

# Eine Einführung in modernes C++ mit CMake

Paul Nykiel

August 10, 2019

- 1 Einleitung
- 2 Ein erstes C++ Programm
- 3 CMake
- 4 Mehr C++
- 5 Design Pattern
- 6 OOP in C++
- 7 Noch mehr C++
- 8 STL
- 9 Tools
- 10 Abschluss
- 11 Praxis

## Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

# Einleitung

## Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

# Was ist C++

- ~~C with classes~~

## Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

# Was ist C++

- ~~C with classes~~
- Standardisiert und offen

## Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

# Was ist C++

- ~~C with classes~~
- Standardisiert und offen
- Wird in quasi jeder Domäne genutzt

# Was ist C++

- ~~C with classes~~
- Standardisiert und offen
- Wird in quasi jeder Domäne genutzt
- Ziele: Sicherer und performanter Code

# C++ im Vergleich zu Java

- Undefiniertes Verhalten



# C++ im Vergleich zu Java

- undefiniertes Verhalten
- keine automatische Speicherverwaltung

# C++ im Vergleich zu Java

- undefiniertes Verhalten
- keine automatische Speicherverwaltung
- kleiner Sprachkern und kleine Standardlibrary

# C++ im Vergleich zu Java

- undefiniertes Verhalten
- keine automatische Speicherverwaltung
- kleiner Sprachkern und kleine Standardlibrary
- Templates

# C++ im Vergleich zu Java

- undefiniertes Verhalten
- keine automatische Speicherverwaltung
- kleiner Sprachkern und kleine Standardlibrary
- Templates
- Operatorenüberladung

# C++ im Vergleich zu Java

- undefiniertes Verhalten
- keine automatische Speicherverwaltung
- kleiner Sprachkern und kleine Standardlibrary
- Templates
- Operatorenüberladung
- tendenziell weniger tiefe Vererbung

# C++ im Vergleich zu Java

- undefiniertes Verhalten
- keine automatische Speicherverwaltung
- kleiner Sprachkern und kleine Standardlibrary
- Templates
- Operatorenüberladung
- tendenziell weniger tiefe Vererbung
- Mehrfachvererbung

# C++ im Vergleich zu Java

- undefiniertes Verhalten
- keine automatische Speicherverwaltung
- kleiner Sprachkern und kleine Standardlibrary
- Templates
- Operatorenüberladung
- tendenziell weniger tiefe Vererbung
- Mehrfachvererbung
- definierte Objektlebenszeit

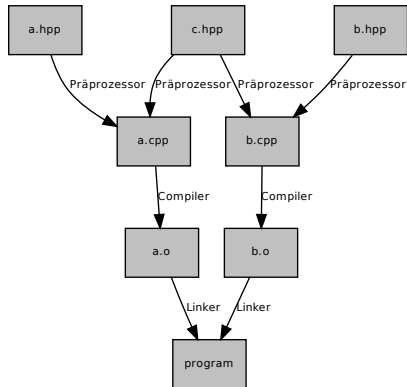
# Ein erstes C++ Programm



# Beispiel: Hello World

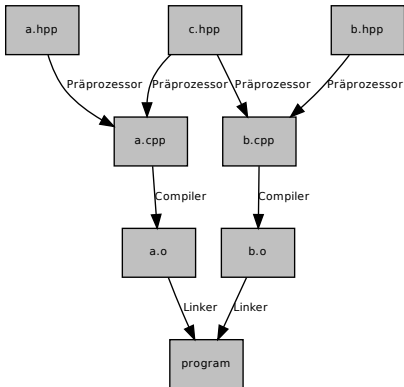
# Vom Sourcecode zur ausführbaren Datei

- Präprozessor



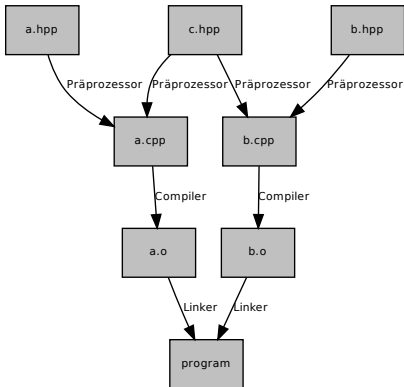
# Vom Sourcecode zur ausführbaren Datei

- Präprozessor
- C++-Compiler



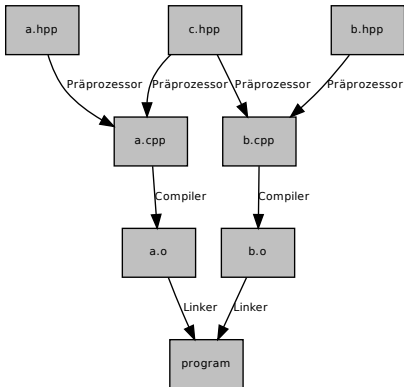
# Vom Sourcecode zur ausführbaren Datei

- Präprozessor
- C++-Compiler
- Linker



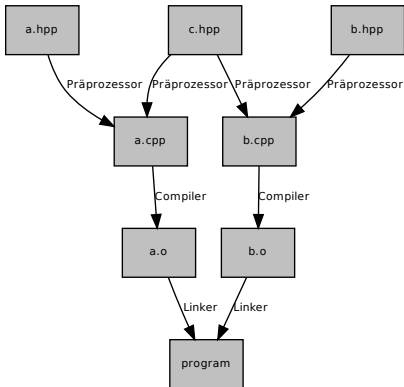
# Vom Sourcecode zur ausführbaren Datei

- Präprozessor
- C++-Compiler
- Linker
- `#includes` sichern Typkonsistenz



# Vom Sourcecode zur ausführbaren Datei

- Präprozessor
- C++-Compiler
- Linker
- `#includes` sichern Typkonsistenz
- Templates müssen im Header definiert werden



# Beispiel: Eine zweite Übersetzungseinheit

# CMake



# Warum ein Buildsystem

- Nur geänderte Dateien neu kompilieren

# Warum ein Buildsystem

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

- Nur geänderte Dateien neu kompilieren
- Einzelner Befehl an Compiler wird zu kompliziert

# Warum ein Buildsystem

- Nur geänderte Dateien neu kompilieren
- Einzelner Befehl an Compiler wird zu kompliziert
- Portabilität

Wird durch Datei CMakeLists.txt konfiguriert:

```
cmake_minimum_required(VERSION 3.10)

set(CMAKE_CXX_STANDARD 17)
set(CMAKE_CXX_FLAGS "-Wall")
if (CMAKE_BUILD_TYPE STREQUAL "Release")
    set(CMAKE_CXX_FLAGS "${CMAKE_CXX_FLAGS} -O3")
endif ()

project(MyProject)
add_executable(${PROJECT_NAME} main.cpp mylib.cpp)
target_link_libraries(${PROJECT_NAME} pthread)
add_subdirectory(Tests)
```

# Beispiel: CMake

# Mehr C++

# Speicherverwaltung

- `std::list<int> a = b;`  
`std::list<int> c = f(a);`

# Speicherverwaltung

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

- `std::list<int> a = b;`  
`std::list<int> c = f(a);`
- Jegliche Zuweisung ist eine Kopie, auch für Funktionsargumente



# Speicherverwaltung

- `std::list<int> a = b;`  
`std::list<int> c = f(a);`
- Jegliche Zuweisung ist eine Kopie, auch für Funktionsargumente
- Einfach verständlich

# Speicherverwaltung

- `std::list<int> a = b;`  
`std::list<int> c = f(a);`
- Jegliche Zuweisung ist eine Kopie, auch für Funktionsargumente
- Einfach verständlich
- Für große Objekte unnötige Performanceeinbuße

- Pointer

# Pointer

- Pointer
- Angst!

# Pointer

# Pointer

- Pointer
- Angst!
- Gefährlich!

# Pointer

- Pointer
- Angst!
- Gefährlich!
- Böse!

# Pointer

- Pointer
- Angst!
- Gefährlich!
- Böse!
- Nicht schlimm aber viel Fehlerpotential

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

# Pointer

- Pointer
- Angst!
- Gefährlich!
- Böse!
- Nicht schlimm aber viel Fehlerpotential
- `int b = 17; int *a = &b;`

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis



- Pointer
- Angst!
- Gefährlich!
- Böse!
- Nicht schlimm aber viel Fehlerpotential
- `int b = 17; int *a = &b;`
- `int *c = new int();`

- Pointer
- Angst!
- Gefährlich!
- Böse!
- Nicht schlimm aber viel Fehlerpotential
- `int b = 17; int *a = &b;`
- `int *c = new int();`
- `delete c;`

# Pointer

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

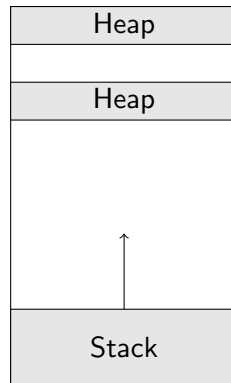
Abschluss

Praxis

- Pointer
- Angst!
- Gefährlich!
- Böse!
- Nicht schlimm aber viel Fehlerpotential
- `int b = 17; int *a = &b;`
- `int *c = new int();`
- `delete c;`
- Gehört nicht in die Anwendungslogik

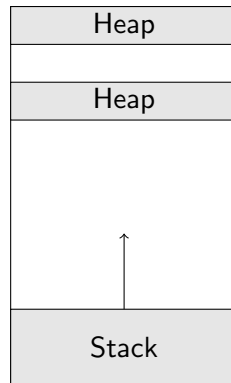
- Hauptspeicher (RAM) wird aus zwei Richtungen vergeben

## Stack und Heap



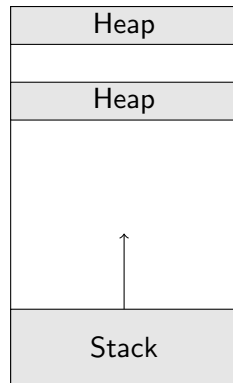
- Hauptspeicher (RAM) wird aus zwei Richtungen vergeben
- Stack wird für Funktion aufgebaut

# Stack und Heap



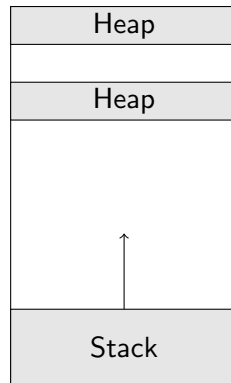
- Hauptspeicher (RAM) wird aus zwei Richtungen vergeben
- Stack wird für Funktion aufgebaut
- Heap für dynamischen Speicher

# Stack und Heap



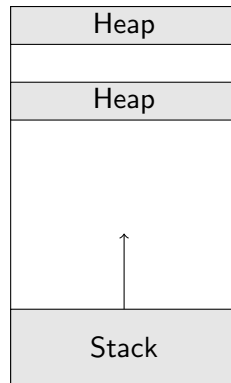
- Hauptspeicher (RAM) wird aus zwei Richtungen vergeben
- Stack wird für Funktion aufgebaut
- Heap für dynamischen Speicher
- Speicher auf dem Heap muss händisch reserviert und freigegeben werden

# Stack und Heap



- Hauptspeicher (RAM) wird aus zwei Richtungen vergeben
- Stack wird für Funktion aufgebaut
- Heap für dynamischen Speicher
- Speicher auf dem Heap muss händisch reserviert und freigegeben werden
- Bei mehr als einem Owner Verwaltung kompliziert

# Stack und Heap





# Beispiel Pointer

```
int main() {  
    int a = 0; // Liegt auf dem Stack  
    int *aPtr = &a; // Zeigt auf den Stack  
  
    int *bPtr = new int(); // Liegt auf dem Heap  
    delete bPtr; // Speicher muss freigegeben werden  
}
```

# Smart-Pointer

- Standardlibrary kann Verwaltung übernehmen

# Smart-Pointer

- Standardlibrary kann Verwaltung übernehmen
- `unique_ptr`

# Smart-Pointer

- Standardlibrary kann Verwaltung übernehmen
- `unique_ptr`
- Genau ein Owner

# Smart-Pointer

## Einleitung

## Ein erstes C++ Programm

## CMake

## Mehr C++

## Design Pattern

## OOP in C++

## Noch mehr C++

## STL

## Tools

## Abschluss

## Praxis

- Standardlibrary kann Verwaltung übernehmen
- `unique_ptr`
- Genau ein Owner
- `std::unique_ptr<int> a = std::make_unique<int>(17);`

# Smart-Pointer

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

- Standardlibrary kann Verwaltung übernehmen
- `unique_ptr`
- Genau ein Owner
- `std::unique_ptr<int> a = std::make_unique<int>(17);`
- `shared_ptr`

# Smart-Pointer

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

- Standardlibrary kann Verwaltung übernehmen
- `unique_ptr`
- Genau ein Owner
- `std::unique_ptr<int> a = std::make_unique<int>(17);`
- `shared_ptr`
- Quasi immer nutzbar
- `std::shared_ptr<int> a = std::make_shared<int>(17);`

- Sprachfeature kein Library-Feature

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

**Mehr C++**

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis



Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

**Mehr C++**

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

- Sprachfeature kein Library-Feature
- Können nicht null sein

# Referenzen

- Sprachfeature kein Library-Feature
- Können nicht null sein
- Können aber ungültig werden

# Referenzen

- Sprachfeature kein Library-Feature
- Können nicht null sein
- Können aber ungültig werden
- `int b = 17; int &a = b;`

# Zusammenfassung Pointer

- Raw-Pointer: Sollten quasi nie verwendet werden

# Zusammenfassung Pointer

- Raw-Pointer: Sollten quasi nie verwendet werden
- Unique-Pointer: Oftmals ersatz für Raw-Pointer

# Zusammenfassung Pointer

- Raw-Pointer: Sollten quasi nie verwendet werden
- Unique-Pointer: Oftmals ersatz für Raw-Pointer
- Shared-Pointer: Sichere Pointer für beliebig viele Owner

# Zusammenfassung Pointer

- Raw-Pointer: Sollten quasi nie verwendet werden
- Unique-Pointer: Oftmals ersatz für Raw-Pointer
- Shared-Pointer: Sichere Pointer für beliebig viele Owner
- Referenzen: Oftmals um Kopien zu vermeiden

# Beispiel: Pointer & Referenzen



# Design Pattern

# Const-Correctness

- Alles per Referenz: Super Effizient aber Fehlerquelle

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

# Const-Correctness

- Alles per Referenz: Super Effizient aber Fehlerquelle
- Const-Referenzen

# Const-Correctness

- Alles per Referenz: Super Effizient aber Fehlerquelle
- Const-Referenzen
- `const int &a = b;`

# Const-Correctness

- Alles per Referenz: Super Effizient aber Fehlerquelle
- Const-Referenzen
- `const int &a = b;`
- Const-Memberfunktionen

# Const-Correctness

- Alles per Referenz: Super Effizient aber Fehlerquelle
- Const-Referenzen
- `const int &a = b;`
- Const-Memberfunktionen
- `int getX() const {...`

# Const-Correctness

- Alles per Referenz: Super Effizient aber Fehlerquelle
- Const-Referenzen
- `const int &a = b;`
- Const-Memberfunktionen
- `int getX() const {...`
- `mutable`

# Beispiel: Const-Correctness



- Resource acquisition is initialization

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

**Design  
Pattern**

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

- Resource acquisition is initialization
- Objekt akquiriert Ressourcen im Konstruktor und gibt sie im Destruktor frei

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

- Resource acquisition is initialization
- Objekt akquiriert Ressourcen im Konstruktor und gibt sie im Destruktor frei
- ```
void doStuff() {  
    std::lock_guard<std::mutex> lockGuard{mutex};  
    shared_resource = 17;  
    shared_resource += functionThatCanThrow();  
}
```

# OOP in C++

# Klassendeklaration

```
class A : public B {  
    public:  
        A(int c, int d);  
        auto getC() const -> int;  
    private:  
        int d;  
};
```

# Klassendefinition

```
A::A(int c, int d) : B{c}, d{d} {  
    // More code  
}
```

```
auto A::getC() const -> int {  
    return this->c;  
}
```

# Namespaces

```
namespace mynamespace {  
    int calculate() { return 17; }  
}  
  
int main() {  
    return mynamespace::calculate();  
}
```

# Namespaces

```
namespace mynamespace {  
    int calculate() { return 17; }  
}  
  
int main() {  
    return mynamespace::calculate();  
}
```

- Struktur



# Namespaces

```
namespace mynamespace {  
    int calculate() { return 17; }  
}  
  
int main() {  
    return mynamespace::calculate();  
}
```

- Struktur
- Keinen Einfluss auf Sichtbarkeit

# Beispiel: HelloWorld OOP

# Noch mehr C++

# Casts und Null-Pointer

- `static_cast<T>(a)`

# Casts und Null-Pointer

- `static_cast<T>(a)`
- `dynamic_cast<T>(a)`

# Casts und Null-Pointer

- `static_cast<T>(a)`
- `dynamic_cast<T>(a)`
- 0, NULL und `nullptr`

# Type-Deduction

```
float f = 0;  
auto i = 0;  
auto i2 = i;  
auto i3 = static_cast<int>(f);  
decltype(i3) i4 = 12;
```

# Kurzeinführung Templates als Generics

Eine  
Einführung in  
modernes  
C++ mit  
CMake  
  
Paul Nykiel

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

```
template<typename T>
auto max(T i, T j) -> T {
    if (i > j) {
        return i;
    } else {
        return j;
    }
}

max<int>(1,2);
max(1,2);
```



# STL

- Standard Template Library

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

**STL**

Tools

Abschluss

Praxis

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

**STL**

Tools

Abschluss

Praxis

- Standard Template Library
- Utility

- Standard Template Library
- Utility
- Container

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

**STL**

Tools

Abschluss

Praxis

- Standard Template Library
- Utility
- Container
- Algorithmen

- Standard Template Library
- Utility
- Container
- Algorithmen
- IO

- Standard Template Library
- Utility
- Container
- Algorithmen
- IO
- Concurrency

# Container

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

|                                     | Auf Element zugreifen | Element einfügen                       |
|-------------------------------------|-----------------------|----------------------------------------|
| <code>std::array&lt;T, N&gt;</code> | $\mathcal{O}(1)$      | X                                      |
| <code>std::vector&lt; N&gt;</code>  | $\mathcal{O}(1)$      | $\mathcal{O}(n)$                       |
| <code>std::deque&lt; N&gt;</code>   | $\mathcal{O}(1)$      | $\mathcal{O}(n)$ bzw. $\mathcal{O}(1)$ |
| <code>std::list&lt; N&gt;</code>    | $\mathcal{O}(n)$      | $\mathcal{O}(1)$                       |



```
std::vector<int> a = {1,2,17,42,1337};  
int b = 0;  
  
for (std::vector<int>::iterator it = a.begin();  
     it != a.end(); ++it) {  
    b += *it;  
}
```

# for-each

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

```
std::vector<int> a = {1,2,17,42,1337};  
int b = 0;  
  
for (const auto &i : a) {  
    b += i;  
}
```

# Weitere Container und Aggregationstypen

- Assoziative-Container: `std::set<T>` und `std::map<K, V>`

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

**STL**

Tools

Abschluss

Praxis

# Weitere Container und Aggregationstypen

- Assoziative-Container: `std::set<T>` und `std::map<K, V>`
- Sammlung verschiedener Objekte: `std::tuple<T...>` und `std::pair<T1, T2>`

# Weitere Container und Aggregationstypen

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

- Assoziative-Container: `std::set<T>` und `std::map<K, V>`
- Sammlung verschiedener Objekte: `std::tuple<T...>` und `std::pair<T1, T2>`
- Objekt das nicht vorhanden sein muss: `std::optional<T>`

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

**Tools**

Abschluss

Praxis

# Tools

```
TEST(SqrtTest, Simple) {  
    EXPECT_EQ(sqrt(4), 2);  
}  
  
TEST(SqrtTest, Negative) {  
    EXPECT_THROW(sqrt(-1), std::runtime_error);  
}
```

# Debugging und Fehlersuche

- Debugger



# Debugging und Fehlersuche

- Debugger
- Valgrind

# Debugging und Fehlersuche

- Debugger
- Valgrind
- LibAdressSanitizer (Asan)

# Debugging und Fehlersuche

- Debugger
- Valgrind
- LibAddressSanitizer (Asan)
- clang-tidy

# Abschluss

# Was fehlt?

- R-Value Referenzen, forward/universal Referenzen

# Was fehlt?

- R-Value Referenzen, forward/universal Referenzen
- Move

# Was fehlt?

- R-Value Referenzen, forward/universal Referenzen
- Move
- Destruktor und Copy / Move Konstruktor

# Was fehlt?

- R-Value Referenzen, forward/universal Referenzen
- Move
- Destruktor und Copy / Move Konstruktor
- Operatorenüberladung



# Was fehlt?

- R-Value Referenzen, forward/universal Referenzen
- Move
- Destruktor und Copy / Move Konstruktor
- Operatorenüberladung
- Friend Definition

# Was fehlt?

- R-Value Referenzen, forward/universal Referenzen
- Move
- Destruktor und Copy / Move Konstruktor
- Operatorenüberladung
- Friend Definition
- Meta-Programming

# Mehr Informationen

- `en.cppreference.com`

# Mehr Informationen

- [en.cppreference.com](http://en.cppreference.com)
- [github.com/isocpp/CppCoreGuidelines](https://github.com/isocpp/CppCoreGuidelines)

# Mehr Informationen

- [en.cppreference.com](http://en.cppreference.com)
- [github.com/isocpp/CppCoreGuidelines](https://github.com/isocpp/CppCoreGuidelines)
- [godbolt.org](http://godbolt.org)

# Mehr Informationen

- [en.cppreference.com](http://en.cppreference.com)
- [github.com/isocpp/CppCoreGuidelines](https://github.com/isocpp/CppCoreGuidelines)
- [godbolt.org](http://godbolt.org)
- [github.com/SoPra-Team-10/CppCMakeIntro](https://github.com/SoPra-Team-10/CppCMakeIntro)

# Mehr Informationen

- [en.cppreference.com](http://en.cppreference.com)
- [github.com/isocpp/CppCoreGuidelines](https://github.com/isocpp/CppCoreGuidelines)
- [godbolt.org](http://godbolt.org)
- [github.com/SoPra-Team-10/CppCMakeIntro](https://github.com/SoPra-Team-10/CppCMakeIntro)
- Scott Meyers: Effective Modern C++

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

**Praxis**

# Praxis



# Praxis:

# Praxis: Huffman-Codierer

# Vorgehen

- Datei einlesen

# Vorgehen

- Datei einlesen
- Relative Häufigkeiten ( $\approx$  Wahrscheinlichkeiten) berechnen (Byteweise)

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

# Vorgehen

- Datei einlesen
- Relative Häufigkeiten ( $\approx$  Wahrscheinlichkeiten) berechnen (Byteweise)
- Huffman-Baum konstruieren

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

# Vorgehen

- Datei einlesen
- Relative Häufigkeiten ( $\approx$  Wahrscheinlichkeiten) berechnen (Byteweise)
- Huffman-Baum konstruieren
  - Menge aller Symbole mit zugehörigen Wahrscheinlichkeiten

Einleitung

Ein erstes  
C++  
Programm

CMake

Mehr C++

Design  
Pattern

OOP in C++

Noch mehr  
C++

STL

Tools

Abschluss

Praxis

- Datei einlesen
- Relative Häufigkeiten ( $\approx$  Wahrscheinlichkeiten) berechnen (Byteweise)
- Huffman-Baum konstruieren
  - Menge aller Symbole mit zugehörigen Wahrscheinlichkeiten
  - Zwei Symbole geringster Wahrscheinlichkeit finden

- Datei einlesen
- Relative Häufigkeiten ( $\approx$  Wahrscheinlichkeiten) berechnen (Byteweise)
- Huffman-Baum konstruieren
  - Menge aller Symbole mit zugehörigen Wahrscheinlichkeiten
  - Zwei Symbole geringster Wahrscheinlichkeit finden
  - Symbole aus Menge Entfernen



- Datei einlesen
- Relative Häufigkeiten ( $\approx$  Wahrscheinlichkeiten) berechnen (Byteweise)
- Huffman-Baum konstruieren
  - Menge aller Symbole mit zugehörigen Wahrscheinlichkeiten
  - Zwei Symbole geringster Wahrscheinlichkeit finden
  - Symbole aus Menge Entfernen
  - Zu neuem Knoten kombinieren

- Datei einlesen
- Relative Häufigkeiten ( $\approx$  Wahrscheinlichkeiten) berechnen (Byteweise)
- Huffman-Baum konstruieren
  - Menge aller Symbole mit zugehörigen Wahrscheinlichkeiten
  - Zwei Symbole geringster Wahrscheinlichkeit finden
  - Symbole aus Menge Entfernen
  - Zu neuem Knoten kombinieren
  - Knoten zu Menge hinzufügen

- Datei einlesen
- Relative Häufigkeiten ( $\approx$  Wahrscheinlichkeiten) berechnen (Byteweise)
- Huffman-Baum konstruieren
  - Menge aller Symbole mit zugehörigen Wahrscheinlichkeiten
  - Zwei Symbole geringster Wahrscheinlichkeit finden
  - Symbole aus Menge Entfernen
  - Zu neuem Knoten kombinieren
  - Knoten zu Menge hinzufügen
- Abbildung ausgeben