

ZUSAMMENFASSUNG PROGCPP FS18

NOAH KÄLIN

ERSTELLT MIT L^AT_EX

9. März 2018

Inhaltsverzeichnis

1	Kapitel 1	4
1.1	Einführung	4
1.1.1	Charakteristiken von C++	4
1.1.2	Entstehung von C++	4
1.1.3	Welches C++?	4
1.1.4	C++-Unterstützung von Texas Instruments (TI)	4
1.1.5	Hello World!	5
1.1.6	C++-Compiler (noch nicht Eclipse)	5
1.2	Lexikalische Elemente von C++	5
1.2.1	Lexikalische Elemente	5
1.2.2	Styleguide: Bezeichner (Namen)	5
1.3	Typkonzept	6
1.3.1	Datentypen	6
1.3.2	#define (Kap. 4.5)	6
1.4	Ausdrücke und Operatoren	6
1.4.1	Ausdrücke und Operatoren	6
1.5	Anweisungen	7
1.5.1	Anweisungen: ebenfalls nichts neues	7
1.6	Streams	7
1.6.1	Streamkonzept	7
1.6.2	Einsatz von Streams	7
1.6.3	Ausgabe: Klasse ostream	8
1.6.4	Eingabe: Klasse istream	8
1.6.5	Formatierte Ein- und Ausgabe	8
1.6.6	Format-Flags um Überblick (unvollständig)	8
2	Kapitel 2: Funktionen	9
2.1	Grundlegendes	9
2.1.1	Synonyme für Funktionen	9
2.1.2	Aufgabe einer Funktion	9
2.1.3	Funktionen (Vergleich zu C)	9
2.1.4	Definition von Funktionen	9
2.1.5	Deklaration von Funktionen (Funktionsprototypen)	10
2.1.6	Kosten einer Funktion	10
2.2	C-Makro	10
2.2.1	C-Makro mit #define	10
2.2.2	Beispiel mit C-Makro: Maximum zweier int-Werte	11
2.2.3	Beispiel mit C-Makro: Was passiert wirklich?	11
2.3	inline-Funktionen	11
2.3.1	inline-Funktionen: Grundlegendes	11
2.3.2	Beispiel mit inline-Code: Maximum zweier int-Werte	12
2.4	Grundsätze für Optimierungen	12
2.5	default-Argumente	12
2.5.1	Vorbelegte Parameter (default-Argumente)	12
2.5.2	Beispiel: default-Argumente	13
2.5.3	Nutzen von default-Argumenten	13
2.6	Overloading	13
2.6.1	Überladen von Funktionen (overloading)	13
2.6.2	Overloading in C++	13
2.6.3	Deklaration von überladenen Funktionen: Regeln	14
2.6.4	Funktionen sollen nur dann überladen werden, wenn ...	14
2.7	default-Parameter vs. Overloading	14

3	Kapitel 3: Pointer und Referenzen	15
3.1	Höhere und strukturierte Datentypen	15
3.1.1	Höhere Datentypen	15
3.1.2	Strukturierte Datentypen	15
3.2	Pointer	15
3.2.1	Adresse	15
3.2.2	Pointer	15
3.2.3	Standarddarstellung von Pointern	15
3.2.4	Pointer und Datentyp	16
3.2.5	Definition einer Pointervariablen	16
3.2.6	Initialisierung mit Null-Pointer	16
3.2.7	Der Adressoperator & (Referenzierung)	16
3.2.8	Kopieren von Adressen	17
3.2.9	Der Inhaltsoperator * (Dereferenzierung)	18
3.2.10	Darstellung in graphischer Pointernotation	18
3.2.11	const bei Pointern: Vorsicht	19
3.2.12	void-Pointer	20
3.2.13	Pointer auf Funktionen	20
3.2.14	Interruptvektortabelle: Tabelle von Funktionspointern	20
3.2.15	Umsetzung von Funktionspointern in C/C++	21
3.2.16	Beispiel für Funktionspointer	21
3.3	Referenzen	21
3.3.1	Was ist eine Referenz?	21
3.3.2	Syntax von Referenzen	22
3.3.3	Einsatz von Referenzen	22
3.3.4	Pointer und Referenzen auf lokale Variablen	22
3.4	Zeiger und Referenzen als Parameter und Rückgabewerte	22
3.4.1	Call by Value vs. Call by Reference	22
3.4.2	3 Beispiele	23
3.4.3	Call by reference: wann einsetzen?	24
3.4.4	Merke	24
4	Kapitel 4: Arrays, Dynamische Speicherverwaltung	25
4.1	Arrays: Vektoren	25
4.1.1	Problemstellung	25
4.1.2	Der Array (Feld, Vektor)	25
4.1.3	Zugriff auf ein Arrayelement	25
4.2	Arrays und Pointer	26
4.2.1	Pro Memoria: Eindimensionales Array (Vektor)	26
4.2.2	Äquivalenz von Array- und Pointernotation	26
4.2.3	Vergleichen von Arrays	26
4.2.4	Arrayname ist ein nicht modifizierbarer L-Wert	26
4.2.5	Automatische Initialisierung von Arrays	27
4.2.6	Explizite Initialisierung von Arrays	27
4.2.7	Beispiel: Explizite Initialisierung von Arrays	27
4.2.8	Goodies für die explizite Initialisierung	27
4.3	Mehrdimensionale Arrays	28
4.3.1	Initialisierung eines mehrdimensionalen Arrays	28
4.4	Übergabe von Arrays und Zeichenketten	28
4.4.1	Beispiel: Array (Vektor) als Parameter	28
4.4.2	Übergabe einer Matrix mittels offenem Array	29
4.4.3	Zeichenketten (Strings)	29
4.5	Dynamische Speicherverwaltung	29
4.5.1	Pro Memoria: Variablen	29

4.5.2	Dynamische Speicherverwaltung	. . . . .	29
4.5.3	Dynamische Speicherverwaltung: Syntax	. . . . .	30
4.5.4	Dynamische Speicherverwaltung: Vorsichtsmassnahmen	. . . . .	30
4.5.5	Memory Leak, Garbage Collection	. . . . .	30
4.5.6	Dynamische Allozierung von Arrays	. . . . .	30
4.5.7	Dynamische Allozierung von Matrizen	. . . . .	31
4.5.8	Dynamische Matrix mit 4 Zeilen und 3 Spalten	. . . . .	31
4.5.9	Zugriff auf dynamisch erzeugte Matrix	. . . . .	31
4.5.10	Dynamische Matrix freigeben	. . . . .	32
4.5.11	Effizienz der Matriximplementationen	. . . . .	32

1 Kapitel 1

1.1 Einführung

1.1.1 Charakteristiken von C++

- C++ erlaubt sowohl prozedurale, objektorientierte als auch generische Programmierung Achtung: nicht jedes C++-Programm ist objektorientiert
- C++ ist sehr mächtig
- C++ ist eine Obermenge von C
- Syntaktisch ist C++ sehr ähnlich oder identisch zu C
- C++ ist sicherer als C

1.1.2 Entstehung von C++

- C Ritchie 1971, typisiert
- ANSI C seit 1983
- C++ Stroustrup 1986, Klassen und OO
- Final Standard ISO/ANSI ab 1990

ISO/IEC 14882:2003 Programming Languages - C++, aka C++03

ISO/IEC 14882:2011 Programming Languages - C++, aka C++11

ISO/IEC 14882:2014 Programming Languages - C++, aka C++14

1.1.3 Welches C++?

- **Im Modul ProgCPP setzen wir den Standard 14882:2003, d.h. C++03 ein**
- Wieso nicht C++11 oder C++14?
 - Der neue Standard hat einige interessante Erneuerungen zu bieten, die C++ noch näher an C# kommen lassen
 - Durch diese neuen Features wird die Sprache leider nicht einfacher sondern umfangreicher und komplizierter
 - Der Nutzen von einzelnen Neuerungen ist m.E. fraglich
 - Bei Embedded Systems wird heute noch mehrheitlich C verwendet. Diejenigen, die C++ einsetzen, nehmen C++03
 - Ich bin gespannt, ob und wann C++11 im Embedded-Bereich den Durchbruch schafft

1.1.4 C++-Unterstützung von Texas Instruments (TI)

- TI als Repräsentant für einen Anbieter von Embedded-Entwicklungsumgebungen
- The TI compilers for all devices support
 - C++98 (ISO/IEC 14882:1998)
 - C++03 (this is a bug fix update to C++98)
- The TI compiler does not support
 - C++ TR1
 - C++11 (ISO/IEC 14882:2011)
- Noch neuere Versionen erst recht nicht

1.1.5 Hello World!

./listings/hello.cpp

```
// Datei: hello.cpp
// Hello World
// N. Kaelin, 02.03.2018

#include <iostream>
using namespace std;

int main(void)
{
    cout << "Hello_World!" << endl;
    return 0;
}
```

1.1.6 C++-Compiler (noch nicht Eclipse)

Statt **gcc** (für C-Programme) muss **g++** (für C++-Programme) oder **clang++** verwendet werden

```
g++ -o hello hello.cpp
clang++ -o hello hello.cpp
```

1.2 Lexikalische Elemente von C++

1.2.1 Lexikalische Elemente

- C++ ist hier völlig identisch zu C
 - Bezeichner
 - Schlüsselwörter (werden ergänzt durch zusätzliche (REFERENZ))
 - Literale
 - Operatoren (werden ergänzt durch zusätzliche)
 - Kommentare
- Codierstil beachten
 - Die Element-Richtlinien haben sich etabliert (siehe Anhang)

1.2.2 Styleguide: Bezeichner (Namen)

- Variablen, Konstanten und Objekte
 - mit Kleinbuchstaben beginnen
 - erster Buchstaben von zusammengesetzten Wörtern ist gross (mixed case)
 - keine Underscores

Beispiele: counter, maxSpeed

- Funktionen
 - mit Kleinbuchstaben beginnen

- erster Buchstaben von zusammengesetzten Wörtern ist gross (mixed case)
- Namen beschreiben Tätigkeiten
- keine Underscores

Beispiele: `getCount()`, `init()`, `setMaxSpeed()`

- Klassen, Strukturen, Enums
 - mit Grossbuchstaben beginnen
 - erster Buchstaben von zusammengesetzten Wörtern ist gross (mixed case)
 - keine Underscores

Beispiele: `MotorController`, `Queue`, `Color`

1.3 Typkonzept

1.3.1 Datentypen

- In C++ gibt es die gleichen Basisdatentypen (plain old data types, POD types) wie in C
- Zusätzlich: es gibt einen Typ für boole'sche Werte: **bool** (Kap. 3.4.5, 4.3.1)
- Der Typ **bool** hat die beiden Werte **true** und **false**

1.3.2 `#define` (Kap. 4.5)

- In C oft noch geduldet, in C++ verpönt
- `#define` bewirkt eine reine Textersetzung durch den Präprozessor, umgeht dadurch Syntax- und Typprüfung
- Für die Definition von symbolischen Konstanten soll statt `#define` das Schlüsselwort **const** oder **enum** verwendet werden
- schlecht:


```
#define PI 3.14159
#define VERSUCHE_MAX 4
```
- gut:


```
const double pi = 3.14159;
const int versucheMax = 4;
enum {versucheMax = 4}; // noch besser als const int
```

1.4 Ausdrücke und Operatoren

1.4.1 Ausdrücke und Operatoren

- C++ ist hier völlig identisch zu C
- Es gibt noch ein paar zusätzliche Operatoren in C++ (z.B. für type casting)

1.5 Anweisungen

1.5.1 Anweisungen: ebenfalls nichts neues

- Die Syntax der Blockanweisung ist identisch zu C
- Die Syntax der Steuerstrukturen ist identisch zu C
 - Sequenz
 - Iteration (for, while, do ... while)
 - Selektion (if, if ... else, switch)
- Sprunganweisungen sind auch identisch zu C
 - break
 - continue
 - return
 - goto → nicht verwenden!!!

1.6 Streams

1.6.1 Streamkonzept

- Ein Stream repräsentiert einen sequentiellen Datenstrom
- Die Operatoren auf dem Stream sind `||` und `!!`
Für vordefinierte Datentypen sind diese Operatoren schon definiert, für eigene selbstdefinierte Klassen können diese Operatoren überladen werden (**KAPITEL ANGEBEN**)
- C++ stellt 4 Standardströme zur Verfügung
 - cin: Standard-Eingabestrom, normalerweise die Tastatur
 - cout: Standard-Ausgabestrom, normalerweise der Bildschirm
 - cerr: Standard-Fehlerausgabestrom, normalerweise der Bildschirm
 - clog: mit *cerr* gekoppelt
- Alle diese Ströme können auch mit einer Datei verbunden werden

1.6.2 Einsatz von Streams

- In C werden `printf()` und `scanf()` mit `stdin`, `stdout`, `stderr` verwendet
- `printf()` und `scanf()` könnten in C++ immer noch verwendet werden. Dies soll jedoch im Normalfall vermieden werden.
- C++ bietet analog die Streams `cin`, `cout`, `cerr` an
- Der Zugriff auf `cin` und `cout` ist einfacher und komfortabler als die Verwendung von `printf()` und `scanf()`
- `cin` und `cout` müssen immer ganz links in einer Befehlszeile stehen. Die Daten kommen von `cin` (Tastatur, Operator `>>`) und gehen zu `cout` (Konsole, Operator `<<`)

1.6.3 Ausgabe: Klasse ostream

- Methoden für die Ausgabe von vordefinierten Datentypen, z.B.:
ostream& operator <<(int n);
ostream& operator <<(double d);
ostream& operator <<(char c);
- Weitere Klassen können diesen Operator überschreiben, z.B.:
ostream& operator <<(std::string str);
- Nutzung mit cout (vordefiniertes Objekt der Klasse ostream):
int i = 45;
cout <<"Hallo " <<i <<endl;

1.6.4 Eingabe: Klasse istream

- Methoden für die Eingabe von vordefinierten Datentypen, z.B.:
istream& operator >>(int& n);
istream& operator >>(double& d);
istream& operator >>(char& c);
- Weitere Klassen können diesen Operator überschreiben z.B.:
istream& operator >>(std::string& str);
- Nutzung mit cin (vordefiniertes Objekt der Klasse istream):
double d;
string str;
cin >>d >>str;

1.6.5 Formatierte Ein- und Ausgabe

ios, eine Basisklasse von iostream, stellt verschiedene Möglichkeiten (Format Flags) vor, um die Ein- und Ausgabe zu beeinflussen.

Beispiel:

```
cout <<showbase <<hex <<27; // Ausgabe: 0x1b
```

1.6.6 Format-Flags um Überblick (unvollständig)

Flag	Wirkung
boolalpha	bool-Werte werden textuell ausgegeben
dec	Ausgabe erfolgt dezimal
fixed	Gleitkommazahlen im Fixpunktformat
hex	Ausgabe erfolgt hexadezimal
internal	Ausgabe innerhalb Feld
left	linksbündig
oct	Ausgabe erfolgt oktal
right	rechtsbündig
scientific	Gleitkommazahl wissenschaftlich (Mantisse und Exponent)
showbase	Zahlenbasis wird angezeigt
showpoint	Dezimalpunkt wird immer ausgegeben
showpos	Vorzeichen bei positiven Zahlen anzeigen
skipws	Führende Whitespaces nicht anzeigen
unitbuf	Leert Buffer des Outputstreams nach Schreiben
uppercase	Alle Kleinbuchstaben in Grossbuchstaben wandeln

2 Kapitel 2: Funktionen

2.1 Grundlegendes

2.1.1 Synonyme für Funktionen

- Unterprogramm
- Subroutine
- Prozedur (Funktion ohne Rückgabewert)
- Methode (in der Objektorientierten Programmierung)

2.1.2 Aufgabe einer Funktion

- Gleichartige, funktional zusammengehörende Programmteile unter einem eigenen Namen zusammenfassen. Der Programmteil kann mit diesem Namen aufgerufen werden.
- Einige Funktionen (im speziellen mathematische) sollen parametrisiert werden können, z.B. die Cosinusfunktion macht nur Sinn, wenn sie mit unterschiedlichen Argumenten aufgerufen werden kann.
- Divide et impera (divide and conquer, teile und herrsche):
Ein grosses Problem ist einfacher zu lösen, wenn es in mehrere einfachere Teilprobleme aufgeteilt wird.

2.1.3 Funktionen (Vergleich zu C)

- Alles was in C möglich ist, gibt es auch in C++
- Einige Punkte sind in C++ zusätzlich eingeführt worden:
 - Operatorfunktion (Spezialität von C++, folgt später)
 - inline-Funktion
 - Vorbelegung von Parametern (default-Argumente)
 - Überladen von Funktionen (overloading)

2.1.4 Definition von Funktionen

- Funktionskopf
 - legt die Aufrufschnittstelle (Signatur) der Funktion fest
 - besteht aus:
 - * Rückgabebetyp
 - * Funktionsname (fast beliebig wählbar)
 - * Parameterliste
- Funktionsrumpf
 - Lokale Vereinbarungen und Anweisungen innerhalb eines Blocks

2.1.5 Deklaration von Funktionen (Funktionsprototypen)

./listings/fktproto.cpp

```
// Datei: fktproto.cpp
// Deklaration von Funktionen
// N. Kaelin, 02.03.2018

#include <iostream>
using namespace std;

void init(int* alpha); // das ist der Funktionsprototyp (Deklaration)

int main(void)
{
    int a;
    init(&a);
    cout << "Der_Wert_von_a_ist_" << a << endl;
    return 0;
}

void init(int* alpha)
{
    *alpha = 10;
}
```

2.1.6 Kosten einer Funktion

- Der Code einer Funktion ist nur einmal im Speicher vorhanden
 - Vorteil: spart Speicher
- Der Aufruf einer Funktion bewirkt eine zeitliche Einbusseim Vergleich zu einer direkten Befehlsausführung
 - Nachteil: Zeitverlust, Overhead

2.2 C-Makro

2.2.1 C-Makro mit #define

- C-Makros bewirken eine reine Textersetzung ohne jegliche Typenprüfung
- Bei Nebeneffekten (welche zwar vermieden werden sollten) verhalten sich Makros oft nicht wie beabsichtigt

Achtung: C-Makros lösen zwar das Problem mit dem Overhead, sind aber sehr unsicher. Bitte nicht einsetzen!

2.2.2 Beispiel mit C-Makro: Maximum zweier int-Werte

```
\#define MAX(a,b)      ((a)>(b) ? (a) : (b))

int z1 = 4;
int z2 = 6;
int m = MAX(z1 , z2) ;
  wird expandiert zu: m = ((z1)<(z2) ? (z1) : (z2)); // m=6, z1=4, z2=6
m = MAX(++z1,++z2) ;
  erwartet wird: m=7, z1=5, z2=7
```

2.2.3 Beispiel mit C-Makro: Was passiert wirklich?

```
m = MAX(++z1,++z2) ;
wird expandiert zu:
  m = ((++z1)<(++z2) ? (++z1) : (++z2)); m = ((5)<(7) ? (++z1) : (8));
  // z2 wird zweimal inkrementiert!
  // m=8, z1=5 ,z2=8
  erwartet wird:
  m=7, z1=5, z2=7
```

2.3 inline-Funktionen

2.3.1 inline-Funktionen: Grundlegendes

- Lösen das Overhead-Problem
 - Code wird direkt eingefügt, kein Funktionsaufruf
- Typenprüfung findet statt
- Einsetzen wenn der Codeumfang der Funktion sehr klein ist und die Funktion häufig aufgerufen wird (z.B. in Schleifen)
- Achtung: Rekursive Funktionen und Funktionen, auf die mit einem Funktionspointer gezeigt wird, werden nicht inlined.

2.3.2 Beispiel mit inline-Code: Maximum zweier int-Werte

```
inline int max(int a, int b)
{
    return a < b ? a : b;
}

int main()
{
    int z1 = 4;
    int z2 = 6;
    int m = max(z1, z2);
    // m=6, z1=4, z2=6
    m = max(++z1, ++z2);
    // m=7, z1=5, z2=7
}
```

2.4 Grundsätze für Optimierungen

#1: Optimize: don't do it

#2: If you have to do it: do it later

2.5 default-Argumente

2.5.1 Vorbelegte Parameter (default-Argumente)

```
void prtDate(int day=1, int month=3, int year=2009);
```

- Parametern können im Funktionsprototypen (**bitte nur dort!**) Defaultwerte zugewiesen werden.
- Beim Funktionsaufruf können (aber müssen nicht) die Parameter mit default-Werten weggelassen werden

Achtung: Hinter (rechts von) einem default-Argument darf kein nicht vorbelegter Parameter mehr folgen, d.h. wenn bei einem Parameter ein default definiert wird, dann müssen bei allen weiteren Parametern dieser Funktion ebenfalls defaults definiert werden.

- Grund: Die Parameterübergabe erfolgt in C++ von links nach rechts

2.5.2 Beispiel: default-Argumente

```
void prtDate(int day=1, int month=3, int year=2009);

// erlaubt sind z.B. die folgenden Aufrufe:
prtDate(); // 1-3-2009
prtDate(23); // 23-3-2009
prtDate(15,6); // 15-6-2009
prtDate(24,7,2012); // 24-7-2012

// nicht erlaubt sind z.B. diese Deklarationen:
void prtDate2(int day=7, int month, int year=2009);
void prtDate3(int day, int month=3, int year);
```

2.5.3 Nutzen von default-Argumenten

- Wenn in einer bereits existierenden Funktion neue Argumente aufgenommen werden müssen, dann:
 - Neue Argumente hinten als default-Argumente anfügen
 - Die bereits bestehenden alten Aufrufe (mit weniger Argumenten) können unverändert beibehalten werden
 - Die Implementation der Funktion muss angepasst werden
- Sehr nützlich z.B. bei Konstruktoren in der objektorientierten Programmierung

2.6 Overloading

2.6.1 Überladen von Funktionen (overloading)

- Zweck:

Eine Funktion sollte allenfalls mit unterschiedlichen Parametern aufgerufen werden können

```
void print(char ch);
void print(int i);
void print(double d);
```

- Alternative (in C) wäre:

```
void printChar(char ch);
void printInt(int i);
void printDouble(double d);
```

Ist umständlicher und unverständlicher

2.6.2 Overloading in C++

- Die Identifikation einer Funktion erfolgt über die Signatur, nicht nur über den Namen
 - Die Signatur besteht aus:

Name der Funktion **plus** die Parameterliste (Reihenfolge, Anzahl, Typ)
(Der Returntyp wird nicht berücksichtigt)

- Der Name der Funktion ist identisch
- Die Implementation muss für jede überladene Funktion separat erfolgen

Hinweis: Overloading sollte zurückhaltend eingesetzt werden. Wenn möglich sind default-Argumente vorzuziehen.

2.6.3 Deklaration von überladenen Funktionen: Regeln

- Entsprechen Rückgabetyt und Parameterliste der zweiten Deklaration denen der ersten, so wird die zweite als gültige Re-Deklaration der ersten aufgefasst.
- Unterscheiden sich die beiden Deklarationen nur bezüglich ihrer Rückgabetypen, so behandelt der Compiler die zweite Deklaration als fehlerhafte Re-Deklaration der ersten.
Der Rückgabetyt von Funktionen kann nicht als Unterscheidungskriterium verwendet werden.
- Nur wenn beide Deklarationen sich in Anzahl oder Typ ihrer Parameter unterscheiden, werden sie als zwei verschiedene Deklarationen mit demselben Funktionsnamen betrachtet (überladene Funktionen).

2.6.4 Funktionen sollen nur dann überladen werden, wenn ...

- die Funktionen eine vergleichbare Operation bezeichnen, die jeweils mit anderen Parametertypen ausgeführt wird
- dieselbe Wirkung nicht durch default-Parameter erreicht werden kann

2.7 default-Parameter vs. Overloading

```
// Variante mit Overloading
// 3 unterschiedliche Funktionen belegen Speicher
// 3 unterschiedliche Funktionen müssen gewartet werden
void print(int i);
void print(int i, int width);
void print(int i, char fillchar, int width);

// Variante mit default-Parametern
// Eine einzige Funktion belegt Speicher
// Nur eine Funktion muss gewartet werden
void print(int i, int width=0, char fillchar=0);
```

Achtung: keinesfalls default-Parameter in überladenen Funktionen verwenden

3 Kapitel 3: Pointer und Referenzen

3.1 Höhere und strukturierte Datentypen

3.1.1 Höhere Datentypen

- Pointer
- Referenzen
- Vektoren

3.1.2 Strukturierte Datentypen

- Strukturen
- Klassen

3.2 Pointer

3.2.1 Adresse

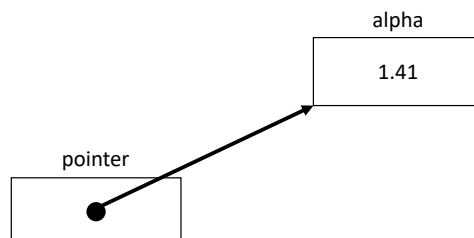
- Die Nummereiner Speicherzelle wird als **Adresse** bezeichnet
- Bei einem byteweise adressierbaren Speicher(ist üblich) liegt an jeder Adresse genau 1 Byte

3.2.2 Pointer

- Synonym: Zeiger
- Ein Pointer ist eine Variable, welche die Adresse einer im Speicher befindlichen Variablen oder Funktion aufnehmen kann
- Man sagt, der Pointer zeige (to point) auf diese Speicherzelle
- Pointer in C++ sind zu 99.99% identisch zu Pointern in C

3.2.3 Standarddarstellung von Pointern

```
float alpha;  
float* pointer;  
alpha = 1.4f;  
pointer = &alpha;
```



3.2.4 Pointer und Datentyp

- Pointer in C++ sind typisiert (wie in C), sie zeigen auf eine Variable des definierten Typs
- Oder anders ausgedrückt:
Der Speicherbereich, auf den ein bestimmter Pointer zeigt, wird entsprechend des definierten Pointer-Typs interpretiert
- Der Speicherbedarf einer Pointervariablen ist unabhängig vom Pointer-Typ. Er ist so gross, dass die maximale Adresse Platz findet
(z.B. 32 Bits für 2^{32} Adressen)

3.2.5 Definition einer Pointervariablen

```
// Datentyp des Pointers Kennzeichnung des Pointers durch '*'
Typname* pointerName;

// Konkrete Beispiele:

int* ptr1;           // ptr1 ist ein Pointer auf int
double* ptr2;        // ptr2 ist ein Pointer auf double
```

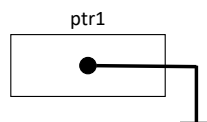


3.2.6 Initialisierung mit Null-Pointer

Mit dem Null-Pointer wird angezeigt, dass der Pointer auf **kein** Objekt zeigt. Dem Pointer wird ein definierter Nullwert zugewiesen.

Hinweis: Der Pointer zeigt nicht auf die Adresse 0!

```
int* ptr = 0;    // bitte nicht NULL verwenden!
```



3.2.7 Der Adressoperator & (Referenzierung)

Ist x eine Variable vom Typ Typname, so liefert der Ausdruck &x einen Pointer auf die Variable x, d.h. er liefert die Adresse der Variablen x.

```

int wert;           // Variable wert vom Typ int wird definiert
int* ptr;           // Pointer ptr auf den Typ int wird definiert
                    // ptr zeigt auf eine nicht definierte Adresse

ptr = &wert;        // ptr zeigt nun auf die Variable wert, d.h.
                    // ptr enthaelt die Adresse der Variablen wert

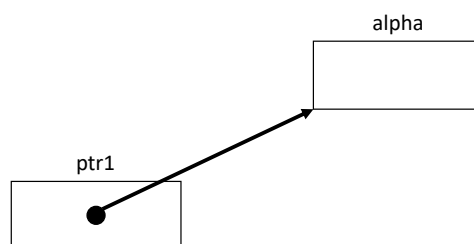
```

3.2.8 Kopieren von Adressen

```

float alpha;
float* ptr1 = &alpha;

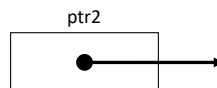
```



```

float* ptr2;

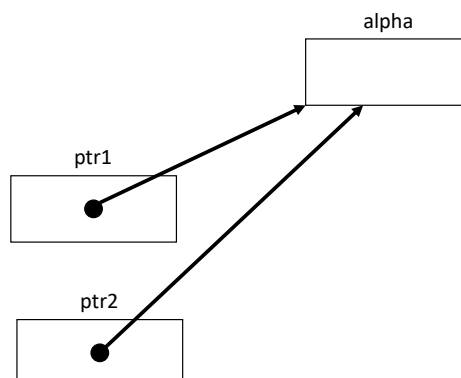
```



```

ptr2 = ptr1;

```



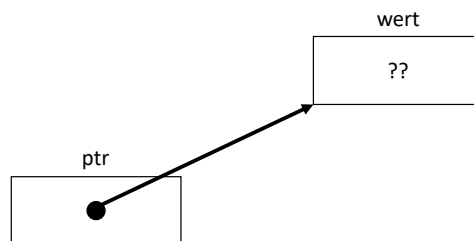
3.2.9 Der Inhaltsoperator * (Dereferenzierung)

Ist `ptr` ein Pointer vom Typ `Typname`, so liefert der Ausdruck `*ptr` den Inhalt der Speicherzelle, auf welche `ptr` zeigt.

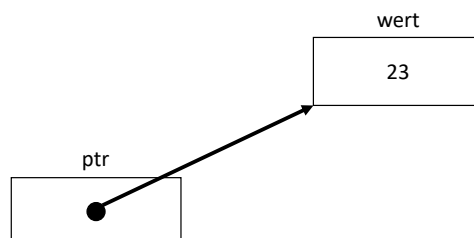
```
int wert;           // Variable wert vom Typ int wird definiert
int* ptr;           // Pointer ptr auf den Typ int wird definiert
                    // ptr zeigt auf eine nicht definierte Adresse
ptr = &wert;         // ptr zeigt nun auf die Variable wert, d.h.
                    // ptr enthaelt die Adresse der Variablen wert
*ptr = 23;           // in die Speicherzelle, auf welche ptr zeigt
                    // (hier: auf die Variable wert), wird 23 geschrieben.
                    // Aequivalent: wert = 23;
```

3.2.10 Darstellung in graphischer Pointernotation

```
int wert;
int* ptr;
ptr = &wert;
```



```
*ptr = 23;
```



3.2.11 const bei Pointern: Vorsicht

1. Variante: konstanter String

```
char str[] = 'Ein String';  
const char* text = str;
```

Dies bedeutet nicht, dass der Pointer text konstant ist, sondern dass text auf einen konstanten String zeigt.

Von rechts nach links lesen:

”text ist ein Pointer auf eine char-Konstante”

```
char ch = text[1];           // erlaubt (== 'i')  
text[1] = 's';              // nicht erlaubt  
text = 'Ein anderer String'; // erlaubt
```

2. Variante: konstanter Pointer

```
char str[] = 'Ein String';  
char* const text = str;
```

Hier ist nun der Pointer text konstant. Die Position von const ist sehr relevant!

Von rechts nach links lesen:

”text ist ein konstanter Pointer auf ein char”

```
char ch = text[1];           // erlaubt (== 'i')  
text[1] = 's';              // erlaubt  
text = 'Ein anderer String'; // nicht erlaubt
```

3. Variante: konstanter Pointer, konstanter String

```
char str[] = 'Ein String';  
const char* const text = str;
```

Hier ist nun der Pointer text konstant und der Text, wohin er zeigt.

Von rechts nach links lesen:

”text ist ein konstanter Pointer auf eine char-Konstante”

```
char ch = text[1];           // erlaubt (== 'i')  
text[1] = 's':              // nicht erlaubt  
text = 'Ein anderer String'; // nicht erlaubt
```

const bei Pointern in Funktionsköpfen

```
void foo (const int* ptr)
{
    *ptr = 14;           // nicht erlaubt
}
```

ptr ist ein Pointer auf eine int-Konstante.

3.2.12 void-Pointer

- void-Pointer sind Objekte, die eine gültige Adresse darstellen
- einem void-Pointer kann jeder Pointer zugewiesen werden
- ein void-Pointer kann ohne Typecast nur anderen void-Pointern zugewiesen werden (anders als in C)
- ein void-Pointer kann nicht dereferenziert werden

Hinweis: in C++ sollten void-Pointer kaum noch angewendet werden

void-Pointer: Beispiele

```
int a;
int* pi = &a;
void* pv = pi;           // ok
double* pd = pv          // Error (in C erlaubt)
pd = static_cast<double*>pv; // ok
```

3.2.13 Pointer auf Funktionen

- Jede Funktion befindet sich an einer definierten Adresse im Codespeicher
- Diese Adresse kann ebenfalls ermittelt werden
- Interessant wäre, dynamisch zur Laufzeit in Abhängigkeit des Programmablaufs eine unterschiedliche Funktion über einen Funktionspointer aufzurufen

Hinweis: In C++ gibt es für viele Situationen bessere Alternativen zu Funktionspointern (Polymorphismus)

3.2.14 Interruptvektortabelle: Tabelle von Funktionspointern

Pointer auf ISR n
...
...
Pointer auf ISR 2
Pointer auf ISR 1

ISR = Interrupt Service Routine

3.2.15 Umsetzung von Funktionspointern in C/C++

Der Name der Funktion kann als Adresse auf den ersten Befehl der Funktion verwendet werden (analog Array).

3.2.16 Beispiel für Funktionspointer

./listings/ftpstr.cpp

```
// Datei: ftpstr.cpp
// Funktionspointer
// N. Kaelin, 03.03.2018

#include <iostream>
using namespace std;

int foo(char ch)
{
    int i;           // muss hier definiert werden
    for(i=1; i<=10; i++)
        cout << ch << " ";
    cout << endl;
    return i;
}

int main()
{
    int (*p) (char); // Deklaration des Funktionspointers
    char c;
    int ret;
    cout << "Buchstabe eingeben: ";
    cin >> c;
    p = foo;         // ermittle Adresse der Funktion foo()
    ret = p(c);      // Aufruf von foo() ueber Funktionspointer
    return 0;
}
```

3.3 Referenzen

3.3.1 Was ist eine Referenz?

- Eine Referenz ist ein Alternativname (Alias) für ein Objekt
- Referenzen ähneln Pointern, sind aber nicht dasselbe. Bei einem Pointer wird immer eine Adresse ermittelt, d.h. dieses Datenobjekt muss sich im adressierbaren Bereich befinden. Eine Referenz kann aber auch auf ein Register verweisen. Grundsätzlich sind Referenzen effizienter als Pointer.
- Syntaktisch sind Referenzen einfacher als Pointer, da ein expliziter Referenzierungs- und Dereferenzierungsoperator entfällt
- Referenzen sind für den Programmierer sicherer anzuwenden als Pointer
- In gewissen Fällen braucht es Pointer. Wenn nicht, dann sollen Referenzen bevorzugt werden.

3.3.2 Syntax von Referenzen

```
int x = 24;
int& r1 = x;    // Definition der Referenz r1

x = 55; // x == 55, r1 == 5 (dasselbe Objekt)
r1 = 7; // x == 7, r1 == 7 (dasselbe Objekt)
r1++;   // x == 8, r1 == 8 (dasselbe Objekt)
```

Hinweis: Referenzen können nach der Definition nicht "umgehängt" werden, d.h. eine Referenz kann und muss nur bei der Definition initialisiert werden und kann nicht später auf etwas anders "zeigen".

3.3.3 Einsatz von Referenzen

- In folgenden zwei Fällen einsetzen:
 - Bei Parameterübergabe (call by reference) anstatt Pointer (entspricht var-Parameter in der Programmiersprache Pascal)
 - Bei Referenz-Rückgabetypp anstatt Pointertyp, d.h. als Returntyp
- Generell:
Objekte einer Klasse und Strukturvariablen sollen immer by reference übergeben werden (niemals by value)
- Sonst: zurückhaltend einsetzen

3.3.4 Pointer und Referenzen auf lokale Variablen

Achtung: Sie dürfen niemals einen Pointer oder eine Referenz auf eine lokale Variable oder ein lokales Objekt mittels return zurückgeben

Grund:

Nach Beendigung der Funktion sind die lokalen Variablen ungültig.

3.4 Zeiger und Referenzen als Parameter und Rückgabewerte

3.4.1 Call by Value vs. Call by Reference

- Parameter, die by value übergeben werden (Wertparameter) werden kopiert, in der Funktion wird mit Kopien gearbeitet.
- Bei Referenzparametern (call by reference) wird nur eine Referenz (Alias) des Originals übergeben.
- Nur Parameter, welche by reference übergeben werden, könne in der Funktion (bleibend) verändert werden.

3.4.2 3 Beispiele

Versuch 1: Call by value

```
void swap(int a, int b)
{
    int tmp = 1;
    a = b;
    b = tmp;
}

int main()
{
    int x = 4;
    int y = 3;
    swap(x, y);    // nur Kopien werden vertauscht!
    return 0;
}
```

Versuche 2: Call by reference mit Referenzen

```
void swap(int& a, int& b)
{
    int tmp = 1;
    a = b;
    b = tmp;
}

int main()
{
    int x = 4;
    int y = 3;
    swap(x, y);    // OK!
    return 0;
}
```

Versuch 3: Call by reference mit Pointer

```
void swp(int* a, int* b)
{
    int tmp = *a;
    *a = *b;
    *b = tmp;
}

int main()
{
    int x = 4;
    int y = 3;
    swp(&x, &y);    // OK, jedoch muehsame Syntax und evtl. ineffizient
    return 0;
}
```


3.4.3 Call by reference: wann einsetzen?

#1: wenn Parameter in der Funktion verändert werden sollen

#2: wenn "grosse" Parameter übergeben werden sollen (struct, class)

zu #2: wenn verhindert werden soll, dass der Parameter verändert wird, so kann dieser mit const deklariert werden

```
int foo(const BigType& b);
```

Achtung: Parameterübergabe und Rückgabe von Objekten by value ist ein Hauptgrund für langsame C++-Programme!

3.4.4 Merke

Achtung: Variablen einer Struktur und Variablen einer Klasse (Objekte) müssen immer by reference übergeben werden, niemals by value.

Read-only Parameter werden zusätzlich mit const spezifiziert.

4 Kapitel 4: Arrays, Dynamische Speicherverwaltung

4.1 Arrays: Vektoren

4.1.1 Problemstellung

Sie müssen 10 Messwerte (z.B. Temperaturwerte) vom Typ `int` speichern.

```
int data1;  
int data2;  
int data3;  
int data4;  
int data5;  
int data6;  
int data7;  
int data8;  
int data9;  
int data10;
```

Diese Darstellung ist sehr unhandlich.

Wie würden sie 1000 Messwerte abspeichern?

4.1.2 Der Array (Feld, Vektor)

Ein Array bietet eine kompakte Zusammenfassung von mehreren Variablen des gleichen Typs.

```
int data[10]; // ein Array von 10 int-Werten  
int data[1000]; // ein Array von 1000 int-Werten  
double zahl[5]; // ein Array von 5 double-Werten
```

4.1.3 Zugriff auf ein Arrayelement

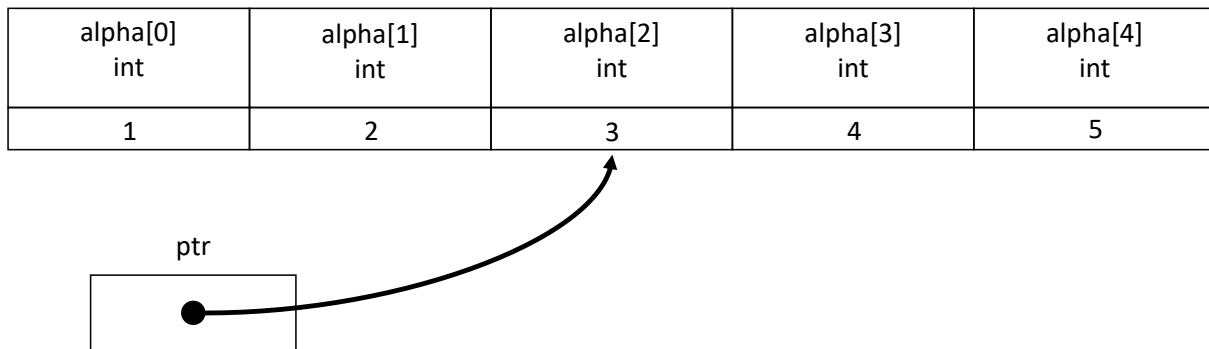
Hinweis: Der Zugriff auf ein Element eines Arrays erfolgt über den Array-Index. Ist ein Array mit `n` Elementen definiert, so ist darauf zu achten, dass in C++ (wie in C) der Index mit 0 beginnt und mit `n-1` endet.

```
int alpha[5]; // der Array 'alpha' mit 5 Elementen vom Typ  
              // int wird definiert  
alpha[0] = 14; // 1. Element (Index 0) wird auf 14 gesetzt  
alpha[4] = 3; // das letzte Element (Index 4)  
  
alpha[5] = 4; \color{red} // Bereichsueberschreitung (geht in C++!)\  
              color{black}
```

4.2 Arrays und Pointer

4.2.1 Pro Memoria: Eindimensionales Array (Vektor)

```
int alpha[5];  
int* ptr;  
ptr = &alpha[2];  
*ptr = 3452;
```



4.2.2 Äquivalenz von Array- und Pointernotation

Der Name des Array kann als konstante Adresse des ersten (Index 0) Elementes des Arrays betrachtet werden.

4.2.3 Vergleichen von Arrays

- In C++ gibt es keinen Operator `==`, der zwei Arrays miteinander vergleicht
- Arrayvergleiche müssen explizit Element um Element durchgeführt werden
- oder: der Inhalt der beiden Speicherbereiche wird mit Hilfe der Funktion `memcmp()` byteweise verglichen
- Beispiel:
Seien `arr1` und `arr2` zwei Arrays
Der Vergleich `arr1 == arr2` prüft, ob die Anfangsadressen der beiden Arrays identisch sind (wird kaum der Fall sein), nicht aber, ob deren Inhalte identisch sind.

4.2.4 Arrayname ist ein nicht modifizierbarer L-Wert

- Der Arrayname ist die konstante Adresse des ersten Elementes des Arrays und kann nicht verändert werden
- Auf den Arraynamen können nur die beiden Operatoren `sizeof` und `&` angewandt werden
- Der Arrayname (z.B. `arr`), als auch der Adressoperator angewandt auf den Arraynamen (`&arr`) ergeben einen konstanten Pointer auf das erste Element des Arrays, der Typ ist jedoch verschieden
- Einem Arraynamen kann kein Wert zugewiesen werden (einer Pointervariablen schon)

4.2.5 Automatische Initialisierung von Arrays

- Globale Arrays werden automatisch mit 0 initialisiert
 - globale Arrays sollten aber nur ausnahmsweise verwendet werden
- Lokale Arrays werden nicht automatisch initialisiert
 - der Inhalt eines lokalen Arrays ist bei der Definition undefiniert

4.2.6 Explizite Initialisierung von Arrays

- Bei der Definition eines Arrays kann ein Array explizit ("manuell") initialisiert werden
- Der Definition folgt ein Zuweisungsoperator und eine Liste von Initialisierungswerten
- Die Liste ist mit geschweiften Klammer begrenzt
- Als Werte können nur Konstanten oder Ausdrücke mit Konstanten angegeben werden, **Variablen sind nicht möglich**
- Die Werte werden mit Kommata getrennt
- Nach der Initialisierung können die Elemente nur noch einzeln geändert werden

4.2.7 Beispiel: Explizite Initialisierung von Arrays

```
in alpha[3] = {1, 2*5, 3};
```

ist "äquivalent" zu:

```
int alpha [3];  
  
alpha[0] = 1;  
alpha[1] = 2*5;  
alpha[2] = 3;
```

4.2.8 Goodies für die explizite Initialisierung

- Werden bei der Initialisierung weniger Werte angegeben als der Array Elemente hat, so werden die restlichen Elemente mit 0 belegt.

```
int alpha[200] = {3, 105, 17};  
// alpha[3] bis alpha[199] werden gleich 0 gesetzt
```

- wird bei der Definition keine Arraygrösse angegeben, so zählt der Compiler die Anzahl Elemente automatisch (offenes Array ohne Längenangabe)

```
int alpha [] = {1, 2, 3, 4};
```

4.3 Mehrdimensionale Arrays

```
int alpha[3][4];
```

Matrix

Kann betrachtet werden als Vektor `alpha[0]` bis `alpha[2]`, wobei jedes Vektorelement wiederum einen Vektor mit 4 Elementen enthält

4.3.1 Initialisierung eines mehrdimensionalen Arrays

```
int alpha[3][4] = {
    {1, 3, 5, 7},
    {2, 4, 6, 8},
    {3, 5, 7, 9}
};
// äquivalent dazu ist die folgende Definition:
int alpha[3][4] = {1, 3, 5, 7, 2, 4, 6, 8, 3, 5, 7, 9};
```

1	3	5	7
2	4	6	8
3	5	7	9

4.4 Übergabe von Arrays und Zeichenketten

- Bei der Übergabe eines Arrays an eine Funktion wird als Argument der Arrayname übergeben. (i.e. Pointer auf erstes Element des Arrays)
- Der formale Parameter für die Übergabe eines eindimensionalen Arrays kann ein offenes Array sein oder ein Pointer auf den Komponententyp des Arrays.
- Zeichenketten sind char-Arrays und werden deshalb gemäss der oben erwähnten Punkte gehandhabt.

4.4.1 Beispiel: Array (Vektor) als Parameter

```
enum {groesse = 3};

void init(int* alpha, int size);           // int* alpha == Pointer auf
    Arrayelement
void ausgabe(int alpha[], int size);       // int alpha[] == offener Array

int main()
{
    int arr[groesse];
    init(arr, sizeof(arr)/sizeof(arr[0])); // Argument ist Name des
        Arrays
    ausgabe(arr, sizeof(arr)/sizeof(arr[0])); // Argument ist Name des
        Arrays
    return 0;
}
```

4.4.2 Übergabe einer Matrix mittels offenem Array

```
void printMat(const double* const mat [],           // Matrix
             int m,                               // Anzahl Zeilen
             int n);                               // Anzahl Spalten
```

- Der Aufruf erfolgt mit `printMat(matA, rows, cols);` // bevorzugt
oder `printMat(&matA[0], rows, cols);`
oder `printMat(&(&matA[0])[0], rows, cols);`
- `matA` ist vom Typ `double**`
`matA[0]` ist vom Typ `double*`
`matA[0][0]` ist vom Typ `double`

4.4.3 Zeichenketten (Strings)

- Strings sind char-Arrays, abgeschlossen mit dem Zeichen `'\0'`, bzw. 0 (alles analog C)

4.5 Dynamische Speicherverwaltung

4.5.1 Pro Memoria: Variablen

- Variablen erleichtern u.a. den Zugriff auf Speicherstellen
 - statt über eine Adresse kann auf die Speicherstelle mit Hilfe des Variablennamens zugegriffen werden
- Die Variablen müssen zur Entwicklungszeit im Code definiert werden
 - zur Laufzeit können keine neuen Variablen erzeugt werden
 - der gesamte Speicherbedarf muss zur Entwicklungszeit statisch mittels Variablen festgelegt werden
 - wie gross wähle ich z.B. einen Array, welcher Messwerte enthält?
 - weiss ich zur Entwicklungszeit bereits die zahl der Messwerte?
- Der Speicher einer Variablen wird automatisch freigegeben, sobald die Variable nicht mehr gültig ist

4.5.2 Dynamische Speicherverwaltung

- Speicher kann zur Laufzeit (dynamisch) vom System angefordert werden
 - Operator: `new` (in C: Funktion `malloc()`)
- Dynamisch allozierter Speicher muss wieder explizit freigegeben werden
 - Operator: `delete` (in C: Funktion `free()`)
- Dynamischer Speicher wird nicht auf dem Stack angelegt, sondern auf dem **Heap**
- Auf dynamischen Speicher kann **nur über Pointer** zugegriffen werden

Achtung: Zugriff auf dynamischen Speicher nie verlieren!

4.5.3 Dynamische Speicherverwaltung: Syntax

```
int* pint = new int;    // Speicher fuer int alloziert
char* pCh1 = new char;  // Speicher fuer char alloziert
char* pCh2 = new char;  // Speicher fuer char alloziert

*pInt = 23;
std::cin >> *pCh1;
pCh2 = pCh1;
// pCh2 zeigt nun auch auf die Speicherstelle, auf welche pCh1 zeigt.
// Damit geht aber der Zugriff auf die Speicherstelle verloren, auf die pCh2 gezeigt hat
// (Memory Leak!)

delete pint;    // Speicher wieder freigeben
delete pCh1;
delete pCh2;    // ergibt Fehler, bereits über pCh1 freigeben
```

4.5.4 Dynamische Speicherverwaltung: Vorsichtsmassnahmen

- der delete-Operator kann auch auf den Nullpointer angewendet werden. Es passiert dadurch (definiert) nichts.
- Die Anwendung des delete-Operators auf einen bereits freigegebenen Speicherbereich kann Probleme verursachen
- Oft wird deshalb eine Pointer nach der delete-Operation auf 0 gesetzt (defensiver Programmierstil)

```
delete pint;    // Speicher wieder freigeben
delete pint;    // Speicher ist bereits freigegeben
pInt = 0;
delete pint;    // ist problemlos
```

4.5.5 Memory Leak, Garbage Collection

- Dynamisch allozierter Speicher, welcher nicht freigegeben wurde oder auf welchen der Zugriff verloren ging, belegt weiterhin Platz im Speicher.
- Der faktisch nutzbare Speicher wird somit immer kleiner. Es ist, als ob der Speicher ein Leck hätte. Dieses Fehlverhalten wird deshalb als **Memory Leak** bezeichnet.
- In einigen Programmiersprachen (z.B. Java) gibt es einen **Garbage Collector** (Abfalleimer), welcher nicht mehr benötigten Speicher automatisch freigibt.
- C++ besitzt keinen Garbage Collector. Der C++-Programmierer ist verantwortlich, dass allozierter Speicher wieder freigegeben wird.

4.5.6 Dynamische Allokierung von Arrays

- In C++ kann Speicher für einen Array auch erst zur Laufzeit (dynamisch) vom System angefordert (alloziert) werden
 - Operator: **new[]**

- Der Zugriff auf den Array erfolgt wie bei einem statischen Array
- Dynamisch allozierte Arrays müssen wieder explizit freigegeben werden
 - Operator: **delete[]**
 - **Achtung: delete[], nicht nur delete**

```
int* pInt = new int [100];      // statt einer Konstanten kann hier auch
                               // eine Variable verwendet werden (Normalfall)
delete pInt;                   // Fehler: nur pInt[0] wird freigegeben
delete [] pInt;                // korrekter Befehl
```

4.5.7 Dynamische Allokierung von Matrizen

- Oft wird eine $m \times n$ - Matrix als ein eindimensionaler Array der Grösse ($m*n$) implementiert. Der Zugriff geht dann jedoch nur noch über Pointer:

```
*(matrix+2*n+3) = 23.44;
```

- Mit der im folgenden gezeigten Variante kann auf ein Matricelement über die Arrayindizes zugegriffen werden:

```
matrix [2] [3] = 23.44;
```

4.5.8 Dynamische Matrix mit 4 Zeilen und 3 Spalten

```
double** m = 0;
m = new double*[4];      // Array mit 4 Elementen vom Typ double* (Pointer
                          // auf double)
for (int i=0; i<4; ++i)
    m[i] = new double[3]; // Jedes m[i] ist ein Pointer auf ein
                          // Array mit 3 Elementen vom Typ double
                          // m[i] selbst ist vom Typ double*
```

Für die Konstanten 3 und 4 könnten auch Variablen verwendet werden (im Gegensatz zu einer statisch definierten Matrix).

4.5.9 Zugriff auf dynamisch erzeugte Matrix

```
double** m = 0;
m = new double*[4];
for (int i=0; i<4; ++i)
    m[i] = new double[3];
m[2][1] = 34.675;        // Der Zugriff erfolgt einfach ueber die
                          // Arrayindizes
```


4.5.10 Dynamische Matrix freigeben

```
for (int i=0; i<4; ++i)
    delete [] m[i]    // Zuerst jede Zeile freigeben
```

```
for (int i=0; i<4; ++i)
    delete [] m[i]

delete [] m;    // Nun noch den Array mit den double* freigeben
```

Achtung: m zeigt immer noch auf die alte Adresse, an welcher sich aber keine gültigen Daten mehr befinden. (Allenfalls m wieder auf 0 setzen)

4.5.11 Effizienz der Matriximplementationen

- Nur mit dieser gezeigten Variante kann auf ein Matrixelement über die Arrayindizes zugegriffen werden:

```
matrix[2][3] = 23.44;
```

- Der Nachteil dieser Variante ist, dass es pro Zeile einen zusätzlichen Pointer braucht. Die einzelnen Zeilen liegen u.U. nicht auf aufeinanderfolgenden Speicherstellen.
- Wenn eine m x n - Matrix als ein eindimensionaler Array der Grösse (m*n) implementiert wird, erspart man sich die Zeilenpointer, der Zugriff ist jedoch langsamer und mühsamer. Die einzelnen Elemente der Matrix liegen auf aufeinanderfolgenden Speicherstellen.