructor, "
34           << m << " x " << n << endl;
35 }
```

385

matrix.cpp 2/5

```
37 Matrix::Matrix(const Matrix& rhs) : coeff(rhs.m*rhs.n) {
38     m = rhs.m;
39     n = rhs.n;
40     for (int j=0; j<m; ++j) {
41         for (int k=0; k<n; ++k) {
42             (*this)(j,k) = rhs(j,k);
43         }
44     }
45     cout << "Matrix: copy constructor, "
46           << m << " x " << n << endl;
47 }
48
49 Matrix& Matrix::operator=(const Matrix& rhs) {
50     if (this != &rhs) {
51         m = rhs.m;
52         n = rhs.n;
53         allocate(m,n,m*n,0);
54         for (int j=0; j<m; ++j) {
55             for (int k=0; k<n; ++k) {
56                 (*this)(j,k) = rhs(j,k);
57             }
58         }
59     }
60     cout << "Matrix: deep copy, " << m << " x " << n << endl;
61     return *this;
62 }
63
64 Matrix::~Matrix() {
65     cout << "Matrix: destructor, "
66           << m << " x " << n << endl;
67 }
```

- ▶ Kopierkonstruktor und Zuweisungsoperator vermeiden **coeff = rhs.coeff**, weil Matrizen unterschiedlich gespeichert sein können

386

matrix.cpp 3/5

```
69 int Matrix::size1() const {
70     return m;
71 }
72
73 int Matrix::size2() const {
74     return n;
75 }
76
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<coeff.size()) );
91     return coeff[ell];
92 }
93
94 double& Matrix::operator[](int ell) {
95     assert( (ell>=0) && (ell<coeff.size()) );
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 }
```

387

matrix.cpp 4/5

```
109 ostream& operator<<(ostream& output, const Matrix& A) {
110     output << endl;
111     int m = A.size1();
112     int n = A.size2();
113     if ( m*n != 0 ) {
114         for (int j=0; j<m; j++) {
115             for (int k=0; k<n; k++) {
116                 output << " " << A(j,k);
117             }
118             output << endl;
119         }
120     }
121     else {
122         cout << " empty matrix" << endl;
123     }
124     return output;
125 }
126
127 const Matrix operator+(const Matrix& A, const Matrix& B) {
128     int m = A.size1();
129     int n = A.size2();
130     assert(m == B.size1() );
131     assert(n == B.size2() );
132     Matrix sum(m,n);
133     for (int j=0; j<m; ++j) {
134         for (int k=0; k<n; ++k) {
135             sum(j,k) = A(j,k) + B(j,k);
136         }
137     }
138     return sum;
139 }
```

► Addition: $A + B \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $(A + B)_{jk} = A_{jk} + B_{jk}$

388

matrix.cpp 5/5

```
141 const Matrix operator*(const Matrix& A, const Matrix& B) {
142     int m = A.size1();
143     int n = A.size2();
144     int p = B.size2();
145     double sum = 0;
146     assert(n == B.size1() );
147     Matrix product(m,p);
148     for (int j=0; j<m; ++j) {
149         for (int ell=0; ell<p; ++ell) {
150             sum = 0;
151             for (int k=0; k<n; ++k) {
152                 sum = sum + A(j,k)*B(k,ell);
153             }
154             product(j,ell) = sum;
155         }
156     }
157     return product;
158 }
```

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

- $A \in \mathbb{R}^{m \times n}$, $B \in \mathbb{R}^{n \times p}$

389

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

390

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`

391

squareMatrix.cpp

```
1 #include "squareMatrix.hpp"
2 using std::cout;
3 using std::endl;
4
5 SquareMatrix::SquareMatrix() {
6     cout << "SquareMatrix: empty constructor" << endl;
7 }
8
9 SquareMatrix::SquareMatrix(int n, double init) :
10     Matrix(n,n,init) {
11     cout << "SquareMatrix: constructor, " << size() << endl;
12 };
13
14 SquareMatrix::SquareMatrix(const SquareMatrix& rhs) :
15     Matrix(rhs) {
16     cout << "SquareMatrix: copy constructor, "
17         << size() << endl;
18 }
19
20 SquareMatrix::~SquareMatrix() {
21     cout << "SquareMatrix: destructor, " << size() << endl;
22 }
23
24 SquareMatrix::SquareMatrix(const Matrix& rhs) :
25     Matrix(rhs) {
26     assert(size1() == size2());
27     cout << "type cast Matrix -> SquareMatrix" << endl;
28 }
29
30 int SquareMatrix::size() const {
31     return size1();
32 }
```

- ▶ 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!

392

Demo zu squareMatrix 1/5

```
1 #include "matrix.hpp"
2 #include "squareMatrix.hpp"
3
4 using std::cout;
5 using std::endl;
6
7 int main() {
8     int n = 3;
9
10    cout << "*** init A" << endl;
11    SquareMatrix A(n);
12    for (int ell=0; ell<n*n; ++ell) {
13        A[ell] = ell;
14    }
15    cout << "A =" << A;
16
17    cout << "*** init B" << endl;
18    Matrix B = A;
19    cout << "B =" << B;
20
21    cout << "*** init C" << endl;
22    SquareMatrix C = A;
23    cout << "C =" << C;
24
25    cout << "*** C = A + A" << endl;
26    C = A + A;
27    cout << "C =" << C;
28
29    cout << "*** init D" << endl;
30    SquareMatrix D = A + B;
31    cout << "D =" << C;
32
33    cout << "*** terminate" << endl;
34    return 0;
35 }
```

- ▶ erwartetes Resultat:

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

393

Demo zu squareMatrix 2/5

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

- ▶ **Output:**

```
*** init A
Matrix: allocate 9
Matrix: constructor, 3 x 3
SquareMatrix: constructor, 3
A =
0 3 6
1 4 7
2 5 8
```

- ▶ man sieht spaltenweise Speicherung von A

394

Demo zu squareMatrix 3/5

```
17 cout << "*** init B" << endl;
18 Matrix B = A;
19 cout << "B =" << B;
20
21 cout << "*** init C" << endl;
22 SquareMatrix C = A;
23 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
```

395

Demo zu squareMatrix 4/5

```
25 cout << "*** C = A + A" << endl;
26 C = A + A;
27 cout << "C =" << C;
```

► Output:

```
*** C = A + A
Matrix: allocate 9
Matrix: constructor, 3 x 3
Matrix: copy constructor, 3 x 3
type cast Matrix -> SquareMatrix
Matrix: allocate 9
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
```

396

Demo zu squareMatrix 5/5

```
29 cout << "*** init D" << endl;
30 SquareMatrix D = A + B;
31 cout << "D =" << C;
32
33 cout << "*** terminate" << endl;
34 return 0;
35 }
```

► Output:

```
*** init D
Matrix: allocate 9
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
```

397

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
11 public:
12     // constructors, destructor, type cast from Matrix
13     LowerTriangularMatrix();
14     LowerTriangularMatrix(int n, double init=0);
15     LowerTriangularMatrix(const LowerTriangularMatrix&);
16     LowerTriangularMatrix(const Matrix&);
17     ~LowerTriangularMatrix();
18
19     // assignment operator
20     LowerTriangularMatrix& operator=(
21         const LowerTriangularMatrix&);
22
23     // read and write entries with matrix access A(j,k)
24     virtual const double operator()(int j, int k) const;
25     virtual double& operator()(int j, int k);
26 };
27 #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 $\ell = \frac{i(j+1)}{2} + k$
- muss Matrix-Zugriff () redefinieren

398

lowerTriangularMatrix.cpp 1/3

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

- ▶ **private** Member **zero** hat Wert 0
 - dienen für Zugriff auf $A_{jk} = 0$ für $k > j$
- ▶ Type Cast kontrolliert, dass **rhs** ∈ $\mathbb{R}^{n \times n}$ eine untere Dreiecksmatrix ist

399

lowerTriangularMatrix.cpp 2/3

```
34 LowerTriangularMatrix::LowerTriangularMatrix(
35     const LowerTriangularMatrix& rhs) {
36     int n = rhs.size();
37     allocate(n, n, 0, 0);
38     zero = 0;
39     accessCoeff() = rhs.accessCoeff();
40     cout << "LowerTriangular: copy constructor, "
41         << n << endl;
42 }
43
44 LowerTriangularMatrix& LowerTriangularMatrix::operator=(
45     const LowerTriangularMatrix& rhs) {
46     if (this != &rhs) {
47         int n = rhs.size();
48         allocate(n, n, 0, 0);
49         zero = 0;
50         accessCoeff() = rhs.accessCoeff();
51         cout << "LowerTriangular: deep copy "
52             << size() << endl;
53     }
54     return *this;
55 }
56
57 LowerTriangularMatrix::~LowerTriangularMatrix() {
58     cout << "LowerTriangular: destructor, "
59         << size() << endl;
60 }
```

- ▶ Kopierkonstruktor und Zuweisungsoperator für Objekte der eigenen Klasse nutzen Operatoren vom **vector**-Template
- ▶ Redefinition nötig, damit nicht von **Matrix** geerbt
 - Speichervektor von **LowerTriangularMatrix** ist anders als der von **Matrix**

400

lowerTriangularMatrix.cpp 3/3

```
62 const double LowerTriangularMatrix::operator()(
63     int j, int k) const {
64     assert( j>=0 && j<size() );
65     assert( k>=0 && k<size() );
66     if ( j < k ) {
67         return 0;
68     }
69     else {
70         const vector<double>& coeff = accessCoeff();
71         return coeff[j*(j+1)/2+k];
72     }
73 }
74
75 double& LowerTriangularMatrix::operator()(int j, int k) {
76     assert( j>=0 && j<size() );
77     assert( k>=0 && k<size() );
78     if ( j < k ) {
79         zero = 0;
80         return zero;
81     }
82     else {
83         vector<double>& coeff = accessCoeff();
84         return coeff[j*(j+1)/2+k];
85     }
86 }
```

- ▶ Redefinition von Matrix-Zugriff **A(j,k)**
- ▶ Garantiere $A_{jk} = 0$ für $k > j$, damit Methoden aus **Matrix** genutzt werden können
 - bei **const**-Objekten stets Rückgabewert **0**
 - bei nicht-**const**-Objekten Rückgabereferenz auf **zero**. Dies wird explizit immer auf 0 gesetzt!
 - * Benutzer könnte auch schreibend zugreifen

401

Demo zu lowerTriangularMatrix 1/7

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

▶ Output:

```
*** init A
Matrix: allocate 9
Matrix: constructor, 3 x 3
SquareMatrix: constructor, 3
A =
1 1 1
1 1 1
1 1 1
```

402

Demo zu lowerTriangularMatrix 2/7

```
15 cout << "*** init B" << endl;
16 LowerTriangularMatrix B(n);
17 for (int ell=0; ell<n*(n+1)/2; ++ell) {
18     B[ell] = 2;
19 }
20 B(0,n-1) = 10; //*** has no effect!
21 cout << "B =" << B;
```

► Output:

```
*** init B
Matrix: allocate 0
Matrix: empty constructor
SquareMatrix: empty constructor
Matrix: allocate 6
LowerTriangular: constructor, 3
B =
 2 0 0
 2 2 0
 2 2 2
```

403

Demo zu lowerTriangularMatrix 3/7

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

► Output:

```
*** init C
Matrix: allocate 9
Matrix: constructor, 3 x 3
C =
 3 1 1
 3 3 1
 3 3 3
*** init D
Matrix: allocate 0
Matrix: empty constructor
SquareMatrix: empty constructor
Matrix: allocate 6
LowerTriangular: constructor, 3
D =
 0 0 0
 1 2 0
 3 4 5
```

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

404

Demo zu lowerTriangularMatrix 4/7

```
33 cout << "--" << endl;
34 D = D + B;
35 cout << "--" << endl;
36 cout << "D =" << D;
```

► Output:

```
--
Matrix: allocate 9
Matrix: constructor, 3 x 3
Matrix: allocate 0
Matrix: empty constructor
SquareMatrix: empty constructor
Matrix: allocate 6
type cast Matrix -> LowerTriangular
Matrix: allocate 0
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: $B = \begin{pmatrix} 2 & 0 & 0 \\ 2 & 2 & 0 \\ 2 & 2 & 2 \end{pmatrix}$, $D = \begin{pmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 2 & 0 \\ 3 & 4 & 5 \end{pmatrix}$

405

Demo zu lowerTriangularMatrix 5/7

```
38 cout << "*** init E" << endl;
39 LowerTriangularMatrix E = D;
40 cout << "E =" << E;
41
42 cout << "*** A = D" << endl;
43 A = D;
44 cout << "A =" << A;
```

► Output:

```
*** init E
Matrix: allocate 0
Matrix: empty constructor
SquareMatrix: empty constructor
Matrix: allocate 0
LowerTriangular: copy constructor, 3
E =
 2 0 0
 3 4 0
 5 6 7
*** A = D
Matrix: allocate 9
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**

406

Demo zu lowerTriangularMatrix 6/7

```
46 cout << "*** B = D" << endl;
47 B = D;
48 cout << "B =" << B;
49
50 cout << "*** B = A" << endl;
51 B = A;
52 cout << "B =" << B;
```

► Output:

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

407

Demo zu lowerTriangularMatrix 7/7

```
54 cout << "*** terminate" << endl;
55 return 0;
56 }
```

► 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
Matrix: destructor, 3 x 3
```

► Erinnerung: Allokationsreihenfolge

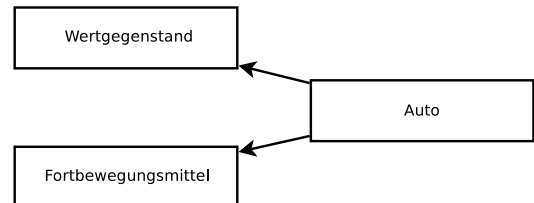
- *A* ist **SquareMatrix**
- *B* ist **LowerTriangularMatrix**
- *C* ist **Matrix**
- *D* ist **LowerTriangularMatrix**
- *E* ist **LowerTriangularMatrix**

408

Mehrfachvererbung

Mehrfachvererbung

► C++ erlaubt Vererbung mit multiplen Basisklassen



► Syntax:

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

► Vertieft Konzept der Objektorientierung

- erhöht Wiederverwendbarkeit von Code

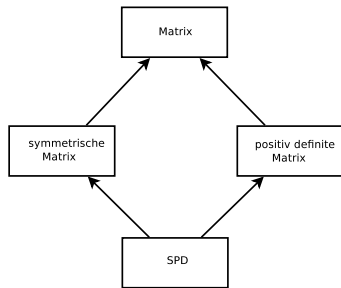
► Problem: Mehrdeutigkeiten (nächste Folie)

409

410

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

411

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

412

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**

413

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
```

414

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

415

Exception Handling

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

416

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

417

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**

418

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
```

419

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
```

420

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
```

421

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
```

422

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)

423

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
```

424

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
```

425

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
```

426

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
```