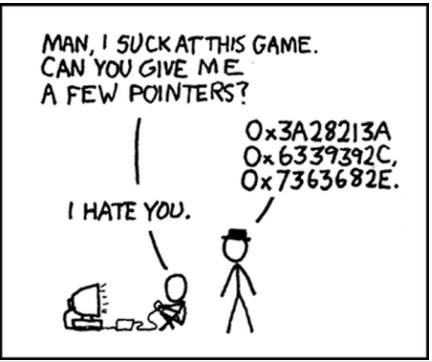
IMS
Institut für Mikroelektronische Systeme
Leibniz Universität Hannover

Leibniz Universität Hannover

Programmierpraktikum Technische Informatik (C++)

12.5.2022

Pointer und Speicherverwaltung



Pointer

- Pointer (deutsch: Zeiger) sind Objekte, die Adressen anderer Objekte enthalten
  - Sollten aus C bereits bekannt sein
- Ähnlich zu Referenzen, aber klare Unterscheidung zum Objekt
  - Müssen im Gegensatz zu Referenzen nicht auf ein Objekt zeigen
  - Für Zugriff auf das Objekt ist explizite Dereferenzierung notwendig
- Pointer werden im Folgenden nur oberflächlich wiederholt. Unklarheiten über grundlegende Konzepte anderweitig nachschlagen
  - http://cslibrary.stanford.edu/104/

Definition von Pointern

```
void increment(int* p) {
    if(p) {
        *p = *p + 1;
    }
}

int main() {
    int  x  = 5;
    int* px = &x;
    increment(px);
    std::cout<<x<<"\n";
}
```

Variable	Adresse	Wert
x	0x003F008	5

- Der Adressoperator & gibt die Adresse eines Objektes zurück

Definition von Pointern

```
void increment(int* p) {
    if(p) {
        *p = *p + 1;
    }
}

int main() {
    int  x  = 5;
    int* px = &x;
    increment(px);
    std::cout<<x<<"\n";
}
```

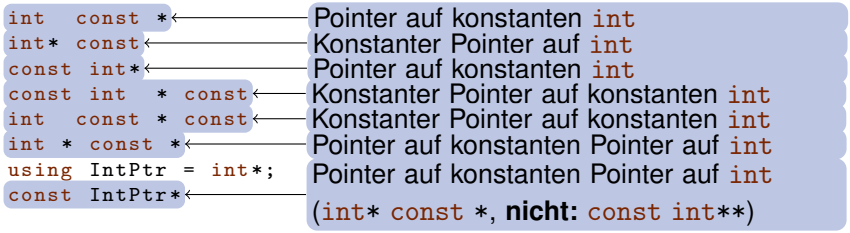
Variable	Adresse	Wert
x	0x003F008	5
px	0x003F010	0x003F008

- *T** definiert einen Pointer auf *T*
  - *T*** definiert einen Pointer auf einen Pointer auf *T*
  - Kann beliebig geschachtelt werden
- Pointer können wie andere Typen per Value oder per Referenz übergeben werden
  - Übergabe als `const`-Referenz unnötig, da Kopien für Pointer billig sind
  - `const`-Definitionen von Pointern können etwas komplex werden...

Const

- Pointer können `const` sein und/oder auf `const`-Objekte zeigen
  - Adressiertes Objekt modifizierbar, auch wenn Pointer `const` ist
- `const` kann auch nach dem Typ stehen
  - Default, `const` vor dem Typ ist lediglich vereinfachte Schreibweise
- Regel: `const` steht **nach** dem Typbestandteil, auf den es sich bezieht
  - Typen von hinten nach vorne lesen
  - Ausnahme: `const` am Anfang das Typs behandeln als würde es hinter dem **ersten** Typbestandteil stehen

Const


int const *
Pointer auf konstanten int
int* const
Konstanter Pointer auf int
const int*
Pointer auf konstanten int
const int * const
Konstanter Pointer auf konstanten int
int const * const
Konstanter Pointer auf konstanten int
int * const *
Pointer auf konstanten Pointer auf int
using IntPtr = int*;
const IntPtr*
Pointer auf konstanten Pointer auf int
(int* const *, nicht: const int**)

Definition von Pointern

```
void increment(int* p) {
    if(p) {
        *p = *p + 1;
    }
}

int main() {
    int  x  = 5;
    int* px = &x;
    increment(px);
    std::cout<<x<<"\n";
}
```

- Pointer wie Iteratoren mit **var* dereferenzieren
  - Gibt Referenz auf das adressierte Objekt zurück
  - Kann verwendet werden, um den Wert des Objekts auszulesen und/oder zu ändern
- Beispiel kann kürzer als `*p += 1` geschrieben werden
  - Noch kürzer, aber schwerer zu lesen: `++(*p)`

Definition von Pointern

```
void increment(int* p) {
    if(p) {
        *p = *p + 1;
    }
}

int main() {
    int  x  = 5;
    int* px = &x;
    increment(px);
    std::cout<<x<<"\n";
}
```

- Wichtigster Unterschied zwischen Referenzen und Pointern:
  Pointer müssen nicht auf ein Objekt zeigen
- Pointer können als Bedingung verwendet werden
- Boolescher Wert eines Pointers ist `true`, wenn er kein Nullpointer ist
  - `if(p)` überprüft, ob `p` nicht `nullptr` ist; `if(!p)` überprüft, ob er gleich `nullptr` ist.

Nullpointer

- Nullpointer haben speziellen Wert (Null), um zu signalisieren, dass sie nicht auf ein Objekt zeigen
- In C und C++03: Macro `NULL` zum Erzeugen von Nullpointern
  - `int* foo = NULL;`
  - Probleme mit Overloads, da `NULL` `int` oder Pointer sein kann
    - Was macht `foo(NULL);`, wenn `int foo(int)` und `int foo(char*)` existieren?
    - Antwort: Ruft `foo(int)` auf
- Seit C++11: `nullptr`
  - Konstante vom Typ `nullptr_t`, konvertiert implizit in alle Pointertypen
  - `int* foo = nullptr;`
  - Keine implizite Konvertierung in Integertypen

Immer `nullptr` statt `NULL` verwenden!

Pointerarithmetik

- Bisher entsprechen Pointer im Wesentlichen Objektreferenzen in Sprachen wie Java
- Wesentlicher Unterschied: Möglichkeit Pointerarithmetik auszuführen
- ++*ptr* schiebt *ptr* ein Objekt weiter
  - Setzt *ptr* auf Adresse des nächsten Objekts, nicht um ein Byte höhere Adresse
  - Differenz in Bytes zwischen alter und neuer Adresse entspricht der Größe des adressierten Typs (`sizeof(`*T*`)`)
  - *ptr*++, `--`*ptr*, *ptr*`--`, *ptr*`+n` und *ptr*`-n` entsprechend
- **Wichtige Einschränkung:** Arithmetik nur legal, wenn der Ergebnispointer im selben Array landet
  - Für `std::vector` und C-Style Arrays (später) muss der Pointer zwischen Start des Arrays und einem Element hinter dem Ende liegen
  - Für andere Objekte in der Regel keine legale Pointerarithmetik

Pointerarithmetik II

- *ptr1* - *ptr2* gibt den Abstand zweier Pointer an
  - Es gelten dieselben Einschränkungen wie für Inkrement
  - Differenz in Vielfachen von `sizeof(`*T*`)`
- *ptr*`[`*n*`]` entspricht `*(`*ptr* `+` *n*`)`
- Pointer können mit `<`, `<=`, `>`, `>=` verglichen werden
  - Wenn die Pointer zum selben Array gehören
- `==` und `!=` als einzige Operationen auch für voneinander unabhängige Pointer
- In der Realität funktionieren arithmetische und Vergleichsoperationen auch für unabhängige Objekte
  - Verwendung führt häufig zu schwierig zu findenden Bugs

Dynamisch allozierter Speicher

- Bisher nur automatisch allozierte Objekte
  - Werden am Ende des jeweiligen Scopes gelöscht
  - Parameter und lokale Variablen
- Container mit zur Compilezeit unbekannter Länge und Struktur (z.B. `std::map`) können auf diese Weise nicht implementiert werden
  - Variablen müssen in C++ zur Compilezeit festgelegte Länge haben
- Lösung: Dynamisch allozierter Speicher
  - Allozierter Speicher nicht direkt an Lebenszeit des enthaltenden Scopes gebunden
  - Container wie `std::map` halten üblicherweise Pointer auf dynamisch allozierten Speicher

Verwendung von dynamisch alloziertem Speicher

```
std::string* foo() {
   std::string* result = new std::string;
   return result;
}

int main() {
  std::string* p = foo();
  std::cout<<p<<"\n";
  delete p;
}
```

- `new` *T* alloziert und defaultkonstruiert ein Objekt vom Typ *T* und gibt einen Pointer auf dieses zurück
  - Mit `new` *T*`(`*args*`)` oder `new` *T*`{`*args*`}` kann nichtdefaultkonstruiertes Objekt erstellt werden
- Die Lebensdauer des allozierten Objektes endet nicht mit dem umschließenden Scope
- Der Code weist dennoch einen gravierenden Bug auf

Verwendung von dynamisch alloziertem Speicher

```
std::string* foo() {
    std::string* result = new std::string;
    return result;
}

int main() {
  std::string* p = foo();
  std::cout<<p<<"\n";
  delete p;
}
```

- Der allozierte String wird niemals wieder freigegeben
  - C++ enthält keinen Garbage Collector, mit `new` allozierter Speicher muss vom Programmierer wieder freigegeben werden
  - Leakt Speicher, kann bei häufigem Vorkommen zu Programmabstürzen aufgrund mangelnden Hauptspeichers führen

Verwendung von dynamisch alloziertem Speicher

```
std::string* foo() {
    std::string* result = new std::string;
    return result;
}

int main() {
  std::string* p = foo();
  std::cout<<p<<"\n";
  delete p;
}
```

- Mit `new` allozierter Speicher **muss** wieder freigegeben werden
- `delete` gibt mit `new` allozierten Speicher wieder frei
  - Gibt dem Objekt die Möglichkeit aufzuräumen
  - Nur für mit `new` allozierten Speicher, nicht für mit `malloc` allozierten Speicher verwendbar
  - **Achtung:** `delete` auf Instanzen benötigt Definition der Klasse, Forward-Deklaration reicht nicht

Probleme mit manuellem Speichermanagement

- Manuelles Speichermanagement ist extrem anfällig für Bugs
- Freigeben von Speicher kann leicht vergessen oder übersprungen werden
  - Wenn Speicher in einer externen Funktion alloziert wird ohne kenntlich zu machen, dass der Speicher vom Programmierer wieder freigegeben werden muss
  - In Funktionen mit mehreren `return`-Statements
  - In Fällen der Ausnahmebehandlung
- Freigeben des Speicherbereiches muss kenntlich gemacht werden
  - Dereferenzieren nach einem `delete` ist undefiniertes Verhalten
- Speicher darf nur einmal freigegeben werden
  - Aufruf von `delete` auf bereits freigegebenem Speicher ist undefiniertes Verhalten

RAII

- In C++ wird üblicherweise automatisiertes Ressourcenmanagement verwendet
- Läuft unter dem Begriff RAII (Resource Acquisition is Initialization)
  - Wahrscheinlich das wichtigste C++ Idiom überhaupt
  - und eines der am schlechtesten benannten
  - Korrekte Anwendung von RAII wesentlicher Unterschied zwischen gutem und schlechtem C++ Code
- Ressourcen (z.B. dynamisch allozierter Speicher) werden von Objekten gemanaged
  - Lebensdauer dieser Ressourcenmanagementobjekte auf andere Weise gehandhabt
  - Üblicherweise lokale Variablen mit scopegebundener Lebenszeit
  - Alternativ: Rekursive Anwendung von RAII, Objekt wird in ein anderes Managementobjekt geschachtelt

RAII II

- Objekt wird durch Aufruf eines Konstruktors bei Definition initialisiert
  - Vor dem Konstruktoraufruf existiert keine Möglichkeit, auf das Objekt zuzugreifen
  - Keine Initialisierung von primitiven Datentypen
- Am Ende seiner Lebenszeit wird das Objekt durch Aufruf eines sogenannten Destruktors deinitialisiert
  - Gibt dem Objekt die Möglichkeit aufzuräumen
  - Beispielsweise Freigabe dynamisch allozierten Speichers
  - Ebenso Freigabe anderer Ressourcen, z.B. Datei-Handles
  - Zu keinem Zeitpunkt Zugriff auf uninitialisiertes Objekt möglich
- Aufruf der Destruktoren in umgekehrter Definitionsreihenfolge
  - Zuletzt erstellte Objekte werden zuerst zerstört

Ressourcen (z.B. Speicher) in C++ **immer** über entsprechende RAII-Objekte managen!

RAII Beispiel

```
int main()
{
    std::vector<std::string> message = {"hello"};
    std::string world = "world";
    message.emplace_back(world);
    message.push_back(std::string("\n"));
    if(!message.empty())
    {
       std::fstream fs("output.txt");
       for(std::string elem: message)
       {
           fs<<elem;
       }
    }
}
```

RAII Beispiel

```
int main()
{
    std::vector<std::string> message = {"hello"};
    std::string world = "world";
    message.emplace_back(world);
    message.push_back(std::string("\n"));
    if(!message.empty())
    {
        std::fstream fs("output.txt");
        for(std::string elem: message)
        {
            fs<<elem;
        }
    }
}
```

- Normalerweise hier `const std::string& elem` verwenden

RAII Beispiel

```
int main()
{
    std::vector<std::string> message = {"hello"};
    std::string world = "world";
    message.emplace_back(world);
    message.push_back(std::string("\n"));
    if(!message.empty())
    {
        std::fstream fs("output.txt");
        for(std::string elem: message)
        {
            fs<<elem;
        }
    }
}
```

- Zerstörung von `fs` schließt die Datei

RAII Beispiel

```
int main()
{
    std::vector<std::string> message = {"hello"};
    std::string world = "world";
    message.emplace_back(world);
    message.push_back(std::string("\n"));
    if(!message.empty())
    {
        std::fstream fs("output.txt");
        for(std::string elem: message)
        {
            fs<<elem;
        }
    }
}
```

- Zerstörung von `message` zerstört automatisch die enthaltenen Strings

Smartpointer

- Verwendung von Smartpointern zur Speicherverwaltung
  - Klassen, die dank Operator-Überladung wie Pointer verwendet werden
  - Dynamisch allozierter Speicher wird automatisch über die Lebenszeit des Smartpointers gemanaged
  - Nur Dereferenzierung und Vergleich, keine Pointerarithmetik direkt auf dem Smartpointer
- Normale Pointer im Folgenden als Rawpointer bezeichnet
- Seit C++11 verschiedene Smartpointer im C++-Standard:
  - `std::unique_ptr`
  - `std::shared_ptr`
  - `std::weak_ptr`

Manuell allozierter Speicher sollte immer durch einen Smartpointer verwaltet werden!

unique_ptr

- `std::unique_ptr<`*T*`>` ist primärer Smartpointertyp in C++
- Modelliert eindeutige Besitzverhältnisse
  - Bedeutet: Es gibt genau ein Objekt, das die Lebenszeit des allozierten Speichers bestimmt
- Am Ende der Lebenzeit des `std::unique_ptr` wird der allozierte Speicher freigegeben
- Kann nicht kopiert, sondern nur verschoben werden

unique_ptr

```
#include <string>
#include <memory>
#include <iostream>
std::unique_ptr<std::string> makeString() {
    return std::make_unique<std::string>("hello world");
}
void consumeString(std::unique_ptr<std::string> p);

int main() {
    std::unique_ptr<std::string> p = makeString();
    std::cout<<p.get()<<": "<<*p<<"("<<p->size()<<")\n";


}
```

- `std::make_unique<std::string>(args)` erstellt einen `std::unique_ptr`, der auf einen neu allozierten String zeigt
  - Allozierter Speicher wird somit vom `unique_ptr` verwaltet
  - Verfügbar seit C++14, vorher: `std::unique_ptr<T>(new T(args))`

unique_ptr und Kopien

- Eindeutige Besitzverhältnisse verbieten auf natürliche Weise Kopien
  - Exklusiver Besitz einer Resource durch zwei `std::unique_ptr` macht keinen Sinn
- `std::unique_ptr` kann dementsprechend nicht kopiert werden
- Wird dennoch im Beispiel per Value zurückgegeben
- Nutzt eine Neuerung in C++11: Rvalue-Referenzen
  - Identifizieren einen Wert als Rvalue, wird durch *Type*`&&` deklariert
    - Zur Erinnerung: *Type*`&` deklariert eine Lvalue-Referenz
  - Später mehr dazu
- Rvalues werden kurz nach ihrer Nutzung zerstört
- Bei per-Value-Rückgabe eines Rvalue-`unique_ptr` wird der Besitz der Resource an den neuen `unique_ptr` übertragen

unique_ptr

```
std::unique_ptr<std::string> makeString() {
    return std::make_unique<std::string>("hello world");
}
void consumeString(std::unique_ptr<std::string> p);

int main() {
    std::unique_ptr<std::string> p = makeString();
    std::cout<<p.get()<<": "<<*p<<"("<<p->size()<<")\n";


}
```

- Besitz des allozierten Speichers wird auf das temporäre, von `return` zurückgegebene Objekt verschoben
- Der allozierte Speicher wird weiterverschoben und gehört nun `p`
- Optimierende Compiler können beide Verschiebungen wegoptimieren und den allozierten Speicher direkt in `p` ablegen

unique_ptr

```
std::unique_ptr<std::string> makeString() {
    return std::make_unique<std::string>("hello world");
}
void consumeString(std::unique_ptr<std::string> p);

int main() {
    std::unique_ptr<std::string> p = makeString();
    std::cout<<p.get()<<": "<<*p<<"("<<p->size()<<")\n";


}
```

- Mit dem Dereferenzierungsoperator kann wie bei Rawpointern auf den adressierten Speicher zugegriffen werden
- Auf den in einem Smartpointer enthaltenen Rawpointer kann mit der `.get()`-Methode zugegriffen werden

unique_ptr

```
std::unique_ptr<std::string> makeString() {
    return std::make_unique<std::string>("hello world");
}
void consumeString(std::unique_ptr<std::string> p);

int main() {
    std::unique_ptr<std::string> p = makeString();
    std::cout<<p.get()<<": "<<*p<<"("<<p->size()<<")\n";


}
```

- Am Ende des Scopes endet die Lebenszeit von `p`
- Besitz des allozierten Speichers wurde weder an einen anderen Smartpointer weitergegeben, noch mit `.release()` manuell entfernt
- Zerstörung von `p` gibt den allozierten Speicher automatisch frei

unique_ptr

```
std::unique_ptr<std::string> makeString() {
    return std::make_unique<std::string>("hello world");
}
void consumeString(std::unique_ptr<std::string> p);

int main() {
    std::unique_ptr<std::string> p = makeString();
    std::cout<<p.get()<<": "<<*p<<"("<<p->size()<<")\n";
    consumeString(p);

}
```

- Versucht, `p` (einen Lvalue) per Value zu übergeben
- Compilerfehler: `std::unique_ptr` kann nicht kopiert werden

Rvalues und move

- `std::unique_ptr` können nur per Value übergeben werden, wenn sie Rvalues sind
  - Trifft in der Regel nicht auf Variablen zu
- C++ bietet daher `std::move`
  - `std::move(`*`val`*`)` gibt eine Rvalue-Referenz zurück
  - Auch wenn *`val`* ein Lvalue ist
  - Im Header `utility`
  - Äquivalent zu `static_cast<`*`T`*`&&>(`*`val`*`)`
- **Achtung:** Verwendung einer Variablen als Rvalue hinterlässt diese in unbestimmtem Zustand
  - Zustand muss gültig sein
  - Häufig: Abhängig von den verwendeten Operationen entweder im Orginalzustand, oder v.a. bei Containern leer
- Vor erneuter Verwendung die Variable neu befüllen

unique_ptr

```
std::unique_ptr<std::string> makeString() {
    return std::make_unique<std::string>("hello world");
}
void consumeString(std::unique_ptr<std::string> p);

int main() {
    std::unique_ptr<std::string> p = makeString();
    std::cout<<p.get()<<": "<<*p<<"("<<p->size()<<")\n";
    consumeString(std::move(p));

}
```

- Versucht, `p` (einen Lvalue) per Value zu übergeben
- Compilerfehler: `std::unique_ptr` kann nicht kopiert werden
- `std::move` wandelt `p` in einen Rvalue um, Funktionsaufruf kann `p` die Daten stehlen

`p` ist nach dem Funktionsaufruf leer

unique_ptr

```
std::unique_ptr<std::string> makeString() {
    return std::make_unique<std::string>("hello world");
}
void consumeString(std::unique_ptr<std::string> p);

int main() {
    std::unique_ptr<std::string> p = makeString();
    std::cout<<p.get()<<": "<<*p<<"("<<p->size()<<")\n";
    consumeString(std::move(p));
    p = std::make_unique<std::string>("hello world again");
}
```

- `p = ...` gibt die enthaltene Resource (sofern vorhanden) frei und reinitialisiert `p` mit dem übergebenen Smartpointer
- `p = nullptr` würde `p` auf einen Nullpointer setzen.

shared_ptr

- `std::shared_ptr` funktioniert wie `std::unique_ptr`, erlaubt aber geteilte Besitzverhältnisse
- Erzeugung mit `std::make_shared<`*`T`*`>(`*`args`*`)`
  - `auto p = std::make_shared<std::string>("Hello World!");`
- Mehrere `std::shared_ptr` auf denselben Speicherbereich möglich
- Der Speicher wird freigegeben, wenn die Lebenszeit des letzten darauf zeigenden `shared_ptr` endet
  - Verwendet Reference Counting
  - Zählt mit, wieviele `shared_ptr` noch leben
  - Potentiell: Performancekosten durch zusätzliche Allokation des Reference Counts

shared_ptr II

- Weitere `shared_ptr` müssen als Kopien eines bestehenden `shared_ptr` erzeugt werden
  - Werden mehrere `shared_ptr` unabhängig voneinander aus einem Rawpointer erstellt, funktioniert das Reference Counting nicht
- Reference Count muss für jede Kopie erhöht werden, für jede Zerstörung verringert
  - Muss threadsicher geschehen, daher bedeutender Laufzeitoverhead
- Nachteil von Reference Counting: Keine Erkennung von Zyklen
  - Aufeinander verweisende `shared_ptr` halten gegenseitig den Reference Count über 0
- Zyklen können durch Verwendung von `std::weak_ptr<`*T*`>` aufgebrochen werden
  - `http://en.cppreference.com/w/cpp/memory/weak_ptr`

shared_ptr II

- Weitere `shared_ptr` müssen als Kopien eines bestehenden `shared_ptr` erzeugt werden
  - Werden mehrere `shared_ptr` unabhängig voneinander aus einem Rawpointer erstellt, funktioniert das Reference Counting nicht
- Reference Count r … ung verringert
  - Muss threadsi…
- Nachteil von Refer…
  - Aufeinander ve… ce Count über 0
- Zyklen können du… hen werden
  - http://en.c…

```
struct foo{
  std::shared_ptr<foo> p;
  foo(const std::shared_ptr<foo>& pf):
      p(pf) {}
  foo():p() {}
};
auto a = std::make_shared<foo>();
auto b = std::make_shared<foo>(a);
a.p = b;
```

Wahl des richtigen Smartpointertyps

- Dynamisch allozierter Speicher sollte **immer** durch Smartpointer verwaltet werden
  - Manuelle Verwaltung birgt hohes Risiko von Bugs
- `std::unique_ptr` modelliert einfachstes Besitzverhältnis (hierarchisch) und hat nur minimalen Overhead
  - Overhead wird von den Kosten einer Speicherallozierung in den Schatten gestellt
  - Immer verwenden, außer wenn geteilter Besitz notwendig ist
- `std::shared_ptr` verwenden, wenn Lebenszeit des Speichers von mehreren Objekten abhängt
- `std::weak_ptr` nur zum Verhindern von Zyklen verwenden

Smartpointer und Rawpointer

- Dynamisch allozierter Speicher sollte immer durch Smartpointer verwaltet werden
  - Bedeutet nicht, dass er nur durch Smartpointer adressiert wird
- Smartpointer nur in Objekten/Funktionen verwenden, die die Lebenszeit beeinflussen
- Übergabe an Funktionen in der Regel als Rawpointer
  - Funktion wird beendet, bevor der Smartpointer zerstört werden kann
  - Unwichtig, ob Verwaltung durch `unique_ptr` oder `shared_ptr`
  - Spart Overhead
  - Ausnahme: Übergabe als Smartpointer, falls die Funktion den Pointer extern speichert
- Für Datenmember abhängig von den Besitzverhältnissen

Link

- Weitere Hinweise zu dynamischer Speicherverwaltung und std::move:
  https://dei.spdns.de/cpp/

C-Style Arrays

- Ähnlich zu C können in C++ mit *type varname*[*length*] Arrays definiert werden
  - In C++ nur mit zur Compilezeit bekannter Länge
  - C-Style Arrays werden stackalloziert und sind kontinuierlich
  - Typ des Arrays: *type*[*length*]
- C-Style Arrays konvertieren implizit in Pointer auf das erste Element des Arrays
- Mit `new` *T*[*N*] kann ein Array dynamisch alloziert werden
  - Wird mit `delete[]` *ptr* (**nicht** `delete`) wieder freigegeben
  - `std::unique_ptr<`*T*`[]>` verwendet korrekte Deallokation
  - Allokation besser mit `std::make_unique<`*T*`[]>(...)`
- `std::vector` ist fast immer eine bessere Alternative, weiterhin existiert `std::array` als sicherer Wrapper für C-style Arrays

`std::vector` oder `std::array` statt C-Style Arrays verwenden!

String Literale

- String Literale sind (nahezu) rückwärts kompatibel zu C vom Typ `char const[`*N*`]`
  - Nullterminierte Zeichenkette, d.h. das Ende wird mit einem extra Character mit Wert `0` markiert
  - *N* gibt Länge des Literals inklusive dem terminalen Nullcharacter an
  - Typ von `"hello"` ist beispielsweise `char const[6]`
- Konvertieren implizit zu `const char*` und aufgrund einer Sonderregelung zu `char*`
- Außer in extrem performancesensitivem Code immer direkt in einen `std::string` schreiben, nicht mit C-Style Strings arbeiten
  - Code ist erst dann performancesensitiv, wenn dies durch Messungen erwiesen wurde!

Weiterführendes

- Im Folgenden: Kurze Erläuterung verbreiteter Low-Level-Konstrukte
- `union`
  - Erlauben das Speichern verschiedener Variablen an der selben Speicherstelle
  - **Achtung:** Lesen eines Members nur nach vorherigem Schreiben erlaubt (nach Standard-C++, Compiler sind häufig weniger streng)
- Placement `new`
  - Erlaubt die Erstellung eines Objektes an einer bereits existierenden (z.B. über `malloc` allozierten) Speicherstelle
  - Primär für eigene Speicherverwaltungsmechanismen und Unions wichtig, ansonsten selten verwendet
- `volatile`
  - Typmodifier (wie `const`), verhindert gewisse Compileroptimierungen
  - Primär für Zugriff auf Memory-Mapped Registers und durch Interrupts gesetzte Variablen

IMS
Institut für Mikroelektronische Systeme
Leibniz Universität Hannover

Leibniz
Universität
Hannover

Aufgaben zu Pointern

Aufgabe A

Was gibt der folgende Code aus?

```
1: int i = 4;
2: int* p1 = &i;
3: *p1 = *p1 * *p1;
4: std::cout << i << std::endl;
```

- Zeile 2: `p1` wird auf die Adresse von `i` gesetzt
- Zeile 3: `i` wird in der letzten Zeile über `p1` quadriert
- `i` hat am Ende den Wert 4^2, also 16

Aufgabe B

Ist eine der folgenden Definitionen illegal?

```
1: int i = 0;
2: double* dp = &i;
3: int*    ip = 0;
4: int*    p  = &i;
```

- Zeile 2: Illegal, da `&i` ein Pointer auf `int` und nicht auf `double` ist
  `error: cannot convert 'int*'to 'double*'in initialization`
- Zeile 3: Legal, initialisiert `ip` als Nullpointer
- Besser wäre `int* ip = nullptr;`
- Zeile 4: Legal, initialisiert `p` als Pointer auf `i`

Aufgabe C

```
 1: int id   = 1024;
 2: int* pi  = &id;
 3: int* pi2 = new int(2048);
 4: using IntPtr = std::unique_ptr<int>;
 5: IntPtr p0(id);
 6: IntPtr p1(pi);
 7: IntPtr p2(pi2);
 8: IntPtr p3(&id);
 9: IntPtr p4(std::make_unique<int>(2048));
10: IntPtr p5(p2.get());
11: IntPtr p6(p4);
```

- Versucht einen `unique_ptr` mit einem `int` zu initialisieren
- Illegal, da kein passender Konstruktor existiert
- `error: invalid conversion from 'int' to 'std::unique_ptr<int>::pointer aka int*'`

Aufgabe C

```
 1: int id   = 1024;
 2: int* pi  = &id;
 3: int* pi2 = new int(2048);
 4: using IntPtr = std::unique_ptr<int>;
 5: IntPtr p0(id);
 6: IntPtr p1(pi);
 7: IntPtr p2(pi2);
 8: IntPtr p3(&id);
 9: IntPtr p4(std::make_unique<int>(2048));
10: IntPtr p5(p2.get());
11: IntPtr p6(p4);
```

- Initialisierung eines `unique_ptr` mit einem Raw-Pointer zwar legal
- Aber: `pi` zeigt auf Speicher, der nicht dynamisch alloziert ist
- Bei Zerstörung von `p1` wird versucht den Speicher freizugeben, führt zu undefiniertem Verhalten
- Wahrscheinliche Folge: Programmabsturz

Aufgabe C

```
 1: int id   = 1024;
 2: int* pi  = &id;
 3: int* pi2 = new int(2048);
 4: using IntPtr = std::unique_ptr<int>;
 5: IntPtr p0(id);
 6: IntPtr p1(pi);
 7: IntPtr p2(pi2);
 8: IntPtr p3(&id);
 9: IntPtr p4(std::make_unique<int>(2048));
10: IntPtr p5(p2.get());
11: IntPtr p6(p4);
```

- Alles Ok, initialisiert `p2` mit einer auf dynamisch allozierten Speicher zeigenden Addresse

Aufgabe C

```
 1: int id   = 1024;
 2: int* pi  = &id;
 3: int* pi2 = new int(2048);
 4: using IntPtr = std::unique_ptr<int>;
 5: IntPtr p0(id);
 6: IntPtr p1(pi);
 7: IntPtr p2(pi2);
 8: IntPtr p3(&id);
 9: IntPtr p4(std::make_unique<int>(2048));
10: IntPtr p5(p2.get());
11: IntPtr p6(p4);
```

- Selbes Problem wie bei `p1`, versucht stackallozierten Speicher freizugeben

Aufgabe C

```
 1: int id   = 1024;
 2: int* pi  = &id;
 3: int* pi2 = new int(2048);
 4: using IntPtr = std::unique_ptr<int>;
 5: IntPtr p0(id);
 6: IntPtr p1(pi);
 7: IntPtr p2(pi2);
 8: IntPtr p3(&id);
 9: IntPtr p4(std::make_unique<int>(2048));
10: IntPtr p5(p2.get());
11: IntPtr p6(p4);
```

- Alles ok, initialisiert `p4` direkt mit neualloziertem Speicher
- Standardvorgehen für Speicherallokation

Aufgabe C

```
 1: int id   = 1024;
 2: int* pi  = &id;
 3: int* pi2 = new int(2048);
 4: using IntPtr = std::unique_ptr<int>;
 5: IntPtr p0(id);
 6: IntPtr p1(pi);
 7: IntPtr p2(pi2);
 8: IntPtr p3(&id);
 9: IntPtr p4(std::make_unique<int>(2048));
10: IntPtr p5(p2.get());
11: IntPtr p6(p4);
```

- Initialisiert `p5` mit dem selben Pointer wie `p2`
- Beide Objekte versuchen am Ende ihrer Lebenszeit den Speicher freizugeben
- Doppelte Freigabe von Speicher führt üblicherweise zu Korruption in den Datenstrukturen der Speicherverwaltung

Aufgabe C

```
 1: int id   = 1024;
 2: int* pi  = &id;
 3: int* pi2 = new int(2048);
 4: using IntPtr = std::unique_ptr<int>;
 5: IntPtr p0(id);
 6: IntPtr p1(pi);
 7: IntPtr p2(pi2);
 8: IntPtr p3(&id);
 9: IntPtr p4(std::make_unique<int>(2048));
10: IntPtr p5(p2.get());
11: IntPtr p6(p4);
```

- Versucht einen `unique_ptr` zu kopieren
- Illegal, da `unique_ptr` nur verschoben, aber nicht kopiert werden können
- Korrekter Ansatz: `IntP p6(std::move(p4));`

Exceptions

Ausnahmebehandlung

```
#include <string>
#include <iostream>
#include <vector>
#include <fstream>
void copyFile(const std::string& inFile, const std::string& outFile) {
    std::ifstream src(inFile);
    std::ofstream dst(outFile);
    dst << src.rdbuf();
}
```

- Sieht korrekt aus
- Was passiert, wenn `inFile` nicht lesend geöffnet werden kann?
  - Weil die Datei nicht existiert
  - Weil die Datei von einer anderen Anwendung exklusiv geöffnet ist
- Was passiert, wenn `outFile` nicht erzeugt werden kann?
  - Weil der Pfad nicht existiert
  - Weil eine andere Anwendung darauf zugreift

Ausnahmebehandlung II

- Fehler häufig nicht an der Stelle ihres Auftretens behandelbar
- Korrektes Vorgehen, wenn eine Operation in `CopyFile` fehlschlägt?
  - Abhängig vom aufrufenden Kontext
  - Kann konsequenzenlos oder fataler Fehler sein
- Fehler müssen häufig aus einer Funktion hinauskommuniziert werden
- Im Wesentlichen zwei Ansätze, um Fehler zu kommunizieren
  - Return Codes
  - Exceptions

Return Codes

- Bereits aus C bekannt
- Funktion signalisiert Erfolg und Misserfolg über den Rückgabewert
- Häufig: Rückgabetyp `int` oder `enum`
  - 0 signalisiert Erfolg
  - Andere Rückgabewerte sind Error Codes, die die Art des aufgetretenen Fehlers spezifizieren
- Aufrufender Code überprüft den Rückgabewert und kann entsprechend reagieren

Nachteile von Return Codes

- Aufrufender Code muss den Return Code überprüfen

```
int process(Object& obj) {
    int result = 0;
    if(!obj.initialize()) {
        if(obj.doWork())
            result = -2;
        if(obj.deinitialize())
            result = -3;
    }
    else
        result = -1;
    return result;
}
```

In echtem Code Konstanten/Enums für die Fehlercodes verwenden, nicht hart in die Funktion kodieren

Nachteile von Return Codes

- Aufrufender Code muss den Return Code überprüfen
  - Vergessene Überprüfung führt häufig zu inkonsistentem Programmzustand und schwierig zu debuggenden Problemen

```
int process(Object& obj)
{
    obj.initialize();
    obj.doWork();
    obj.deinitialize();
    return 0;
}
```

Funktionieren `doWork` und `deinitialize`, falls `initialize` fehlschlägt?

Nachteile von Return Codes

- Aufrufender Code muss den Return Code überprüfen
  - Vergessene Überprüfung führt häufig zu inkonsistentem Programmzustand und schwierig zu debuggenden Problemen
  - Verwendung von `0` (entspricht `false`) als Erfolgssignal ist unintuitiv
  - Durch die Vielzahl von `if`-Statements wird der Code unübersichtlich
- Auswertung des Rückgabewertes bibliotheksabhängig
  - Häufig signalisiert `0` erfolgreiche Ausführung
  - Manchmal ist die Rückgabe ein boolscher Wert, `0` signalisiert also Misserfolg
  - Andere Variante: Positive Werte signalisieren Erfolg (mit eincodierten Informationen), negative Misserfolg
- Rückgabewert wird für Return Code verwendet
  - Existiert eigentlicher Rückgabewert, muss für diesen eine Zielvariable per Pass-by-Reference (oder Pointer) übergeben werden
  - Verhindert Functionchaining: `foo(bar(5))`
  - Konstruktoren haben keinen Rückgabewert

Der Callstack

Um Exceptions zu verstehen, ist ein Verständnis des Callstacks wichtig:

- Die Aufrufhierarchie eines Programmes lässt sich als Stack abbilden
- Bei Funktionsaufruf wird die aufgerufene Funktion auf den Stack gelegt
  - Stackeintrag (der sog. Stackframe) der Funktion enthält lokale Variablen
  - Gilt im C++-Modell prinzipiell nicht nur für Funktionen, sondern auch für Compound-Statements
- Bei Verlassen der Funktion wird der oberste Stackeintrag entfernt
  - Automatische Zerstörung aller lokalen RAII-Objekte in diesem Schritt

Exceptions

- Aufgrund der Probleme mit Return Codes unterstützen viele Programmiersprachen sogenannte Exceptions
- Exceptions erlauben eine fast vollständig vom normalen Kontrollfluss getrennte Behandlung von Fehlern
- Im Fehlerfall werden Exceptions geworfen
- Exceptions propagieren entlang des Callstacks nach unten, bis sie auf einen Handler stoßen
  - RAII-Objekte werden dabei ordnungsgemäß zerstört
  - Ist zusätzliches Problem bei manuellem Speichermanagement in C++
- Berücksichtigung der Exceptions erst notwendig, wenn sie gehandled werden
  - Im Gegensatz zu Return Codes keine manuelle Weitergabe durch jede Aufrufebene notwendig

Throw

- Mit `throw` *expr* wird eine Exception geworfen
  - Typ von *expr* prinzipiell beliebig
  - Konvention: Unterklasse von `std::exception`
  - Diverse Exceptionklassen in `stdexcept`
- Lebensdauer von temporären geworfenen Objekten wird verlängert, bis der Fehler gehandled ist
- Scope wird ansonsten ordnungsgemäß verlassen
  - Zerstörung lokaler Objekte für alle Scopes bis zum Handler

Try-Catch

```
#include <stdexcept>
#include <iostream>
int foo() {
    try {
        throw std::runtime_error("throwExcept called)";
    } catch(std::exception& e){
        std::cout<<e.what()<<std::endl;
        throw;
    }
}
```

- In Release-Code müssen Exceptions in der Regel gefangen werden
  - Nichtgefangene Exceptions führen zu Programmabbruch
- Zum Fangen von Exceptions dient try-catch

Try-Catch Syntax

```
try
{
    regularCodePath
}
catch(exceptionDefinition)
{
    exceptionalCodePath
}
```

- Geschweifte Klammern sind notwendig, erzeugen immer einen Scope
- *regularCodePath* wird immer ausgeführt
  - Bis zu dem Punkt, an dem eine Exception geworfen wird
- *exceptionalCodePath* wird nur ausgeführt, wenn eine Exception gefangen wird
- *exceptionDefinition* definiert die zu fangende Exception
  - Normale Variablendeklaration
  - Nur Exceptions mit kompatiblem Typ werden von dem `catch` gefangen
  - Inkompatible Exceptions propagieren weiter

Try-Catch

```
#include <stdexcept>
#include <iostream>
int foo() {
    try {
        throw std::runtime_error("throwExcept called)";
    } catch(std::exception& e){
        std::cout<<e.what()<<std::endl;
        throw;
    }
}
```

- Fängt Exceptions vom Typ `std::exception` per Referenz
  - `std::runtime_error` abgeleitet von `std::exception`
  - Polymorphe Klasse, Fangen als Referenz erhält Polymorphie (mehr dazu später)
  - Kann auch unbenannt sein: `catch(std::exception&)`
  - Kopie kann fehlschlagen, würde zu Programmabruch führen

`throw` by-Value, `catch` by-Reference!

Try-Catch

```
#include <stdexcept>
#include <iostream>
int foo() {
    try {
        throw std::runtime_error("throwExcept called)";
    } catch(std::exception& e){
        std::cout<<e.what()<<std::endl;
        throw;
    }
}
```

- Mit `catch(...)` können beliebige Typen gefangen werden
- In der Regel: Nur Unterklassen von `std::exception` werfen und fangen

Try-Catch

```
#include <stdexcept>
#include <iostream>
int foo() {
    try {
        throw std::runtime_error("throwExcept called)";
    } catch(std::exception& e){
        std::cout<<e.what()<<std::endl;
        throw;
    }
}
```

- Im Catch-Block kann die Exception mit `throw;` erneut geworfen werden
  - Sinnvoll, wenn die Exception nicht gehandelt werden kann
- Rethrow auch mit `throw e;` möglich
  - Nicht empfehlenswert, da Ursprung der Exception nicht mitgeschleift wird (für Debugging)

Nachteile von Exceptions

- Exceptions haben nicht nur Vorteile gegenüber Return Codes
- Komplexität
  - Mit Exceptions: Behandlung von Fehlerfällen nicht lokal
  - Prüfung, ob alle Fehlerfälle abgedeckt sind, ist schwieriger
  - Problematisch für systemkritische Software
    - Strikte Verifikationsprozesse reduzieren das Risiko unbehandelter Fehler bei Return Codes
    - Unbehandelte Exception in z.B. der Steuerung einer Rakete kann katastrophal enden
- Laufzeitoverhead
  - Overhead für normalen Codefluss gering bis nicht vorhanden
  - Werfen und Fangen von Exceptions in der Regel sehr teuer
  - Für Operationen, die häufig fehlschlagen, möglicherweise nicht optimal
  - **Niemals Exceptions für normalen Codefluss verwenden!**
    - Wirklich **nie**!

Assertions

- Ausnahmefälle haben zwei Ursachen
  - Fehlerhafte Eingaben
  - Programmierfehler
- Idealszenario: Programmierfehler treten in fertiger Software nicht auf
- Überprüfungen zum Abfangen von Fehlern kosten Leistung
  - Unnötige Überprüfungen daher nicht wünschenswert
- Assertions dienen zum Abfangen von Programmierfehlern
  - Werden in Release-Versionen in der Regel rauskompiliert
  - Implementiert über Macros
- Verwendung: `assert(`*`expr`*`);`
  - Programm wird beendet, wenn *expr* zu `false` evaluiert
  - Definiert in `cassert`
  - Wird durch Definition des Macros `NDEBUG` deaktiviert
  - **Achtung:** Seiteneffekte in *expr* können zu unterschiedlichem Verhalten zwischen Debug und Releasebuild führen

Assertions

- Ausnahmefälle haben zwei Ursachen
  - Fehlerhafte Eingaben
  - Programmierfehler
- Idealszenario: Programmierfehler treten in fertiger Software nicht auf
- Überprüfungen zu
  - Unnötige Über
- Assertions dienen
  - Werden in Rel
  - Implementiert
- Verwendung: asse
  - Programm wird beendet, wenn *expr* zu `false` evaluiert
  - Definiert in `cassert`
  - Wird durch Definition des Macros `NDEBUG` deaktiviert
  - **Achtung:** Seiteneffekte in *expr* können zu unterschiedlichem Verhalten zwischen Debug und Releasebuild führen

```
#include <cassert>
#include <string>
void processString(std::string* dataPtr)
{
    assert(dataPtr != nullptr);
    assert(!dataPtr->empty());
    //do work...
}
```

Allgemeines zu den Aufgaben

Dateien im Programmierprojekt II

- Zur Vermeidung von Konflikten sollten die folgenden Punkte beachtet werden:
  1. Zu Aufgaben gehörige Dateien nur durch Pull von `common` in das Repository bringen, nicht `ppti-common` klonen und Dateien manuell in das eigene Repository kopieren
  2. Nur die Dateien verändern, in denen Aufgaben bearbeitet werden sollen
  3. Die Verzeichnisstruktur nicht verändern
- Wenn dies in der Vergangenheit missachtet: Neue Aufgabe frühzeitig pullen und überprüfen, ob alles sauber zusammengefügt wurde
  - Bei Problemen: Melden Sie sich bei uns!

Weitere Regeln für die C++-Programmierung

- In Konstruktoren: Alle Membervariablen in der Initialisierungsliste initialisieren!
  - Reihenfolge entsprechend der Definitionsreihenfolge der Member in der Klasse
- Für Nullpointer `nullptr` und nicht `NULL` oder `0` verwenden!
- Kein manuelles Speichermanagement verwenden
  - Speicher immer durch RAII-Objekte, also Container oder Smartpointer, verwalten lassen
  - Keine direkten Aufrufe von `new` und `delete` im eigenen Code, stattdessen `std::make_unique` oder `std::make_shared` verwenden

Nichtbeachtung ohne **überzeugende** Begründung kann zu Punktabzug führen!