

Inhaltsverzeichnis

1	Rechenoperationen	3
2	Maschinensprache	5
3	funktionale Programmierung	5
4	funktionale Programmierung in C++	6
4.1	Overloading der arithmetischen Operationen	7
4.2	Integer-Division in C++	8
4.3	Anwendung	8
4.4	Bedingungen	9
4.5	Rekursion	10
4.6	Von der funktionalen zur prozeduralen Programmierung	10
5	Prozedurale Programmierung	11
5.1	Schleifen	12
5.2	Anwendung: Wurzelberechnung	13
6	Datentypen	15
6.1	Zeichenketten - String	16
6.2	Umgebungsmodell	17
7	Umgebungen	18
7.1	Namensräume	18
7.2	Referenzen	19
8	Container-Datentypen	21
9	Iteratoren	25
9.1	Die Funktion <i>std::transform()</i>	26
9.2	Insertion Sort	27
9.3	Insertion Sort	29
10	Templates	31
11	Grundlagen der generischen Programmierung	31
11.1	Funktionen-Templates	32
12	Bestimmung der Effizienz von Algorithmen und Datenstrukturen	34
12.1	technisches Effizienzmaß	35
12.2	\mathcal{O} -Notation/ Ω -Notation	36
13	Zahlendarstellung	38
13.1	natürliche Zahlen \mathbb{N}	38
13.2	ganze Zahlen \mathbb{Z}	40
13.3	reelle Zahlen \mathbb{R}	41

14 Buchstabenzeichen	43
14.1 eigene Datentypen	44
15 Objektorientierte Programmierung	44
15.1 eigene Datentypen mit Kapselung	44
15.2 running example	46
15.3 Member-Funktionen	49
15.4 Vorteile der Kapselung	51
15.5 Operatoren	52
15.6 Objekte nachträglich verändern	53
16 Klasse: Image	55

1 Rechenoperationen

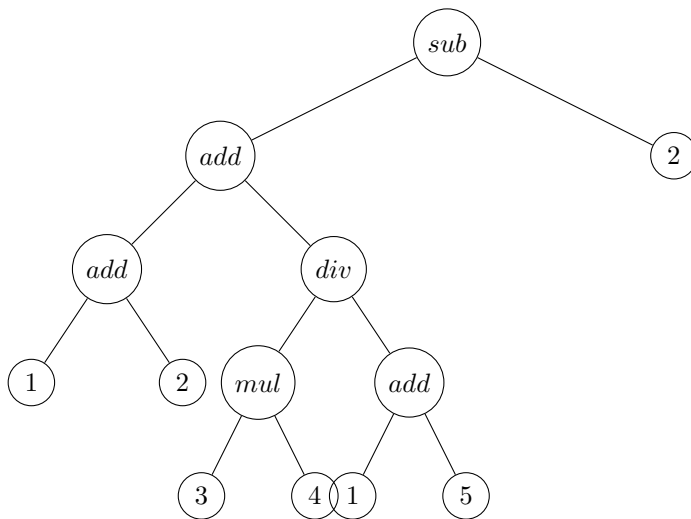
1. Baum besteht aus Knoten (Kreise) und Kanten (Pfeile)
2. Kanten verbinden Knoten mit ihren Kind-Knoten
3. jeder Knoten (außer der Wurzel) hat genau ein Elternteil
4. Knoten ohne Kinder heißen “Blätter“ (leaf-nodes)
5. Teilbaum
 - (a) wähle beliebigen Knoten
 - (b) entferne temporär dessen Eltern-Kante
 - i. der Knoten wird temporär zu einer Wurzel
 - ii. dieser Knoten mit allen seinen Nachkommen bildet wieder seinen Baum - “ Teilbaum des Originalbaums“
 - (c) Tiefe: Abstand des Knotens zur Wurzel
 - (d)

Infix-Notation:

$$1 + 2 + 3 * 4 / (1 + 5) - 2$$

Präfix-Notation:

$$sub(add(add(1, 2), div(mul(3, 4), add(1, 5))), 2)$$



Präfix Notation aus dem Baum rekonstruieren

1. Wenn die Wurzel ein Blatt ist, dann “Drucke die Zahl“
2. sonst (Operator):
 - (a) Drucke Funktionsnamen
 - (b) Drucke “(“
 - (c) wiederhole ab 1) für das linke Kind
 - (d) Drucke “,”
 - (e) wiederhole den Algorithmus ab 1) für das rechte Kind
 - (f) Drucke “)”

Beachte Reihenfolge: Wurzel - Links - Rechts (Pre-Order Traversal) Ergebnis:
 $sub(add(add(1, 2), div(mul(3, 4), add(1, 5))), 2)$

Definition: Rekursion Rekursion meint Algorithmus für Teilproblem von vorn

Infix Notation

1. wie bei Präfix
2. sonst
 - (a) entfällt
 - (b) wie bei Präfix
 - (c) wie bei Präfix
 - (d) Drucke Operatorsymbol
 - (e) wie bei Präfix
 - (f) wie bei Präfix
 - (g) wie bei Präfix

Beachte Reihenfolge: Links - Wurzel - Rechts (In-Order Traversal)

Ergebnis:
 $((1 + 2) + ((3 * 4) / (1 + 5))) + 2$

Berechne den Wert mit Substitutionsmethode

1. Wenn Wurzel ein Blatt hat, gib die Zahl zurück
2. sonst
 - (a) entfällt
 - (b) entfällt
 - (c) wiederhole ab 1) für linken Teilbaum und speichere Ergebnis als “left-result“

- (d) entfällt
- (e) wiederhole ab 1) für rechten Teilbaum, speichere Ergebnis als “right-result“
- (f) berechne $fkt_name(left - result, right - result)$ und gib Ergebnis zurück

Beachte Reihenfolge: Links - Rechts - Wurzel (Post-Order Traversal)

$$\begin{aligned}
 & sub(add(add(1, 2), div(mul(3, 4), add(1, 5))), 2) \\
 &= sub(add(add(1, 2), div(12, 6)), 2) \\
 &= sub(add(3, 2), 2) \\
 &= sub(5, 2) \\
 &= 3
 \end{aligned}$$

2 Maschinensprache

- optimiert für die Hardware (viele verschiedene)
- Gegensatz: höhere Programmiersprache ($C++$) ist optimiert für Programmierer
- Compiler oder Interpreter übersetzen Hoch- in Maschinensprache

Vorgang des Übersetzens

1. Eingaben (und Zwischenergebnisse) werden in Speicherzellen abgelegt \Rightarrow jeder Knoten im Baum bekommt eine Speicherzelle (Maschinensprache: durchnummeriert ; Hochsprache: sprechende Namen)
2. Speicherzellen für die Eingaben *initialisieren* ; Notation: $SpZ \leftarrow Wert$
3. Rechenoperationen in der Reihenfolge des Substitutionsmodells ausführen und in der jeweiligen Speicherzelle speichern ; Notation: $SpZ_Ergebnis \leftarrow fkt_name\ SpZ_Arg1\ SpZ_Arg2$
4. alles in Zahlencode umwandeln
 - Funktionsname \Rightarrow Opcodes
 - Speicherzellen: nur die Nummer
 - Werte sind schon Zahlen
 - Notation: Opcode Ziel SpZ SpZ_Arg1 SpZ_Arg2 oder Opcode Ziel SpZ Initialwert

3 funktionale Programmierung

(alles durch Funktionsaufrufe ausführen)

1. bei Maschinensprache wurden Zwischenergebnisse in Speicherzellen abgelegt

2. das ist auch in der funktionalen Programm. eine gute Idee

- (a) Speicherzellen werden durch Namen (vom Programmierer vergeben) unterschieden
- (b) Beispiel: Lösen einer quadratischen Gleichung: $ax^2+bx+c=0$, finde $x_{1/2} \Rightarrow x^2-px+q=0$ mit $p = -\frac{b}{2a}, q = \frac{c}{a} \Rightarrow x_1 = -\frac{b}{2a} + \sqrt{(-\frac{b}{2a})^2 - \frac{c}{a}}$
 \Leftarrow allgemein : $x_{1/2} = p \pm \sqrt{p^2 - q}$
- (c) Präfix:
 $x_1 \leftarrow \text{add}(\text{div}(\text{div}(b, a), -2), \text{sqr}(\text{sub}(\text{mul}(\text{div}(\text{div}(b, a), -2), \text{div}(\text{div}(b, a), -2)), \text{div}(c, a))))$
mit Zwischenergebnissen und Infix-Notation: $p \leftarrow b/c/-2$ oder $p \leftarrow -0,5*b/a$ $q \leftarrow c/a$
 $\text{discriminant} \leftarrow \text{sqr}(p * P - q)$
 $x_{1/2} \leftarrow p \pm \text{discriminant}$

3. zwei Vorteile:

- (a) lesbar
- (b) redundante Berechnung verschieden
Beachte: In der funktionalen Programmierung können die Speicherzellen nach der Initialisierung nicht mehr verändert werden
- (c) Speicherzellen mit Namen sind nützlich, um Argumente an Funktionen zu übergeben \Rightarrow Definition eigener Funktionen
Bsp:

function sq(x){ return x*x }

4 funktionale Programmierung in C++

1. in C++ hat jede Speicherzelle einen Typ (legt Größe und Bedeutung der Speicherzelle fest)
wichtigste Typen: "int" für ganze Zahlen, "double" für reelle Zahlen, "std::string" für Text
zugehörige Literale (Konstanten): 12, -3 (int) -1.02 , 1.2e-4 (double) "text text" (string)
2. Die Initialisierung wird geschrieben als

```
type_name spz_name = initialwert
```

Bsp:

```
double a = 10  
std::cout << "x_1" << x_1 << "\n" ;
```

3. eigene Funktion in C++:

```
type_ergebnis funktionsname (typ_arg1 name_arg1, typ_arg2 name_arg2)  
{  
    <code>  
    return ergebnis;  
}
```

4. zwei Funktionen mit gleichem Namen, aber unterschiedlichen Typen dürfen in C++ gleichzeitig definiert sein (“overloading”)
 - ⇒ C++ wählt automatisch die richtige Variante anhand des Argumenttypes (“overload resolution“)
5. jedes C++-Programm muss genau eine Funktion names “main“ haben: Dort beginnt die Programm-Ausführung

Bsp:

```
int main() { <code>    return 0 (erfolgreich abgearbeitet) }
```
6. Regel von C++ für erlaubte Namen (Speicherzelle & Funktion):
 - (a) erste Zeichen: Klein- oder Großbuchstaben des englischen Alphabets oder _
 - (b) optional: weitere Zeichen: wie erstes Zeichen oder Ziffern 0 ... 9
7. vordefinierte Funktionen in C++
 - (a) eingebaute Funktionen (immer vorhanden) z.B. Infix Operatoren
 - (b) Funktionen der Standardbibliothek (Programmierer muss sie explizit auffordern)
 - i. z.B. algebraische Funktionen beginnend mit std::...
 - ii. sind in Module geordnet, z.B. `cmath` $\hat{=}$ algebraische Funktionen, `iostream` $\hat{=}$ Ausgabe, z.B. `std::cout`
 - iii. Um ein Modul zu benutzen, muss man zuerst (am Anfang des Programms) sein Inhaltsverzeichnis importieren


```
#include <module_name>
```

 sprich “Header inkludieren“

```
# include <iostream>
# include <string>

int main() {

    std::cout << "Hello" << "\n";
    std::string >> ausgabe = "mein erstes Programm"
    std::cout << ausgabe;

    return 0
}
```

4.1 Overloading der arithmetischen Operationen

```
int a = 3;
int b = 4;
int c = a * b;
double x = 3.0;
double y = 4.0;
double z = x * y;
```

$3.0 * 4 \Rightarrow$ automatische Umwandlung in höheren Typ, hier: "double" \Rightarrow wird als $3.0 * 4.0$ ausgeführt

4.2 Integer-Division in C++

Konsequenzen:

1. Division unterscheidet sich nach dem Datentypen: $(-12)/5 \Rightarrow -2 \neq -2.4 \Leftarrow (-12.0/5.0)$
2. negative Ereignisse werden aufgerundet, positive abgerundet (truncating division)
d.h. Nachkommastellen abschneiden, d.h. Richtung Null runden
3. Gegensatz (z.B. zu Python): floor division $\hat{=}$ wird immer abgerundet
4. Divisionsrest:

```
int a = ...;
int b = ...;
int q = a/b;
(a/b)*b = q * b
```

ist im allgemeinen ungleich $a \Rightarrow$

```
int rest = a - q*b;
```

1. wenn Division aufgeht \Rightarrow rest = 0 , sonst $\neq 0$
2. Invariante:

```
(a/b) * b + rest = a

int rest1 = a % b; // equivalent: a - (b/a)*b
```

4.3 Anwendung

Wochentag für beliebiges Datum bestimmen: gegeben: d, m, y , gesucht: $w \in \{0, \dots, b\}$

`int weekday(int d, int m, int y) ; weekday(10,11,2016) \Rightarrow 3 (Donnerstag)`

Teilprobleme

1. finde den Wochentag vom 1. Januar y
2. finde den Abstand vom (d,m,y) zum (1,1,y)
3. setze beides zusammen

Schaltjahresregel: y ist Schaltjahr, wenn:

1. y durch 4 teilbar, aber nicht durch 100 \Rightarrow 2004, 2006, nicht 2100

2. y durch 400 teilbar $\Rightarrow 2000$

\Rightarrow 400-Jahres-Zyklus der Regeln: nach 400 Jahren beginnt die Schaltjahresregel von vorn

- Beobachtung: der 1.1.2001 ist der erste Tag eines neuen Zyklus und war Montag
- die Anzahl der Tage vom 1.1. y zum 1.1.2001 ist:
 $z = y - 2001 \quad \Delta = 365 * z + z/4 - z/100 + z/400$
- floor division ist wichtig, wenn $z < 0$, z.B. $y = 2000, z = -1$

zu②: d.m. ist der x -te Tag im Jahr mit:

- kein Schaltjahr

1. $m = 1 \Rightarrow d$
2. $m = 2 \Rightarrow d + 31$
3. $m = 3 \Rightarrow d + 59$
4. $m = 4 \Rightarrow d + 90$
5. $m = 5 \Rightarrow d + 120$
6. $m > 2 \Rightarrow d + 59 + (153 * m - 457)/5$

- Schaltjahr

1. $m = 1 \Rightarrow d$
2. $m = 2 \Rightarrow d + 31$
3. $m = 3 \Rightarrow d + 60$
4. $m = 4 \Rightarrow d + 91$
5. $m = 5 \Rightarrow d + 121$
6. $m > 2 \Rightarrow d + 60 + (153 * m - 457)/5$

zu③: Wochentag von d, m, y :

```
w = (w_11y + x - 1) mod 7
```

4.4 Bedingungen

- Bei den meisten Algorithmen ist die Reihenfolge der Schritte nicht fix, sondern hängt von den Eingabedaten ab
- Beispiel: Auswahl der Offset $d \rightarrow x$ hängt von m ab
dafür die Funktion:

```
cond ( bedingung , resultat_wenn_wahr , resultat_wenn_falsch )
```

- kanonische Beispiele: Absolutbetrag, Vorzeichenfunktion

Bedingungen programmieren:

- relationale Operatoren: Vergleich von zwei Argumenten
 $<, >, \leq, \geq, !=$
- logische Operatoren: Verknüpfen von mehreren Bedingungen
 $\&\&(und), ||(oder), !=(nicht)$
- in $C++$ gibt es keine Prefix-Variante für die $cond()$ -Funktion, aber eine Infix-Variante:

```
(bedingung) ? erg_wenn_wahr : erg_wenn_falsch

int abs (int x) {
    return (x >= 0) ? x : -x;
}
double abs (double x) {
    return (x >= 0.0) ? x : -x;
}
int sign (int x) {
    return (x == 0) ? 0 : ((x > 0) ? 1 : -1);
}
```

4.5 Rekursion

bedeutet: eine Funktion ruft sich selbst auf (evtl. indirekt)

- kanonisches Beispiel: Fakultätsfunktion $k! = 1 \cdot 2 \cdot \dots \cdot (k-1) \cdot k$
- in $C++$ (rekursive Definition)

```
int fakultaet (int k) {
    return (k == 0) ? 1 : k * fakultaet(k-1) ;
}
```

- wichtige Eigenschaften:
 - jede rekursive Funktion muss mindestens einen nicht-rekursiven Zweig enthalten, der nach endlich vielen rekursiven Aufrufen erreicht wird “Rekursionsabschluss“- sonst: Endlosrekursion (Absturz)
 - bei jedem Aufruf werden dem Namen der Dateenelemente (Argumente & Zwischenergebnisse) neue Speicherzellen zugeordnet
 $fakultaet(3) \rightarrow fakultaet(2) \rightarrow fakultaet(1) \rightarrow fakultaet(0) \Rightarrow$
 $return\ 3*fakultaet(2) \leftarrow return\ 2*fakultaet(1) \leftarrow return\ 1*fakultaet(0) \leftarrow return\ 1$

4.6 Von der funktionalen zur prozeduralen Programmierung

- Eigenschaften der FP:
 - alle Berechnungen durch Funktionsaufrufe, Ergebnis ist Rückgabe

- Ergebnis hängt nur von den Werten der Funktions-Argumente ab, nicht von externen Faktoren (*referentielle Integrität*)
- Speicherzellen für Zwischenergebnisse/Argumente können nach der Initialisierung nicht geändert werden (*write once*)
- Möglichkeit der rekursiven Funktionsaufrufe (jeder Aufruf bekommt eigene Speicherzellen)
- Vorteile:
 - natürliche Ausdrucksweise für arithmetische und algebraische Funktionalität (*Taschenrechner*)
 - einfache Auswertung durch Substitutionsmodell - Auswertungsreihenfolge nach Post-Order
 - mathematisch gut formalisierbar \Rightarrow Korrektheitsbeweise (besonders bei Parallelverarbeitung)
 - Rekursion ist mächtig und natürlich für bestimmte Probleme (z.B. Fakultät)
- Nachteile:
 - viele Probleme lassen sich anders natürlicher ausdrücken (z.B. Rekursion vs. Iteration)
 - setzt unendlich viel Speicher voraus (\Rightarrow Memory management notwendig \Rightarrow später)
 - Entitäten, die sich zeitlich verändern schwer modellierbar, teilweise unnatürlich
- Korrolar: Man kann keine externen Ressourcen (z.B. die Console/Drucker, Bildschirm) ansprechen (weil zeitlich veränderlich)
“keine Seiteneffekte“
- Lösung: Einführung einer Multi-Paradigmen-sprachen, z.B. Kombination von funktionaler mit prozeduraler Programmierung

5 Prozedurale Programmierung

- Kennzeichen:
 - Prozeduren - Funktionen, die nichts zurückgeben, haben nur Seiteneffekte
Bsp: auf Konsole ausgeben
- ```
std::cout << "Hello World \n"; // Infix
operator << (std::cout, "Hello \nLeftarrow"); // Praefix notation
```
- Prozeduren in C++:
    1. Funktion, die *void* zurückgibt (Pseudotyp nur “nichts“)
    2. Returnwert ignorieren
  - Anweisen zur Steuerung des Programmablaufs (z.B. *if* / *else*)

```

// funktional:
int abs (int x) {
 return (x>=0) ? x : -x ;
}

// prozedural
int abs (int x) {
 if (x >= 0) {
 return x;
 } else {
 return -x;
 }
}

```

- Zuweisung:

- Speicherzellen können nachträglich verändert werden “*read-work*“

```

// prozedural
int foo (int x) {
 int y =2;
 int z1 = x * y; // z1 = 6
 y = 5;
 int z2 = x * y; // z2 = 15
 return z1 + z2;
}
// write once
typ const name = wert

// funktional
int foo (int x) {
 int y = 2;
 int z1 = x * y; // z1 = 6
 int y2 = 5;
 int z2 = x * y2; // z2 = 15
 return z1 + z2;
}

```

- ⇒ Folgen:

- mächtiger, aber ermöglicht völlig neue Bugs ⇒ Erhöhte Aufmerksamkeit beim Programmieren
- die Reihenfolge der Ausführung ist viel kritischer als beim Substitutionsmodell
- der Programmierer muss immer ein mentales Bild des aktuellen Systemzustands haben

## 5.1 Schleifen

der gleiche Code soll oft wiederholt werden

```

while (bedingung) {
 ... // code wird ausgefuehrt, solange bedingung "true" ist
}

```

Bsp: Zahlen von 0-2 ausgeben)

```
int counter = 0;
while (counter < 3) {
 std::cout << counter << "\n";
 counter = counter + 1;
}
```

| counter | Bedingung | Ausgabe |
|---------|-----------|---------|
| 0       | true      | 0       |
| 1       | true      | 1       |
| 2       | true      | 2       |
| 3       | false     | ∅       |

- $C++$  beginnt mit der Zählung meist bei 0 “zero-based“
- vergisst man Inkrementierung  $\text{counter} = \text{counter} + 1 \Rightarrow$  Bedingung immer true  $\Rightarrow$  Endlosschleife  $\Rightarrow$  Bug
- drei äquivalente Schreibweisen für Implementierung:

```
counter = counter + 1; // assignment
counter += 1; // add-assignment
++ counter; // pre-increment
```

## 5.2 Anwendung: Wurzelberechnung

Ziel: `double sqrt (double y)` Methode: iterative Verbesserung mittels Newtonverfahren

```
initial guess x(0) bei t=0 geraten
while not_good_enough(x(t)) {
 update x(t+1) from x(t)
 t = t+1
}
```

Newtonverfahren: finde Nullstelle einer gegebenen Funktion  $f(x)$ , d.h. suche  $x^*$ , sodass  $f(x^*) = 0$  oder  $|f(x^*)| < \epsilon$

1. Taylorreihe von  $f(x)$ :  $f(x + \Delta) \approx f(x) + f'(x) \cdot \Delta + \dots$
2.  $0 = f(x^*) \approx f(x) + f'(x) \cdot \Delta = 0 \Rightarrow \Delta = -\frac{f(x)}{f'(x)}$
3. Iterationsvorschrift:  $x^{(t+1)} = x^{(t)} - \frac{f(x^{(t)})}{f'(x^{(t)})}$
4. Anwendung auf Wurzel: setze  $f(x) = x^2 - y \Rightarrow \text{mit } f(x^*) = 0 \text{ gilt } (x^*)^2 - y = 0$
5. Iterationsvorschrift:  $x^{(t+1)} = x^{(t)} - \frac{(x^{(t)})^2 - y}{2x^{(t)}} = \frac{(x^{(t)})^2 + y}{2x^{(t)}}$   
 $x^{(t+1)} = \frac{x^{(t)} + \frac{y}{x^{(t)}}}{2}$  mit  $x^* = \sqrt{y} \Rightarrow x^{(t+1)} = \sqrt{y}$

```
double sqrt (double y) {
 if (y<0.0) {
 std::cout << "Wurzel aus negativer Zahl \n";
 return -1.0;
 }
 if (y == 0.0) {
 return 0.0;
 }
 double x = y; // initial guess
 double epsilon = 1e-15 * y; // double Genauigkeit

 while (abs(x*x-y) > epsilon) {
 x = (x + y/x) / 2.0 ;
 }
 return x;
}
```

**for - Schleife** Zum Vergleich mit der while-Schleife:

```
int c = 0;
while (c < 3) {
 ... // unser code
 c += 1; //sonst funktionsunfaehig
}
```

die *for* - Schleife ist dagegen "idiotensicher"

```
for (int c =0; // Initialisierung
 c < 3; // Bedingung (oder: c!=3)
 c+=1) { // Incrementierungsanweisung
 ... // unser code
}
```

- Befehle, um Schleifen vorzeitig abubrechen:

- *continue* (bricht aktuelle Iteration ab und springt zum Schleifenkopf)
- *break* (bricht die ganze Schleife ab und springt hinter die schließende Klammer)
- *return* (beendet die Funktion und damit auch die Schleife)

- 3 gleichbedeutende Beispiele:

```
for (int c =0; c<10; ++c) {
 if (c%2 ==0) { // gerade Zahl?
 std::cout << c << "\n";
 }
}

/* Sobald in der if-Anweisung nur eine Zeile steht, kann sie weggelassen
werden. Das ist gefaehrlich und die Klammern sollten eher trotzdem
gesetzt werden */

for (int c =0; c<10; ++c) {
 if (c %2 !=0) { // nicht gerade?
 continue;
 }
}
```

```

 }
 std::cout << c << "\n" ;
}

for (int c =0; c<10; c+=2) {
 std::cout << c << "\n" ;
}

```

- mit den wichtigsten Schleifen ist bereits ein guter Grundstein für die vielseitige Programmierung gelegt

## 6 Datentypen

- Basistypen:  
Bestandteil der Sprachsyntax und normalerweise direkt von der Hardware(CPU) unterstützt
  - int (ganze Zahlen)
  - double (Fließkommazahlen)
  - bool (*true* oder *false*)
  - später mehr
- zusammengesetzte Typen:  
mithilfe von *struct* oder *class* aus einfacheren Typen zusammengebaut
  - Standardtypen: in der C++ Standardbibliothek definiert (*#include ..*)
  - Bsp: `std::string` mit *#include <string>*
  - externe Typen: aus anderer Bibliothek, die man zuvor herunterladen und installieren muss
  - eigene Typen: vom Programmierer selbst implementiert
- durch “objekt-orientierte Programmierung“ erreicht man, dass zusammengesetzte Typen genauso einfach, bequem und effizient sind, wie Basistypen
- “Kapselung“: die interne Struktur und Implementation ist für den Benutzer unsichtbar
- Benutzer manipuliert Speicher über Funktionen (“member functions“)  $\approx$  Schnittstelle des Typs Interface

```

zusammenges_typ_name var_name = initial-wert; // init
var_name.foo(a1, a2); // oder: foo(var_name, a1, a2)

```

## 6.1 Zeichenketten - String

- zwei Datentypen in  $C++$
- klassischer C-String: `char[]` ("character array")
- $C++$ -String: `std::string` - gekapselt und bequem
- String-Literale: "Zeichenkette"
- einzelnes Zeichen: `'z'`  
Vorsicht: die String-Literale sind C-Strings (gibt keine  $C++$  String-Literale)
- Initialisierung:

```
std::string s1 = "abcde"; // Zuweisung
std::string s2 = s1;
std::string leer = "";
s1.size() // Laenge (Anzahl der Zeichen)
s1.empty() // Test: s1.size() == 0
```

- Addition: Strings aneinanderreihen ("concatenate")

```
std::string s3 = s + "i,k"; // "xyi,k"
std::string s3 = s + s; // "xyxy"
std::string s3 = "abc" + "def"; // Bug - Literale unterstuetzen + mit
 ganz anderer Bedeutung
```

- Add-Assignment: Abkürzung für Addition gefolgt von Zuweisung

```
s += "nmk"; // ist gleich zu:
s = s + "nmk"; // "xynmk"
s3 = (s + "abc") + "def"; // ok
```

- die Zeichen werden intern in einem C-Array gespeichert  
Array: zusammenhängende Folge von Speicherzellen des gleichen Types, hier: `char`

|   |   |   |   |   |
|---|---|---|---|---|
| a | b | c | d | e |
|---|---|---|---|---|

 Länge: 5;  $s[\text{index}] \in \{0, 1, 2, 3, 4\}$ 

```
std::string s = "abcde";
for (int k = 0; k < s.size(); ++k) {
 std::cout << s[k] << "\n";
}
```

Variante①: 'in-place' (den alten String überschreiben, selbe Speicherzelle)

```
int i = 0;
int k = s.size() - 1;
while (i < k) {
 char tmp = s[i] // i-tes Zeichen merken
 s[i] = s[k];
 s[k] = tmp;
 --k; // k = k - 1
 ++i;
}
```



Variante②: neuen String erzeugen

```
std::string s = "abcde";
std::string r = "";
for (int k = s.size() - 1; k >= 0; --k)
```

## 6.2 Umgebungsmodell

- in prozeduraler Programmierung: Gegenstück zum Substitutionsmodell für funktionale Programmierung
- Zwecke:
  - Regeln für Auswertung von Ausdrücken
  - Regeln für automatische Speicherverwaltung: Freigeben nicht mehr benötigter Speicherzellen (nützlich bei in der Praxis immer endlichem Speicher)  
⇒ bessere Approximation von “unendlich viel Speicher“

- Umgebung beginnt normalerweise bei “{“ und endet bei “}“  
Ausnahme: for-Schleife, Funktionsdefinitionen, globale Umgebung

```
for (int k=0; k<10; ++k) { // Laufvariable Teil der Umgebung
 ... // code
}

bool is_email (std::string s) { // Speicherzellen fuer Argumente
 // und Ergebnis gehoeren zur Umgebung
 ... // code
}
```

- automatische Speicherverwaltung:
  - Speicherzellen, die in einer Umgebung angelegt werden, werden am Ende der Umgebung in umgekehrter Reihenfolge freigegeben
  - Compiler fügt vor “{“ automatisch die notwendigen Befehle ein
  - Speicherzellen in der globalen Umgebung werden dem Programmierenden freigegeben

```
int global = 1;

int main() {
 int l = 2;
 {
 int m = 3;
 } // m wird freigegeben
} // l wird freigegeben
// global wird freigegeben
```

- Umgebungen können beliebig tief geschachtelt werden  
⇒ alle Umgebungen bilden einen Baum, mit der globalen Umgebung als Wurzel

- Funktionen sind in der globalen Umgebung definiert  
 $\Rightarrow$  Umgebung jeder Funktion sind “Kinder“ der globalen Umgebung (Ausnahme: Namensräume)  
 $\Rightarrow$  Funktionsumgebung ist nicht Kind der Umgebung, in der sie aufgerufen wird
- Jede Umgebung besitzt eine Zuordnungstabelle für alle Speicherzellen, die in der Umgebung definiert werden
 

| Name | Typ | aktueller Wert |
|------|-----|----------------|
| 1    | int | 2              |
- jeder Name kann pro Umgebung nur  $1 \times$  vorkommen (gleichzeitig in anderen Umgebungen)  
 Ausnahme: Funktionsnamen können mehrmals vorkommen bei “function overloading“ (C++)
- Alle Befehle werden relativ zur aktuellen Umgebung ausgeführt  
 aktuell: Zuordnungstabelle der gleichen Umgebung & aktueller Wert zum Zeitpunkt des Aufrufs (Zeitpunkt wichtig im Substitutionsmodell)

Beispiel:  $c = a * B$  ;

Regeln:

- wird der Name (a,b,c) in der aktuellen Zuordnungstabelle gefunden:
    - ① Typisierung  $\Rightarrow$  Fehlermeldung, wenn Typ und Operation zusammenpassen
    - ② andernfalls, setze aktuellen Wert aus Tabelle in Ausdruck ein
  - wird der Name nicht gefunden, suche in der Elternumgebung weiter mit ① oder ②
  - wird der Name bis zur Wurzel nicht gefunden  $\Rightarrow$  Fehlermeldung
  - ist der Name in mehreren Umgebungen vorhanden, gilt das zuerst gefundene (Typ, Wert)
- $\Rightarrow$  Programmierer muss selbst darauf achten, dass:
1. bei der Suche die gewünschte Speicherzelle gefunden wird  $\Rightarrow$  benutze “sprechende“ Namen
  2. der aktuelle Wert der richtige ist  $\Rightarrow$  beachte Reihenfolge der Befehle!

## 7 Umgebungen

### 7.1 Namensräume

spezielle Umgebungen in der globalen Umgebung (auch geschachtelt) mit einem Namen

- Ziele:
  - Gruppieren von Funktionalität in Module (zusätzlich zu Headern)
  - Verhindern von Namenskollisionen
  - Beispiel: C++ Standardbibliothek

```
namespace std {
 double sqrt (double x);
 namespace chrono {
 class system_clock;
 }
}
```

⇒ `std::sqrt(x)` wird zu `sqrt(x)`

Besonderheit: mehrere Blöcke mit selbem Namensraum werden verschmolzen

- Funktionen befinden sich in der globalen Umgebung
- ⇒ Umgebung der Funktion ist Kind der globalen Umgebung

```
int p = 2;
int q = 3;

int foo (int p) { // lokales p verdeckt das globale, aber globales q
 sichtbar
 return p * q;
}

int main() {
 int k = p * q; // beides ist global; =6
 int p = 4; // lokales p, was das globale verdeckt
 int r = p * q; // lokales p. globales q; =12
 int s = foo(p); // lokales p wird zum lokalen p von foo(); =12
 int t = foo(q); // globales q wird zum lokalen p von foo(); =9
}
```

Beispiel: `my_sin` (Übung 3.3)

```
double taylor_sin (double x) {
 return x - std::pow(x,3)/6.0;
}

double pump_sin (double sin_third) {
 return 3.0*sin_third - 4.0 * std::pow(sin_third,3)
}

double pi_2 = 2.0*M_PI;

double normalize (double x) {
 double k = std::floor(x/pi_2); // wie vielte Periode
 double y = x-pi_2*k; // 0 <= y < pi_2
 return (y <= M_PI) ? y : y-pi_2; // -pi < result <= pi
}

double my_sin (double x) {
 double y = normalize(x) ;
 return (std::abs(y)<=0.15) ? taylor_sin(y) : pump_sin(y/3.0);
}

int main() {
 double r = my_sin(0.78) ;
}
```

**global**  
 $\pi_2 = 6.28$

**main**  
 $r = 2$

## 7.2 Referenzen

- sind neue (zusätzliche) Namen für vorhandene Speicherzellen

```

int x = 3; // neue Variable x mit neuer Speicherzelle
int & y = x; // Referenz: y ist neuer Name fuer x, beide haben dieselbe
 Speicherzelle

y = 4; // Zuweisung an y, aber x aendert sich auch, d.h. x == 4
x = 5; // jetzt y == 5

int const & z = x; // read-only Referenz, d.h. z = 6 ist verboten
x = 6; // jetzt auch z == 6

```

- Hauptanwendung:

- Umgebung, wo eine Funktion aufgerufen wird und die Umgebung der Implementation sind unabhängig, d.h. Variablen der einen Umgebung sind in der anderen nicht sichtbar

Beispiel:

```

int foo (int x) { // pass-by-value (Uebergabe des echten Werts)
 x += 3;
 return x;
}

int bar (int & x) { // pass-by-reference (Uebergabe der Adresse der
 // Speicherzelle)
 x += 3;
 return x;
}

void baz (int & z) { // pass-by-reference
 z += 3; // kein return Wert
}

int main() {
 int a = 2;
 std::cout << foo(a) << "\n"; // Ausgabe: 5
 std::cout << a << "\n"; // Ausgabe 2

 std::cout << bar(a) << "\n"; // Ausgabe: 5
 std::cout << a << "\n"; // Ausgabe: 5

 baz(a);
 std::cout << a << "\n";
}

```

- Funktionen die Werte nur über eine Referenz ändern heißen Seiteneffekt der Funktion (Haupteffekt ist immer der return Wert) [in der funktionalen Programmierung sind Seiteneffekte verboten mit Ausnahme von Ein-/Ausgabe]

- Ziele

1. häufig möchte man Speicherzellen in beiden Umgebungen teilen  $\Rightarrow$  verwende Referenzen
2. häufig will man vermeiden, dass eine Variable kopiert wird (pass-by-value)  
 $\Rightarrow$  durch *pass-by-value* braucht man keine Kopie  $\Rightarrow$  typisch *const &*  $\cong$  read-only, keine Seiteneffekte

```
void print_string(std::string const & s) {
 std::cout << s;
}
```

## 8 Container-Datentypen

dienen dazu, andere Datentypen aufzubewahren

- Art der Elemente
  - homogene Container: alle Elemente haben den gleichen Typ (typisch für  $C++$ )
  - heterogene Container: Elemente können verschiedene Typen haben (z.B. Python)
- Art der Größe
  - statische Container: feste Größe, zur Compilezeit bekannt
  - dynamische Container: Größe zur Laufzeit veränderbar
- Arrays sind die wichtigsten Container, weil effizient auf Hardware abgebildet und einfach zu benutzen
  - klassisch: Arrays sind statisch, z.B. C-Arrays (hat  $C++$  geerbt)
  - modern: dynamische Arrays:
    - \* Entdeckung einer effizienten Implementierung
    - \* Kapselung durch Objekt-Orientierte-Programmierung (sonst zu kompliziert)
- ein dynamisches Array:  $std::string$  ist Abbildung  $int \mapsto char$   $Index \rightarrow Zeichen$
- wir wollen das selbe Verhalten für beliebige Elementtypen:  $std::vector$

**Datentyp:**  $std::vector$

```
#include <vector>

std::vector<double> v(20, 0.0); // initialisiert mit Groesse,
 Initialwert

// analog: std::vector<int>, std::vector<std::string>
```

- Abbildung:  $int \mapsto double$
- weitere Verallgemeinerung: Indextyp beliebig (man sagt dann “Schlüssel-Typ”)
  - typische Fallen:
    - Index ist nicht im Bereich  $0 \leq Index < size$ , z.B. Matrikelnummer
    - Index ist String, z.B. Name eines Studenten

- `std::map`, `std::unordered_map` (Binärer Suchbaum)

Beispiel:

```
std::map<int, double> noten; // noten[3 1 2 4 5 2 3 1 3] = 1.0
std::map<string, double> noten; // noten["krause"] = 1.0
```

dabei: <Schlüsseltyp, Elementtyp>

- Erzeugen:

```
std::vector<double> v(20, 1.0);
std::vector<double> v; // leeres Array (erst ab C++ 11)

std::vector<double> v = {1.0, -3.0, 2.2}; // "initializer list"
```

- Größe:

```
v.size()
v.empty() (=v.size() ==0)
```

- Größe ändern:

```
v.resize(neue_groesse, initialwert)
1.: neue_gr < size() // Elemente ab neue_gr gelöscht, andere bleiben
2.: neue_gr > size() // neue Elemente mit Initialwert am Ende
 angehängt

v.push_back(neues_element) // ein neues Element am Ende anhängen

v.insert(v.begin()+index, neues_element); // neues Element an Position
 // index einfügen folgende Werte werden
 // um eine Position verschoben
 v.begin() ist Iterator

v.pop_back() // letztes Element löschen (effizient)

v.erase(v.begin()+index) // Element aus Position löschen,
 // hintere Werte verschieben

v.clear() // alles löschen
```

- Zugriff:

```
v[k] // Element bei Index k
v.front() // erstes Element
v.back() // letztes Element

v.at(k) // wie v[k], aber Fehlermeldung, wenn nicht 0 <= k < size()
```

- Funktionen für Container: benutzen in C++ Iteration, damit sie für verschiedenste Container funktionieren
- Iteration-Range:

```

v.begin()
v.end() // hinter dem letzten Element

im Header <algorithm>

```

- alle Elemente kopieren:

```

std::vector<double> source = {1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0};
std::vector<double> target(source.size(), 0.0);

std::copy(source.begin(), source.end(), target.begin());
std::copy(source.begin()+2, source.end(), target.begin());
// unbenutzte Initialwerte bleiben erhalten

```

- Elemente sortieren:

```

std::sort(v.begin(), v.end()); // "in-place"
std::random_shuffle(v.begin(), v.end()) // "in-place"

```

### Warum ist `push_back()` effizient?

- veraltete Lehrmeinung: Arrays sind nur effizient, wenn statisch (d.h. Größe zur Compilezeit, spätestens bei Initialisierung bekannt)
- modern: bei vielen Anwendungen genügt, wenn Array (meist) nur am Ende vergrößert wird (z.B. `push_back`)  
dies kann sehr effizient unterstützt werden  $\Rightarrow$  dynamisches Array
- `std::vector` verwaltet intern ein statisches Array der Größe "`v.capacity() >= v.size()`"
  - wird das interne Array zu klein  $\Rightarrow$  wird automatisch auf ein doppelt so großes umgeschaltet
  - ist das interne Array zu groß, bleiben unbenutzte Speicherzellen als Reserve
- Verhalten bei `push_back()`
  - noch Reserve vorhanden: lege neues Element in eine unbenutzte Speicherzelle  $\Rightarrow$  billig & chillig
  - keine Reserve:
    1. alloziere neues statisches Array mit doppelter Kapazität
    2. kopiere die Daten aus allem ins neue Array
    3. gebe das alte Array frei
    4. gehe zu ①, jetzt wieder Reserve vorhanden  
Umkopieren ist nicht teuer, da es nur selten nötig ist
  - Beispiel:

```

std::vector<int> v;
for (int k = 0; k < 32; ++k) {
 v.push_back(k);
}

```

| k        | <i>cap_vor_p_b()</i> | <i>cap_nach_p_b()</i> | <i>size()</i> | Reserve | Umkopierung |
|----------|----------------------|-----------------------|---------------|---------|-------------|
| 0        | 0                    | 1                     | 1             | 0       | 0           |
| 1        | 1                    | 2                     | 2             | 0       | 1           |
| 2        | 2                    | 4                     | 3             | 1       | 2           |
| 3        | 4                    | 4                     | 4             | 0       | 0           |
| 4        | 4                    | 8                     | 5             | 3       | 4           |
| 5 ... 7  | 8                    | 8                     | 8             | 0       | 0           |
| 8        | 8                    | 16                    | 9             | 7       | 8           |
| 9 ... 15 | 16                   | 16                    | 16            | 0       | 0           |
| 16       | 16                   | 32                    | 17            | 15      | 16          |

...

- Kosten:
  - 32 Elemente einfügen = 32 Kopien extern  $\Rightarrow$  intern
  - aus altem Array ins neue kopieren = 31 Kopien intern  $\Rightarrow$  intern  
 $\Rightarrow$  im Durchschnitt sind pro Einführung 2 Kopien nötig  
 $\Rightarrow$  dynamisches Array ist doppelt so teuer, wie das statische  
 $\Rightarrow$  immer noch sehr effizient
- relevante Funktionen von *std::vector*
  - *v.size()*: aktuelle Zahl der Elemente
  - *v.capacity() - v.size()*: Reserve ( $\geq 0$ )
  - *v.resize(new\_size)*: ändert immer *v.size()*, aber *v.capacity()* nur wenn  $< new\_size$
  - *v.reserve(new\_capacity)*: ändert *v.size()* nicht, aber *v.capacity()* falls *new\_capacity*  $\geq size$
  - *v.shrink\_to\_fit()*: *v.reserve(v.size())* (Reserve ist danach 0), wenn Endgröße erreicht
- wenn Reserve  $> size$ : *capacity* kann auch halbiert werden

## wichtige Container der C++ Standardbibliothek

- dynamisches Arrays: *std::string*, *std::vector*
- assoziative Arrays: *std::map*, *std::unordered\_map*
- Mengen: *std::set*, *std::unordered\_set* (jedes Element ist höchstens einmal enthalten)
- Stapel: *std::stack* (Funktion: "last-in-first-out") z.B. gestapelte Bierkästen.
- Warteschlange: *std::queue* (Funktion: "first-in-first-out")
- Kartendeck: *std::deque* gleichzeitig Stapel und Warteschlange
- Stapel mit Priorität: *std::priority\_queue* (Priorität vom Nutzer definiert)



## 9 Iteratoren

- für Arrays lautet kanonische Schleife:

```
for (int k = 0; k != v.size(); ++k) {
 int current = v[k]; // aktuelles Element lesen
 v[k] = new_value; // aktuelles Element schreiben
}
```

- wir wollen eine so einfache Schleife für beliebige Container
  - der Index-Zugriff  $v[k]$  ist bei den meisten Containern nicht effizient
  - Iteratoren sind immer effizient  $\Rightarrow$  es gibt sie in allen modernen Programmiersprachen, aber die Details sind sehr unterschiedlich
  - Analogie: Zeiger einer Uhr, Cursor in Textverarbeitung  
 $\Rightarrow$  ein Iterator zeigt immer auf ein Element des Containers oder auf Spezialwert “ungültiges Element”
  - in C++ unterstützt jeder Iterator 5 Grundoperationen

1. Iterator auf erstes Element erzeugen:

```
auto iter = v.begin(); // auto ist Universaltyp, wird
 // vom Compiler automatisch
 // mit richtigen Typen ersetzt
```

2. Iterator auf “ungültiges Element” erzeugen:

```
auto end = v.end() // typischerweise v[v.size()]
```

3. Vergleich:

```
iter1 == iter2;
iter != end; (= !(iter == end)) // iter zeigt nicht auf
 // ungültiges Element
```

4. zum nächsten weitergehen: ++iter, Ergebnis ist v.end(), wenn man vorher beim letzten Element war
5. auf Daten des aktuellen Elements zugreifen: \*iter (“Dereferenzierung“)

- $\Rightarrow$  kanonische Schleife:

```
for (auto iter = v.begin(); iter != v.end(); ++iter) {
 int current = *iter; // lesender Zugriff;
 *iter = new_value; // schreibender Zugriff

 // Abkürzung in C++: rang-based for-loop
 for (int & element : v) {
 int current = element; // lesen
 element = new_value; // schreiben
 }
}
```

- wenn die zugrunde liegenden Speicherzellen geändert werden, also die Containergröße sich ändert, werden die Iteratoren ungültig
- Iteratoren mit den 5 Grundoperationen heißen “forward iterators“ (wegen `++iter`)
- “bidirectional iterators“ unterstützen auch `--iter` (alle Iteratoren aus Standardbibliothek)
- “random access iterators“ können beliebige Sprünge machen (`iter++ = 5`)  
unterstützt von `std::string` und `std::vector`
- Besonderheit für assoziative Arrays (`std::map`):
  - Schlüssel und Werte können beliebig gewählt werden  
⇒ das aktuelle Element ist immer ein Schlüssel/Wert-Paar  
(`*iter`).*first* ⇒ Schlüssel  
(`*iter`).*second* ⇒ Wert

```
v[(*iter).first] == (*iter).second;
```

- Bei `std::map` liefern die Iteratoren die Elemente in aufsteigender Reihenfolge der Schlüssel (Unterschied zu `std::unordered_map`)

## 9.1 Die Funktion `std::transform()`

Die Funktion `std::transform()`

- `std::transform()` erlaubt, die Daten “on-the-fly“ zu ändern  
z.B. nach Kleinbuchstaben konvertieren:

```
std::string source = "aAbCdE"; std::string = target = source; // Target
 muss gleiche Laenge haben
std::transform(source.begin(), source.end(), target.begin(), std::tolower);
//Name einer Funktion, die ein einzelnes Element transformiert
```

- z.B. die Daten quadrieren:

```
double sq (double x) {
 return x*x;
}

std::transform(source.begin(), source.end(), target.begin(), sq);
```

- das ist eine Abkürzung für eine Schleife: (zwei Schleifen auf einmal)

```
auto src_begin = source.begin();
auto src_end = source.end();
auto tgt_begin = target.begin();

for (; src_begin != src_end; ++src_begin, ++tgt_begin) {
 // mehrere Inkrementierungen durch , getrennt
 *tgt_begin = sq(*src_begin); // mit * Bezug zu originalen Daten
}
```

- der Argumenttyp der Funktion muss mit dem *source*-Elementtyp kompatibel sein
- der Argumenttyp der Funktion muss mit dem *target*-Elementtyp kompatibel sein
- Das letzte Argument von `std::transform()` muss ein Funktor sein ( $\cong$  verhält sich wie eine Funktion)

Dazu gibt es drei Varianten:

1. normale Funktion, z.B. `sq` Aber wenn die Funktion für mehrere Argumenttypen überladen ist, muss der Programmierer dem Compiler sagen, welche Version gemeint ist  
 $\Rightarrow$  ("function pointer cast")
2. Funktorobjekte  $\Rightarrow$  objekt-orientierte Programmierung
3. definiere eine namenlose Funktion  $\cong$  "Lambda-Funktionen"  $\lambda$   
 statt  $\lambda$  wird in `C++` `[]` geschrieben

```
std::transform(source.begin(), source.end(), target.begin(),
[] (double x) { // statt Funktionsname sq, wie bei 1.
 // steht hier die ganze Funktionsimplementierung
 return x*x
}); // der Returntyp wird automatisch eingesetzt, wenn es
 // nur einen Returntyp gibt
```

- Lambda-Funktionen können noch viel mehr  $\Rightarrow$  für Fortgeschrittene
- `std::transform` kann "in-place" arbeiten (d.h. source-Container überschreiben), wenn source und target gleich
- die Funktion `std::sort()` wird zum "in-place" sortieren eines Arrays

```
std::vector<double> v = {4.0, 2.0, 3.0, 5.0, 1.0};
std::sort(v.begin(), v.end()); // -> v = {1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0}
```

- `std::sort()` ruft intern den " $<$ " Operator des Elementtyps auf, um die Reihenfolge zu bestimmen

Def: "totale Ordnung"

- \*  $a < b$  muss  $\forall a, b$  gelten
- \* transitiv:  $(a < b) \wedge (b < c) \Rightarrow (a < c)$
- \* anti-symmetrisch:  $!(a < b) \wedge !(b < a) \Rightarrow a == b$

## 9.2 Insertion Sort

schnellste Sortieralgor. für kleine Arrays ( $n \leq 30$ , hängt vom Compiler & CPU ab)

- für große Arrays sind Merge Sort, Heap Sort, Quick Sort schneller
- `std::sort()` wählt automatisch einen schnellen Algor.

Idee von Insertion Sort: wie beim Aufnehmen und Ordnen eines Kartenblatts

- gegeben: bereits sortiertes Teilarray bis zur Position  $k - 1$

- füge das  $k$ -te Element an der richtigen Stelle ein. Erzeuge Lücke an der richtigen Position durch Verschieben von Elementen nach rechts
- wiederhole für  $k = 1, \dots, N$  (siehe Übung 5.1 “Einsortieren“)

```

4 2 3 5 1
4 3 5 1 (current = 2)
 4 3 5 1
2 4 3 5 1
2 4 5 1 (current = 3)
 4 5 1
2 3 4 5 1
2 3 4 5 1
2 3 4 1 (current = 5)
2 3 4 5 1
2 3 4 5 1 (current = 1)
1 2 3 4 5

```

```

void insertion_sort(std::vector<double> &v) {
 for (int k = 1; k < v.size(); ++k) {
 double current = v[k];
 int j = k; // Anfangsposition der Luecke
 while (j > 0) {
 if (v[j-1] < current) {
 break; // j ist richtige Position der Luecke
 }
 v[j] = v[j-1];
 --j;
 }
 v[j] = current; // current in die Luecke kopieren
 }
}

```

- andere Sortierung: definiere Funktor  $cmp(a, b)$ , der das gewünschte “kleiner“ realisiert  $\cong$  gibt genau dann *true* zurück, wenn  $a$  “kleiner  $b$  nach neuer Sortierung
- neue Sortierungen am besten per Lambda-Funktion an `std::sort` übergeben

```

std::sort(v.begin(), v.end()); // Standardsortierung aufsteigend

std::sort(v.begin(), v.end(), // Standardsortierung aufsteigend
 [](double a, double b) {
 return a < b;
 })

std::sort(v.begin(), v.end(), // absteigende Sortierung
 [](double a, double b) {
 return b < a;
 })

std::sort(v.begin(), v.end(), // normale Sortierung nach Betrag
 [](double a, double b) {

```

```

 return std::abs(a) < std::abs(b);
 }
)

// Stringvergleich
std::vector<std::string> v = {"Ac", "ab", "De", "cf"};
std::vector<std::string> v = {"Ac", "De", "ab", "cf"} // case
insensitive
std::vector<std::string> v = {"ab", "Ac", "cf", "De"} // case sensitive

```

- Das letzte Argument von `std::transform()` muss ein Funktor sein ( $\cong$  verhält sich wie eine Funktion)

Dazu gibt es drei Varianten:

1. normale Funktion, z.B. `sq` Aber wenn die Funktion für mehrere Argumenttypen überladen ist, muss der Programmierer dem Compiler sagen, welche Version gemeint ist  $\Rightarrow$  ("function pointer cast")
2. Funktorobjekte  $\Rightarrow$  objekt-orientierte Programmierung
3. definiere eine namenlose Funktion  $\cong$  "Lambda-Funktionen"  $\lambda$   
statt  $\lambda$  wird in `C++` geschrieben

```

std::transform(source.begin(), source.end(), target.begin(),
[] (double x) { // statt Funktionsname sq, wie bei 1.
 // steht hier die ganze Funktionsimplementierung
 return x*x
}); // der Returntyp wird automatisch eingesetzt, wenn es
 // nur einen Returntyp gibt

```

- Lambda-Funktionen können noch viel mehr  $\Rightarrow$  für Fortgeschrittene
- `std::transform` kann "in-place" arbeiten (d.h. source-Container überschreiben), wenn source und target gleich
- die Funktion `std::sort()` wird zum "in-place" sortieren eines Arrays

```

std::vector<double> v = {4.0, 2.0, 3.0, 5.0, 1.0};
std::sort(v.begin(), v.end()); // -> v = {1.0, 2.0, 3.0, 4.0, 5.0}

```

- `std::sort()` ruft intern den " $<$ " Operator des Elementtyps auf, um die Reihenfolge zu bestimmen

Def: "totale Ordnung"

- \*  $a < b$  muss  $\forall a, b$  gelten
- \* transitiv:  $(a < b) \wedge (b < c) \Rightarrow (a < c)$
- \* anti-symmetrisch:  $!(a < b) \wedge !(b < a) \Rightarrow a == b$

## 9.3 Insertion Sort

schnellste Sortialgor. für kleine Arrays ( $n \leq 30$ , hängt vom Compiler & CPU ab)

- für große Arrays sind Merge Sort, Heap Sort, Quick Sort schneller
- `std::sort()` wählt automatisch einen schnellen Algor.

Idee von Insertion Sort: wie beim Aufnehmen und Ordnen eines Kartenblatts

- gegeben: bereits sortiertes Teilarray bis zur Position  $k - 1$
- füge das  $k$ -te Element an der richtigen Stelle ein. Erzeuge Lücke an der richtigen Position durch Verschieben von Elementen nach rechts
- wiederhole für  $k = 1, \dots, N$  (siehe Übung 5.1 “Einsortieren“)

```

4 2 3 5 1
4 3 5 1 (current = 2)
 4 3 5 1
2 4 3 5 1
2 4 5 1 (current = 3)
 4 5 1
2 3 4 5 1
2 3 4 5 1
2 3 4 1 (current = 5)
2 3 4 5 1
2 3 4 5 1 (current = 1)
1 2 3 4 5

```

```

void insertion_sort(std::vector<double> &v) {
 for (int K = 1; K < v.size(); ++K) {
 double current = v[K];
 int j = K; // Anfangsposition der Luecke
 while (j > 0) {
 if (v[j-1] < current) {
 break; // j ist richtige Position der Luecke
 }
 v[j] = v[j-1];
 --j;
 }
 v[j] = current; // current in die Luecke kopieren
 }
}

```

- andere Sortierung: definiere Funktor  $cmp(a, b)$ , der das gewünschte “kleiner“ realisiert  $\cong$  gibt genau dann `true` zurück, wenn  $a$  “kleiner  $b$  nach neuer Sortierung
- neue Sortierungen am besten per Lambda-Funktion an `std::sort` übergeben

```

std::sort(v.begin(), v.end()); // Standardsortierung aufsteigend

std::sort(v.begin(), v.end(), // Standardsortierung aufsteigend
 [](double a, double b) {
 return a < b;
 })

```

```

std::sort(v.begin(), v.end(), // absteigende Sortierung
 [](double a, double b) {
 return b < a;
 }
)

std::sort(v.begin(), v.end(), // normale Sortierung nach Betrag
 [](double a, double b) {
 return std::abs(a) < std::abs(b);
 }
)

// Stringvergleich
std::vector<std::string> v = {"Ac", "ab", "De", "cf"};
std::vector<std::string> v = {"Ac", "De", "ab", "cf"} // case
 insensitive
std::vector<std::string> v = {"ab", "Ac", "cf", "De"} // case sensitive

std::sort(v.begin(), v.end(),
 [](std::string a, std::string b) {
 std::transform(a.begin(), a.end(), a.begin(), std::tolower);
 std::transform(b.begin(), b.end(), b.begin(), std::tolower);

 return a < b;
 }
);

```

## 10 Templates

`insertion_sort` soll für beliebige Elementtypen funktionieren:

```

template <typename ElementType>

void insertion_sort(std::vector<ElementType> & v) {
 for (int k = 1; k < v.size(); ++k) {
 ElementType current = v[k];
 ... // Rest unverändert
 }
}

```

“ElementType“ ist Platzhalter für den tatsächlichen Elementtyp und wird vom Compiler automatisch ersetzt.

## 11 Grundlagen der generischen Programmierung

- Ziel: benutze *template*-Mechanismus, damit eine Implementation für viele verschiedene Typen verwendbar ist  
erweitert funktionale und prozedurale und objekt-orientierte Programmierung
- zwei Arten von Templates (“Schablonen“)
  1. Klassen-Templates für Datenstrukturen, z.B. Containersollen beliebige Elementtypen unterstützen

- Implementation  $\Rightarrow$  später
- Benutzung: Datenstrukturname gefolgt vom Elementtyp in spitzen Klammern  
`std::vector<double>`

## 2. Funktionen-Templates: es gab schon “function overloading“

Beispiel:

```
int sq (int x) {
 return x * x;
}

double sq (double x) {
 return x * x;
}
... usw fuer komplexe Zahlen
```

$\Rightarrow$  Nachteile:

- wenn die Implementationen gleich sind nutzlose Arbeit
- Redundanz ist gefährlich, korrigiert man ein Bug, wird leicht eine Variante vergessen

## 11.1 Funktionen-Templates

mit Templates reicht eine Implementation:

```
template <typename T> // T ist Platzhalter fuer beliebigen Typ
// wird spaeter durch einen tatsaechlichen Typ ersetzt
T sq (T x) {
 return x * x; // implizierte Anforderung an den Typ:
 // er muss Multiplikation unterstuetzen
}
```

- Benutzung:
  - Typen für die Platzhalter hinter dem Funktionsnamen in spitzen Klammern
  - meist kann man die Typangabe `<type>` weglassen, weil der Compiler sie anhand des Argumenttyps automatisch einsetzt
- kombiniert man Templates mit Overloading, wird die ausprogrammierte Variante vom Compiler bevorzugt
- Funktion, die ein Array aus Konsole ausgibt:

```
std::vector<double> v = {1.0, 2.0, 3.0};
print_vector(v); // {1.0, 2.0, 3.0}
```

für beliebige Elementtypen:

```
template <typename ElementType>
void print_vector(std::vector<ElementType> const & v) {
 // const: read-only, &: nur Kopie verwenden
 std::cout << "{";
 if (v.size() > 0) {
```



```

 std::cout << " " << v[0];
 for (int k = 1; k < v.size(); ++k) {
 std::cout << " " << v[k];
 }
 }
 std::cout << " }";
}

```

- Verallgemeinerung für beliebige Container mittels Iteratoren:

```

std::list<int> l = {1,2,3};
print_container (l.begin(), l.end()) // {1,2,3}

```

- es genügen forward iterators

```

Iterator iter2 = iter; // Kopie erzeugen
++iter1; // zum naechsten Element
iter1 == iter2, iter1 != end // zeigen sie auf das selbe Element
+ iter1 // Zugriff auf aktuelles Element

template <typename Iterator>

void print_container(Iterator begin, Iterator end) {
 std::cout << "{";
 if (begin != end) { // teste, ob Container leer
 std::cout << " " << *begin;
 ++begin;
 for (; begin != end; ++begin) {
 std::cout << ", " << *begin;
 }
 }
 std::cout << "}";
}

```

- Beispiel 3: checken, ob Container sortiert ist

```

Version 1: hard-coded

bool check_sorted (std::vector<double> const & v) {
 for (int k = 1; k < v.size(); ++k) {
 if (v[k] < v[k-1]) { // Sortierfehler durch Ausnutzen
 // der Transitivitaet
 return false;
 }
 }
 return true; // Schleife ohne Fehler zuende gelaufen
}

Version 2: beliebige Elementtypen, beliebige Sortierung

template <typename ElementType, typename LessThanFunctor>

bool check_sorted(std::vector<ElementType> const & v, typename
LessThanFunctor) {
 for (int k = 1; k < v.size(); ++k) {
 if (less_than(v[k], v[k-1])) {

```

```

 return false;
 }
}
return true;
}

```

- Aufruf von Version 2 mit “lambda-function“:

```

std::vector<double> v = {1.0, 2.0, 3.0};
check_sorted(v, [] (double a, double b) {
 return a<b;
}); // true

check_sorted(v, [] (double a, double b) {
 return a>b;
}); // true

```

- Version 3 mit “forward-iterator“:

```

template<typename Iterator, typename LessThanFunctor>
bool check_sorted(Iterator begin, Iterator end,
 LessThanFunctor less_than)
{
 if (begin == end) { // Container leer?
 return true; // leerer Container immer sortiert
 }
 Iterator next = begin;
 ++next; // next zeigt auf Element nach Iterator begin

 for (; next != end; ++begin, ++next) { // Iteratoren zeigen
 // auf zwei benachbarte Elemente
 if (less_than(*next, *begin)) {
 return false;
 }
 }
}

```

- Bemerkungen:

1. Compiler-Fehlermeldungen bei Template-Code sind oft schwer zu implementieren ⇒ Erfahrung nötig
2. mit Templates kann man noch viel raffiniertere Dinge machen, z.B. Traits-Klassen, intelligent libraries, template metaprogramming ⇒ nur für Fortgeschrittene

## 12 Bestimmung der Effizienz von Algorithmen und Datenstrukturen

- 2 Möglichkeiten

1. messe die “wall clock time“ (wie lange muss man auf ein Ergebnis warten)
2. unabhängig von Hardware: algorithmische Komplexität

- “wall-clock-time“ misst man z.B. mit dem Modul `<chrono>`

```
#include <chrono>
#include <iostream>

int main() {
 ... // alles zur Zeitmessung vorbereiten, z.B. Daten einlesen

 auto start = std::chrono::high_resolution_clock::now(); // Startzeit
 merken
 ... // Code, der gemessen werden soll
 auto stop = std::chrono::high_resolution_clock::now(); // Endzeit
 merken
 std::chrono::duration<double> diff = stop-start; // Zeitdifferenz (
 Laufzeit) in Sekunden
 std::cout << "Zeitdauer: " << diff() << " sekunden \n";
}
```

- in der Praxis nicht so einfach  $\Rightarrow$  Pitfalls:
  - moderne Compiler optimieren oft zu viel, d.h. komplexe Berechnungen werden zur Compilezeit ausgeführt und ersetzt  $\Rightarrow$  gemessene Zeit viel zu kurz gegenüber der Praxis  
Abhilfe: Daten nicht “hard-wired“, sondern z.B. von Platte lesen (*volatile* beim Initialisieren)
  - der Algorithmus ist schneller als die clock  
Abhilfe: rufe den Algorithmus mehrmals in einer Schleife auf
  - die Ausstattung des Programms kann vom Betriebssystem jederzeit für etwas wichtigeres unterbrochen werden  $\Rightarrow$  gemessene Zeit ist zu lang  
Abhilfe: messe mehrmals und nimm die kürzeste Zeit (meist reicht 3-10x)
  - Faustregel: Messung zwischen 0.02-3 Sekunden zur optimalen Nutzung der clock
- Nachteil: Zeit hängt besonders von der Qualität der Implementation, den Daten und der Hardware ab
- algorithmische Komplexität ist davon unabhängig  $\cong$  “theoretisches Effizienzmaß“  
beschreibt, wie sich die Laufzeit verlängert, wenn man mehr Daten hat

$\Rightarrow$  bei effizienten Algorithmen steigt der Aufwand mit  $n$  nur langsam (oder bestenfalls gar nicht)

## 12.1 technisches Effizienzmaß

- berechne, wie viele elementare Schritte der Algorithmus in Abhängigkeit von  $n$  benötigt  
 $\Rightarrow$  komplizierte Formel  $f(n)$
- vereinfache  $f(n)$  in eine einfache Formel  $g(n)$ , die dasselbe wesentliche Verhalten zeigt  
Die Vereinfachung erfolgt mittels O-Notation und ihren Verwandten

## 12.2 $\mathcal{O}$ -Notation/ $\Omega$ -Notation

1.  $g(n)$  ist eine asymptotische (für große  $n$ ) obere Schranke für  $f(n)$  ( $f(n) \leq g(n)$ )  
 $f(n) \in \mathcal{O}(g(n))$  ( $f(n)$  ist in der Komplexitätsklasse  $g(n)$ , wenn es ein  $n_0$  und  $C$  gibt, sodass  $\forall n > n_0 : \Leftrightarrow f(n) \in \mathcal{O}(g(n))$ )
2.  $g(n)$  ist asymptotisch untere Schranke für  $f(n)$  ( $f(n) \geq g(n)$ )  
 $f(n) \in \Omega(g(n)) \Leftrightarrow \exists n_0, C, \text{ sodass } \forall n > n_0 : f(n) \geq C \cdot g(n)$
3.  $g(n)$  ist asymptotisch scharfe Schranke für  $f(n)$  ( $f(n) = g(n)$ )  
 $f(n) \in \Theta(g(n)) \Leftrightarrow f(n) \in \mathcal{O}(g(n)) \wedge f(n) \in \Omega(g(n))$

Regeln:

1.  $f(n) \in \Theta(f(n)) \Rightarrow f(n) \in \mathcal{O}(f(n)), f(n) \in \Omega(f(n))$
2.  $f(n) \in \Theta(f(n)) \Rightarrow C \cdot f(n) \in \Theta(f(n))$
3.  $\mathcal{O}(f(n)) \cdot \mathcal{O}(g(n)) \in \mathcal{O}(f(n) \cdot g(n))$
4.  $\mathcal{O}(f(n)) + \mathcal{O}(g(n)) \in \mathcal{O}(\max(f(n), g(n)))$   
 formell:  $f(n) \in \mathcal{O}(g(n)) \Rightarrow \mathcal{O}(f(n)) + \mathcal{O}(g(n)) \in \mathcal{O}(g(n))$   $g(n) \in \mathcal{O}(f(n)) \Rightarrow \mathcal{O}(g(n)) + \mathcal{O}(f(n)) \in \mathcal{O}(f(n))$

– beliebteste Wahl für  $g(n)$ :

- \*  $\mathcal{O}(1)$  “konstante Komplexität“, Bsp: elementare Operationen, Array-Zugriff
- \*  $\mathcal{O}(\log(n))$  “logarithmische Komplexität“, Bsp: Zugriff auf ein Element von `std::map`
- \*  $\mathcal{O}(n)$  “lineare Komplexität“, Bsp: `std::transform`
- \*  $\mathcal{O}(\log(n) \cdot n)$  “ $n \cdot \log(n)$ “, “quasilinear“, Bsp: `std::sort()`
- \*  $\mathcal{O}(n^2)$  “quadratische Komplexität“
- \*  $\mathcal{O}(n^p)$   $p = \text{const.}$  “polynomelle Komplexität“
- \*  $\mathcal{O}(2^n)$  “exponentielle Komplexität“

– Beispiele:

$$f(n) = 1 + 15n + 4n^2 + 7n^3 \in \mathcal{O}(n^3)$$

$$f(n) = n \cdot \log(n) + n^2 \in \mathcal{O}(n \cdot \log(n) + n \cdot n) \in \mathcal{O}(n) \cdot \mathcal{O}(\log(n) + n) \in \mathcal{O}(n) \cdot \mathcal{O}(n) \in \mathcal{O}(n^2)$$

$\Rightarrow$  es gewinnt immer die am stärksten wachsende Funktion

Anwendung 1: Fibonacci-Zahlen:  $f_k = f_{k-2} + f_{k-1}$

| k     | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7  | 8  |
|-------|---|---|---|---|---|---|---|----|----|
| $f_k$ | 0 | 1 | 1 | 2 | 3 | 5 | 8 | 13 | 21 |

```
int fib1 (int k) { // O(k)
 if (k<2) { // O(1)
 return k; // O(1)
 }
 int f1 = 1; // O(1)
 int f2 = 1; // O(1)

 for (int j = 2; j<=k; ++j) { // O(k)
 int f = f1 + f2; // O(1)
 }
}
```

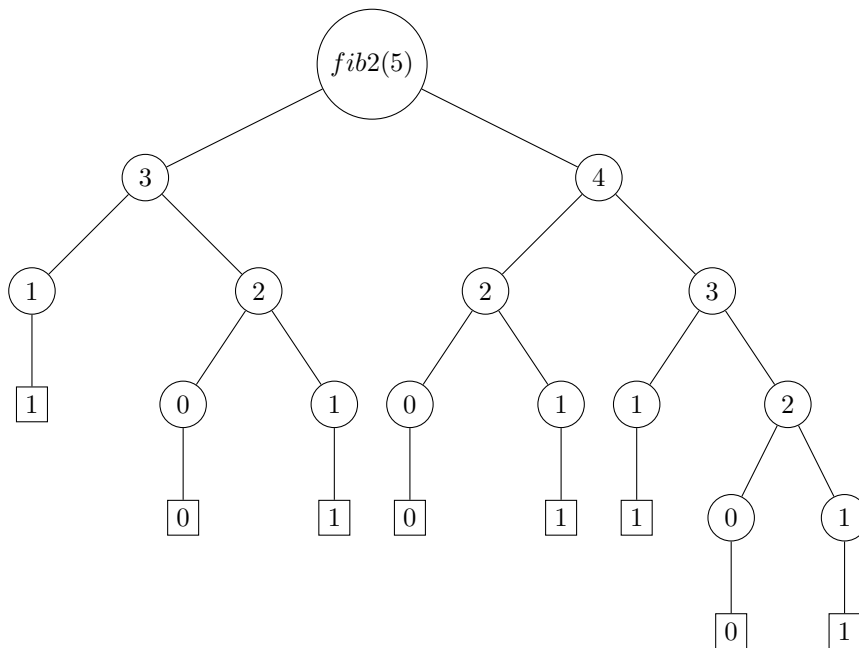
```

 f1 = f2; // O(1)
 f2 = f; // O(1)
}

return f2; // O(1)
}

int fib2 (int k) {
 if (k<2) {
 return k;
 }
 return fib2(k-2)+fib2(k-1));
}

```



⇒ sehr ineffizient, weil alle Fib-Zahlen  $< k$  mehrmals berechnet werden

Sei  $f(k)$  die Anzahl der Schritte, Annahme: jeder Knoten ist  $\mathcal{O}(1) \Rightarrow \mathcal{O}(\text{Knoten})$  Sei  $f'(k)$  die Anzahl der Schritte, oberhalb (oberhalb ist der Baum vollständig (jeder innere Knoten hat genau 2 Kinder))

$$\begin{aligned}
 f'(k) &= 2^{l+1} - 1 \\
 &= 2^{k/2+1} - 1 \\
 &= 2 \cdot 2^{k/2} - 1 \\
 &= 2 \cdot (\sqrt{2})^k - 1 \\
 &\in \Omega(\sqrt{2})^k \\
 &\Rightarrow \text{exponentielle Komplexität}
 \end{aligned}$$

## 13 Zahlendarstellung

Problem: unendlich viele Zahlen, aber die Computer sind endlich

### 13.1 natürliche Zahlen $\mathbb{N}$

$x \geq 0$ , (C++ bietet Typen verschiedener Größe)

| klassisch          | mit Größe (C++) | # Bits       | Bereiche              | Literale |
|--------------------|-----------------|--------------|-----------------------|----------|
| unsigned char      | uint8_t         | ( $\geq$ )8  | 0 – 256               |          |
| unsigned short     | uint16_t        | ( $\geq$ )16 | 0 – 65.535            |          |
| unsigned int       | uint32_t        | ( $\geq$ )32 | 0 – $4 \cdot 10^9$    |          |
| unsigned long      | uint32_t        | 32 oder 64   | 0 – $4 \cdot 10^9$    |          |
| unsigned long long | uint64_t        | 64           | 0 – $2 \cdot 10^{19}$ | 4L       |

Was passiert bei zu großen Zahlen?

- alle Operationen werden Modulo  $2^m$  ausgeführt, wenn der Typ  $m$  Bits hat  
Bsp 1:

```
uint8_t x = 250, y = 100;
uint8_t s = x+t; // 350 % 256 = 94
uint8_t p = x*y; // 2500 % 256 = 168
```

- Pitfalls  
Beispiel 1: Mittelwert eines uint8\_t-Arrays

```
std::vector<uint8_t> v = {...}
uint8_t sum = 0; // uint32_t od. uint64_t
for (int k = 0; k < v.size(); ++k) {
 sum += v[k];
}
std::cout << "Mittelwert: " << (sum(v.size())) << "\n";
```

uint32\_t sum = 0 verhindert overflow mit hoher Wahrscheinlichkeit

Bsp 2: Count-Down Loop (rückwärts über Array)

```
for (uint8_t k = v.size() - 1; k >= 0; --k) {
 .. // v[k] zugreifen
}
uint8_t x = 0;
--x;
```

- arithmetische Op. Addition in Kapitel "Automaten"  
Substitution kann auf Addition zurückgeführt werden

**Erinnerung: Restklassenarithmetik (Modulo)** alle Zahlen mit dem gleichen Rest modulo  $k$  bilden "Äquivalenzklasse"

hier: kleinste Repräsentanten  $0, \dots, k-1$  mit  $k = 2^m$

Eigenschaft: man kann Vielfache  $n \cdot k$  addieren, ohne Äquivalenzklasse zu ändern  
 $\Rightarrow$  implementiere (Addition besser als Subtraktion)

$$\begin{aligned} & (a - b) \% 2^m \\ &= (a + 2^m - b) \% 2^m \\ &= (a + z) \% 2^m \end{aligned}$$

**bitweise Negation** dreht alle Bits um

$$\begin{aligned} m = 4 & \sim (1001) \Rightarrow (0110) \\ \text{setze : } & (2^m - b) \% 2^m = \sim (b + 1) \% 2^m \\ & b + \sim b = 11 \dots 11 = 2^m - 1 \\ & \sim b + 1 = 2^m - b \end{aligned}$$

Fall 1:

$$\begin{aligned} b > 0 & \Rightarrow \sim b < 2^m - 1 \\ & \Rightarrow \sim (b + 1) < 2^m \\ \sim (b + 1) \% 2^m &= \sim (b + 1) \\ (2^m - b) \% 2^m &= \sim b \% 2^m \end{aligned}$$

Fall 2:

$$\begin{aligned} b = 0 & \Rightarrow \sim b = 2^m - 1 \\ \sim b + 1 &= 2^m \\ (\sim b + 1) \% 2^m &= 0 \\ 2^m - b &= 2^m \end{aligned}$$

## Multiplikation

- neue Operationen  $\ll$  und  $\gg$  (left und right shift) verschiebt die Bits um  $k$  Positionen nach links oder rechts. Die herausgeschobenen Bits werden vergessen, auf der anderen Seite durch 0-Bits ersetzt.

$$\begin{aligned} m = 8 : \quad & 11011101 \ll 3 = 11101000 \\ & 11011101 \gg 3 = 00011011 \end{aligned}$$

- Satz:

$$x \ll k = (x * 2^m) \% 2^m \quad (1)$$

- Operationen  $\&$  und  $|$  sind bitweise “und” bzw. “oder” Verknüpfungen nicht verwechseln mit  $\&\&$  bzw.  $||$  für logische Operatoren für  $m = 8$ :

```

10110011 & 1
00000001

00000001

10110011 | 1
00000001

10110011

```

```

uint8_t mal(uint8_t x, uint8_t y) {
 uint8_t res = 0;
 for (int k = 0; k < 8; ++k) {
 if (y & (1 << k) != 0) {
 res += k;
 }
 x = x << 1; // = x*2
 }
 return res;
}

```

## 13.2 ganze Zahlen $\mathbb{Z}$

| klassisch        | Typ mit Größe  | Bits       | Bereich                    |
|------------------|----------------|------------|----------------------------|
| signed char      | <i>int8_t</i>  | 8          | $-127 \dots 128$           |
| signed short     | <i>int16_t</i> | 16         | $-2^{15} \dots 2^{15} - 1$ |
| signed int       | <i>int32_t</i> | 32         | $-2^{31} \dots 2^{31} - 1$ |
| signed long      | <i>int32_t</i> | 32 oder 64 | $-2^{63} \dots 2^{63} - 1$ |
| signed long long | <i>int64_t</i> | 64         | $-2^{63} \dots 2^{63} - 1$ |

für Restklassen: statt  $0 \dots 2^m$  bei unsigned  
jetzt:  $-2^{m-1} \dots 2^{m-1} - 1$  (symmetrisch um 0)

d.h.  $x < 2^{m-1}$ : Repräsentant bleibt

$x \geq 2^{m-1}$ : neuer Repräsentant,  $x - 2^m$  (gleiche Restklasse)

Konsequenzen:



- bei negativer Zahl ist höchste Bit 1, weil  $x \rightarrow x - 2^m$ , falls  $x \geq 2^{m-1}$
- unäre Negation  $-x$  durch Zweierkomplement:

$$\begin{aligned}
 -x &= (\sim x + 1) \% 2^m \\
 Bsp : -0 &= (\sim 000000 + 1) \% 2^8 \\
 &= (1111111 + 1) \% 2^8 \\
 &= 100000000 \% 2^8 \\
 &= 0 \\
 Bsp : -1 &= (\sim 00000001 + 1) \% 2^8 \\
 &= (\sim 11111110 + 1) \% 2^8 \\
 &= 11111111 \% 2^8 \\
 &= 11111111 \\
 &= 2^8 - 1 < 2^8
 \end{aligned}$$

- Ausnahmeregel: für  $\gg$  bei negativen Zahlen Compilerabhängig, meist wird links ein Bit reingeschrieben, damit Zahl negativ bleibt  $\Rightarrow$  es gilt immer noch  $x \gg h = \lfloor x/2^k \rfloor$

### 13.3 reelle Zahlen $\mathbb{R}$

Problem: unendlich viele Zahlen

|                 | Name        | Größe  | Bereich                    | kleinste    | Literale |
|-----------------|-------------|--------|----------------------------|-------------|----------|
| Lösung in $C++$ | float       | 32 Bit | $-10^{-38} \dots 10^{38}$  | $10^{-38}$  | $4.0f$   |
|                 | double      | 64 Bit | $-10^{308} \dots 10^{308}$ | $10^{-308}$ | 4.0      |
|                 | long double |        |                            |             |          |

- der  $C++$  Standard legt Größe nicht fest, aber alle gängigen CPUs benutzen Standard *IEEE754*  
 $C++$  übernimmt Hardware-Implementation
- Ziele bei Definition von reellwertigen Zahlen:
  - hohe Genauigkeit (viele gültige Nachkommastellen)
  - a
- elegante Lösung: halb-logarithmische Darstellung (“floating-point”)
 

Datentyp ist aus rein natürlichen Zahlen zusammengesetzt (aber alles von CPU gekapselt)

  1.  $S$  (1-bit): Vorzeichen ( $0 \approx +$ ,  $1 \approx -$ )
  2.  $M$  (m-bits): Mantisse: Nachkommastellen
  3.  $E$  (e-bits, Basis  $b$ ): Exponent/Größenordnung
- die eigentliche Zahl wird berechnet durch:
 
$$x = (-1)^s \cdot (1 + M \cdot 2^{-m}) \cdot 2^{E-b}$$

| x | $M \cdot 2^{-m}$ | $E - b$ | effektive Darstellung |
|---|------------------|---------|-----------------------|
| 1 | 0                | 0       | $1 \cdot 2^0$         |
| 2 | 0                | 1       | $1 \cdot 2^1$         |
| 3 | 0.5              | 1       | $1.5 \cdot 2^1$       |
| 4 | 0                | 2       | $1 \cdot 2^2$         |
| 5 | 0.25             | 2       | $1.25 \cdot 2^2$      |

**Konsequenz** alle ganzen Zahlen zwischen  $-2^m + \dots + 2^m$  können exakt dargestellt werden und exakte Arithmetik

**Werte für  $m, e, b$  (IEEE754)**

- float:  $m = 23, e = 8, b = 127$   
 $2^{E-b} \in [2^{-126}, 2^{127}] \approx [10^{-38}, 10^{38}]$
- double:  $m = 52, e = 11, b = 1023$   
 $2^{E-b} \in [2^{-1022}, 2^{1023}] \approx [10^{-308}, 10^{308}]$

**Anzahl Nachkommastellen**

- allgemein:  $2^{-m}$
- float:  $2^{-23} \approx 10^{-7}$
- double:  $2^{-52} \approx 2 \cdot 10^{-16}$
- $\varepsilon = 2^{-m}$  = machine epsilon, unit last place (ULP)
- $\varepsilon$  ist die kleinste Zahl, so dass  $(1.0 \cdot \varepsilon)! = 1.0$ , weil Nachkommastellen außerhalb der Mantisse (rechts von  $2^{-m}$ ) ignoriert werden  
 $\Rightarrow$  Problem der Auslöschung von signifikanten Stellen: wenn man zwei fast gleich große Zahlen subtrahiert, löschen sich fast alle Bits der Mantisse  $\Rightarrow$  nur wenige gültige Nachkommastellen überleben
- Bsp 1:  $0.1234567 - 0.1234566 = 0.0000001$  (eine gültige Nachkommastelle)
- Bsp 2:  $10 - \cos(x)$  für kleine  $x$ :

|                                                                   | x         | # gültige Stellen         | Additionstheorem |
|-------------------------------------------------------------------|-----------|---------------------------|------------------|
| für $x \approx 0$ ist $\cos(x) \approx 1 \Rightarrow$ Auslöschung | 0.0001    | 9 (statt 15.5)            | 15.5             |
|                                                                   | $10^{-8}$ | 0 ( $\cos(10^{-8}) = 1$ ) | 15.5             |

Additionstheorem:  $1 - \cos(x) = 2(\sin(x/2.0))^2$

- Bsp 3: quadratische Gleichung  $ax^2 + by + c$  mit  $b > 0$   
 $x_1 = \frac{1}{2a}(-b + \sqrt{b^2 - 4ac})$  falls  $a \cdot c > 0, b^2 \gg 4ac$   
Umstellen:  $x_1 = \frac{1}{2a}(-b + \sqrt{b^2 - 4ac}) \stackrel{=b-\sqrt{b^2-4ac}}{-b-\sqrt{b^2-4ac}}$   
 $\approx -b + b + \varepsilon \approx 0 \Rightarrow$  Auslöschung, wenig gültige Stellen  
 $\frac{1}{2a} \frac{b^2 - (b^2 - 4ac)}{-b - \sqrt{b^2 - 4ac}} = \frac{2c}{-(b + \sqrt{b^2 - 4ac})}$

- Ausnahmeregeln (spezielle Werte)
  - normal:  $E \in [1 \dots 2^e - 2]$
  - $E = 2^e - 1$  (größtmöglicher Wert):
    - für  $M = 0 : x = \pm\infty$  (abhäng. von  $S$ )
    - für  $M > 0 : x = \text{NaN}$  (“Not a Number”)
  - $E = 0$  (kleinster Wert):
    - für  $M = 0 : \pm 0$  (abhäng. von  $S$ )
    - für  $M > 0 : \text{“denormalisierte Zahlen”}$  für sehr kleine Werte

## 14 Buchstabenzeichen

“glyphs” müssen durch Zahlen repräsentiert werden: “Zeichencode”

### Geschichte

- 1963: ASCII (7-bit) Zeichen der engl. Schreibmaschine (keine Umlaute)
- 1964-2000: 8-bit codes mit Umlauten, Akzenten, kyrillisch  
aber 8-bit sind zu wenig, um alles abzudecken  
 $\Rightarrow$  viele konkurrierende 8-bit Codes
- 1991-heute: Unicode  
 anfangs 16-bit, jetzt  $\approx$  21-bit  
 $\Leftarrow$  alles (chinesisch, Emojis, Hyroglyphen)

**Unicode** 3 Codierungen für Unicode:

1. UTF-8: variable length code (pro glyph  $1 \dots 4\text{uint8\_t}$ )
  2. UTF-16: variable length code (pro glyph  $1 \dots 2\text{uint16\_t}$ )
  3. UTF-32: fixed length code (pro glyph  $1\text{uint32\_t}$ )
- char: 8-bit Codes
  - wchar\_t: 16-bit (Windows), 32-bit (Linux)
  - `u16char_t`
  - `u32int_t`

leider sehr plattformabhängig  $\Rightarrow$  Zeichensalat, wenn inkompatible Codes verwendet werden

$\Rightarrow$  in `C++` ICU library (“International Components for Unicode”)

- hat man alle Zeichen korrekt, ist Problem noch nicht gelöst: alphabetische Sortierung sprachabhängig  
 ä: dt. Wörterbuch - wie a; dt. Telefonbuch - wie ae
- Lösung in `C++`:

```
std::sort(v.begin(), v.end(), std::locale("se_SE.UTF-8")) mit <locale>,
<codecvt>
```

## 14.1 eigene Datentypen

3 Möglichkeiten:

- *enum*: Aufzählungstypen  $\Rightarrow$  Selbststudium
- *struct*: strukturierte Daten, zusammengesetzte Typen
- *class*: wie *struct* auf objekt-orientiert

```
struct Typevalue {
 type_name var_name1;
 type_name var_name2;
 ...
};
```

Beispiel:

```
struct Date {
 int day;
 int month;
 int year;
}; // Datenmember = member variables

Date caster (int year) {
 ... // Osterdaten
 Date res;
 res.day = day;
 res.month = month;
}

// für Übungsaufgabe 8.4
struct Character {
 wchar_t clear;
 wchar_t encrypted;
 int count;
};
```

## 15 Objektorientierte Programmierung

### 15.1 eigene Datentypen mit Kapselung

- eigene Datentypen sind zusammengesetzt aus einfacheren/existierenden Datentypen (Ausnahme *enum*)
- zwei Arten:
  - offene Typen: Benutzer kann auf interne Daten zugreifen, “C-style types” (wichtige Änderungen aus Standardbibliothek aus C übernommen)
  - gekapselte Typen: Benutzer kann nicht auf interne Daten zugreifen (“private”) alle Benutzerzugriffe über ein öffentliches Interface (“public”) Vorteile:

1. komplexe Details zur Verwaltung bleiben verborgen
2. öffentliches Interface (hoffentlich) einfach zu benutzen  
z.B. `std :: vector`
3. interne Details können bei Bedarf geändert werden, ohne dass sich das öffentliche Interface ändert  
⇒ Benutzer muss Code nicht ändern, aber Programm geht schneller  
“Rückwärtskompatibilität”

## Wie erreicht man die Kapselung?

- zwei Schlüsselwörter für eigene Typen:
  1. `class` (Konvention in OOP)
  2. `struct` (von C übernommen)
- zwei Schlüsselwörter für die Kapselung:
  1. `public` (öffentlicher Teil)
  2. `private` (gekapselter Teil)

`class` ist standardmäßig “private”, `struct` ist “public”

```
class MyType {
 ... // private by default
 public:
 ... // jetzt oeffentlich
 private:
 ... // jetzt privat
};

struct MyType {
 ... // oeffentlich by default
 private:
 ... // jetzt privat
 public:
 ... // jetzt wieder oeffentlich
};
```

⇒ Benutzer können nur auf Funktionalität im `public`-Teil zugreifen

- die im zusammengesetzten Typ enthaltenen Daten heißen “member variables” und sind normalerweise `private`
  - kann nachträglich geändert werden  
z.B. complex in real/imaginär → Phase/Betrag
  - Benutzer kann nicht unbeabsichtigt die Konsistenz verletzen

## 15.2 running example

Punkt-Klasse für 2-dimensionalen Punkt

```
class Point {
 double x_; // Koordinate als private
 double y_; // Datenmember ('_' am Ende)
};
```

⇒ dieser Datentyp ist unbenutzbar, weil alles privat

- unverzichtbare öffentliche Funktion zum Initialisieren des Speichers: “Konstruktoren”
- Prozeduren innerhalb der Klasse, Name gleich Äquivalenzklasse
  - Prozeduren sind *void*, *void* wird weggelassen
  - nur Seiteneffekt: neue Objekte initialisieren, also die Konstruktoren der Datenmember aufrufen
- zur Erinnerung: zwei Möglichkeiten für normale Variableninitialisierung:
  - `double z = 1.0;`
  - `double z(1.0)` - nur diese Syntax ist in Konstruktoren erlaubt

```
class Point {
 double x_,
 double y_;

 public:
 Point(double x, double y) // Konstruktoraufrufe vor Prozedurrumpf
 : x_(x) // Member x_ auf Initialwert x
 , y_(y) // Member y_ auf Initialwert y
 {
 // normaler Rumpf der Prozedur, hier leer
 }
};

Point p(1.0, 2.0);
Point q = {3.0, 4.0};
```

**Standardkonstruktor**  $\cong$  Konstruktor ohne Argumente

- initialisiert Objekt in Standardzustand
- bei Zahlen: auf 0 setzen, hier auf Koordinatenursprung

```
class Point {
 ... // wie zuvor
 Point() // Standardkonstruktor
 : x_(0.0)
 , y_(0.0)
 {}
};
```

- um mit Punkt-Objekten zu arbeiten, brauchen wir weitere Funktionen:
  1. Member-Funktionen: innerhalb der Klasse definiert man (wie Konstruktoren), können auf alles *private* zugreifen, können als *private* oder *public* definiert werden
  2. freie Funktionen: normale Funktionen außerhalb der Klasse, die ein Argument des neuen Typs haben können nur auf öffentliches Interface zugreifen
- wichtigste Vertreter der Member-Functions: Zugriffsfunktionen “Getter”: erlauben Benutzer, aktuellen Zustand abzufragen (z.B. *v.size()*)

```
Point p(1.0, 2.0);
p.x() // returns 1.0 (x-Koordinate)
p.y() // returns 2.0 (y-Koordinate)
```

- Member-Funktionen werden mit Punkt-Syntax aufgerufen: *p.x()*  
Objekt vor dem Punkt ist das “nullte” Argument der Funktion  $\Rightarrow$  Compiler macht daraus *x(p)*
- bei der Implementation der Member-Funktion schreibt man “nullte” Argument nicht hin, der Compiler stellt es automatisch unter dem Namen *\*this* zur Verfügung

```
class Point {
 ... // wie vorher

 double x() {
 return (*this).x_;
 }
 double y() {
 return (*this).y_;
 }
}
```

- meist kann man *(\*this).* weggelassen werden, wenn eindeutig ist, welchen Member man meint, fügt der Compiler es automatisch ein
- Getter-Funktionen sind “read-only” (ändern die Member-Variablen nicht)  
man sollte sie deshalb mittels *const* explizit als “read-only” markieren  
Vorteile:
  1. Programmierer kann Member-Variable nicht irrtümlich ändern
  2. Funktion kann auch in Kontexten benutzt werden, wo das Objekt (nulltes Argument) explizit als “read-only” markiert ist

*Point const cp(1.0, 2.0);*

## Punkte ausgeben

- zwei Möglichkeiten:

– Member-Funktion:

```
std::cout << p.to_string() << '\n';
```

– freie Funktion:

```
std::cout << to_string(p) << '\n';
```

```
class Point { // Member-Funktion
... // wie vorher

 std::string to_string() const {
 std::string res;
 res += '[' + std::to_string((*this).x()) + ',' + std::to_string(
 (*this).y()) + ']';
 return res;
 }
};

// oder
std::string to_string() const { // freie Funktion
 std::string res;
 res += '[' + std::to_string(p.x()) + ',' + std::to_string(p.y())
 + ']';
 return res;
}
```

ws man wählt, ist Geschmackssache (freie Funktion ist kompatibel zu `std::to_string`)

## Punkte vergleichen

```
class Point {
... // wie vorher

 bool equals (Point other) const {
 return (*this).x() == other.x() && (*this).y() == other.y();
 }
};

// andere Umgebung
Point p(1.0, 2.0);
Point origin;
assert(p.equals(p));
assert(!p.equals(origin));
```

üblicher: Infix-Notation  $\Rightarrow$  dazu Prefix-Variante `operator ==` implementieren

```
class Point {
... // wie vorher

 bool equals (Point other) const {
 return (*this).x() == other.x() && (*this).y() == other.y();
 }
}
```



```

 bool operator== (Point other) const {
 return (*this).x() == other.x() && (*this).y() == other.y();
 }
 bool operator!= (Point other) const {
 return (*this).x() != other.x() || (*this).y() != other.y();
 }
};

// andere Umgebung
Point p(1.0, 2.0);
Point origin;
assert(p == p);
assert(!(p == origin));
assert(p != origin);

```

**neuen Punkt erzeugen** transponiert, d.h. x-y Koordinaten sind vertauscht

```

Point p(1.0, 2.0);
Point tp = p.transpose(); // unser Ziel

class Point {
 ... // wie vorher

 Point transpose() const {
 Point res((*this).y(), (*this).x());
 return res;
 }
};

```

verschoben

```

Point p(1.0, 2.0);
Point v (3.0, 4.0);
Point vp = p.translate(v); // unser Ziel

class Point {
 ... // wie vorher

 Point translate(Point v) const {
 Point res((*this).x() + v.x(), (*this).y() + v.y());
 return res;
 }
};

```

## 15.3 Member-Funktionen

Jede Klasse hat bestimmte spezielle Member-Funktionen:

- Konstruktor: bringt Objekt in wohldefinierten Anfangszustand
- Destruktor: entsorgt nicht mehr benötigtes Objekt (typischerweise am Ende der Umgebung)
- Zuweisungsoperatoren: um Objekte per Zuweisung ("=") zu übers

**Destruktor** Jede Klasse muss genau einen haben, wenn der Programmierer das nicht explizit implementiert, fügt Compiler ihn automatisch ein

```
class Klassenname {
public:
 ~Klassenname() {
 ... Implementation
 }
};
```

- der automatisierte Destruktor ruft einfach die Destrukturen aller Member-Variablen auf
- meist ist das ausreichend, aber in bestimmten Situationen muss der Programmierer zusätzliche Aktionen implementieren
- Beispiele:
  1. manuelle Speicherverwaltung: Destruktor muss nicht mehr benötigten Speicher an Betriebssystem zurückgeben (z.B. Destruktor von `std::vector`)  
Vorteil der Kapselung: Nutzer merkt davon nichts
  2. manuelles Dateimanagement: Destruktor muss Datei schließen (=Daten aus dem Cache auf die Platte übertragen)
  3. Abmelden von einem Service (Ausloggen, Verbindung beenden)
- spezieller Konstruktor:

**Kopier-Konstruktor** zum Erzeugen einer Kopie eines vorhandenen Objekts, d.h. neue Speicherzelle mit gleichem Inhalt:

```
Point p (1.0, 2.0); // Konstruktor mit Initialwert
Point q = p; // Kopierkonstruktor
Point r(p); // Kopierkonstruktor

int foo (Point q) {
 ...
}
foo(p) // Kopierkonstruktor wegen pass-by-value

int bar (Point const & q) {
 ...
}
bar(p); // q ist neuer Name für p ohne neue Speicherzelle
```

```
class KlassenName{
public:
 KlassenName (KlassenName const & existing) {
 ...
 }
};
```

- der Compiler erzeugt Kopier-Konstruktor automatisch, falls nicht explizit programmiert (= ruft Kopier.Konstruktor für alle Member-Variablen auf)  
meistens richtig, Ausnahmen wie oben

## Standard-Konstruktor (“default constructor”)

- ohne Argumente
- bringt Objekt in Standard-Zustand, z.B. 0 bei Zahlen

```
class KlassenName {
 public:
 KlassenName() {
 ...
 }
};
```

- Compiler erzeugt Standard-Konstruktor automatisch, falls es keinen benutzerdefinierten Konstruktor gibt
- “rule-of-three”: Wenn es nötig ist, einen der drei Funktionen (Destruktor, Kopier-Konstruktor und Zuweisungskonstruktor) explizit zu implementieren, müssen alle drei explizit implementiert werden

## 15.4 Vorteile der Kapselung

- Benutzung der Klasse ist viel einfacher, weil unwichtige Details verborgen sind
- interne Implementation kann geändert werden, ohne den Benutzer zu Folgeänderungen zu zwingen, weil externe Schnittstelle erhalten bleibt

### Beispiel: Point-Klasse

```
class Point {
 double x_, y_;

 public:
 Point()
 : x_(0.0)
 , y_(0.0) {}

 Point(double x, double y)
 : x_(x)
 , y_(y) {}

 double x() const {
 return x_; // = return (*this).x_;
 }

 double y() const {
 return y_;
 }
};
```

```
Alternative: Array Länge 2:
#include <array>
std::array<double, 2> // feste Größe

class Point {
 std::array<double, 2> data_;
```

```

public:
 Point()
 : data_{0.0, 0.0} {}

 Point (double x, double y)
 : data_{x, y} {}

 double x() const {
 return data_[0];
 }

 double y() const {
 return data_[1];
 }
};

```

## 15.5 Operatoren

**Ziel der Objektorientierten Programmierung** Arbeiten mit Nutzer-definierten Datenstrukturen möglichst einfach, wie mit eingebauten (z.B. arithmetische Infix-Operationen)

```

Point p(2.0, 3.0), q(4.0, 5.0)
Point r = 2.5*p + q;
assert(r == Point(9.0, 12.5));

```

- dazu muss man die entsprechenden Prefix-Funktionen implementieren
- Addition:

```

Point operator + (Point p1, Point p2) {
 Point res (p1.x() + p2.x(), p1.y() + p2.y());
 return res;
}

// Alternative
Point operator + (Point cconst & p1, Point const & p2) {
 ... // wie zuvor
}

```

- Subtraktion, elementweise Multiplikation und Division genauso (“+” überall durch “+”, “\*”, “−” ersetzen)
- Skalierungsoperation: Multiplikation von Punkt mit Zahl, d.h. zwei verschiedene Argumenttypen (zwei Versionen für Kommutativität)

```

Point operator * (double s, Point p) {
 Point res (s * p.x(), s * p.y());
 return res;
}

// und
Point operator * (Point p, double s) {
 Point res (p.x() * s, p.y() * s);
 return res;
}

```

- alle diese Versionen können dank “function-overloading” gleichzeitig implementiert sein
- bisher: freie Funktionen
- falls das erste Argument vom Typ Point oder Point const & ist, kann man die Funktionen alternativ als Member-Funktion implementieren

```
class Point {
... // wie bisher
Point operator + (Point const & p2) {
 Point res ((*this).x() + p2.x(), (*this).x() + p2.y());
 return res; // Nulltes Argument anstelle von p2 der freien Funktion
}
};
```

## Member-Funktionen

- Vorteil von Member-Funktionen: Zugriff auf private Member der Klasse (hier nicht notwendig)
- Nachteil:
  1. nur möglich, wenn das linke Argument vom Klassentyp ist  
( $p * s$  kann Member-Funktion sein,  $s * p$  nicht)
  2. nur möglich, wenn man die Klassendefinition ändern darf

## 15.6 Objekte nachträglich verändern

- bisher: alle Objekte waren “write-once”, d.h. Speicher wurde im Konstruktor initialisiert und war dann unveränderlich  
⇒ Paradigmen der funktionalen Programmierung - “referentielle Integrität”
- prozedurale Programmierung erfordert Möglichkeit, Objekte zu ändern, z.B. um entsprechende Änderungen in der realen Welt widerzuspiegeln
- dazu 3 Möglichkeiten:
  1. Setter-Funktionen (universell nutzbar)

```
class Point {
... // wie zuvor
void setX (double new_x) { // kein const. für Änderung
 (*this).x_ = new_x;
}

void setY (double new_y) { // kein const. für Änderung
 (*this).y_ = new_y;
}

void set (double new_x, double new_y) {
 (*this).x_ = new_x;
 (*this).y_ = new_y;
}
};
```

## 2. Index-zugriff, wie bei `std::vector`

```
// wollen:
Point p(2.0, 3.0);
assert(p[0] == 2.0 && p[1] == 3.0); // lesender Zugriff

p[0] = 4.0;
p[1] = 5.0;
assert(p == Point(4.0, 5.0)); // schreibender Zugriff

class Point {
... // wie zuvor
double operator[] (int index) const {
 if (index == 0) {
 return (*this).x_;
 } if (index == 1) {
 return (*this).y_;
 } else {
 // Fehlermeldung
 }
} // lesender Zugriff

double & operator[] (int index) {
 if (index == 0) {
 return (*this).x_;
 } if (index == 1) {
 return (*this).y_;
 } else {
 // Fehlermeldung
 }
} // schreibender Zugriff
};

// Verwendung (Langform):
Point p(2.0, 3.0);
double & x = p[0];
double & y = p[1];
x = 4.0; // ändert indirekt auch die Variablen p.x_, p.y_
y = 5.0;
assert(p == Point(4.0, 5.0));
```

## 3. Zuweisungsoperatoren

```
// wollen:
Point p(2.0, 3.0), q(4.0, 5.0);

p = 1.0;
assert(p == Point(1.0, 1.0));

p = q;
assert(p == Point(4.0, 5.0));

Point & r = q;

class Point {
... // wie zuvor
void operator= (double v) {
 (*this).x_ = v;
}
```

```

 (*this).y_ = v;
 }

 void operator= (Point const & other) {
 (*this).x_ = other.x_;
 (*this).y_ = other.y_;
 } // copy assignment operator
};

```

## Bemerkungen

- implementiert der Programmierer keinen copy assignment Operator, implementiert der Compiler ihn automatisch (wie Kopierkonstruktor): ruft copy assignment für alle Member-Variablen auf
- man implementiert meist:

```

Point & operator= (...) {
 ... // wie zuvor
 return *this;
}

```

Vorteil: man kann Zuweisungen verketteten

- arithmetische Zuweisung:

```

// wollen:
Point p(2.0, 3.0), q(4.0, 5.0);
p += q; // add-assignment
assert(p == Point(6.0, 8.0));

class Point {
 ... // wie zuvor
 Point & operator += (Point const & other) {
 (*this).x_ += other.x_;
 (*this).y_ += other.y_;
 return *this;
 }
};

```

## 16 Klasse: Image

- speichert 2D Bild (analog: Matrix), zunächst nur Graubilder, später Farbbilder
- Beispiel für dynamische Datenstruktur, Größe erst zur Laufzeit bekannt und änderbar
- besteht aus Pixeln ("picture elements"), die mit 2 Indizes x und y angesprochen werden
- Problem: Speicher ist nur 1D  
Lösung: Lege Zeilen hintereinander

```

class Image {
 int width_, height_;
 std::vector<uint16_t> data_;
public:
 Image() //Std-Konstruktor Bildgröße(0,0)
 :width_(0)
 ,height_(0)
 ,data_()
 {}

 Image(unsigned int w, unsigned int u)
 :width_(w)
 ,height_(u)
 ,data_(w*h, 0) // Pixelgröße mit Farbwert schwarz

 int width() const {
 return width_;
 }

 int height() const {
 return height_;
 }

 int size() const { // Gesamtzahl Pixel
 return width_ * height_;
 }

 void resize(unsigned int w, unsigned int h) {
 data_.resize(w*h);
 width_ = w;
 height_ = h;
 }

 uint16_t get(int x, int y) const {
 return data_[x + y*width_];
 }

 void set(int x, int y, uint16_t v) {
 data_[x + y*width_] = v;
 }
};

```

**Zugriff bequemer machen** wünschenswert wäre: 2D Arrays  $\Rightarrow$  verwende stattdessen runde Klammern

```

class Image {
 ... // wie bisher
 uint16_t operator()(int x, int y) const {
 return get(x,y);
 }

 uint16_t & operator()(int x, int y) {
 return data_[x+y*width_];
 }
};

```



```
// jetzt:
uint16_t v = image(1,2);
image(1,2) = 255;
```

### Rückgabe als String

```
std::string to_string (Image const & image) {
 std::string res;
 for (int y=0; y<image.height(); y++) { // iteriert über die Zeilen
 for (int x=0; x<image.width(); x++) { // iteriert über die Spalten
 if (x>0) {
 res += ' ' ;
 }
 res += std::to_string(image(x,y));
 }
 res += '\n';
 }
 return res;
}
```