

Programmierpraktikum C und C++



```
#include <iostream>

int main()
{
    std::cout
        << "Welcome to the Dark Side!
        << std::endl;
}
```



ES Real-Time Systems Lab

Prof. Dr. rer. nat. Andy Schürr

Dept. of Electrical Engineering and Information Technology

Dept. of Computer Science (adjunct Professor)

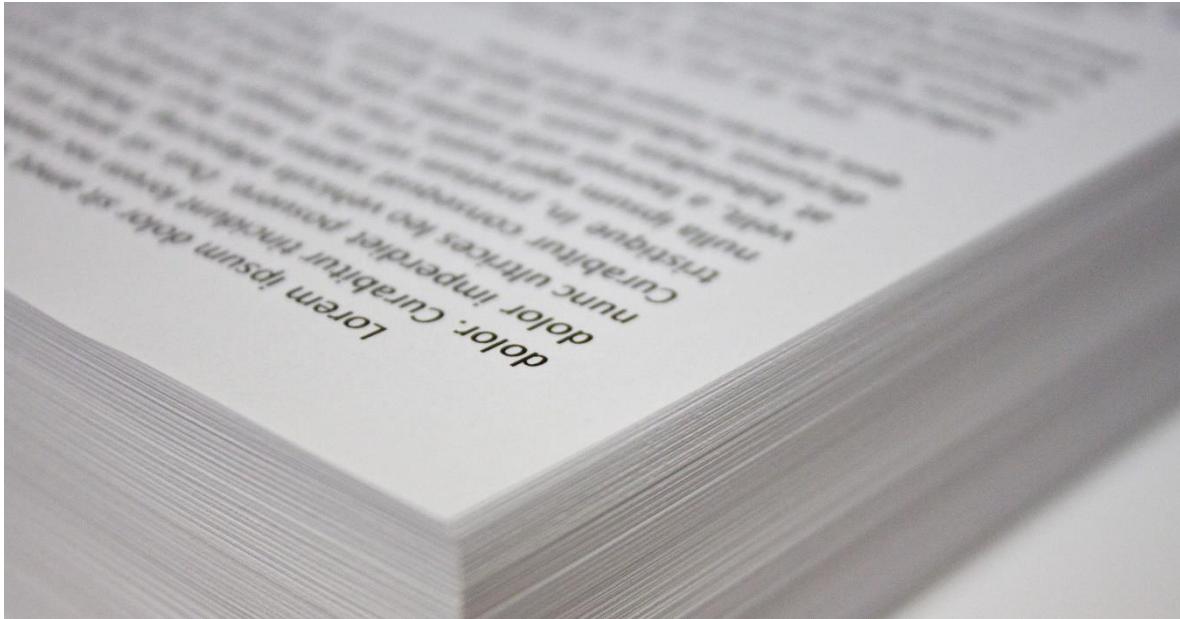
www.es.tu-darmstadt.de

Roland Kluge

roland.kluge@es.tu-darmstadt.de

Programmierpraktikum C und C++

Organisatorisches



ES Real-Time Systems Lab

Prof. Dr. rer. nat. Andy Schürr

Dept. of Electrical Engineering and Information Technology

Dept. of Computer Science (adjunct Professor)

www.es.tu-darmstadt.de

Roland Kluge

roland.kluge@es.tu-darmstadt.de



In diesem Praktikum wollen wir einige **Besonderheiten der Sprachen C++ und C (für Microcontroller)** kennenlernen.

Idee des Praktikums

- Vorlesung vermittelt Konzepte
- Übung vermittelt praktische Kenntnisse

Basisvoraussetzungen

- Allgemeine Programmiererfahrung
- Kenntnisse in Java

Zusammenhang zwischen C, C++ und Java



C "1.0"
(1972)



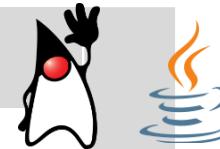
C++ "1.0"
(1980~85)

ANSI C/C89 (1989)
"Programming
Language C"

C95 (1995)

C99 (1999)

C11 (2011)



Java 1.0 (1996)

C++98 (1998)

C++03 (2003)

C++11 (2011)

C++14 (2014)

Java 1.5 (2004)

Java SE 6 (2006)

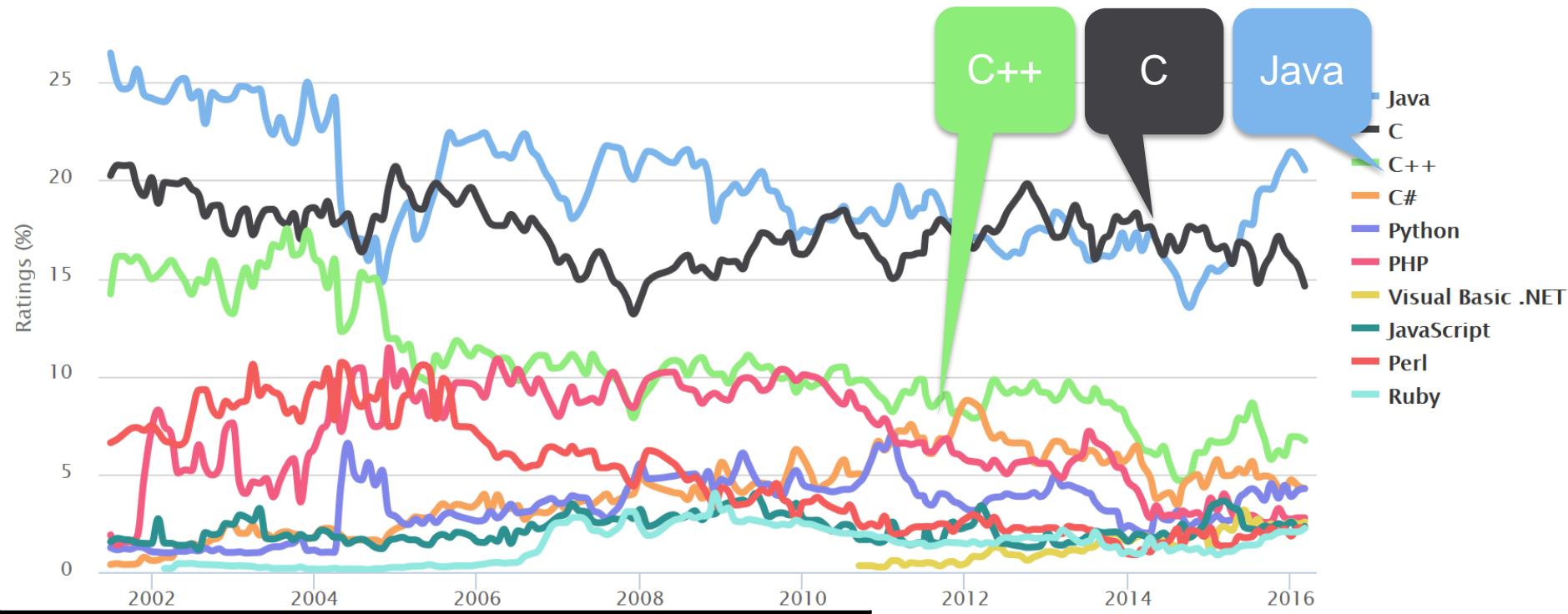
Java SE 7 (2011)

Java SE 8 (2014)

Wie wichtig sind C und C++? Der TIOBE-Index.



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Mar 2016	Mar 2015	Language	Ratings	Change
1	2	Java	20.5%	+5.0%
2	1	C	14.6%	-2.0%
3	4	C++	6.7%	+0.1%
4	5	C#	4.3%	-0.7%

http://www.tiobe.com/tiobe_index?page=index

Inhaltliche Struktur des Praktikums



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- **Grundlagen**
 - Projektstruktur, Kompiliervorgang, allgemeine Konzepte
- **Speicherverwaltung**
 - Speicherbereiche in C++, Vergleich zu Java
 - Typische Fallstricke (denn davon gibt es reichlich!)
- **Objektorientierung**
 - Besonderheiten von C++
- **Fortgeschrittene Themen**
 - Templates (vergleichbar mit Generics in Java)
 - Funktionszeiger: in C von Anfang an, in Java erst seit 1.8!
- **C & Embedded C**
 - Besonderheiten einer Hardwareplattform



Jeden Tag

09:00 – ca. 16:00 im Electronic Classroom (S3|21 1)

ca. 14:00..14:30: Beginn Nachmittagsblock (je nach Bedarf)

Anwesenheitspflicht

- Ausnahmen **persönlich genehmigen lassen** (Klausur, Krankheit)
- Wer **mehr als 2 Kontrollen (= in Summe 1 Tag)** fehlt (**egal wieso**), darf leider **nicht an der Klausur teilnehmen!**
- Anwesenheitsbescheinigung **kann** in folgende Jahre "**mitgenommen**" werden.

Ansprechpartner

Roland Kluge	(Vorlesung, Übung, Moodle)
Laurenz Kamp	(Übung, Moodle)
Nicolas Himmelmann	(Übung, Moodle)

Bitte **aktiv** Hilfe fordern während der Übung!

Regeln für den Electronic Classroom



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Die PCs und Experimentierboards sind neu
- Es gelten von der Pooladministration klare Regeln.
Bitte...
 1. Kein Essen
 2. Kein Trinken
 3. Keine Kabel abmontieren / umstecken
- Bei wiederholtem Verstoß kann ein Teilnehmer des Praktikums verwiesen werden

Klausur



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Termin

Datum: 04. Oktober 2017

Uhrzeit: 16:15 - 18:15 (90min Bearbeitungszeit)

Raum: S1|01 A1

Inhalt

Tag 1 – Tag 4: C++-Programmierung

Tag 5 – Tag 6: C-Programmierung (generisch & für Microcontroller)

Microcontroller-Programmierung ist **nicht** klausurrelevant.

Vorbereitung

1. Konzepte der Vorlesung verstehen
2. Übungen aus dem Praktikum selbstständig lösen

Zur Teilnahme erforderlich

1. amtlicher Lichtbildausweis
2. Klausuranmeldung (TUCaN!)

Übungsmaterial



▪ **Virtuelle Maschine:**

- Downloadbereich: <http://www.es.tu-darmstadt.de/studentftp/cppp/>
- User: ccppp, PW: C++Lab2017#ES
- User-PW in der VM: cppprak

▪ **Material:** <https://github.com/Echtzeitsysteme/tud-cppp/>

▪ **Wiki mit FAQs:** <https://github.com/Echtzeitsysteme/tud-cppp/wiki/>

▪ **Eigenes Projekt erstellen mit Git:**

- Einführung in Git: <http://git-scm.com/book/de>
- Kostenfreie Git-Repositories auf <https://github.com/>
(auch private Repositories als Student kostenfrei möglich)
- Siehe auch unser Github-Wiki:
<https://github.com/Echtzeitsysteme/tud-cppp/wiki/Arbeiten-mit-git>

▪ **Fachliche Fragen** bitte **immer** über Moodle:

- <https://moodle.tu-darmstadt.de/course/view.php?id=9352>



- **Aufgabenblatt**

- Ein Dokument enthält alle Aufgaben
 - C++-Grundlagen
 - Speichermanagement in C++
 - Objektorientierung
 - Fortgeschrittene Themen
 - (Embedded) C-Programmierung
 - Zusatzaufgaben: Aufzugsimulator aus der Vorlesung selber implementieren
 - Gute Vorbereitung für die Klausur!

- **URL:**

<https://github.com/Echtzeitsysteme/tud-cpp/tree/master/exercises>

Demo: Virtuelle Maschine



1. Herunterladen der VM (URL, User, PW: siehe vorige Folie)

2. Importieren der Appliance
praktikum2017_v4.ova

WICHTIG (f. Pool):

!! Beim Importieren muss der Pfad für das **Virtuelle Plattenabbild** angepasst werden, sodass die VM in **C:\vms** liegt – ansonsten sprengt Ihr das **Quota**!

!! Der Pfad muss weiterhin auf "vmdk" enden.

!! Die VM wird **auf dem PC und nicht** in eurem Profil gespeichert!

3. **Genereller Hinweis:** *Ctrl (rechts)* ist die Host-Taste der VM → Kann zu Problemen bei Tastenkürzeln führen.

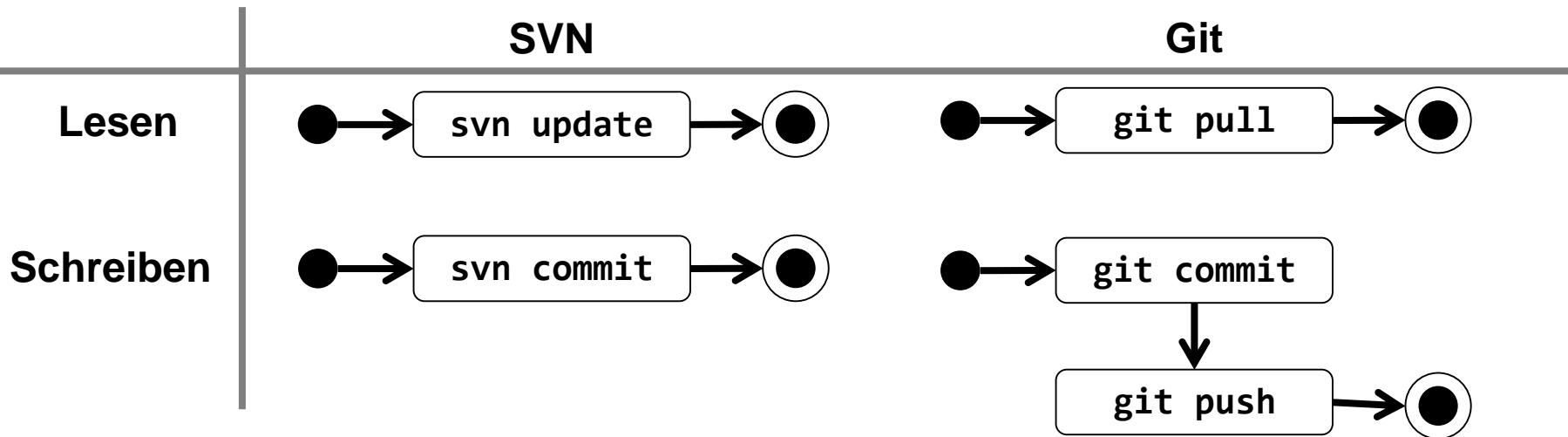
Beschreibung	Konfiguration
Virtuelles System 1	
Name	praktikum_1
Gast-Betriebssystem	Other/Unknown
CPU	1
RAM	2048 MB
DVD-Laufwerk	<input checked="" type="checkbox"/>
USB-Controller	<input checked="" type="checkbox"/>
Netzwerkadapter	<input checked="" type="checkbox"/> PCnet-FAST III (Am79C973)
Festplatten-Controller IDE	PIIX4
Festplatten-Controller IDE	PIIX4
Festplatten-Controller SATA	AHCI
Virtuelles Plattenabbild	C:\VM\praktikum_1\antergos-disk1.vmdk

Ein paar Worte zu Git



▪ Bereitstellung der Vorlesungs- und Übungsunterlagen

- Bereits auf der VM ausgecheckt, aber **regelmäßiges Pullen** sinnvoll!
- **Vorlesung** <https://github.com/Echtzeitsysteme/tud-cpp>
- **Wichtig:** git kann nur "pullen", wenn keine versionierten Dateien verändert sind. → Separates Repo für eigenen Code erstellen.





TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ERGÄNZENDE RESSOURCEN

Literaturvorschläge



- Bruce Eckel: Thinking in C++ (frei verfügbar
<http://mindview.net/Books/TICPP/ThinkingInCPP2e.html>)
- Mike Banahan: The C Book (frei verfügbar: http://publications.gbdirect.co.uk/c_book/)
- Scott Meyers: Effective C++ & More Effective C++
- Helmut Schellong: Moderne C Programmierung [Springer]
Ralf Schneeweiß: Moderne C++ Programmierung [Springer]
- Jürgen Wolf: Grundkurs C [Galileo] & Grundkurs C++ [Galileo]
- Bjarne Stroustrup: Einführung in die Programmierung mit C++
- TU München: Grundkurs C/C++
<http://www.ldv.ei.tum.de/lehre/programmierpraktikum-c/>,
<http://www.ldv.ei.tum.de/lehre/grundkurs-c/>
- FH Regensburg: Programmieren 1
<http://fbim.fh-regensburg.de/~sce39014/pg1/pg1-skript.pdf>
Heinz Tschabitscher: Einführung in C++
http://ladedu.com/cpp/zum_mitnehmen/cpp_einf.pdf
- LearnCPP.com <http://www.learncpp.com/>
- CProgramming.com <http://www.cprogramming.com/>
- Google C++ Style Guide: <https://google.github.io/styleguide/cppguide.html>
- Bytes'n'Objects: Kostenfreies Tutorial mit über 110 Lektionen:
<http://bytesnobjects.dev.geekbetrieb.de/cpp>

Online C++-Referenzen



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- Ausführliche Dokumentation von Standardbibliotheken
- Erläuterung von **Best Practices** und **Programmierkonzepten** für C++

<http://www.cplusplus.com/>

The screenshot shows the cplusplus.com website. The navigation bar includes a search field, a 'Go' button, and tabs for 'Reference' and '<iostream>'. The left sidebar has sections for 'Information', 'Tutorials', 'Reference', 'Articles', and 'Forum'. Under 'Reference', there's a tree view with 'C library', 'Containers', 'Input/Output' (which is expanded to show '<fstream>', '<iomanip>', '<ios>', '<iostfwd>', '<iostream>', '<iostream>', '<ostream>', '<sstream>', '<streambuf>'), 'Multi-threading', and 'Other'. The main content area is titled '<iostream>' and describes it as the 'Standard Input / Output Streams Library'. It notes that including this header automatically includes '<iomanip>' and/or '<iostfwd>'. A note at the bottom says that the 'iostream' class is mainly declared in '<iostream>'. There's also a section for 'Objects'.

<http://en.cppreference.com/w/>

The screenshot shows the en.cppreference.com website. The top navigation bar has tabs for 'C++ reference', 'C++98', 'C++03', 'C++11', and 'C++14'. The main content area is titled 'C++ reference'. It lists several categories: 'Language' (ASCII chart, Compiler support), 'Containers library' (array (C++11), vector - deque, list - forward_list (C++11), set - multiset, map - multimap, unordered_set (C++11), unordered_multiset (C++11), unordered_map (C++11), unordered_multimap (C++11), stack - queue - priority_queue), 'Headers' (Preprocessor, Keywords, Operator precedence, Escape sequences, Fundamental types), 'Concepts', 'Utilities library' (Type support, Dynamic memory management, Error handling, Program utilities, Date and time, bitset, Function objects, pair - tuple (C++11), integer_sequence (C++14)), 'Algorithms library', 'Iterators library', and 'Numerics library' (Common mathematical functions, Complex numbers, Pseudo-random number generation).

C++-FAQ (<https://isocpp.org/wiki/faq/>)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

C++ FAQ Sections

Overview Topics

- Big Picture Issues
- Newbie Questions & Answers
- Learning OO/C++
- Coding Standards
- User Groups Worldwide (map 

Starting From Another Language

- Learning C++ if you already know Objective-C
- Learning C++ if you already know C# or Java
- Learning C++ if you already know C
- How to mix C and C++

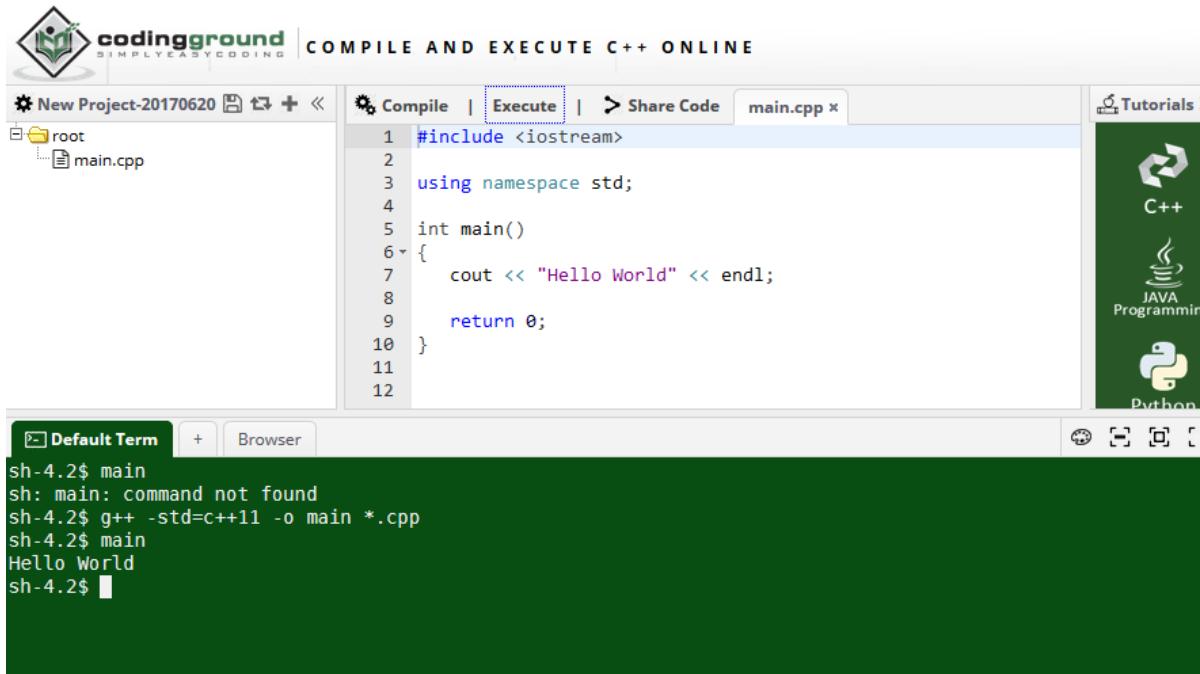
Learning C++ if you already
know [...] Java

General Topics

- Built-in / Intrinsic / Primitive Data Types
- Input/output via `<iostream>` and `<cstdio>`
- Const Correctness
- References

Const Correctness,
Referenzen,...

- Man kann C++-Code auch online testen.
- Beispiele:
 - <http://cpp.sh>
 - https://www.tutorialspoint.com/compile_cpp11_online.php



The screenshot shows the CodingGround online compiler interface. The main window title is "COMPILE AND EXECUTE C++ ONLINE". On the left, there's a file tree showing a project named "New Project-20170620" with a single file "main.cpp" under a "root" folder. The code editor on the right contains the following C++ code:

```
1 #include <iostream>
2
3 using namespace std;
4
5 int main()
6 {
7     cout << "Hello World" << endl;
8
9     return 0;
10 }
```

Below the code editor is a terminal window titled "Default Term" showing the execution process:

```
sh-4.2$ main
sh: main: command not found
sh-4.2$ g++ -std=c++11 -o main *.cpp
sh-4.2$ main
Hello World
sh-4.2$
```

To the right of the terminal, there's a sidebar with links for "Tutorials" (C++, JAVA Programming, Python) and other programming-related icons.



Fragen?



Programmierpraktikum C und C++

Grundlagen



ES Real-Time Systems Lab

Prof. Dr. rer. nat. Andy Schürr

Dept. of Electrical Engineering and Information Technology

Dept. of Computer Science (adjunct Professor)

www.es.tu-darmstadt.de

Roland Kluge

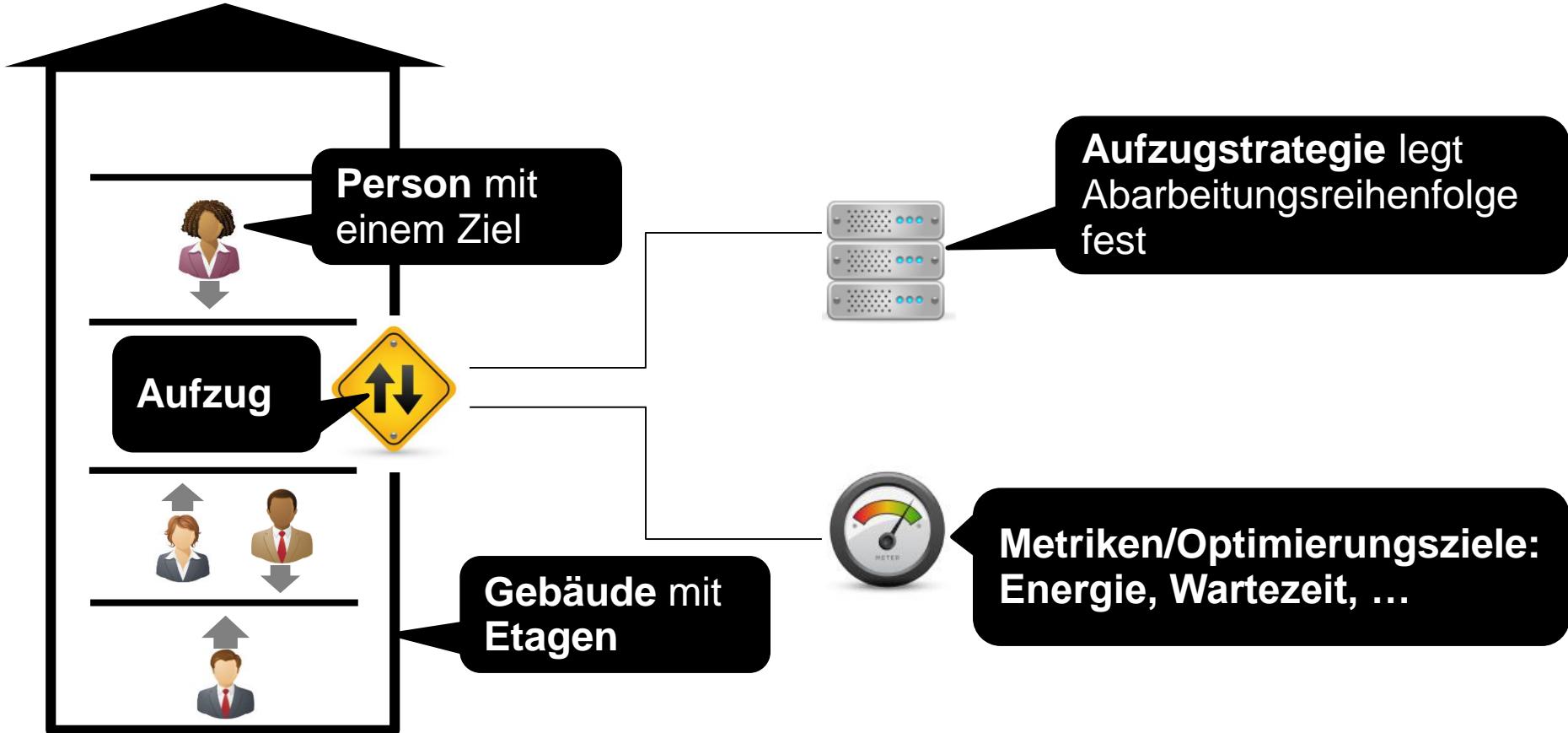
roland.kluge@es.tu-darmstadt.de



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

LAUFENDES BEISPIEL

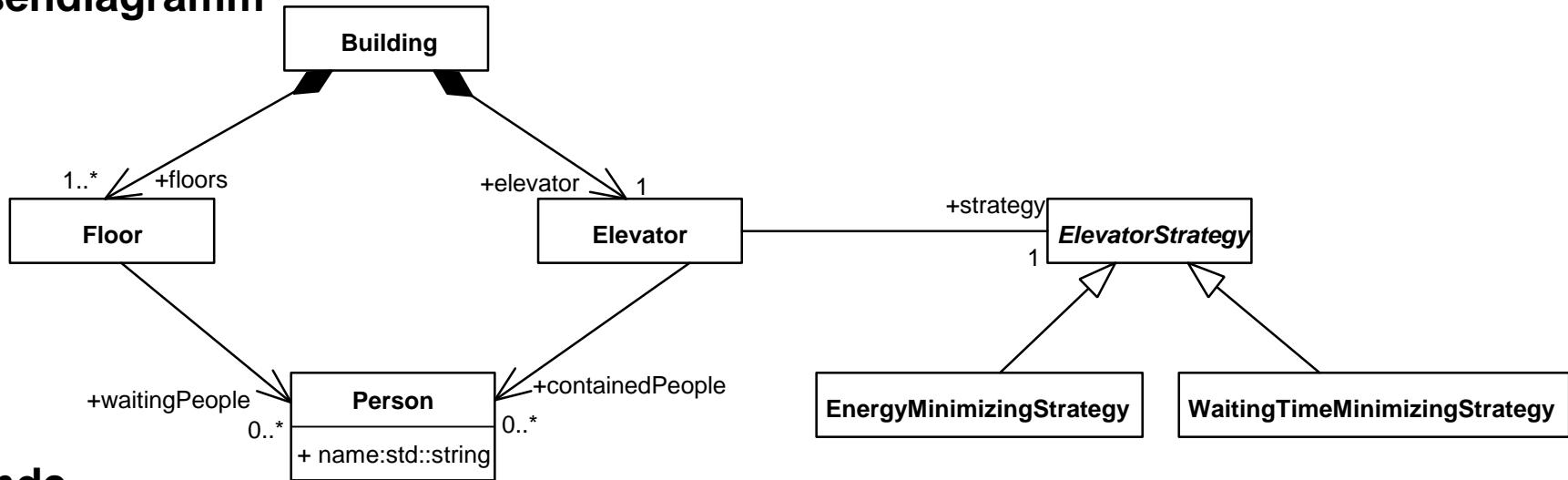
Laufendes Beispiel: Aufzugsimulation



Laufendes Beispiel: Klassendiagramm



Klassendiagramm



Legende

- Building** **ElevatorStrategy** Klasse und abstrakte Klasse
- Floor** **Person** Assoziation mit Rollenname und Multiplizität und String-Attribut von Person
- ElevatorStrategy** <--> **EnergyMinimizingS.** Vererbung ("EnergyMin.S. ist eine ElevatorS.")
- Building** ♦--> **Floor** Aggregation ("Ein Floor ist immer Teil eines Buildings")



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

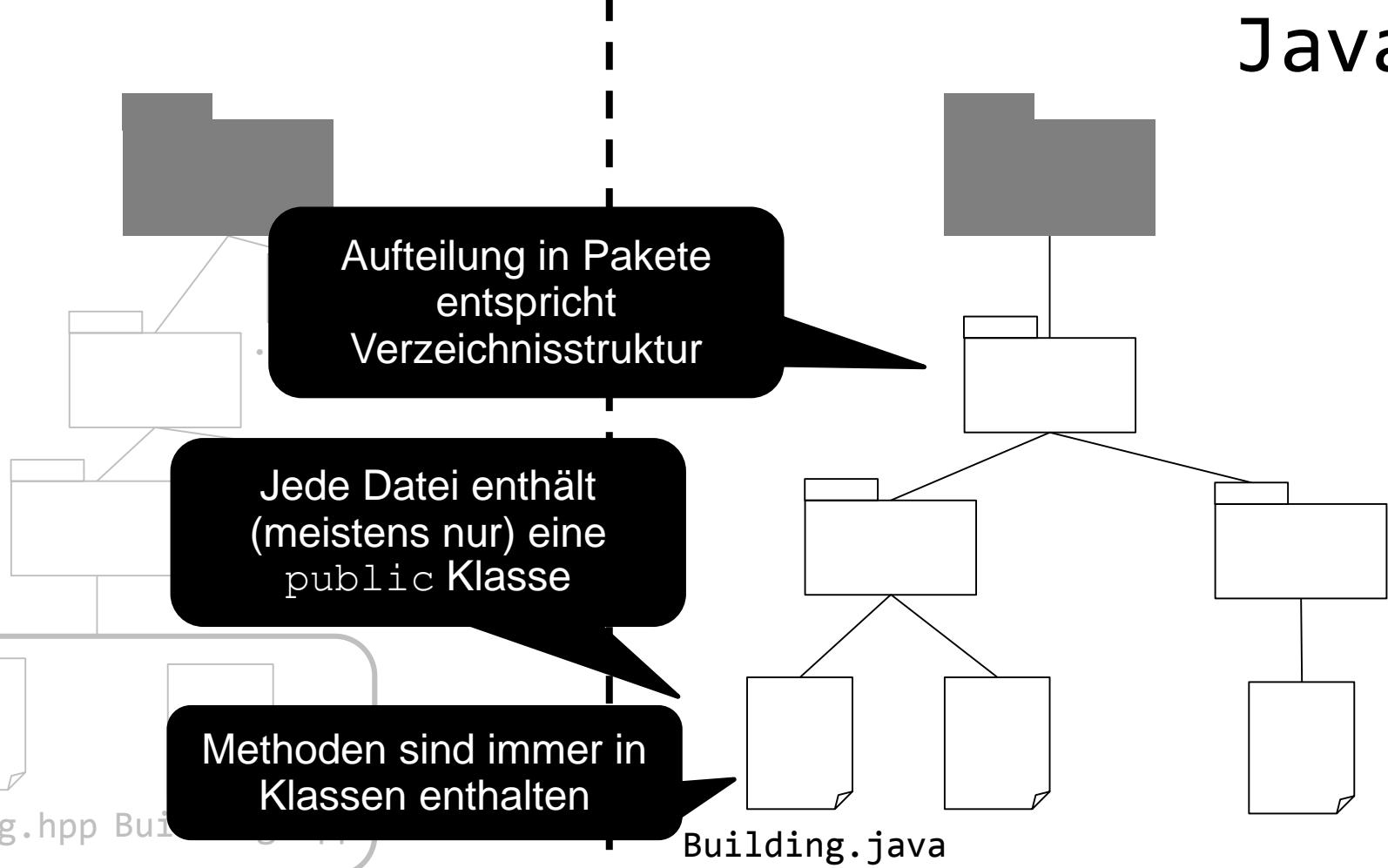
PROJEKTSTRUKTUR

Projektstruktur



C++

Java



Intermezzo



Was ist der Unterschied zwischen Funktion und Methode?

Wie implementiert man **Funktionen** in Java?

Ist es sinnvoll, die **Paketstruktur** an die **Verzeichnisstruktur** zu binden?

Darf man in Java **mehrere Klassen** in einer **Datei** implementieren?

Hier seid Ihr gefragt! ☺



Projektstruktur



C++

Java

Implementierungsdateien mit
Funktionen (nicht Methoden!)
sind möglich und üblich

Beliebige Verzeichnisstruktur -
hat nichts mit Sichtbarkeit zu tun

Klassen werden in **Header-** und
Implementierungsdatei getrennt

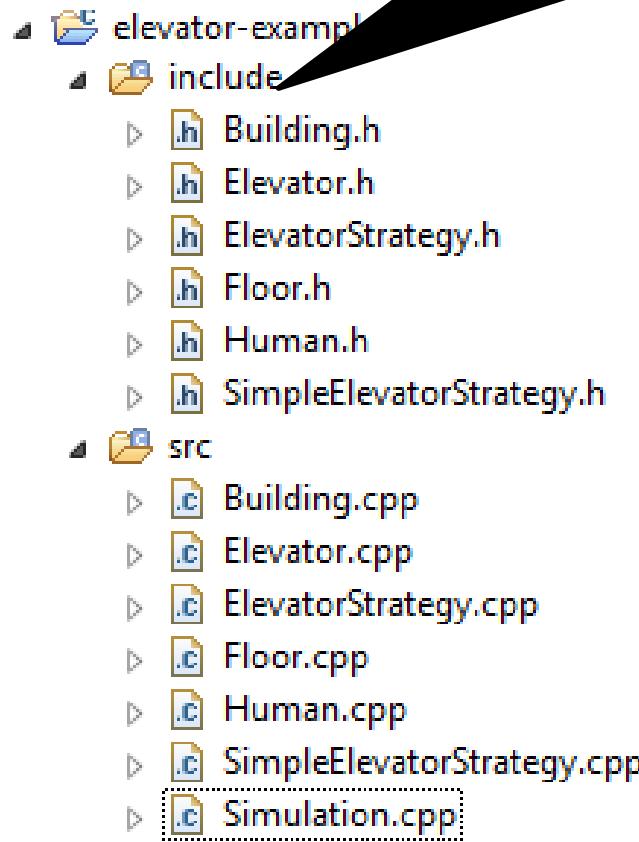
Mehrere Klassen können flexibel in
Header/Implementierungsdateien
kombiniert werden

Building.hpp Building.cpp

Projektstruktur

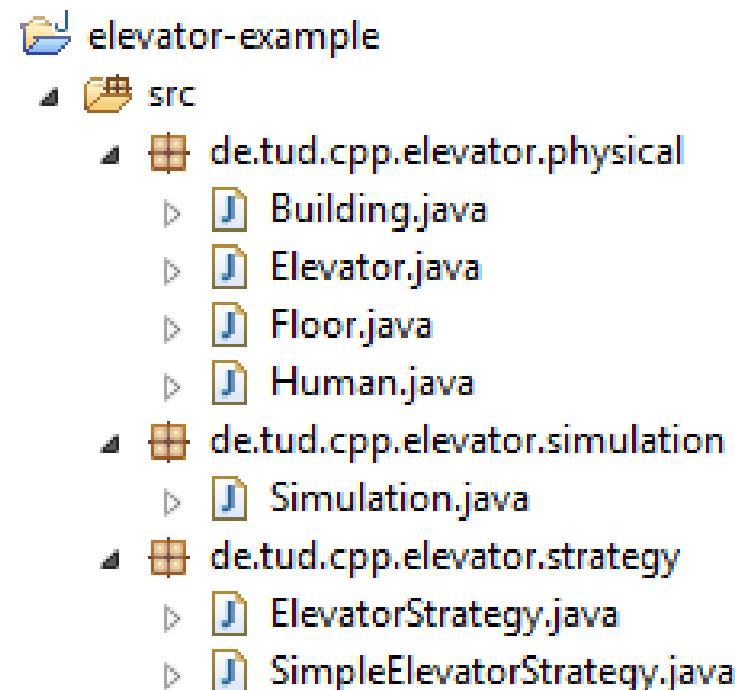


C++



Mögliche Struktur: Getrennte Ordner für Header und Implementierung

Java



Header und Implementierungs-Dateien



```
/*
 * Part of the elevator simulation
 * A Building is a container for
 * Floors and the Elevator
 */

#ifndef BUILDING_HPP_
#define BUILDING_HPP_

#include <vector>

#include "Floor.hpp"
#include "Elevator.hpp"

class Building {
public:
    Building(int numberOffFloors);
    ~Building();

    void runSimulation();

private:
    std::vector<Floor> floors;
    Elevator elevator;
};

#endif /* BUILDING_HPP_ */
```

Kommentare wie in Java
/* ... */ mehrzeilig
// einzeilig

Include-Anweisungen wie Import-Befehle in Java:
<...> für Bibliotheken,
"..." für eigenen Code

Definition der Klasse mit Deklaration der Methoden

Der Header enthält die nach "außen" sichtbare Schnittstelle einer Klasse

Header und Implementierungs-Dateien



```
#include <iostream>
#include "Building.hpp"

using std::cout;
using std::endl;

Building::Building(int number_of_floors) :
    floors(number_of_floors, Floor()) {
    cout << "Creating building with "
        << number_of_floors << " floors."
        << endl;
}

Building::~Building() {
    cout << "Destroying building." << endl;
}

void Building::runSimulation() {
    cout << "Simulation running ..." << endl;
}
```

Header-Datei wird eingebunden
("exakte" Einfügung)

Using-Befehle sind wie statische Imports in Java (*cout* statt *std::cout*)

VORSICHT: using's sollten stets hinter den #includes auftreten.

Methoden werden implementiert
(Details später)

Intermezzo



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Warum ist die Trennung in Header- und Implementierungsdateien **hilfreich**?

Warum ist die Trennung in Header- und Implementierungsdateien **eine Fehlerquelle**?



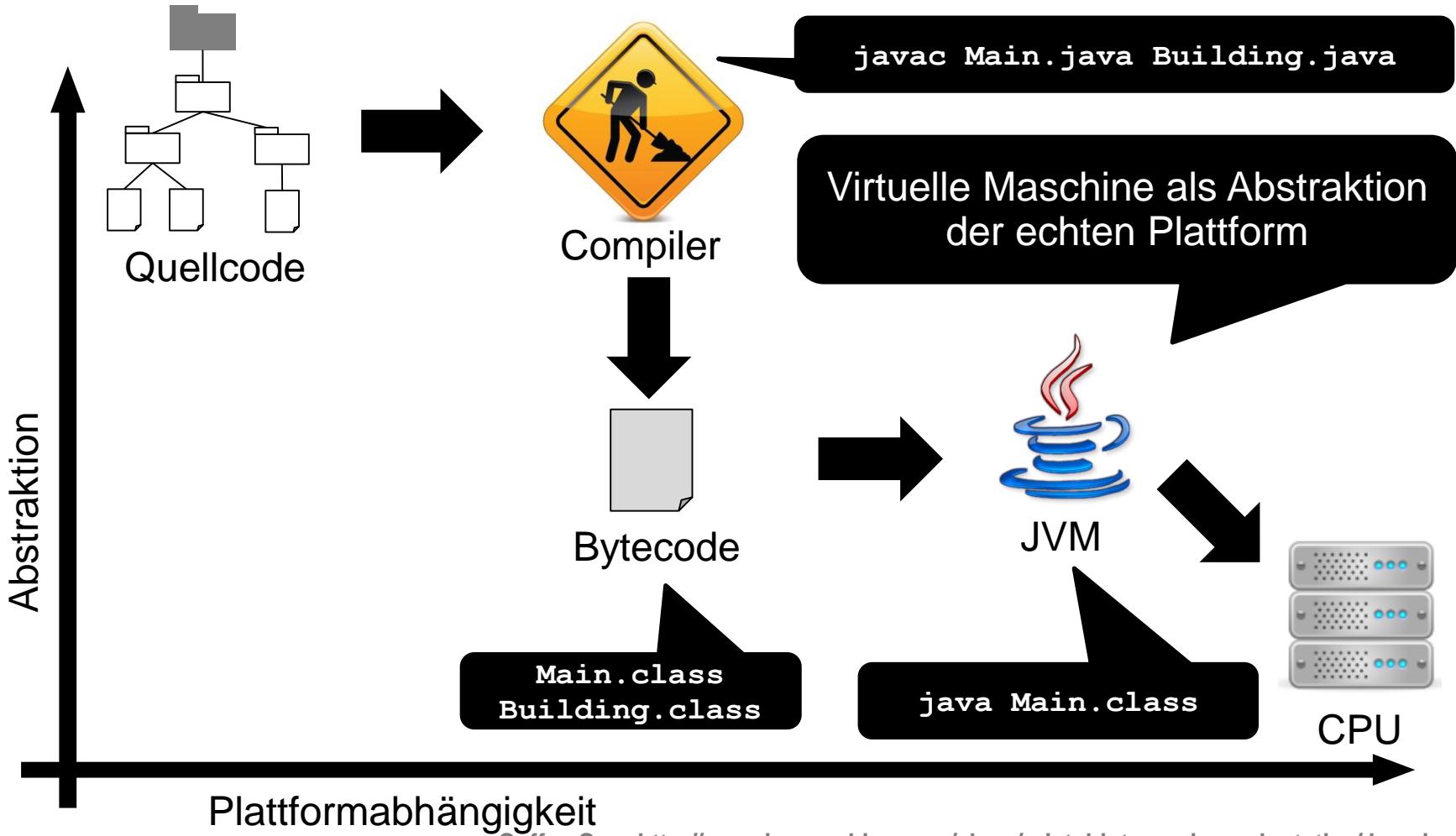


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

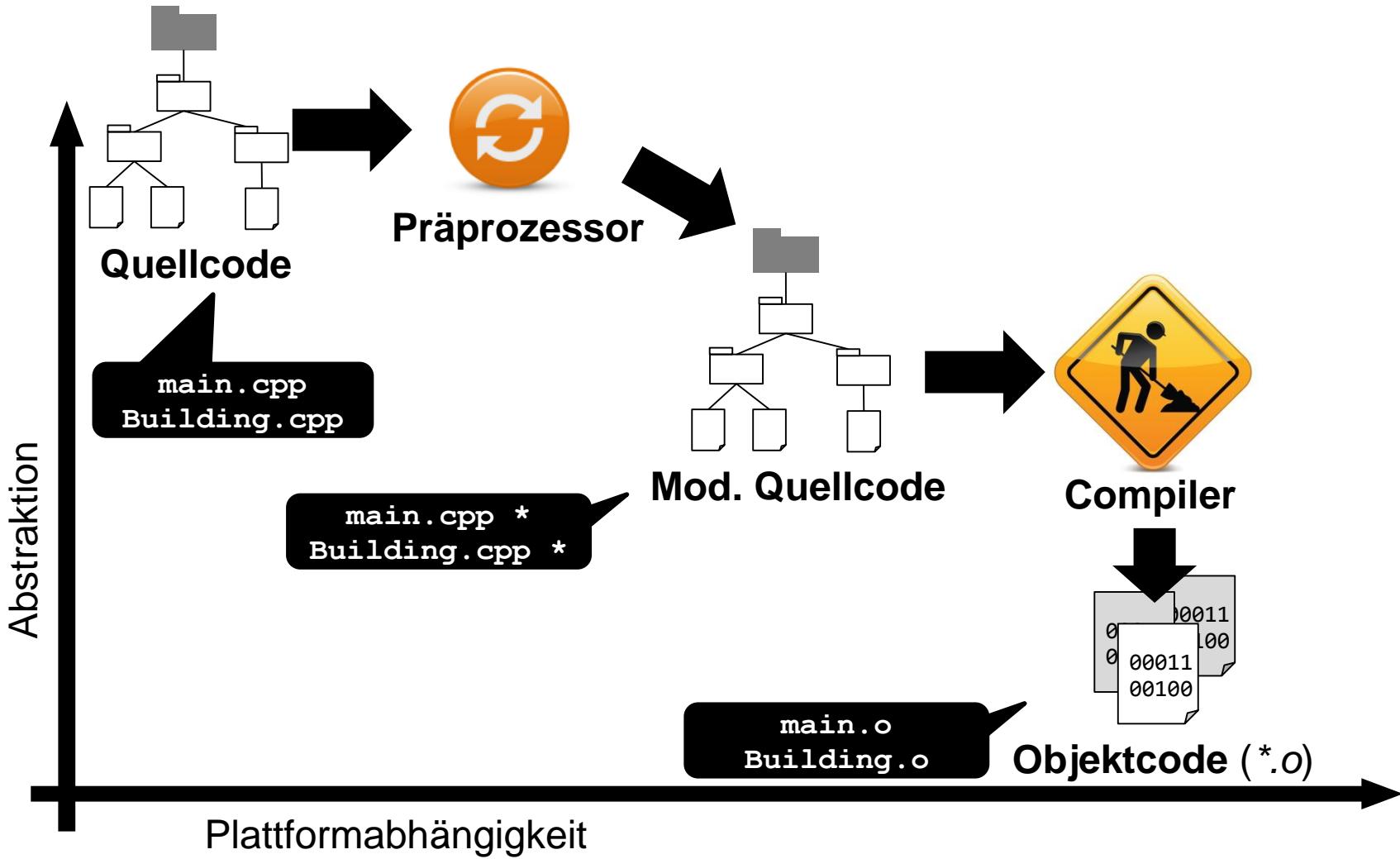
KOMPILEIERUNG



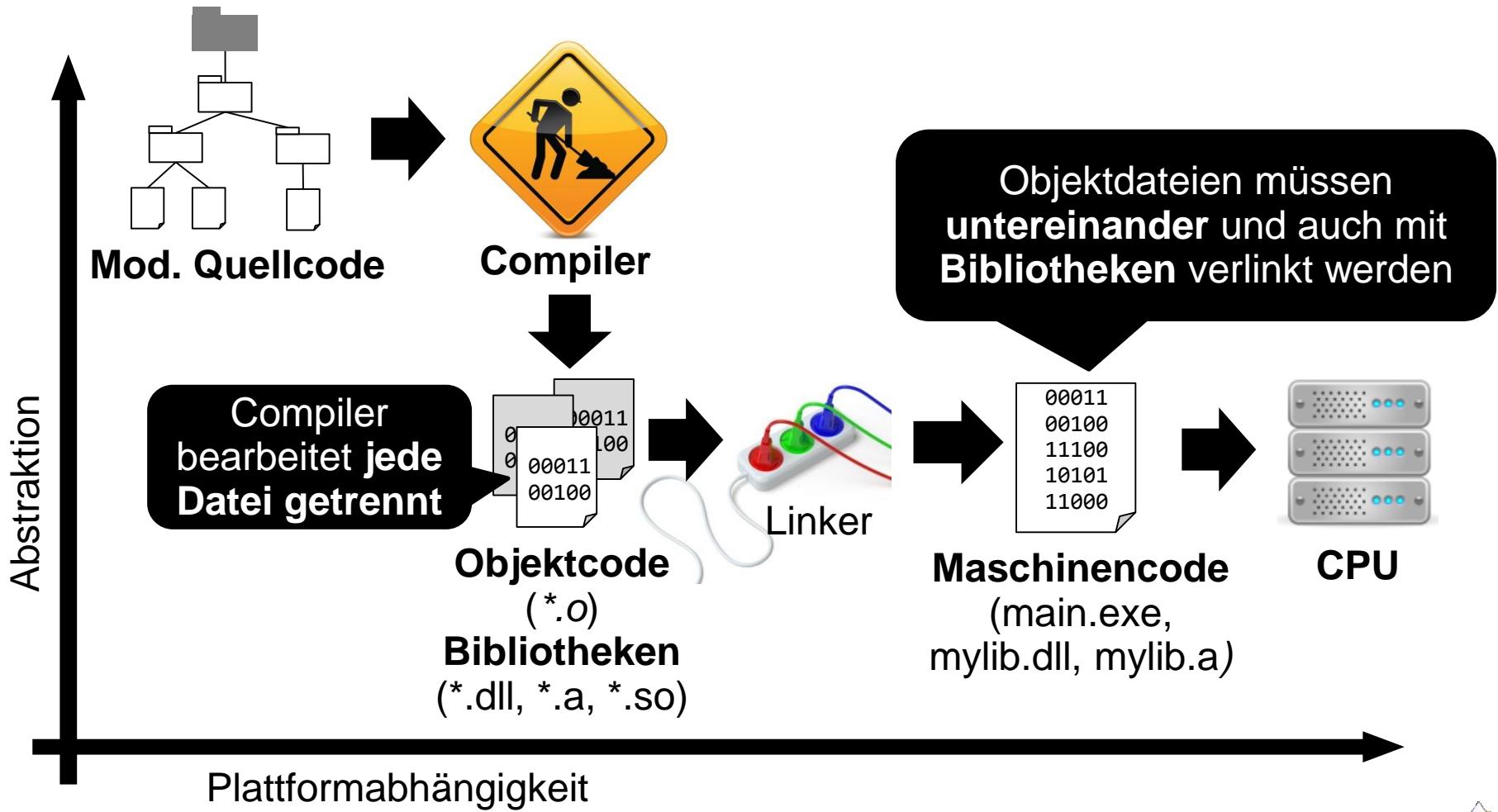
Kompilierung in Java



Kompilierung für C/C++ I



Kompilierung für C/C++ II



Statisches und dynamisches Linken



Statisches Linken

(Static Libraries und Shared Archives)

- Bibliothek muss zur **Linkzeit** vorhanden sein.
- "Kopie" der Bibliothek wird im Compilat (*main.exe*) abgelegt.
- Unterschied zwischen SL und SA eher klein

→ Compilat ist "**standalone**", aber (oft wesentlich) **größer** als beim dynamischen Linken

Dynamisches Linken

(Shared Objects und DLLs)

- *Shared Objects* müssen zur **Linkzeit** und zur **Laufzeit** vorhanden sein.
- *DLLs* müssen **nicht** zur **Linkzeit** und **nur beim konkreten Aufruf** zur **Laufzeit** verfügbar sein.

→ Compilat ist "**minimal**", braucht aber zur Laufzeit **zusätzliche Abhängigkeiten**

Was genau macht der Präprozessor?



```
#ifndef BUILDING_HPP_
#define BUILDING_HPP_

#include <vector>

#include "Floor.hpp"
#include "Elevator.hpp"

class Building {
public:
    Building(int numberOffFloors);
    ~Building();

    void runSimulation();

private:
    std::vector<Floor> floors;
    Elevator elevator;
};

#endif /* BUILDING_HPP_ */
```

Include Guard: schützt vor mehrmaligem Einbinden von *Building.h*

Dadurch können wir alle benötigten Header überall (beliebig oft) einbinden.

Funktionsweise:

- #define-Konstanten auswerten (→ #if(n)def) und ersetzen
- #include-Anweisungen durch Dateiinhalt ersetzen (rekursiv!)

Weitere Anwendungsfälle des Präprozessors:

- DEBUG vs. NDEBUG/RELEASE
- Betriebssystemerkennung (z.B. WIN32, UNIX)
- Konstanten (in C)

https://en.wikipedia.org/wiki/Include_guard

Was passiert ohne Include Guards?



Vor dem Präprozessor

```
/* Building.hpp */  
#include "Floor.hpp"  
#include "Elevator.hpp"  
  
class Building {};
```

```
/* Elevator.hpp */  
#include "Floor.hpp"  
  
class Elevator {};
```

```
/* Floor.hpp */  
class Floor {};
```

Nach dem Präprozessor

```
/* Building.hpp */  
// #include "Floor.h"  
  
class Floor {};  
  
// #include "Elevator.hpp"  
  
// #include "Floor.hpp" (recursive)  
  
class Floor {};  
  
class Elevator {};  
  
class Building {};
```

One Definition Rule:
Jede Klasse/Methode/...
durf höchstens einmal
definiert werden

**Die meisten Probleme beim Arbeiten mit C++
gehen auf Regelverletzungen zurück.**

http://en.cppreference.com/w/cpp/language/definition#One_Definition_Rule

Was passiert ohne Include Guards? Lösung.



Vor dem Präprozessor

```
/* Building.hpp */  
#include "Floor.hpp"  
#include "Elevator.hpp"  
  
class Building {};
```

```
/* Elevator.hpp */  
#include "Floor.hpp"  
  
class Elevator {};
```

```
/* Floor.hpp */  
#ifndef FLOOR_HPP_  
#define FLOOR_HPP_  
  
class Floor {};  
  
#endif
```

Nach dem Präprozessor

```
/* Building.hpp */  
// #include "Floor.h"  
// FLOOR_HPP_ undefined -> defined  
  
class Floor {};  
  
// #include "Elevator.hpp"  
  
// #include "Floor.hpp" (recursive)  
  
class Elevator {};  
  
class Building {};
```

Include Guards: #ifndef vs. #pragma once



- Anstelle der Klammer aus #ifndef, #define, #endif kann man auch #pragma once verwenden → **kompakter, weniger fehleranfällig**
- #pragma once ist **(noch) nicht im Standard**, wird aber von den meisten Compilern unterstützt.
- Liste von kompatiblen Compilern:
https://en.wikipedia.org/wiki/Pragma_once#Portability

```
#ifndef BUILDING_HPP_
#define BUILDING_HPP_

#include <vector>
#include "Floor.hpp"
#include "Elevator.hpp"

class Building {
public:
    Building(int number_of_floors);
    ~Building();

    void runSimulation();
};

#endif /* BUILDING_HPP_ */
```

```
#pragma once

#include <vector>
#include "Floor.hpp"
#include "Elevator.hpp"

class Building {
public:
    Building(int number_of_floors);
    ~Building();

    void runSimulation();
};
```

Anwendungsmöglichkeiten von #define

Die Direktive #define kann auf drei Arten eingesetzt werden

- **Symbol:** `#define BUILDING_HPP`
 - Das Symbol BUILDING_HPP existiert (ohne Wert).
- **Konstante:** `#define BUILDING_HPP 1`
 - Alle Auftreten von BUILDING_HPP werden mit 1 ersetzt
 - Heute unüblich, dank "const" und "static" (siehe später)
- **Funktion:** `#define MAX(a,b) ((a < b) ? (b) : (a))`
 - Verwendung: `std::cout << "MAX(1,2)" : " " << MAX(1,2) << std::endl;`
 - N.B.: **Ternärer Operator:** If-Condition ? Then-Value : Else-Value



- **Grundlegendes Konzept** in den meisten Programmiersprachen!
- **Deklaration**
 - ... gibt an, dass ein Element (z.B. Variable, Funktion, Klasse) **existiert** (→ Größe im Speicher etc.) **ohne** ihm dabei einen **konkreten Wert** zuzuweisen.
 - Beispiele: `int x; void myFunction(); class MyClass;`
- **Definition**
 - ... belegt ein Element mit einem **konkreten Wert**
 - Je nach Element ist eine **Redefinition** möglich
 - Beispiele: `x=3; void myFunction() /* function def. */;`
`class MyClass /* class def. */;`
- Deklaration und Definition können **gleichzeitig geschehen**
 - Wenn möglich, vorzuziehen!
 - Trennung erlaubt es aber, **zyklische Abhängigkeiten aufzubrechen**.
 - z.B. `int x = 3;` (Rest gleich wie bei Definition)

Praktisches Beispiel: http://www.cprogramming.com/declare_vs_define.html

Inlining und Code-Optimierung



```
class Floor {  
public:  
    Floor(int number);  
    Floor(const Floor& floor);  
    ~Floor();  
  
    inline int getNumber() const {  
        return number;  
    }  
  
    inline void setNumber(int n) {  
        number = n;  
    }  
  
private:  
    int number;  
};
```

Floor.hpp

- **inline** zeigt an, dass statt eines Methoden-/Funktionsaufrufs direkt der Code an jeder Aufrufstelle eingefügt werden soll.
- **Heutzutage:** Nur ein **Hinweis** an den Compiler – nicht "verpflichtend".
 - I.d.R. **nicht mehr notwendig**, da der Compiler automatisch über Optimierungen entscheidet
(Flags -O1, -O2, -O3, ...)

https://en.wikipedia.org/wiki/Inline_function

class vs. struct vs. union



In C++ gibt es (mind.) drei Wege zur Implementierung "**komplexer Datentypen**".

- **class**
 - Standardmittel in C++
- **struct**
 - **Geerbt von C** (→ µC-Teil), u.a. für Binärkompatibilität (z.B. Datentypen in `ctime`)
 - In C++: **Konstruktor, Methoden, Vererbung** möglich
 - Unterschied zu `class`: standardmäßig sind alle Member **public**
- **union** [eher exotisch]
 - **Spezialdatentyp**, zur Speicherung "alternativer" Member
 - Belegung ist klar vom Kontext.
 - Höhere **Effizienz** durch gemeinsame Speichernutzung

```
struct RawVector3D {  
    int x;  
    int y;  
    int z;  
};  
  
int main() {  
    RawVector3D myVec;  
    myVec.x = 5;  
}
```

```
union ResultValue {  
    int exitCode;  
    bool flag;  
};  
  
int main() {  
    ResultValue result1;  
    result1.exitCode = 3;  
    result1.flag = true;  
    // result1.exitCode == 1;  
}
```

<https://blogs.mentor.com/colinwalls/blog/2014/06/02/struct-vs-class-in-c/>
<http://en.cppreference.com/w/cpp/language/union>

Intermezzo



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Wie ist es möglich, dass man erfolgreich **kompilieren** aber **nicht linken** kann?

Wozu braucht man einen **Präprozessor**?

Welche **Konsequenzen zieht eine Änderung** an **inline**-Methoden (im Header) **nach sich** im Vergleich zu Änderungen in der Implementierungsdatei?

Wo sollte man eigentlich **dokumentieren**:
Im Header oder in der Implementierungsdatei?





TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

PROGRAMMSTART

Systemstart



- main-Funktion in C++ entspricht main-Methode in Java.
- Zwei Formen:
 - parameterlos
 - mit Kommandozeilenparametern (argv[0] enthält Pfad zum Programm)

```
#include "Building.hpp"

int main() {
    Building building(3);
    building.runSimulation();
}
```

Kein Rückgabewert
(= return 0; = alles OK)

```
#include <iostream>
#include <cstdlib>
#include "Building.h"
int main(int argc, char **argv){
    if (argc >= 2) {
        unsigned int levels = std::atoi(argv[1]);
        Building hbi(levels);
        building.runSimulation();
    }
}
```

Arrays

C++-Datentypen können vorzeichenlos (unsigned) sein.

In C(++) ist die Reihenfolge wichtig!



- Der C++-Compiler analysiert ganz dumm (dafür aber effizient) jede Datei von **vorne nach hinten**. (In Java: beliebige Reihenfolge)

```
int main() {  
    myFunction();  
}  
  
void myFunction() {}
```

- Abhilfe:** Aufrufende Funktion ans Ende stellen (geht nicht immer) oder Funktion deklarieren.

```
// Declaration of myFunction  
void myFunction();  
  
int main() {  
    myFunction();  
}  
  
// Definition of myFunction  
void myFunction() {}
```

Funktionsprototyp

Unterschiede zwischen Java- und C/C++-Compiler



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Java

- **Java-Code → Java-Bytecode** (relativ ähnliche Struktur)
- 1:1-Beziehung zwischen .java- und .class-Dateien → inkrementelle Compilierung
- Sprachumfang **von Java deutlich kleiner als C++**
- **Optimierungen:** fast ausschließlich zur **Laufzeit** durch die JVM
- Auflösung **externer Abhängigkeiten** über Java **Classpath** (~ dyn. Linken)

C/C++

- **C/C++-Code → Assembler-Code**
 - Komplexere Transformation, (oft) inklusive Linken
 - Im einfachsten Fall: eine "fette" Datei als Ergebnis → keine Inkrementalität
- Auflösung von **externen Abhängigkeiten** über **#include** (Compile-Schritt) und statisches/dynamisches Linken (Link-Schritt)
- **Optimierungen zur Compile-Zeit**



Eine lose Übersicht über

WEITERE KONZEPTE IN C++

Enumerationen



- Enumerationen sind **Klassen mit einer beschränkten Anzahl von Instanzen**
- Enum-Konstanten können **ganzzahlige Werte zugewiesen werden** (DOWN=-1)
- Es existieren auch **anonyme Enumerationen**
 - z.B. `enum {UP, DOWN} elevatorButton;` (führt Variable `elevatorButton` ein)
- **Java:** Enumerationen können zusätzlich Konstruktoren, Methoden, Felder haben

```
#include <iostream>

enum Button {
    UP, DOWN = -1
};

int main() {
    Button d = UP;
    switch(d) {
        // Traditional style, may conflict with preprocessor
        case UP:           std::cout << "Up!" << std::endl; break;
        // Since C++11
        case Button::DOWN: std::cout << "Down!" << std::endl; break;
        default:           std::cout << "Cannot handle this!" << std::endl;
    }
}
```

<http://en.cppreference.com/w/cpp/language/enum>

Switch-Case



- Als Bedingung von switch-case sind in C++ nur ganzzahlige Typen (**int**, **long**, ...) und Enumerationen möglich (+ Referenzen darauf).
- **Falldefinition** mittels case-Label (z.B. **case UP:**)
- Jeder **Fall** sollte beendet werden mittels **break;** (sonst "fall through")
- Falls kein Fall zutrifft, kann man **default:** als Standardfall nutzen.
- **Java:** Seit 1.7 auch Strings möglich.

```
#include <iostream>

enum Button {
    UP, DOWN = -1
};

int main() {
    Button d = UP;
    switch(d) {
        // Traditional style, may conflict with preprocessor
        case UP:           std::cout << "Up!" << std::endl; break;
        // Since C++11
        case Button::DOWN: std::cout << "Down!" << std::endl; break;
        default:           std::cout << "Cannot handle this!" << std::endl;
    }
}
```

Namenskonflikte vermeiden mit Namespaces



- **Java:** package x.y.z; class X;
 - **Zugriff:** import und import static in Java
 - **Standardnamensraum:** [leer]
- **C++:** namespace x{};, class X{};, struct X{};
 - **Zugriff:** using-Direktive zum Importieren
 - **Standardnamensraum:** namespace{} → ::sum(1,2);

```
int sum(int a, int b)
{ return a+b; }

namespace my_utils {
    int sum(int a, int b)
    { return a+b; }
}

class MyUtils {
public:
    int sum(int a, int b);
};

MyUtils::sum(int a, int b)
{ return a+b; }
```

```
int main1() {
    sum(1,2);
    my_utils::sum(1,2);

    using my_utils::sum; // ERROR<-conflict
}

int main2() {
    using my_utils::sum;
    sum(1,2);
}
```

<http://en.cppreference.com/w/cpp/language/namespace>



- **Bereichsweise, nicht attribut-/methodenweise, Nur innerhalb einer class-Definition, für Attribute und Methoden (= Members)**
 - **public:** alle folgenden Members sind unbegrenzt nutzbar
 - **protected:** alle folgende Members sind nur in dieser und Unterklassen nutzbar
 - **private:** alle folgenden Members sind nur in dieser Klasse nutzbar
 - **friend f()** erlaubt Funktion/Methode f() Zugriff auf private Members dieser Klasse
- **Anders als in Java:** keine package-/default-Sichtbarkeit
 - via `::`-Operator oder **using** können alle Funktionen und **public**-Methoden genutzt werden
 - Beispiel: `using std::string;`

Das Schlüsselwort static



Java

- Markiert **Zugehörigkeit zur Klasse**, nicht zu einer Instanz
 - z.B.: `static int instanceCount = 0; // incremented in constructor`
- Definition von **Konstanten**
 - z.B. `private static final int MAX_FLOOR_COUNT = 100;`

C/C++:

- **Als Zugehörigkeitsmodifikator und für Konstanten:**
 - Verwendung wie bei Java
 - Kombination mit `const`-Modifier (s. später)
 - z.B. `static const int MAX_FLOOR_COUNT = 100;` (in class-Definition)
 - z.B. `const int Building::MAX_FLOOR_COUNT = 100;` (außerhalb, **ohne** `static!`; One Definition Rule beachten)
- **Als Sichtbarkeitsmodifikator:**
 - Vor allem in C (s.a. später)
 - `static` Funktion/Variable ist nur innerhalb der Implementierungsdatei sichtbar; ansonsten: globale Funktion/Variable

<http://en.cppreference.com/w/cpp/keyword/static>



Java

- Quote-Literale werden zu **java.lang.Strings**
- Beispiel:
 - `System.out.println("Hello World".getClass()); // java.lang.String`

C++

- Quote-Literale werden zu **C-Strings = char-Arrays**
- Beispiele:
 - `const char *myString = "Hello World.";` // A C-style string
 - `std::string myString2("Hello World.");` // explicit constructor invoc.
 - `std::string myString3 = "Hello World";` // implicit constructor invoc.

Standard-Bibliotheken in C++



- ISO-genormte, stetig wachsende Standardbibliothek
- Alle Komponenten liegen in `namespace std`
- Komponenten:
 - I/O (z.B. `<iostream>`, `<sstream>`)
 - Strings (z.B. `<string>`, `<regex>`)
 - Standard Template Library (STL)
 - Generische Datenstrukturen
(z.B. `<vector>`, `<array>`, `<list>`, `<priority_queue>`)
 - Generische Algorithmen
(z.B. `<algorithm>`, `<iterator>`, `<functional>`)

Boost: "Brutschränk" für C++-Standardkomponenten



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



<http://www.boost.org/>

"...one of the most highly regarded
and expertly designed C++ library
projects in the world."

Herb Sutter, Andrei Alexandrescu, C++ Coding Standards

Array

Filesystem

Lambda

Odeint

Chrono

Function(al)

Math
(advanced)

Smart Ptr

Date Time

Graph

MPI

System



Java

- Operatoren in **Sonderrolle, fest belegt** ("Lehre aus Erfahrung mit C++)
- Fixe Präzedenz (= Abarbeitungsreihenfolge bei mehreren Operatoren)
 - Im Ausdruck `int x = a + 1;` wird zuerst `'+'` und dann `'='` ausgewertet.
- Beispiel: `++, --` (Postfix) vor `++,--,+, -, ~, !` vor `*, /, %` vor ...

C++

- Operatoren als **Syntactic Sugar** und beliebig überschreibbar
 - `a + b` gleichwertig zu `operator+(a,b)` oder `a.operator+(b)`
 - Extrem wichtig: Zuweisungsoperator `operator=` (siehe später)
- Fixe Präzedenz
- `::` vor `++, --` (Postfix), `(), [], . , ->` vor `++, --, ...`

<https://docs.oracle.com/javase/tutorial/java/nutsandbolts/operators.html>

<http://en.cppreference.com/w/cpp/language/operators>

http://en.cppreference.com/w/cpp/language/operator_precedence



Exkurs: Typumwandlung (Casting)



Ein (Type) Cast ändert den Typ einer Variablen, also die Interpretation der gespeicherten Information.

Java

- **Casts in Sonderrolle** (Sprachfeature)
- Nur Typecast: SpecialBuilding sb = (SpecialBuilding)b;
- Laufzeitfehler bei Fehlschlag: java.lang.ClassCastException

C++:

- **Casts als reguläre Funktionen**, große Vielfalt und durch Bibliotheken erweiterbar
- `int i = (int) 3.4;` C-Stil; beliebige Umwandlung ist möglich
- `static_cast<int>(3.0)` Umwandlung ohne Laufzeitcheck
- `dynamic_cast<SC*>()` Umwandlung in Typ SC* mit Laufzeitcheck
- `reinterpret_cast<C>(x)` beliebige Umwandlung
- `const_cast<char*>()` Constness entfernen (s. später)

<http://www.cplusplus.com/doc/tutorial/typecasting/>

Iterierungskonzepte in C++



Java

- **For:** `for(int i = ...; i < ...; ++i){/*loop body*/}`
- **While-Do:** `while(/*condition*/*){/*loop body*/}`
- **Do-While:** `{/*loop body*/} while(/*condition*/)`
- **Foreach:** `for(final String s : new String[]{"a", "b", "c"}){/*body*/}` (seit Java 1.7)
- **Iterator:** `Iterator<Object> iter = list.iterator(); while(iter.hasNext()) {Object o = iter.next();}`
 - z.B. um Elemente leicht überspringen zu können

C++

- **For:** `for(int i = ...; i < ...; ++i){/*loop body*/}` (wie in Java),
- **While-Do:** `while(/*condition*/*){/*loop body*/}` (wie in Java),
- **Do-While:** `{/*loop body*/} while(/*condition*/)` (wie in Java),
- **STL Foreach:** `std::foreach(v.begin(), v.end(), myFunction)`
- **Iterator:** `for(std::vector<int>::iterator iter = v.begin(); iter != v.end(); ++iter) {int x = *v;}` (traditionell, STL-Stil)
- **Foreach:** `for (int i : {1,2,3,4,5}) {/*...*/}` (seit C++11, wie in Java)

STL: http://www.cplusplus.com/reference/algorithm/for_each/
C++11: <http://en.cppreference.com/w/cpp/language/range-for>

Konzepte und Konventionen sind in C++ wesentlich

Konzept



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- C++ vertraut dem Programmierer – **alles** ist möglich.

"C makes it easy to shoot yourself in the foot; C++ makes it harder, but when you do it blows your whole leg off" - B. Stroustrup, 1986

- **Konventionen** sind in C++ wesentlich, werden tw. mittels Schlüsselwörtern spezifiziert und vom Compiler überprüft:

- `void f() noexcept` garantiert, das f keine Exceptions wirft.

▪ Konzepte:

▪ One-Definition Rule

- Methoden/Klassen dürfen nur einmal definiert werden.

▪ Undefined Behavior (UB)

- UB tritt ein, wenn Code auf eine nicht-spezifizierte Weise aufgerufen wird

▪ Const Correctness

- Schutz vor ungewollten Zustandsänderungen, vgl. `final` Variablen neu zuweisen in Java

https://en.wikipedia.org/wiki/One_Definition_Rule

<https://isocpp.org/wiki/faq/const-correctness>

Fortgeschritten: <http://en.cppreference.com/w/cpp/concept>



Undefined Behavior (UB)

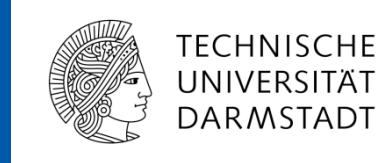
- **Definition:** Konstrukte mit UB lassen ein Programm bedeutungslos werden. Ein Compiler kann im Falle von UB mit Fehlermeldung abbrechen oder Code mit beliebigem Verhalten generieren.
- **Beispiele:**
 - Dereferenzieren von null: `int *nP = null; int x = *nP;`
 - Division durch 0: `int y = x/0;`
 - Konstanten nach `const_cast` manipulieren:
 - Fehlendes return-Statement: `int f {/*no return statement*/}`
 - Zugriff auf uninitialisierte Variablen: `int b; int a = b + 1;`
- **Warum wird UB überhaupt vom Compiler zugelassen?**
 - Der Hauptgrund dürfte Performance-Steigerung und Ressourcen-Minimierung sein (z.B. kein 0-Check beim Dividieren).

<http://en.cppreference.com/w/cpp/language/ub>

<http://blog.regehr.org/archives/213>

Programmierpraktikum C und C++

Speicherverwaltung und Lebenszyklus



ES Real-Time Systems Lab

Prof. Dr. rer. nat. Andy Schürr

Dept. of Electrical Engineering and Information Technology

Dept. of Computer Science (adjunct Professor)

www.es.tu-darmstadt.de

Roland Kluge

roland.kluge@es.tu-darmstadt.de



Stack und Heap

WO LEBEN MEINE DATEN? ... UND WIE LANGE?



In C++ spielt die **Speicherverwaltung** eine **wesentlich größere Rolle** als in Java

Vier wesentliche Speicherbereiche

- **Programmspeicher**

Enthält den binären Programmcode (+ evtl. Debugging-Symbole); normalerweise read-only.

- **Globaler Speicher**

Enthält die globalen Variablen und Konstanten; für uns hier nicht so wichtig.

In diesem Praktikum besonders relevant

- **Heap-Speicher** (aka. **dynamischer Speicher**)

Frei verwendbar; Benutzer übernimmt Speichermanagement.

- **Stack-Speicher** (aka. **statischer Speicher**)

Verwendung für lokale Variablen; Speicherverwaltung durch Compiler.

Stack vs. Heap



Stack

- Begrenzte Größe (lokale Variablen, Rücksprungadresse)
- **Speicherbelegung und –freigabe durch den Compiler**
- Speicherverwaltung:
last-in first-out

→ sehr effizient, statisch

Heap

- Typischerweise wesentlich größer als Stack
- Speicherverwaltung:
manuell, durch "Benutzer"
(`new`, `delete`)

→ groß aber teuer (Laufzeit)

Intermezzo



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Wieso braucht man überhaupt Speicher auf dem Heap, wenn der Stack die **Speicherverwaltung** übernimmt und auch noch so **viel effizienter** ist?

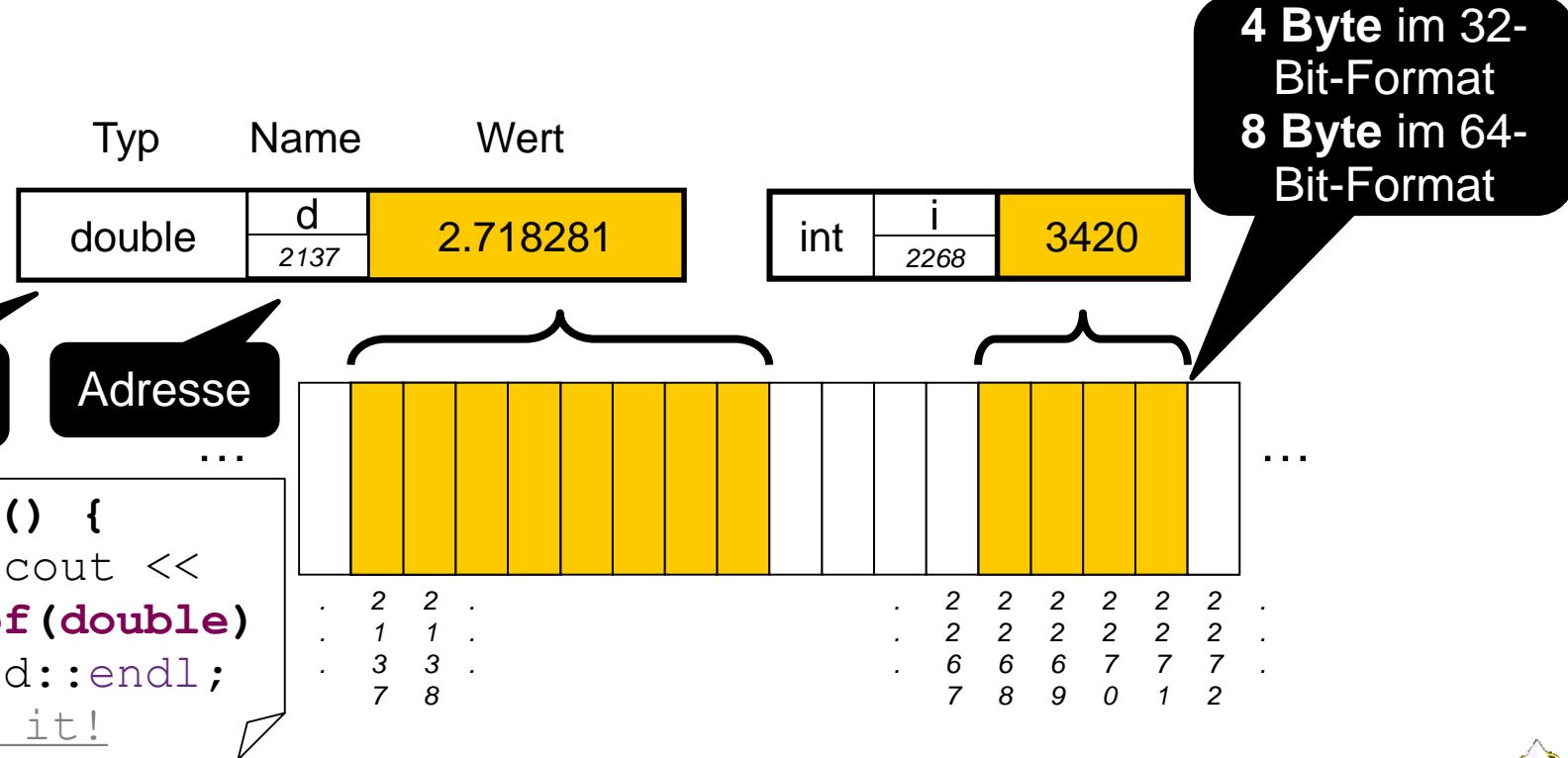


Variablen und Zeiger: Was ist eine Variable?



Eine **Variable** entspricht intern einer **Speicheradresse** mit einer **Menge von Speicherstellen**

Der **Typ einer Variable** bestimmt die **Größe** des reservierten Speicherplatzes und die **Interpretation** der enthaltenen Daten

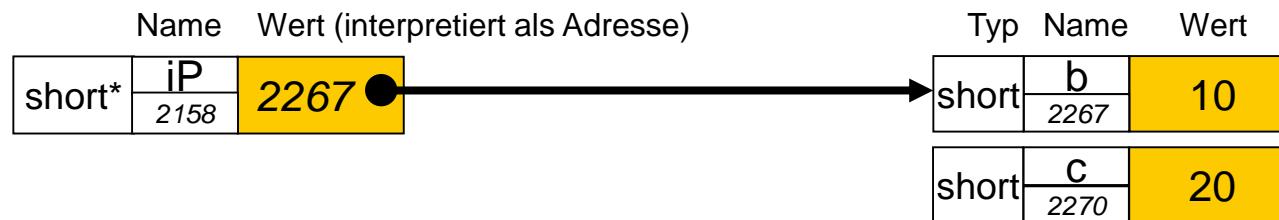
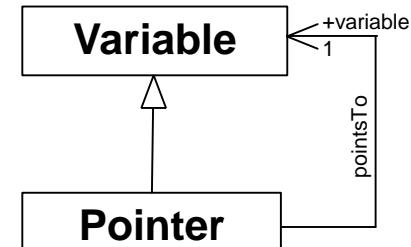


Variablen und Zeiger: Was ist ein Zeiger?



Ein **Zeiger (Pointer)** ist eine Variable, deren Inhalt als die Speicheradresse einer anderen Variable **interpretiert** wird

Der **Typ eines Zeigers** legt fest, auf welchen Typ von Variable "gezeigt" wird



4 Byte im 32-Bit-Format
8 Byte im 64-Bit-Format

Variablen und Zeiger: Syntax



```
int i = 42;
```

Deklaration eines Zeigers vom Typ *int** (Zeiger auf *int*, hat strenggenommen keinen Wert)

```
int *iP;
```

Definition eines Zeigers vom Typ *int** durch Zuweisung einer Adresse (Referenzierung)

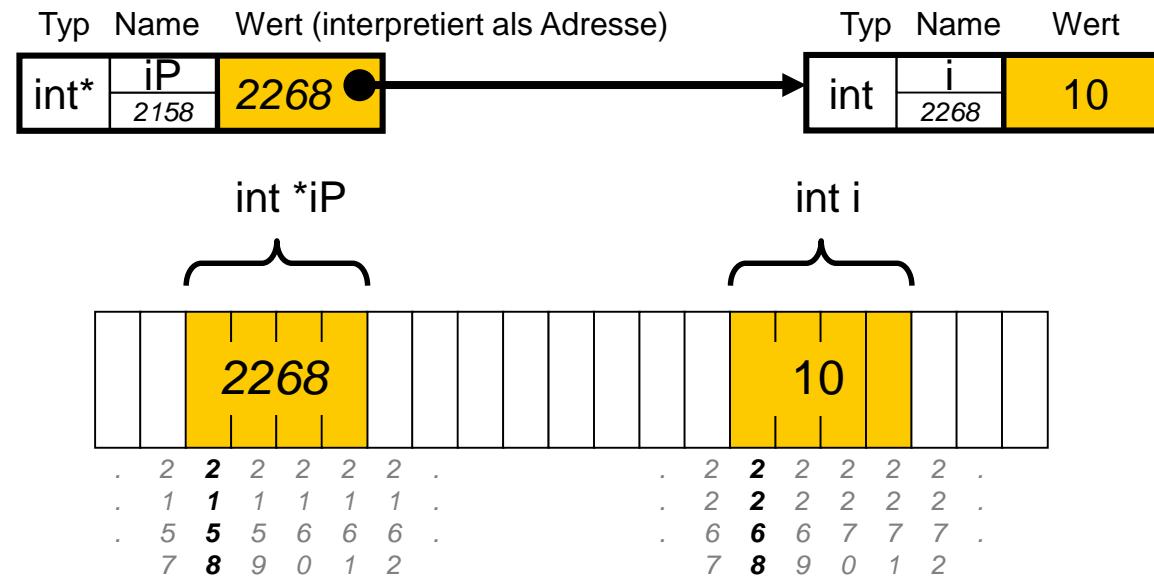
```
iP = &i;
```

Dereferenzierung eines Zeigers, um den Inhalt zu erhalten

```
int j = *iP;
```

Ohne Dereferenzierung bekommt man den Wert des Zeigers (= die gespeicherte Adresse).

Intermezzo: Pointer und Variablen



```
std::cout << i << std::endl;           10  
std::cout << iP << std::endl;         2268  
std::cout << &i << std::endl;          2268  
std::cout << *iP << std::endl;        10  
std::cout << &iP << std::endl;          2158
```





Der Null-Pointer



Der Null-Pointer wird verwendet, um anzugeben,
dass ein Pointer noch **keinen definierten Wert** hat.

0x0

- C:

```
int *i = 0; int *j = 0x0;
```

NULL

- C90

```
#include <stddef.h>
int *k = NULL;
```

nullptr

- C++

```
#include <cstddef>
int *k = NULL;
```

Wie <stddef.h>, aber
mit Namespaces

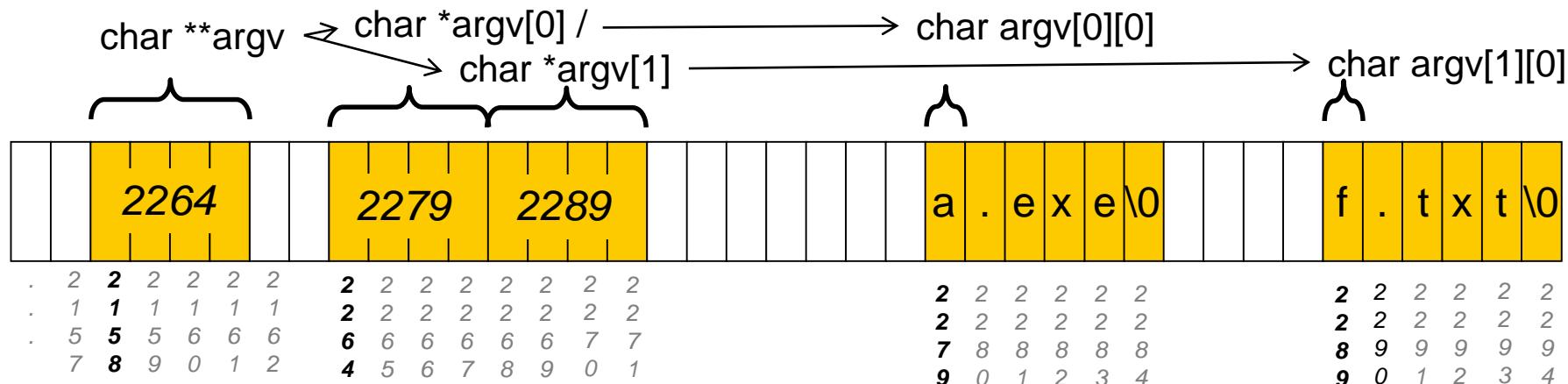
- C++11

```
int *m = nullptr;
```

https://en.wikipedia.org/Null_pointer

```
int main(int argc, char** argv)
```

- Was passiert beim Aufruf a.exe f.txt?
 - Traditionelle Strings: Folgen von char (mit '\0' abgeschlossen)



```
cout << argv[0] << endl;  
cout << argv[1] << endl;
```

2264
a.exe 2279
f.txt 2289

Spezieller operator<< für char*

2279

```
cout << (void *)argv[0] << endl
```

**void* =
erischer" Pointer**



Java

- **Eingebautes Sprachfeature** mit speziellem operator[] / length-Attribut
- Zusammenhängender Speicher (enthält Werte (int,...) oder Referenzen)
- **Beispiel:** `int[] x = {1, 1, 2, 3, 5, 8}; int x2 = x[2]; int len = x.length; // 6`

C++

- **Syntactic Sugar:** Array = Pointer auf zusammenhängenden Speicherbereich
- **Problem:** Längeninformation werden nicht explizit gespeichert
- **Gefahr:** Keine Bereichsprüfung
- **Beispiel:**

```
int* myArray = {1, 1, 2, 3, 5, 8};  
int x2 = myArray[2];  
int x77 = *(myArray + 77); // Danger!
```

<http://www.cplusplus.com/doc/tutorial/arrays/>

sizeof-Operator und std::size_t



▪ sizeof-Operator

- ... liefert die **Größe (in Byte) einer Variable** eines bestimmten Typs.
- Aufruf über Typ oder konkrete Variable möglich

▪ Datentyp std::size_t

- Standard-STL-Datentyp, um **Objektgrößen** in Byte zu speichern
- Ist immer groß genug, um das größtmögliche Objekt auf der jeweiligen Plattform zu speichern.

```
#include <iostream>
// #include <cstddef> // contains std::size_t

int main() {
    // Via type
    std::cout << sizeof(double) << std::endl;
    // Via variable
    std::size_t x = 3.0;
    std::cout << sizeof(x) << std::endl;
}
```

<http://en.cppreference.com/w/cpp/language/sizeof>
http://en.cppreference.com/w/cpp/types/size_t

Intermezzo



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Wann braucht man wirklich Zeiger?

Wieso kann man nicht einfach nur normale
Variablen verwenden?



Unveränderlichkeit - *const*



Zeiger auf Konstante

vs.

Unveränderlicher Zeiger

```
int i = 42;
```

```
const int *iP;
```

```
iP = &i; ✓
```

```
(*iP)++; X
```

```
|  
| int i;  
| int j = 7;  
|  
| int *const jP = &j;  
|  
| (*jP)++; ✓  
|  
| jP = &i; X
```

Einmalige,
sofortige
Definition

Unveränderlicher Zeiger auf Konstante:

```
int i = 42;  
const int *const iP = &i;
```

Eselnbrücke:

- *const* bezieht sich immer auf das "Nächstliegende".
- Lese von rechts nach links.



- Ein Programm ist "const correct", wenn unveränderliche (d.h. als unverändlich gemeinte) Objekte durch das Programm auch nicht verändert werden.
- Wird in C++ durch das **Schlüsselwort const** (für Typen und Funktionen) sichergestellt.
- `const int` und `int` entsprechen **zur Compile-Zeit** verschiedenen Typen, **zur Laufzeit** jedoch wird kein Unterschied gemacht

<https://isocpp.org/wiki/faq/const-correctness>

Was ist eine C++-Referenz?



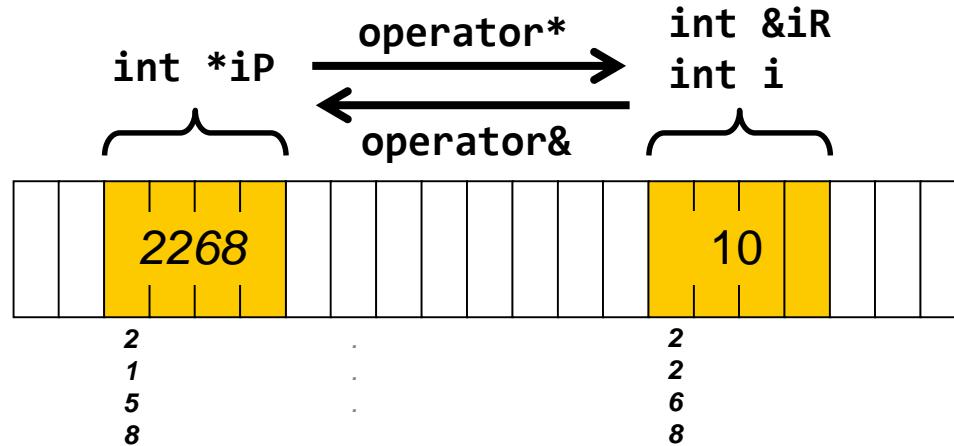
- Eine **Referenz** ist ein **Alias auf eine Variable**
- Sie braucht **nicht zwangsweise eigenen Speicher** (bspw. innerhalb einer Funktion)
- Sie verhält sich **wie ein const-Pointer**.

```
int i = 42;  
  
int *const iP = &i;  
  
(*iP)++;  
  
const int *const iP = &i;  
  
cout << *iP << endl;
```

```
int i = 42;  
  
int &iR = i;  
  
iR++;  
  
const int &iR = i;  
  
cout << iR << endl;
```

Syntax wie
für Variablen

Beispiel: Asterisk und Ampersand



	Asterisk (*)	Ampersand (&)
Typ	<code>int *iP = 2268;</code>	<code>int &iR = i;</code>
Operator	<pre>// operator* if(*iP == 10){}</pre>	<pre>// operator& if(&i == iP){}</pre>

Zusammenfassung: Variabtentypen



- **Werttypen** (enden weder auf &, *, [])
 - Variablen mit **Werttyp X** repräsentieren konkrete Werte/Objekte
 - z.B. int x = 3; Building b = Building(3);
- **Referenztypen** (enden auf &)
 - Variable mit **Referenz-Typ X&** ist ein Alias für ein Objekt vom Typ X.
 - z.B. int &y = x;
- **Pointer-Typen** (enden auf *)
 - Variable mit **Pointer-Typ X*** verweist auf eine Speicherstelle, die einen X-Wert/-Objekt enthält.
 - z.B. int *x = new int(3);
- **Array-Typen** (enden auf []), Syntactic Sugar
 - Variable mit **Array-Typ X[]** verweist auf ein Array, dessen Elemente den Typ X haben, und ist äquivalent zu Typ X*.
 - z.B. int[] x = {1,1,2,3,5}; int *x2 = {1,1,2,3,5};

Zusammenfassung: Zuweisung

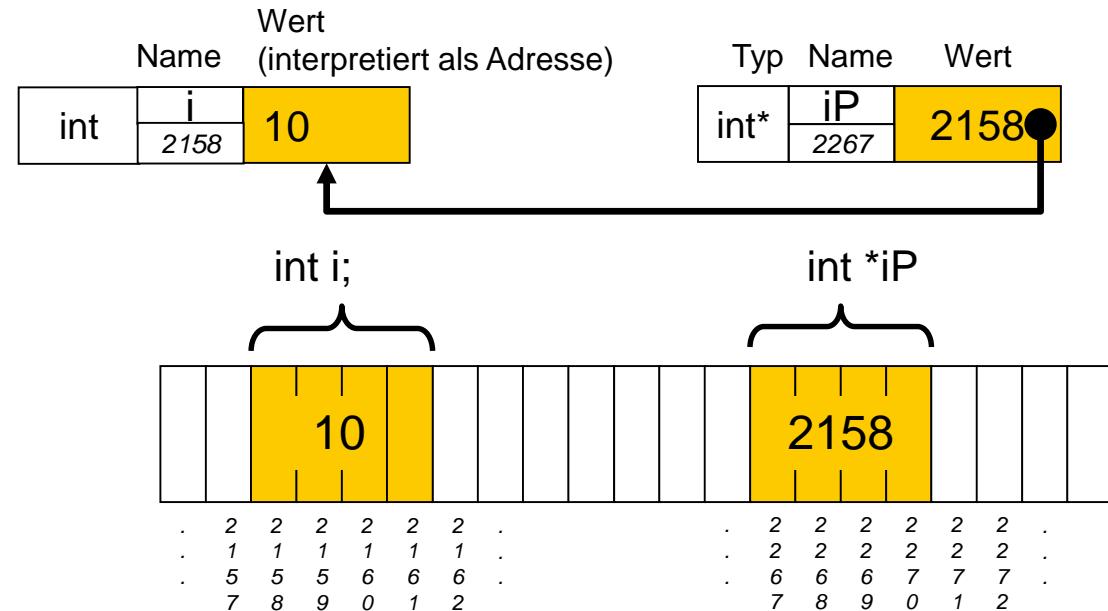


- Was passiert bei der Zuweisung zwischen verschiedenen Variabtentypen?
- [LHS-Typ] $x = [\text{Operator}] [\text{RHS-Typ}] y;$

LHS	RHS	Wert-Typ $Y\ y$	Referenz-Typ $Y\ \&y$	Pointer-Typ $Y\ *y$
Wert-Typ $X\ x =$	$x = y$ (Kopie)	$x = y$ (Kopie)	$x = *y$ (Kopie)	
Referenz-Typ $X\ \&x =$	$x = y$ (Alias)	$x = y$ (Alias)	$x = *y$ (Alias)	
Pointer-Typ $X\ *x =$	$x = \&(1)y$ (Alias)	$x = \&y$ (Alias)	$X = y$ (Alias)	

(1) **Adressoperator** kann nur auf "benannte" Objekte angewandt werden (z.B. Variablen), nicht aber auf anonyme Objekte und Literale (z.B. `&42`, `&Building()`)

Zusammenfassung: Rolle von const



const int	*	iP = &i;	CONST
int const	*	iP = &i;	CONST

int	* const	iP = &i;	CONST
-----	---------	----------	-------

const int	* const	iP = &i;	CONST
int const	* const	iP = &i;	CONST

const bei Objekten



```
class Building {  
public:  
    Building(int number_of_floors);  
    ~Building();  
  
    void printFloorPlan() const;  
  
private:  
    std::vector<Floor> floors;  
    Elevator elevator;  
};  
  
void iDoNotChangeAnything(const Building &building) {  
    building.printFloorPlan();  
}
```

Verändert den Zustand des
Objekts nicht
(Read-only-Zugriff)

building darf
nicht verändert
werden

Es dürfen **nur const Methoden** auf
building aufgerufen werden

const Overloading



- Überladung von Methoden anhand von **const** ist möglich
- Typischerweise ähnliche oder identische Implementierung

```
class Building {  
public:  
    std::vector<Floor> &getFloors() { return floors; };  
    const std::vector<Floor> &getFloors() const { return floors; };  
private:  
    std::vector<Floor> floors;  
};  
  
int main() {  
    const Building b{};  
    const std::vector<Floor> &fs = b.getFloors();  
    const Floor &f = b.getFloors().at(1);  
}
```

Auch die Elemente des Vektors sind const!

Der this-Zeiger



- **this** ist in **jeder Methode** implizit verfügbar – wie in Java.
- Für eine Klasse C ist der **Typ** von **this**
 - **C*** innerhalb von **nicht-const** Methoden
 - **const C*** innerhalb von **const** Methoden
- **this** kann genutzt werden, um **Code "sprechender"** zu machen.

```
class Building {           Building.hpp
public:
    Building(int numberOffFloors);
    ~Building();

    void printFloorPlan() const;

private:
    std::vector<Floor> floors;
    Elevator elevator;
};
```

```
void
Building::printFloorPlan()
const {
    /*...*/
    floors.at(0);
    this->floors.at(0);

    // Same for methods:
    printFloorPlan();
    this->printFloorPlan();
}
```

Intermezzo: const



```
const int numFloors;  
const Elevator &elevator;
```

Unveränderliches Attribut (-> Initialisierungsliste nötig!).

```
static const int MAX_FLOOR_COUNT = 3;
```

Konstante (innerhalb oder außerhalb einer Klasse)

```
const Elevator &Building::getElevator() const;
```

Methode, die eine unveränderliche *Elevator*-Instanz liefert (1. *const*) und die umgebende Klasse *Building* nicht verändert (2. *const*).

```
void readPerson(const Person *const person);
```

Funktionsparameter *person* als Pointer, der nicht neu zugewiesen werden kann (also kein *person = new Person()*, 2. *const*) und dessen Objekt nicht verändert werden kann (1. *const*).



Intermezzo



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Wieso soll ich konsequent **const** verwenden?

Wann soll ich **const** verwenden und wann nicht?

Was ist der Unterschied zu **final** in Java?

Was ist der Unterschied zwischen

`int* iP`

und

`int *iP`

und

`int * iP`

?



Zusammenfassung: Vorteile von const?



- Compiler kann automatisch die Absichten des Programmierers statisch durchsetzen (es gibt einen guten Grund wieso etwas const sein soll!)
- Compiler kann viele Optimierungen durchführen mit dem Wissen darüber, was const ist und was nicht
- Absicht des Programms wird für den Leser "expliziter".
- Wird für Objekte und Methoden sinnvoll verallgemeinert

Intermezzo: * und &



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Weil es **so wichtig** ist, noch einmal: Asterisk (*) und Ampersand (&) können je nach Auftrittsort unterschiedliche Bedeutungen haben.

Welche Bedeutung kann der **Asterisk (*)** im Code annehmen?

Welche Bedeutung kann das **Ampersand (&)** im Code annehmen?





(Kopier-)Konstruktor, Zuweisung und Destruktor

AUF- UND ABBAUEN VON OBJEKTEN

Konstruktor, Destruktor und Copy-Konstruktor



```
class Floor {  
public:  
    Floor(std::string label,  
          int number);  
    ~Floor();  
    Floor(const Floor &floor);  
  
private:  
    const std::string label;  
    const int number;  
};
```

**Konstruktor mit
Initialisierungsliste
(Reihenfolge beachten!)**

Copy-Konstruktor

Destruktor

```
Floor::Floor(  
    std::string label, int number):  
    label(label),  
    number(number) {  
    cout << "Creating floor"  
        << number << "]" << endl;  
}  
  
Floor::Floor(const Floor &floor):  
    label(floor.label),  
    number(floor.number+1) {  
    cout << "Copying floor"  
        << floor.number << "]" << endl;  
}  
  
Floor::~Floor() {  
    cout << "Destroying floor ["  
        << number << "]" << endl;  
}
```

Initialisierungslisten



- Initialisierungslisten haben mit C++11 eine **zweite Bedeutung** erhalten: Mittels Array-ähnlicher Syntax können jetzt **Datenstrukturen leichter initialisiert werden.**
- **Klassisch:** Pflicht bei const-Attributen und Referenzen im Konstruktor
 - `Floor::Floor(std::string label, int number)
: label(label), number(number) {}`
- **In C++11:** {} als Syntactic Sugar `std::initializer_list`
 - vereinfachte Initialisierung von Vektoren etc.
 - `std::vector<int> v = std::vector<int>({7, 5, 16, 8});`
 - `std::vector<int> v({7, 5, 16, 8});`
 - `std::vector<int> v = {7, 5, 16, 8};`

impliziter Konstruktoraufruf

Klassisch: http://en.cppreference.com/w/cpp/language/initializer_list
`std::initializer_list`: http://en.cppreference.com/w/cpp/utility/initializer_list

Exkurs: Implizite Typ-Konvertierung und Anonyme Objekte



```
#include <string>

class Student {
public:
    Student(const std::string &name)
        : name(name) {}

private:
    std::string name;
};

int main() {
    Student mike("Mike");
}
```

Konstruktor erwartet std::string

Aber: Aufrufer verwendet const char*

Implizite Typkonvertierung, da std::string einen Konstruktor besitzt, der const char* als Parameter hat.

Das generierte Objekt ist "**anonym**", d.h. kann nach dieser Zeile nicht mehr verwendet werden – daher ist **nur eine Übergabe als const &name sinnvoll**.

Exkurs: Implizite Typkonvertierung unterbinden mit `explicit`



```
#include <string>

class Student {
public:
    explicit Student(const std::string &name)
        : name(name) {}

private:
    std::string name;
};

void useStudent(const Student &student) {
}

int main() {
    Student mike("Mike");
    useStudent(mike);
    useStudent(std::string("Sarah"));
}
```

Schlüsselwort `explicit` unterbindet Verwendung des Konstr. für implizite Typkonvertierung

Ohne `explicit` kann man `useStudent` auch so aufrufen wegen impliziter Typkonvertierung.

Delegating Constructors



Java

- kann innerhalb eines Konstruktors an einen anderen Konstruktor delegieren (bspw. Default-Werte übergeben)
- Beispiel: `public Floor() { this("default", 1); }`

C++

- Vor C++11: kann/muss Basisklassen initialisieren
 - `Class(): Base("default") {}`
 - Kann aber nicht an Konstruktoren der eigenen Klasse delegieren.
- Seit C++11: Konstruktoraufruf auf eigene Klasse möglich
 - `Floor() : Floor("default", 1) {}`

http://en.cppreference.com/w/cpp/language/initializer_list#Delegating_constructor
Praktisch: <http://www.learncpp.com/cpp-tutorial/b-5-delegating-constructors/>

Parameterübergabe bei Methodenaufrufen



Parameter werden in C++ **immer** per Wert übergeben (**Call by Value**)

```
void iUseACopy(Floor floor){  
    cout << "This is floor ["  
        << floor.getNumber()  
        << "]" << endl;  
}  
  
int main() {  
    Floor floor("f", 0);  
    iUseACopy(floor);  
}
```

Copy-Konstruktor wird bei der Übergabe aufgerufen, um das Objekt zu kopieren!



Creating floor [0]

Copying floor [0]

This is floor [1]
Destroying floor [1]

Destroying floor [0]

Objekt wird automatisch zerstört wenn *iUseACopy* zu *main* zurückkehrt...

Parameterübergabe bei Methodenaufrufen (I)



Kopieren bei der Übergabe ist oft nicht gewollt. Lösungsmöglichkeiten:

(1) Übergabe "per Referenz" (**Call by Reference**)

```
void iUseAReference(  
    Floor &floor) {  
    cout << "This is floor ["  
        << floor.getNumber()  
        << "]"  
        << endl;  
}  
  
int main() {  
    Floor floor("f", 0);  
    iUseAReference(floor);  
}
```

Es wird **keine Kopie** des Objekts angelegt

Creating floor [0]
This is floor [0]
Destroying floor [0]

! *iUseAReference* kann aber das Objekt beliebig verändern!

Parameterübergabe bei Methodenaufrufen (II)



Kopieren bei der Übergabe ist oft nicht gewollt. Lösungsmöglichkeiten:
(2) Übergabe per **const Referenz**

```
void iUseAConstReference(  
    const Floor &floor){  
    cout << "This is floor ["  
        << floor.getNumber()  
        << "]"  
        << endl;  
}  
  
int main() {  
    Floor floor("f", 0);  
    iUseAConstReference(floor);  
}
```

Creating floor [0]
This is floor [0]
Destroying floor [0]

! Dies sollte grundsätzlich die Default-Übergabestrategie sein.

Parameterübergabe bei Methodenaufrufen (III)



Kopieren bei der Übergabe ist oft nicht gewollt. Lösungsmöglichkeiten:
(3) Übergabe per Zeiger

```
void iUseAPointer(  
    Floor *floor){  
    cout << "This is floor ["  
        << floor->getNumber()  
        << "]"  
        << endl;  
}  
  
int main() {  
    Floor floor("f", 0);  
    iUseAPointer(&floor);  
}
```

Äquivalent zu
(*floor).getNumber()

Creating floor [0]
This is floor [0]
Destroying floor [0]

Intermezzo



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Wieso ist die Übergabe per *const&* ein
sinnvoller Default?

Wann ist die Übergabe per *const& nicht möglich?*

Wieso soll (sogar in vielen Fällen muss)
man die **Initialisierungsliste** verwenden?



Assignment-Operator (I)



- Neben dem Kopierkonstruktor gibt es auch noch eine andere Art, den **Zustand eines Objektes zu übertragen**: den **Assignment-Operator**

```
class EnergyMinimizingStrategy {
public:
    EnergyMinimizingStrategy() {
        std::cout << "Constructor called" << std::endl;
    }

    EnergyMinimizingStrategy(const EnergyMinimizingStrategy &a) {
        std::cout << "Copy constructor called" << std::endl;
    }
}
```

- ! **Copy-Konstruktor** überträgt Zustand beim Initialisieren
- ! **Assignment-Operator** überträgt Zustand nach dem Initialisieren

```
EnergyMinimizingStrategy &operator=(const EnergyMinimizingStrategy &a) {
    std::cout << "operator= called" << std::endl;
    return *this;
}
```

; **Rückgabe von *this erlaubt Verkettung ("Operator chaining"):**
EMS e1,e2,e3; e1 = e2 = e3; // same as: e1 = (e2 = e3);

<http://cpp.sh/643yg>

Assignment-Operator: Vergleich zu Java



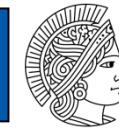
- Assignment-Operator kann in Java **nicht überschrieben/angepasst werden.**

- **Java-Primitive** (int, double,...): **Wertzuweisung**

```
int x = 1;  
int y = x;  
++y // Only y is modified
```

- **Java-Objekte:** **Referenzzuweisung/Aliasing**

```
Floor x = new Floor();  
Floor y = x; // Aliasing  
y.setLevel(3); // x and y are modified
```



Implementiert man Copy-Konstruktor, Assignment-Operator oder Destruktor, muss man vermutlich auch die anderen Beiden implementieren.

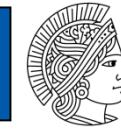
```
#include <fstream>

class AccessController {
public:
    AccessController() {
        logfile.open("logfile.txt");
    }
    // No copy constructor
    // No assignment operator
    ~AccessController() {
        logfile.close();
    }

private:
    std::ofstream logfile;
};
```

Default Copy-Konstruktor kopiert *logfile*.

Aber: `std::ostream` hat **keinen**
Kopierkonstruktor!



Implementiert man **Copy-Konstruktor**, **Assignment-Operator** oder **Destruktor**, muss man vermutlich auch die anderen Beiden implementieren.

- Der Compiler generiert einen der drei bei Bedarf automatisch, indem Felder 1:1 kopiert werden (evtl. mittels "rekursivem" Copy-Konstruktor).
- Wenn ich **Ressourcen** (Speicher, File Handle,...) in einem **Konstruktor** akquiriere, möchte ich sie auch im **Destruktor** freigeben.
- Verwende ich einen **eigenen Copy-Konstruktor** und einen **generierten Assignment-Operator**, kann es zu **inkonsistentem Verhalten** kommen.

Compiler-generierte Methoden: C++



- Der C++-Compiler ("automagically") generiert automatisch eine Reihe von Methoden, falls sie **nicht vorhanden (=deklariert)** sind, z.B.:
 - Default-Konstruktor `MyClass ()` (←wie in Java!)
 - Copy-Konstruktor `MyClass (const MyClass &a)`
 - Assignment-Operator `MyClass &operator=(const MyClass &a)`
 - Destruktor `~MyClass ()`
 - Initialisierungsliste → Default-Konstruktoren für Felder
- Man kann auch die **Generierung unterbinden**
 - vor C++11: `MyClass &operator=(MyClass &); // WITHOUT implementation`
 - seit C++11: `MyClass &operator=(MyClass &) = delete;`
- **Gegenstück: "= default"**, falls man trotz (bspw.) manuell implementiertem Kopierkonstruktor die Standardimplementierung (bspw.) des parameterlosen Konstruktors haben will.
 - `MyClass() = default;`

**Wichtig als Zeichen
an andere Entwickler!**

https://en.wikipedia.org/wiki/C%2B%2B11#Explicitly_defaulted_and_deleted_special_member_functions

Compiler-generierte Methoden: Java

- Jede Klasse **erbt (indirekt) von java.lang.Object**

```
public class Elevator {}
```

wird durch Compiler zu

```
public class Elevator extends Object {}
```

- **Namensraum java.lang.*** wird automatisch eingebunden.



Hängende Zeiger und Speicherlecks

STOLPERFALLEN BEI DER SPEICHERVERWALTUNG

http://static.tvtropes.org/pmwiki/pub/images/Bear_Trap_7423.jpg

Hängende Zeiger

Referenzen auf gelöschte Objekte zurückgeben



```
Floor &makeNextFloor(const Floor &floor){  
    Floor next = Floor(floor);  
    cout << "Making next floor [ "  
        << next.getNumber()  
        << "]" << endl;  
    return next;  
}  
  
int main() {  
    Floor floor(0);  
    Floor &next = makeNextFloor(floor);  
    cout << "Next floor is floor [ "  
        << next.getNumber()  
        << "]" << endl;  
}
```

Hier wird eine Referenz
auf eine lokale Variable
zurückgegeben!

g++ ist gnädig und lässt das mit einer
Warnung durchgehen. Ist trotzdem
sehr schlechter Programmierstil!



Creating floor [0]

Copying floor [0]

Making next floor[1]

Destroying floor [1]

Next floor is floor [1]

Destroying floor [0]

Rückgabe von Objekten durch Kopieren



```
Floor makeNextFloor(const Floor &floor){  
    Floor next = Floor(floor);  
    cout << "Made next floor ["  
        << next.getNumber()  
        << "]"  
        << endl;  
    return next;  
}  
  
int main() {  
    Floor floor(0);  
  
    Floor nextFloor = makeNextFloor(floor);  
  
    cout << "Next floor is floor ["  
        << nextFloor.getNumber()  
        << "]"  
        << endl;  
}
```

Compiler erkennt, wann Kopien
vermieden werden können



Creating floor [0]

Copying floor [0]
Made next floor [1]
Copying floor [1]
Destroying floor [1]

Next floor is floor [2]
Destroying floor [2]
Destroying floor [0]

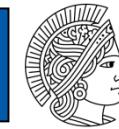
Creating floor [0]

Copying floor [0]
Made next floor [1]

Next floor is floor [1]
Destroying floor [1]
Destroying floor [0]

Erwartet

Tatsächlich

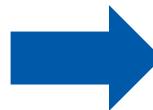


```
class EnergyMinimizingStrategy {
public:
    EnergyMinimizingStrategy() {
        cout << "Constructor called" << endl;
    }

    EnergyMinimizingStrategy(const
        EnergyMinimizingStrategy &a) {
        cout << "Copy constructor called" << endl;
    }

    EnergyMinimizingStrategy &operator=(
        const EnergyMinimizingStrategy &a) {
        cout << "operator= called" << endl;
        return *this;
    }

int main() {
/*1.*/ EnergyMinimizingStrategy a;
/*2.*/ EnergyMinimizingStrategy c = a;
/*3.*/ EnergyMinimizingStrategy b(a);
/*4.*/ b = a;
/*5.*/ EnergyMinimizingStrategy d =
    EnergyMinimizingStrategy();
}
```



Ausgabe:

- 1 Constructor called
- 2 Copy constructor called
- 3 Copy constructor called
- 4 operator= called
- 5 Constructor called

Mit *-fno-elide-constructors* wird tatsächlich kopiert.

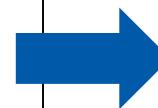
- Zu erwarten ist, dass bei (5.) zunächst ein Objekt mittels Default-Konstruktor angelegt und dann mittels *operator=* überschrieben wird – C++ ist da schlauer ☺.

https://en.wikipedia.org/wiki/Copy_elision

Rückgabe von Objekten auf dem Heap



```
Floor* makeNextFloor(const Floor &floor){  
    Floor *next = new Floor(floor);  
    cout << "Made next floor ["  
        << next->getNumber() << "]"  
        << endl;  
    return next;  
}  
  
int main() {  
    Floor floor(0);  
  
    Floor *nextFloor = makeNextFloor(floor);  
  
    cout << "Next floor is floor ["  
        << nextFloor->getNumber()  
        << "]" << endl;  
}
```



Creating floor [0]

Copying floor [0]
Made next floor [1]

Next floor is floor [1]
Destroying floor [0]



Dieses Programm enthält einen
Fehler! Wer sieht ihn?

Rückgabe von Objekten auf dem Heap



```
Floor* makeNextFloor(const Floor &floor){  
    Floor *next = new Floor(floor);  
    cout << "Made next floor ["  
        << next->getNumber() << "]"  
        << endl;  
    return next;  
}  
  
int main() {  
    Floor floor(0);  
  
    Floor *nextFloor=makeNextFloor(floor);  
  
    cout << "Next floor is floor ["  
        << nextFloor->getNumber()  
        << "]" << endl;  
  
    delete nextFloor;  
}
```



Creating floor [0]

Copying floor [0]
Made next floor [1]

Next floor is floor [1]
Destroying floor [1]
Destroying floor [0]

Hängende Zeiger

Frühzeitige Zerstörung von Objekten



```
int main() {  
    Floor *floor = new Floor(0);  
    Floor &refToFloor = *floor;  
  
    delete floor;  
  
    cout << "Dangling reference to floor ["  
        << refToFloor.getNumber()  
        << "]" << endl;  
}
```



Creating floor [0]
Destroying floor [0]

Dangling reference to
floor:
[5444032]



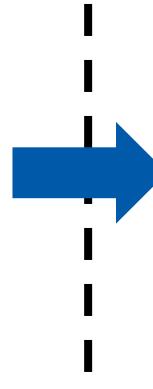
Extrem gefährlich!

Hängende Zeiger

Nochmalige Zerstörung von Objekten



```
int main() {  
    Floor *floor = new Floor(0);  
  
    delete floor;  
    delete floor;  
}
```



Creating floor [0]
Destroying floor [0]
Destroying floor [5903232]

Extrem gefährlich!

```
int main() {  
    Floor *floor = new Floor(0);  
  
    delete floor;  
  
    floor = nullptr;  
  
    delete floor;  
}
```



Creating floor [0]
Destroying floor [1]

Nach dem Löschen
immer auf nullptr
setzen!

Speicherlecks



```
int main() {  
    Floor *floor = new Floor(0);  
    Floor *otherFloor = new Floor(1);  
  
    floor = otherFloor; //->floor [0]  
    otherFloor = floor; //->floor [0]  
  
    delete floor;  
    delete otherFloor;  
}
```



Was wird hier
gelöscht?



```
Creating floor [0]  
Creating floor [1]  
Destroying floor [1]  
Destroying floor [5706624]
```

Es ist nicht mehr möglich, *floor [0]* freizugeben! Dies wird als ein **Speicherleck** bezeichnet.

Verantwortlichkeitsprobleme bei Zeigern



```
int f(const Floor &floor) {
    // (1) Am I sure that floor is not
    //      already a dangling reference?

    // Use floor in some way

    // (2) Is floor on the heap?
    // (3) Am I supposed to delete it or not?
    // (4) If yes, how about all other references
        to floor from other objects?
        How do these objects know that floor is now destroyed?
}

int g() {
    Floor *floorOnHeap = new Floor(0);
    Floor floorOnStack(1);

    // How do I signalise that floorOnHeap/floorOnStack should (not)
    // be deleted? Or that I want to give up "ownership" of floorOnHeap
    // (it should be deleted)?
    f(*floorOnHeap);
    f(floorOnStack);

    // I might still want to use floorOnHeap here!
}
```

Saubere Speicherverwaltung im Allgemeinen **nur mit vielen Konventionen** möglich.
Fremdbibliotheken können aber andere Konventionen verlangen.

Wie können wir (1) – (3) klären und vor allem (4) immer garantieren?

Aliasing bei klassischen Zeigern

```
Person *Eve = new Person();  
Person *Alice = Eve;
```

"Rohzeiger"
(raw pointer)

Objekt auf dem Heap

Eve



:Person

Alice

Die Person darf nur zerstört werden, wenn es keine Zeiger mehr gibt!

Intermezzo



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

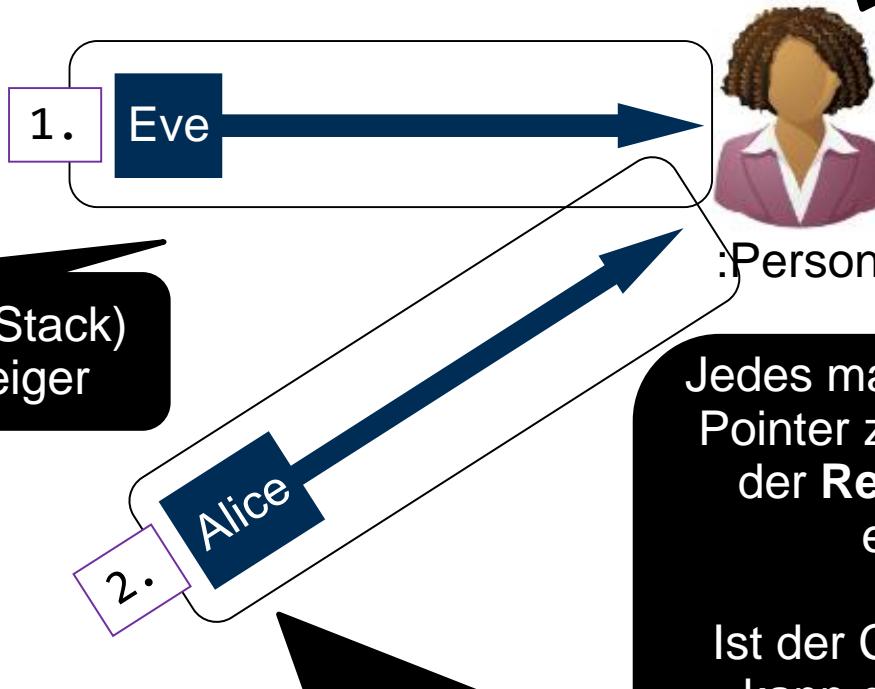
Wie könnte man das Problem lösen? Wir müssen ja irgendwie entscheiden wann ein Objekt gelöscht werden darf ...



Mit std::shared_ptr

```
std::shared_ptr<Person> Eve(new Person());  
std::shared_ptr<Person> Alice = Eve;
```

Objekt auf dem Heap



Smart Pointer wissen, **wie oft** das Objekt referenziert wird

Ist der Counter bei 0, so kann das Objekt vom Smart Pointer zerstört werden!

Person – ohne std::shared_ptr



```
#include <string>
using namespace std;

class Person {
public:
    Person(const string &name);
    Person(const Person &person);
    ~Person();

    const string &getName() const
    {
        return name;
    }

private:
    const string name;
};
```

Person.hpp

```
#include "Person.hpp"
#include <iostream>
using namespace std;

Person::Person(const string &name):
    name(name) {
    cout << endl << "Created " << name << endl;
}

Person::Person(const Person &person):
    name(person.name){
    cout << "Cloning " << name << endl;
}

Person::~Person() {
    cout << endl << "Good bye " << name << endl;
}
```

Person.cpp

Person – mit std::shared_ptr



```
#include <string>
#include <memory>
```

Person.hpp

```
class Person {

using namespace std;
public:
    Person(const string &name);
    Person(const Person &person);
    ~Person();

    const string &getName() const {
        return name;
    }

private:
    const string name;
};

typedef std::shared_ptr<Person>
PersonPtr;

typedef std::shared_ptr<const Person>
ConstPersonPtr;
```

```
#include "Person.hpp"
#include <iostream>
using namespace std;
```

Person.cpp

```
Person::Person(const string &name):
    name(name) {
    cout << "Created " << name << endl;
}

Person::Person(const Person &person):
    name(person.name){
    cout << "Cloning " << name << endl;
}

Person::~Person() {
    cout << "Good bye " << name << endl;
}
```

Beispiel: Weniger Code dank smarter Zeiger



```
#include <iostream>
#include "Person.hpp"

using namespace std;

void makeSmallTalkWith(const Person &person){
    cout << "Isn't the weather pleasant today, "
        << person.getName() << "?" << endl;
}

void greet(const Person &person){
    cout << "Greeting " << person.getName() << endl;
    makeSmallTalkWith(person);

    Person *passerBy = new Person("Sir");
    makeSmallTalkWith(*passerBy);

    delete passerBy;
    passerBy = 0;
}

int main() {
    Person *eve(new Person("Eve"));
    greet(*eve);

    Person *alice = eve;
    greet(*alice);

    delete eve;
    eve = 0;
}
```

main.cpp

```
#include <iostream>
#include "Person.hpp"

using namespace std;

void makeSmallTalkWith(ConstPersonPtr person){
    cout << "Isn't the weather pleasant today, "
        << person->getName() << "?" << endl;
}

void greet(ConstPersonPtr person){
    cout << "Greeting " << person->getName() << endl;
    makeSmallTalkWith(person);

    ConstPersonPtr passerBy(new Person("Sir"));
    makeSmallTalkWith(passerBy);

}

int main() {
    ConstPersonPtr eve(new Person("Eve"));
    greet(eve);

    ConstPersonPtr alice = eve;
    greet(alice);

}
```

std::make_shared

```
#include <string>
#include <memory>

class Person {
public:
    Person(const std::string &name)
        : name(name) {}
private:
    std::string name;
};

int main() {
    std::shared_ptr<Person> nobody;

    Person *leila = new Person("Leila");
    delete leila;

    std::shared_ptr<Person> mike(
        new Person("Mike"));

    std::shared_ptr<Person> susan =
        std::make_shared<Person>("Susan");
}
```

std::shared_ptr()
entspricht nullptr.

Der Raw Pointer sollte **direkt** und
genau einmal in einen
std::shared_ptr eingepackt werden.

Die Utility-Funktion
std::make_shared ist vorteilhaft:
Exceptions führen nicht zu
Speicherfehlern und die
Speicherallokation ist schneller

http://en.cppreference.com/w/cpp/memory/shared_ptr/make_shared

Weak SmartPointer: Motivation

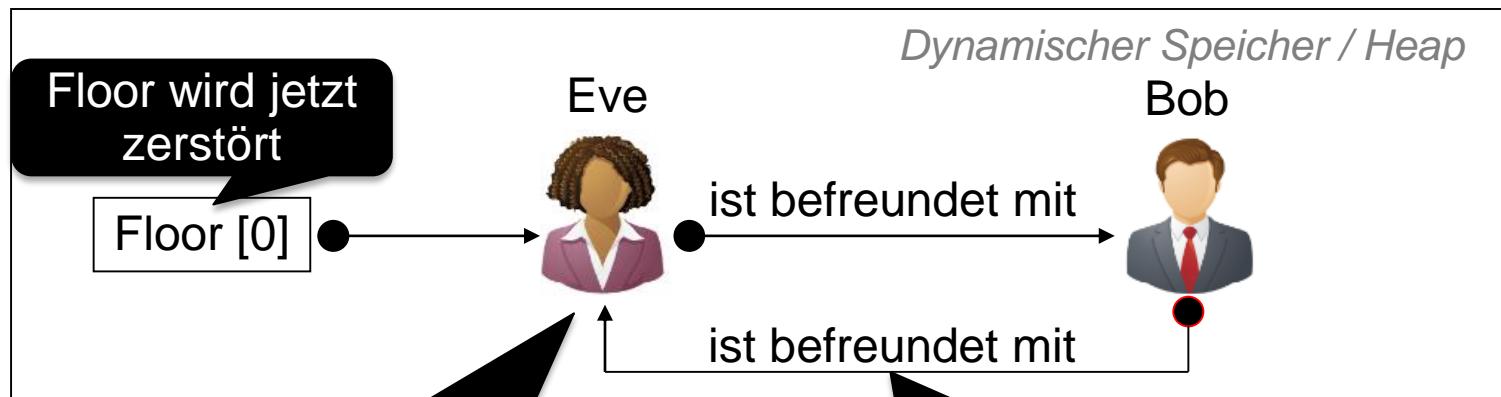


`std::shared_ptr<>` ist nicht perfekt:

- Etwas langsamer als Rohzeiger
- Erkennt **zirkuläre Abhängigkeiten** nicht:

Ablauf:

1. Objekt `Floor[0]` wird zerstört
2. Fertig – Eve und Bob halten sich gegenseitig am Leben.



Weak Pointer (`std::weak_ptr`)

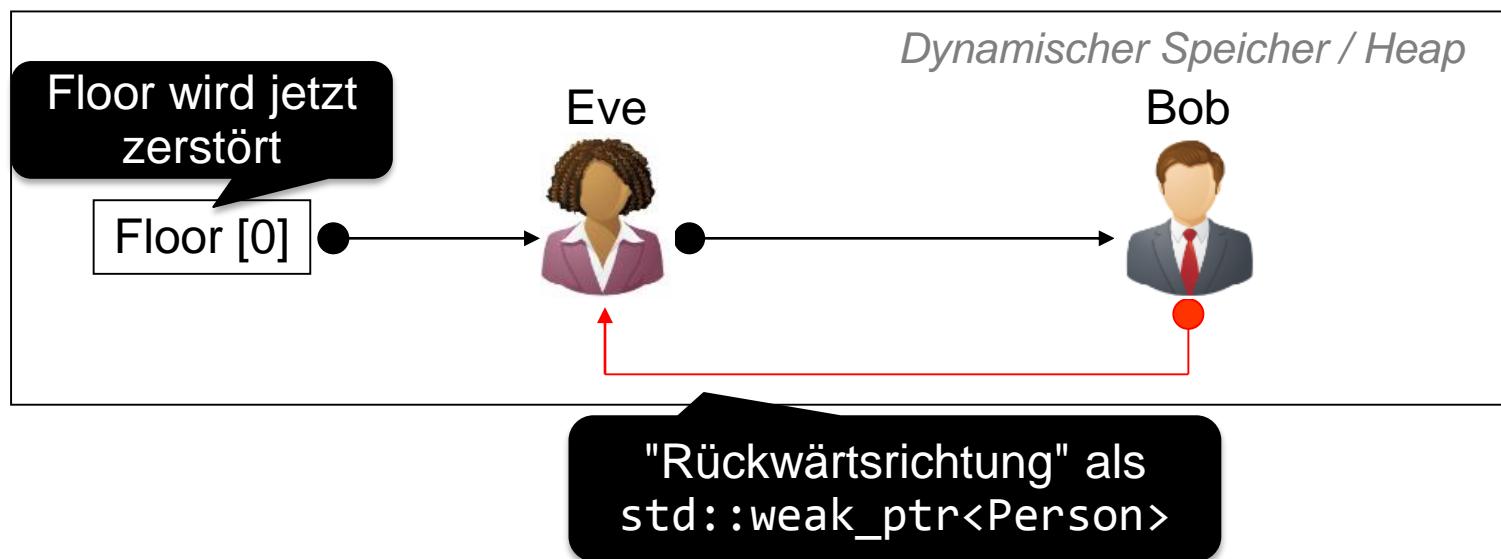


- `std::weak_ptr` für **eine Richtung der Beziehung** zwischen Personen verwenden (z.B.: Eve zeigt stark auf Bob, Bob schwach auf Eve)
- `std::shared_ptr` um "**extern**" auf Personen zu zeigen (Floor auf Person)
- Ein schwacher (weak) Zeiger verlangt, das **mindestens ein "starker" (strong) Zeiger** (z.B. ein `std::shared_ptr`) bereits auf die Person zeigt
- Person wird gelöscht, sobald **höchstens noch schwache Zeiger** darauf verweisen

Weak Pointer: Lösung

Ablauf mit `std::weak_ptr<Person>`:

1. Objekt `Floor[0]` wird zerstört
2. Zähler: 0 Smart/ 1 Weak Pointer auf Eve
3. Eve wird zerstört
4. Zähler: 0 Smart/ 0 Weak Pointer auf Bob
5. Bob wird zerstört



Intermezzo



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Wir haben das Problem mit einem schwachen
Zeiger für eine Richtung der Beziehung
zwischen Personen gelöst...

Wie hätte man das sonst lösen können?

Was wäre die Konsequenz?



Lösung: Verzicht auf Zeiger (I)



```
class Person {  
public:  
// ...  
private:  
    std::vector<Person> friends;  
// ...  
};
```

```
class Elevator {  
public:  
// ...  
private:  
    std::vector<Person> containedPersons;  
// ...  
};
```

```
class Floor {  
public:  
// ...  
private:  
    std::vector<Person> containedPersons;  
// ...  
};
```



Welches neue Problem handeln wir uns damit ein?



Eine Person existiert jetzt **mehrfach!** (s. nächste Folie)

Lösung: Verzicht auf Zeiger (II)



```
int main(int argc, char **argv) {  
  
Person eve("Eve", 55.0); // initial weight: 55kg  
Person bob("Bob", 80.0); // initial weight: 80kg  
  
cout << bob.getName() << " has weight " << bob.getWeight() << endl;  
  
Person::makeFriends(eve, bob);  
  
Person &bobAsEvesFriend = eve.getFriends().at(0);  
bobAsEvesFriend.setWeight(95);  
cout << bobAsEvesFriend.getName() << " [as Eve's friend] has weight " <<  
    bobAsEvesFriend.getWeight() << endl;  
  
cout << bob.getName() << " has weight " << bob.getWeight() << endl;  
}  
}
```

Ausgabe:

Bob has weight 80
Bob [as Eve's friend] has weight 95
Bob has weight 80

Mit **immutablen Objekten**
(→ `java.lang.String`) umgehbar

https://en.wikipedia.org/wiki/Immutable_object

Zusammenfassung: Übergabe und Rückgabe



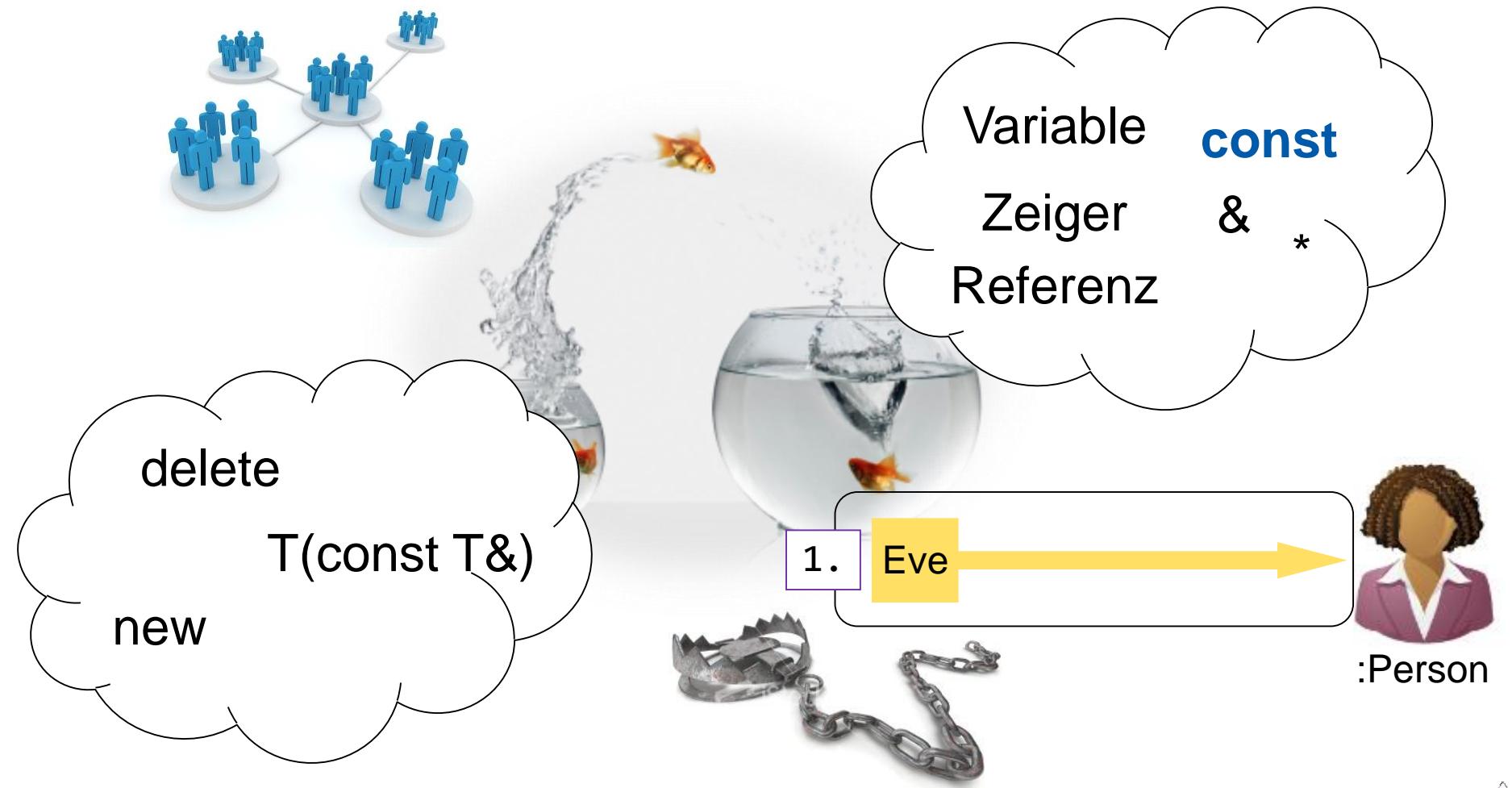
Java

- **Keinerlei "Konfigurationsmöglichkeit"**
 - Primitive "by value" (d.h. int, double, ...)
 - Objekte "by reference" (d.h. Object, String, ...)
- **Übergabe:** Einzige Variation ist final oder nicht final
 - Auswirkung innerhalb der Methode (bzgl. Neuzuweisung)

C++

- **Alles konfigurierbar**, aber anspruchsvoller
- **Übergabe** unabhängig ob primitiver oder komplexer Datentyp
 - "pass by value"
 - "pass by reference (to const)"
 - "pass by pointer (to const)"
- **Rückgabe:**
 - "return by value" (sicher, aber Zusatzaufwand durch Kopie, evtl. Copy Elision)
 - "return by reference (to const)" (effizient, aber Gefahr von Speicherfehlern)
 - "return by pointer (to const)" (effizient, aber Gefahr von Speicherfehlern)

Zusammenfassung



Programmierpraktikum C und C++

Vererbung und Polymorphie



ES Real-Time Systems Lab

Prof. Dr. rer. nat. Andy Schürr

Dept. of Electrical Engineering and Information Technology

Dept. of Computer Science (adjunct Professor)

www.es.tu-darmstadt.de

Roland Kluge

roland.kluge@es.tu-darmstadt.de

Was ist (Untertyp-)Polymorphie?



- **Bedeutung:** Eine Variable kann Instanzen verschiedener Klassen enthalten (oder darauf verweisen), die eine Unterklasse des statischen Typs der Variable sind.
- **Beispiel:**

```
ElevatorStrategy *strategy = new EnergyMinimizingStrategy();    // (1)
strategy = new WaitingTimeMinimizingStrategy();                  // (2)
```

 - **Statischer Typ** (zur Compilezeit) von strategy: ElevatorStrategy *
 - **Dynamischer Typ** (zur Laufzeit) von strategy:
 - (1) EnergyMinimizingStrategy*
 - (2) WaitingTimeMinimizingStragy*
- Funktioniert in C++ **nur mit Pointern/Referenzen** – nicht mit Werten!

[https://en.wikipedia.org/wiki/Polymorphism_\(computer_science\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Polymorphism_(computer_science))

Ein einfaches Beispiel für Polymorphie in C++

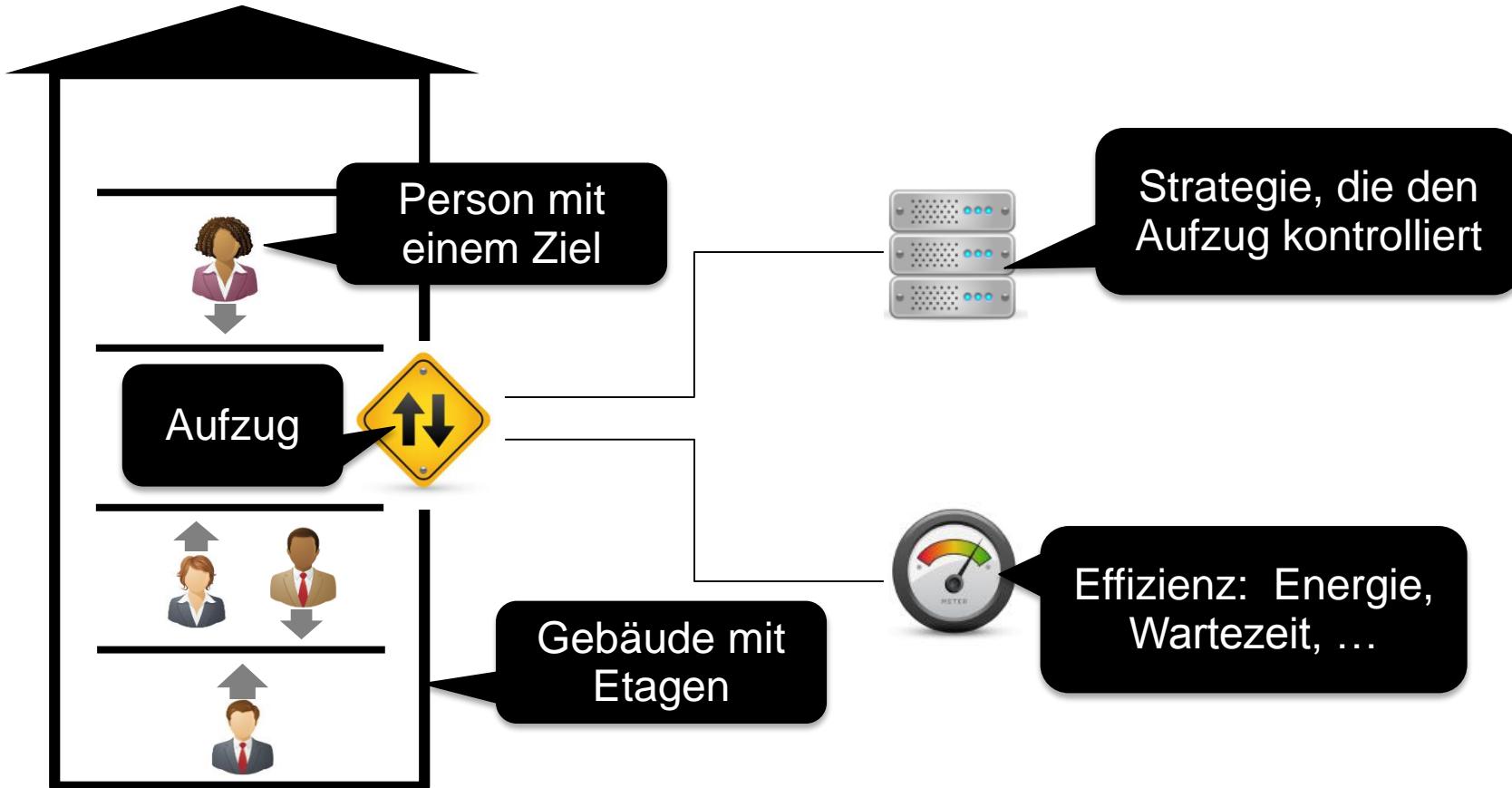


```
class Base {  
public:  
    virtual void print() {  
        std::cout << "B" << std::endl;  
    };  
  
class Child : public Base{  
public:  
    virtual void print() override {  
        std::cout << "C" << std::endl;  
    };  
  
    void doPrint(Base b) { b.print(); }  
  
    void doPrintRef(Base &b) { b.print(); }  
  
// ...
```

Polymorphie funktioniert in C++ nur mit Pointern und Referenzen

```
// ...  
  
int main() {  
    Base b;  
    Base baseFromChild = Child();  
    Child c;  
    Base *basePtrFromChild = new Child();  
  
    b.print(); // B  
    baseFromChild.print(); // B  
    c.print(); // C  
    basePtrFromChild->print(); // C  
  
    doPrint(b); // B  
    doPrint(baseFromChild); // B  
    doPrint(c); // B  
    doPrint(*basePtrFromChild); // B  
  
    doPrintRef(b); // B  
    doPrintRef(baseFromChild); // B  
    doPrintRef(c); // C  
    doPrintRef(*basePtrFromChild); // C  
  
}
```

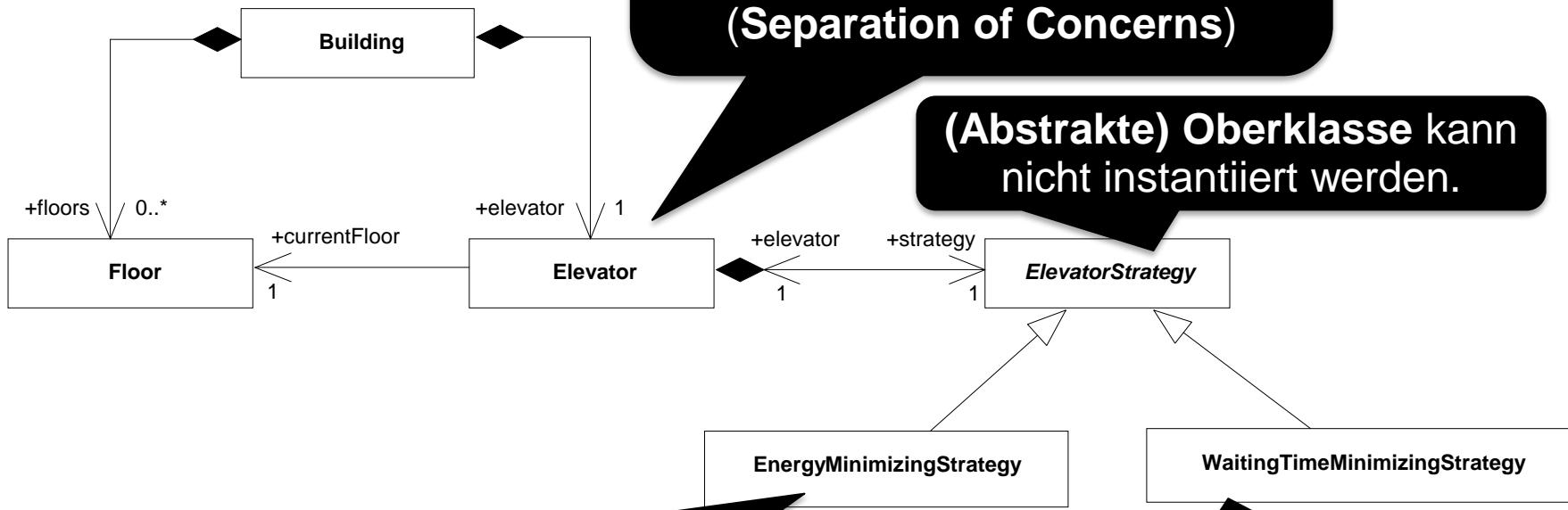
Wozu Polymorphie?



Verschiedene Strategien als Unterklassen



Der Code im Aufzug, der die Strategie verwendet, soll sich nicht ändern, nur weil eine andere Strategie eingesetzt wird.
(Separation of Concerns)



Unterschiedliche Strategien können ergänzt und verwendet werden (**Erweiterbarkeit**). Die richtige Methode wird "magisch" aufgerufen!

Konkrete Unterklassen

Lösung ohne und mit Polymorphie



```
void Elevator::moveToNextFloor(int strategy){  
    switch(strategy){  
        case ENERGY_MINIMIZING_STRATEGY:  
            // ...  
            break;  
        case WAITING_TIME_MINIMIZING_STRATEGY:  
            // ...  
            break;  
  
        // and so on ...  
    }  
}
```

"Dispatch" von Hand

Für jede neue Strategie muss die Logik hier (und eventuell an **etlichen anderen Stellen**) erweitert werden!

Fehleranfällig, schlecht wartbar
(Fluch des switch-case)

```
void Elevator::moveToNextFloor(){  
    currentFloor =  
        strategy->next(this);  
}
```

Polymorpher Dispatch

Konkrete **ElevatorStrategy** wird bei der Erzeugung des Aufzugs gesetzt.

Der obige Code ruft die Strategie polymorph auf und **muss nicht mehr verändert werden**.

Intermezzo



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Was ist der **Vorteil von Polymorphie?**

Wie kann das so wichtig sein wenn z.B. C das nicht unterstützt (und C doch so weitverbreitet ist)?!

Was hat Polymorphie mit Vererbung zu tun? Geht es auch ohne Vererbung?



Ein Blick auf die Klassen ElevatorStrategy

Vorausdeklaration (Forward Declaration, statt `#include`), um zyklische Abhängigkeit zu vermeiden

```
#include <memory>           ElevatorStrategy.hpp
#include "Floor.hpp"

class Elevator;

class ElevatorStrategy {
public:
    ElevatorStrategy();
    ~ElevatorStrategy();

    const Floor*
    next(const Elevator *elevator) const
        override;
};

typedef std::shared_ptr<ElevatorStrategy>
ElevatorStrategyPtr;

typedef std::shared_ptr<const ElevatorStrategy>
ConstElevatorStrategyPtr;
```

In der .cpp-Datei ist dies aber kein Problem!



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

```
#include "ElevatorStrategy.hpp"
#include "Elevator.hpp"

using namespace std;

ElevatorStrategy::ElevatorStrategy() { /* ... */ }

ElevatorStrategy::~ElevatorStrategy() {/* ... */}

const Floor*
ElevatorStrategy::next(const Elevator *elevator) const
{
    /* Do nothing */
    return elevator->getCurrentFloor();
}
```

ElevatorStrategy.cpp

Vorausdeklarationen können nur dann verwendet werden, wenn **nur Referenzen oder Pointer** auf die referenzierte Klasse (Elevator) genutzt werden

Ein Blick auf die Klassen Elevator



```
#include "ElevatorStrategy.hpp"  
#include "Floor.hpp"  
  
class Elevator {  
public:  
    Elevator(const Floor*,  
             ConstElevatorStrategyPtr);  
    ~Elevator();  
  
    inline const Floor* getCurrentFloor() const {  
        return currentFloor;  
    }  
  
    void moveToNextFloor();  
  
private:  
    const Floor *currentFloor;  
    ConstElevatorStrategyPtr strategy;  
};
```

Elevator.hpp

Parameter ohne
Namen möglich

```
#include <iostream>  
using std::cout;  
using std::endl;  
  
#include "Elevator.hpp"  
  
Elevator::Elevator(const Floor *currentFloor,  
                    ConstElevatorStrategyPtr  
strategy):  
    currentFloor(currentFloor), strategy(strategy) {  
    cout << "Elevator(): "  
        << "Creating elevator." << endl;  
}  
  
Elevator::~Elevator(){  
    cout << "~Elevator(): "  
        << "Destroying elevator." << endl;  
}  
  
void Elevator::moveToNextFloor(){  
    cout << "Elevator::moveToNextFloor(): "  
        << "Polymorphic call to strategy." << endl;  
  
    currentFloor = strategy->next(this);
```

Elevator.cpp

const Floor* und nicht **const Floor&**,
da der Zeiger sich ändert (aber nicht das
Objekt worauf gezeigt wird!)

Verwendung der Strategie bleibt
gleich, egal welche konkrete
Strategie verwendet wird

Sichtbarkeits-Modifier bei Vererbung



ElevatorStrategy.hpp

```
#include "ElevatorStrategy.hpp"

class EnergyMinimizingStrategy
    : public ElevatorStrategy {
public:
    EnergyMinimizingStrategy();
    ~EnergyMinimizingStrategy();

    const Floor*
    next(const Elevator *elevator) const;
};
```

public-Vererbung entspricht dem Vererbungskonzept in Java.

protected- und **private**-Vererbung schränken die Sichtbarkeit weiter ein

ElevatorStrategy.cpp

```
#include "EnergyMinimizingStrategy.hpp"
#include "Elevator.hpp"
using namespace std;

EnergyMinimizingStrategy::EnergyMinimizingStrategy()
    : ElevatorStrategy() {

    // ...
}

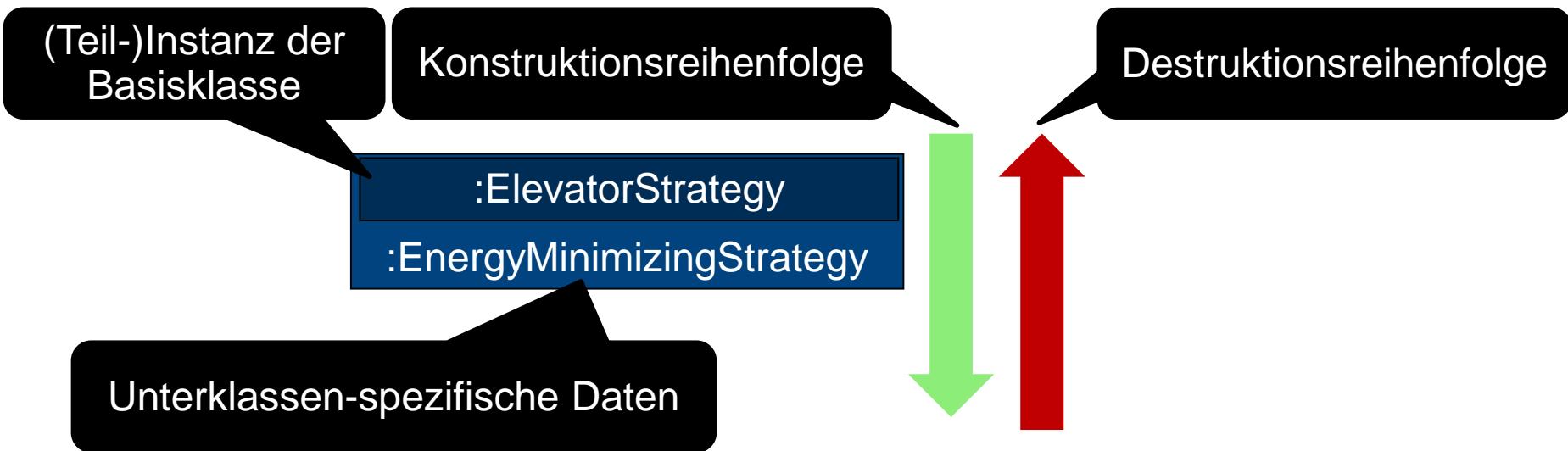
EnergyMinimizingStrategy::~EnergyMinimizingStrategy() {
    cout << "~EnergyMinimizingStrategy(): "
        << "Destroying energy minimizing strategy"
        << endl;
}

const Floor* EnergyMinimizingStrategy::
next(const Elevator *elevator) const{
    cout << "EnergyMinimizingStrategy::next(...): "
        << "Perform some complex calculation ..."
        << endl;

    return elevator->getCurrentFloor();
}
```

Wie **super()**-Aufruf in Java

Konstruktion und Destruktion bei Vererbung



- **Vorteil:** Während der Konstruktion von `EnergyMinimizingStrategy` kann auf die Felder von `ElevatorStrategy` zugegriffen werden.
- Wird spannend bei **Mehrfachvererbung** (siehe später)

Probelauf unserer Simulation



```
#include <iostream>
using namespace std;

#include "Building.hpp"
#include "ElevatorStrategy.hpp"
#include "EnergyMinimizingStrategy.hpp"

int main() {
    ElevatorStrategy *strg = new EnergyMinimizingStrategy();

    // Do something...

    ConstElevatorStrategyPtr strategy(strg);
    Building hbi(6, strategy);

    hbi.getElevator().moveToNextFloor();
}
```

Probelauf unserer Simulation



```
ElevatorStrategy(): Creating basic strategy  
EnergyMinimizingStrategy(): Creating energy minimizing strategy
```

```
Floor(): Creating floor [0]  
Floor(const Floor&): Copying floor [0]  
~Floor(): Destroying floor [0]
```

```
Elevator(): Creating elevator.  
Building(...): Creating building with 6 floors.  
Building(...): Elevator is on Floor: 0
```

```
Elevator::moveToNextFloor(): Polymorphic call to strategy.  
ElevatorStrategy::next(...): Using basic strategy ...
```

```
~Building(): Destroying building.  
~Elevator(): Destroying elevator.
```

```
~Floor(): Destroying floor [0]  
~Floor(): Destroying floor [1]  
~Floor(): Destroying floor [2]  
~Floor(): Destroying floor [3]  
~Floor(): Destroying floor [4]  
~Floor(): Destroying floor [5]
```

```
~ElevatorStrategy(): Destroying basic strategy
```

Konstruktoren werden
richtig aufgerufen

Polymorpher Aufruf hat
aber nicht funktioniert!

Destruktor der
Subklasse wurde nicht
aufgerufen!

Virtuelle Methoden



- Im Gegensatz zu Java ist bei C++ aus Effizienzgründen die **polymorphe Behandlung** von Methoden **per Default ausgeschaltet**
- Es muss explizit mit dem **Schlüsselwort virtual** angegeben werden, welche Methoden polymorph zu behandeln sind

Virtuelle Methoden



```
class ElevatorStrategy {  
public:  
    ElevatorStrategy();  
    virtual ~ElevatorStrategy();  
  
    virtual const Floor* next(const Elevator *elevator) const;  
};
```

Regel: Klassen mit virtuellen Methoden sollten einen **virtuellen Destruktor** besitzen!

Methoden werden als virtuell gekennzeichnet (**nur im Header**)

```
class EnergyMinimizingStrategy : public ElevatorStrategy {  
public:  
    EnergyMinimizingStrategy();  
    virtual ~EnergyMinimizingStrategy();  
  
    virtual const Floor* next(const Elevator *elevator) const;  
};
```

virtual muss nicht in Subklassen wiederholt werden, wird aber häufig der Übersicht halber gemacht

Intermezzo



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Warum muss der **Destruktor** in einer Klasse mit **virtuellen Methoden** auch **virtuell** sein?

Wo sind **virtuelle Konstruktoren** nützlich?



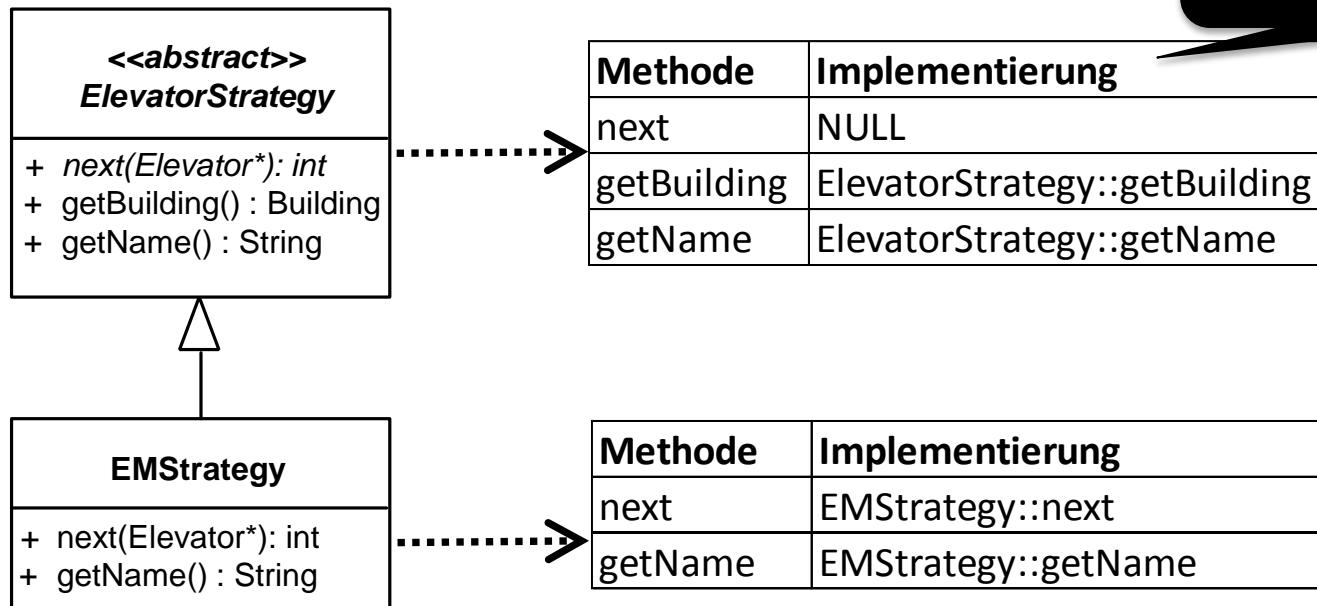
Exkurs: Virtual Method Table

Der Mechanismus der dynamischen Bindung



- Egal, wie der Pointer auf ein Objekt deklariert ist (z.B. `ElevatorStrategy*`), **das Objekt behält seinen Typ** (z.B. `EnergyMinimizingStrategy*`).
- **Jede Klasse** besitzt eine **Lookup-Tabelle (vtable)**, die jeder virtuellen Methode ihre Implementierung zuweist.

Java: alle Methoden
C++: `virtual` Methode



Falls kein
Eintrag/NULL:
Verwende
Methode des
Typs des
Pointers.

https://en.wikipedia.org/wiki/Virtual_method_table

Probelauf mit virtuellen Methoden



ElevatorStrategy(): Creating basic strategy

EnergyMinimizingStrategy(): Creating energy minimizing strategy

```
Floor(): Creating floor [0]
Floor(const Floor&): Copying floor [0]
~Floor(): Destroying floor [0]
```

Elevator(): Creating elevator.

Building(...): Creating building with 6 floors.

Building(...): Elevator is on Floor: 0

Elevator::moveToNextFloor(): Polymorphic call to strategy.

EnergyMinimizingStrategy::next(...): Perform some complex calculation ...

```
~Building(): Destroying building.
~Elevator(): Destroying elevator.
~Floor(): Destroying floor [0]
~Floor(): Destroying floor [1]
~Floor(): Destroying floor [2]
~Floor(): Destroying floor [3]
~Floor(): Destroying floor [4]
~Floor(): Destroying floor [5]
```

~EnergyMinimizingStrategy(): Destroying energy minimizing strategy

~ElevatorStrategy(): Destroying basic strategy



Polymorpher Aufruf
funktioniert jetzt



Und alle Destruktoren werden in der
richtigen Reihenfolge aufgerufen

Pure Virtual = "virtual + =0"



```
class ElevatorStrategy {  
public:  
    ElevatorStrategy();  
    virtual ~ElevatorStrategy();  
  
    virtual const Floor* next(const Elevator *elevator) const = 0;  
};
```

ElevatorStrategy kann durch =0 nicht mehr instantiiert werden.

Methode ist hiermit **rein virtuell** – keine Implementierung in ElevatorStrategy möglich.

- Entspricht einer **abstrakten Methode** in Java.
- Klasse mit rein virtuellen Methode entspricht **abstrakter Klasse** oder **Interface** in Java.
- Methode kann von Unterklassen implementiert werden, muss aber nicht. (~ Hierarchie abstrakter Klassen)

Intermezzo



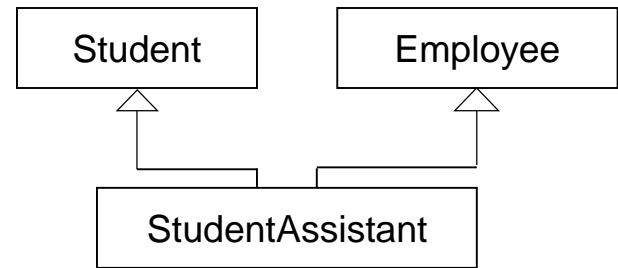
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Wieso sind **virtuelle Methoden** "teuer"?

Was bedeutet jede **const-Verwendung** im folgenden Ausdruck:

```
class ElevatoryStrategy {  
    virtual const Floor* next(const Elevator *elevator)  
        const = 0;  
};
```





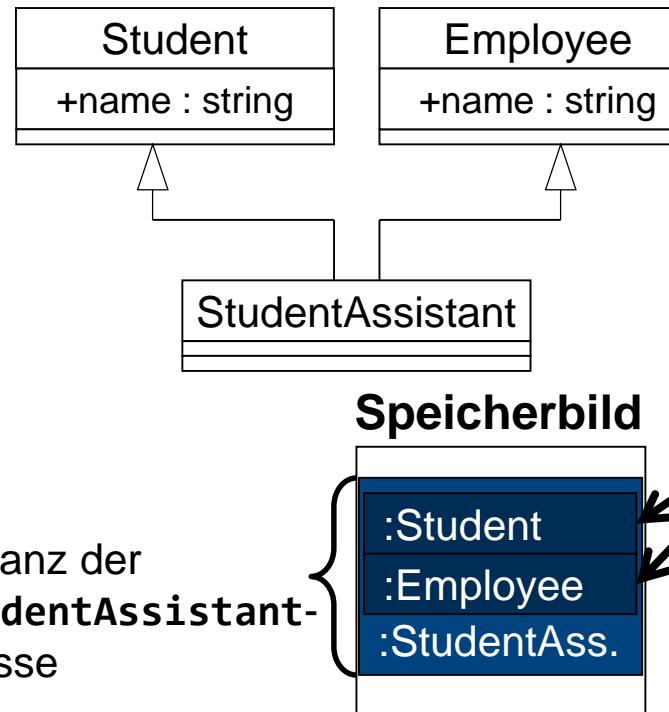
MEHRFACHVERERBUNG

Implementierungsvererbung: Konflikte



- **Mehrfachvererbung kann zu Mehrdeutigkeit führen**

Attribute und Methoden einer Oberklasse sind Bestandteil der Unterklasse (außer **private**-Elemente)



```
#include <string>

class Student      {public: std::string name; };
class Employee     {public: std::string name; };

class StudentAssistant
: public Student,
public Employee {};
```

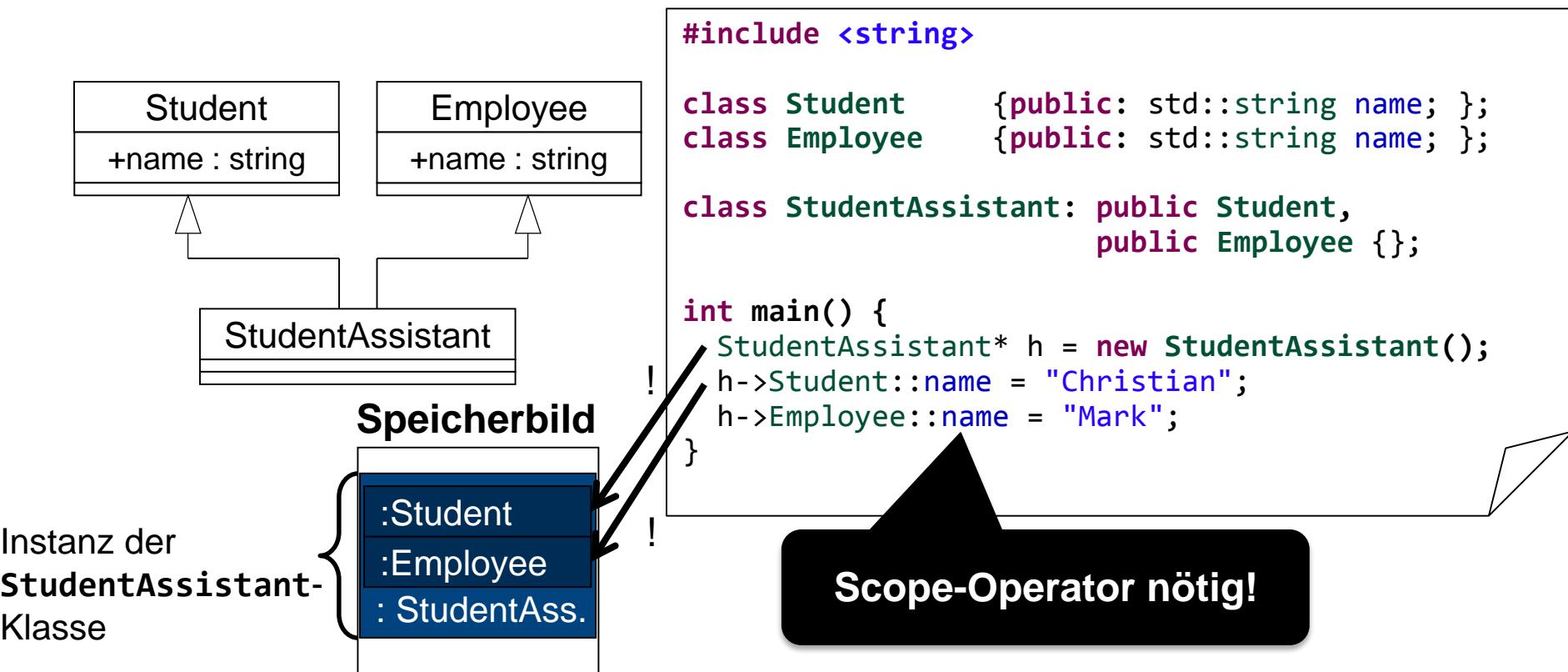
```
int main() {
    StudentAssistant *h = new StudentAssistant();
    h->name = "Christian";
    /* Error: request for name is ambiguous */
}
```

Namenskonflikt!
Keine eindeutige
Zuweisung ...

Implementierungsvererbung: Konflikte



- Auflösung der Mehrdeutigkeit durch Verwendung des vollständigen Namens (**Scope-Operator ::**)

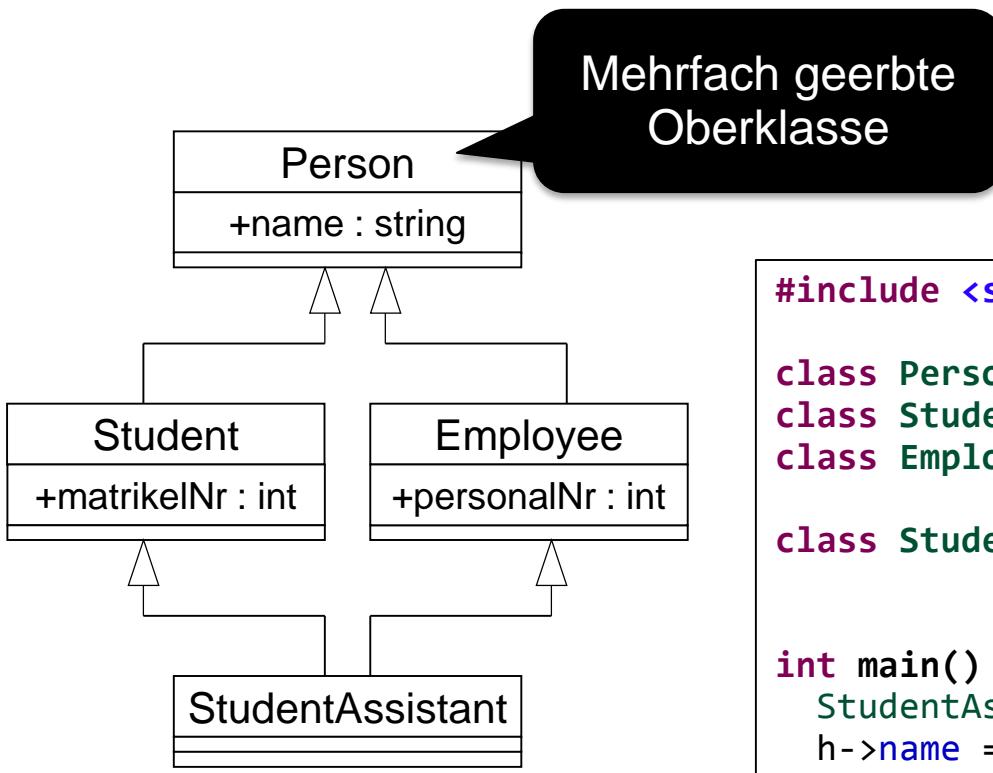


Instanz der
StudentAssistant-
Klasse

Implementierungsvererb.: Speicherproblematik

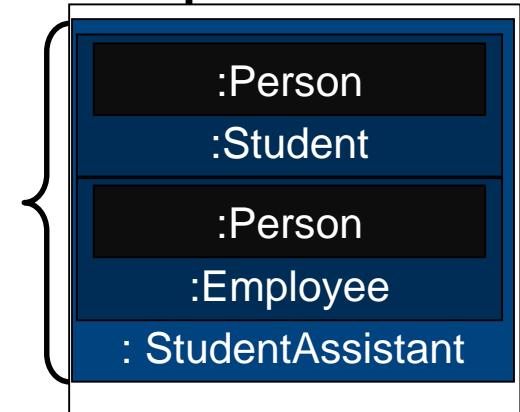


Mehrfach geerbte Oberklassen führen auch zur
unnötigen Bindung von Speicher



Instanz der
HiWi-Klasse

Speicherbild



```
#include <string>
```

```
class Person {public: std::string name; };
class Student : public Person {};
class Employee : public Person {};

class StudentAssistant : public Student,
                        public Employee {};
```

```
int main() {
    StudentAssistant* h = new StudentAssistant();
    h->name = "Christian";
}
```

Fehler! Keine
eindeutige
Zuweisung ...

Implementierungsvererb.: Methoden



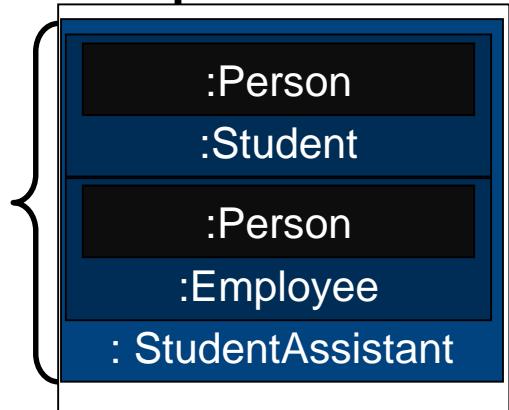
Für Methoden entsteht genau die gleiche Problematik!

```
#include <string>
class Person {
public:
    std::string getName() {return "...";}
};
class Student : public Person {};
class Employee : public Person {};
class StudentAssistant : public Student,
                           public Employee {};

int main() {
    StudentAssistant* h = new StudentAssistant ();
    h->getName();
}
```

Instanz der HiWi-Klasse

Speicherbild



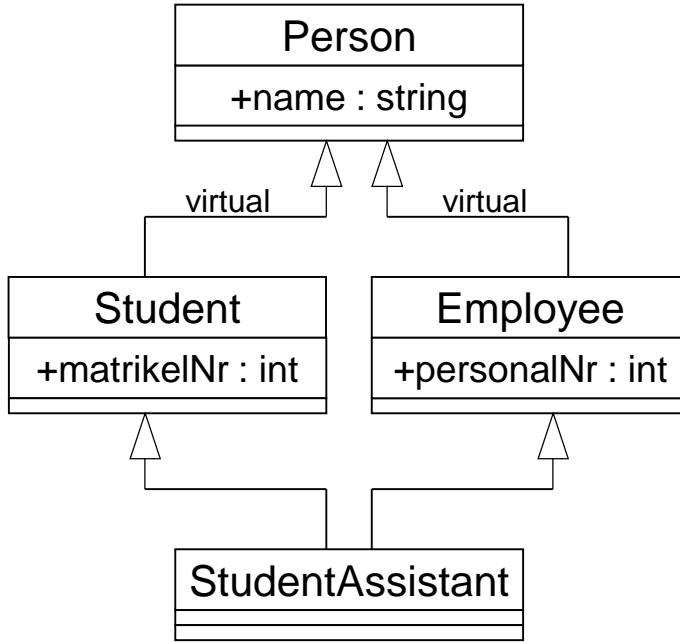
In function 'int main()':
11:6: error: request for
 member 'getName' is ambiguous
3:42: note: candidates are:
 std::string Person::getName()
 std::string Person::getName()

Hilfreich?

Virtuelle (Mehrfach-)Vererbung (I)



Lösung: Mehrfach geerbte Oberklassen nur einmal einbinden
Schlüsselwort **virtual** ermöglicht virtuelle Oberklassen / Vererbung



```
#include <string>

class Person { public: std::string name; };
class Student : virtual public Person;
class Employee: virtual public Person

class HiWi:
    public Student,
    public Employee{};

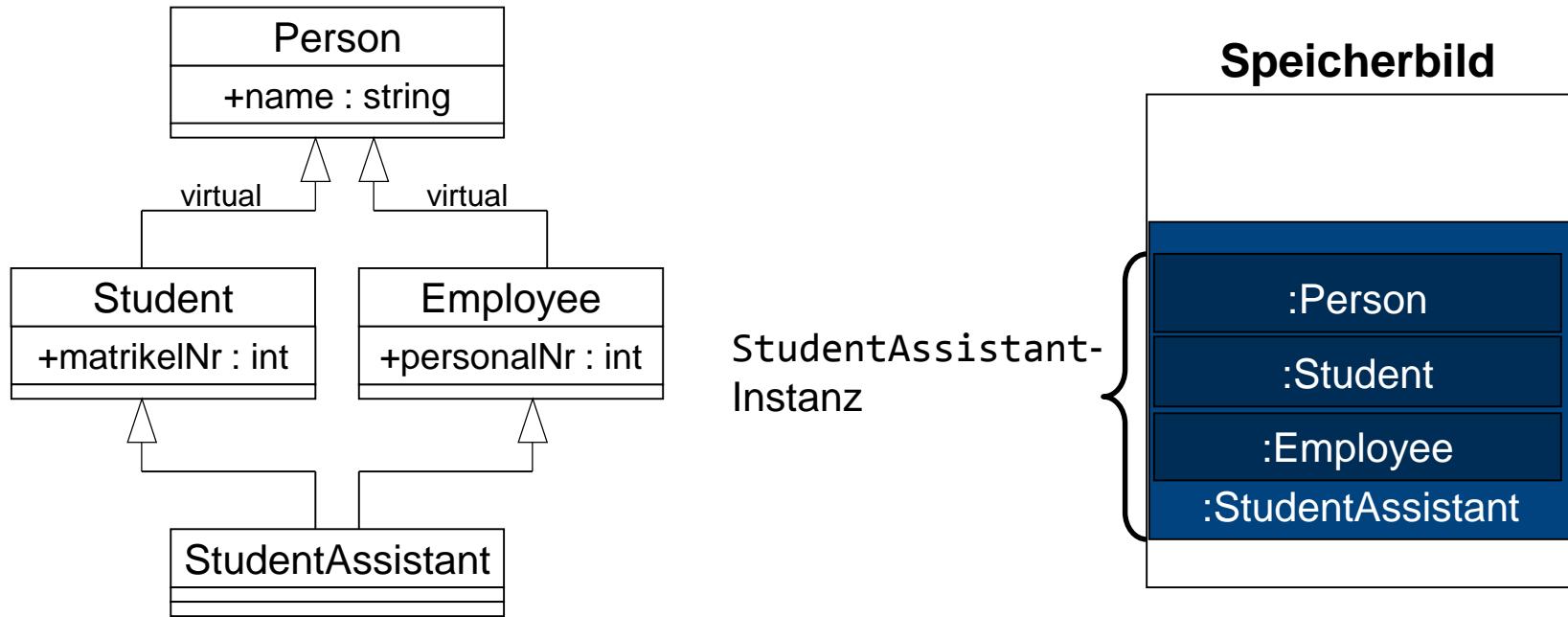
int main() {
    StudentAssistant* h = new StudentAssistant();
    h->name = "Max";
}
```

! Die **virtual**-Deklaration findet nicht an der Stelle statt, die sie nötig macht (**StudentAssistant**)!

Virtuelle (Mehrfach-)Vererbung (II)



Lösung: Mehrfach geerbte Oberklassen nur einmal einbinden
Schlüsselwort **virtual** ermöglicht virtuelle Oberklassen / Vererbung

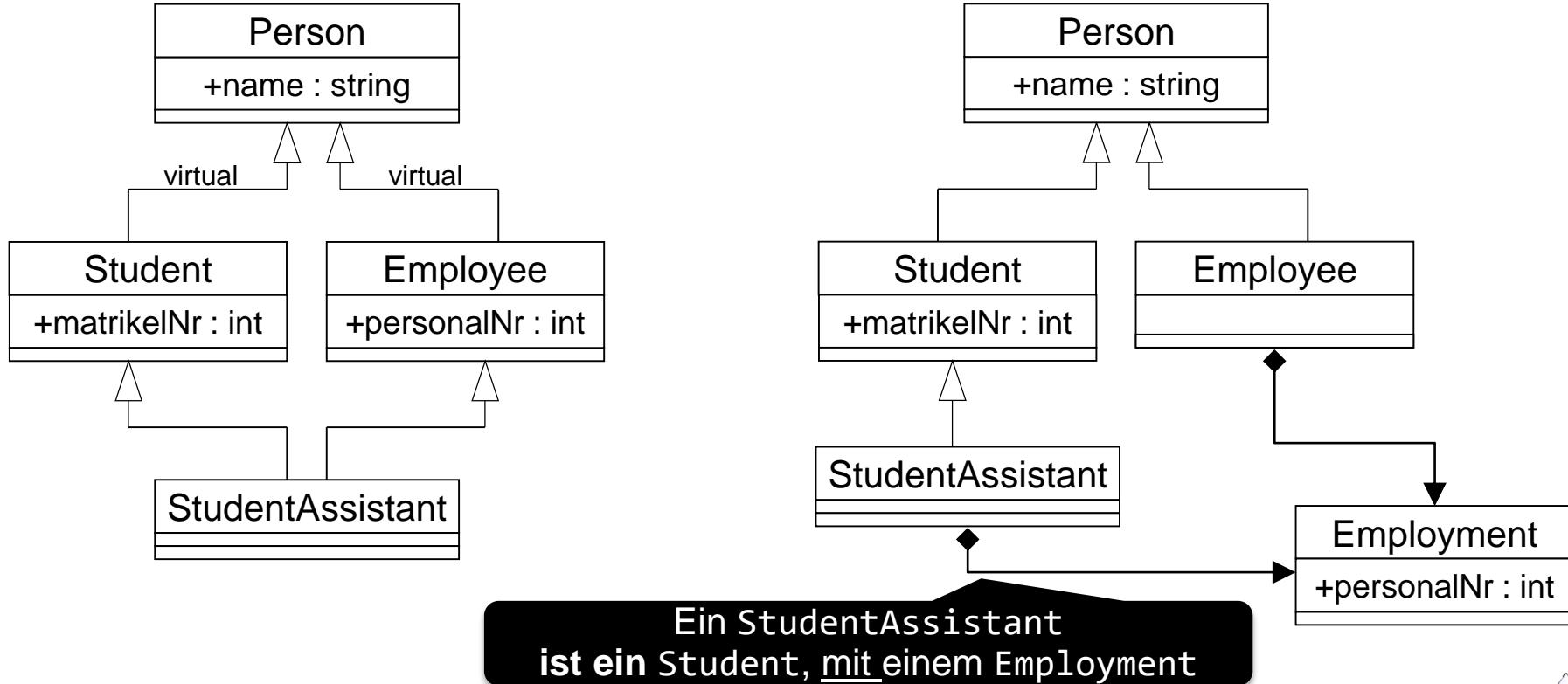


Implementierungsvererbung: Schlechtes Design?



Mehrfachvererbung kann auf schlechtes Design hindeuten:

Gemeinsamkeiten sollen explizit extrahiert und das Design vereinfacht werden



Schnittstellen- vs. Implementierungsvererbung



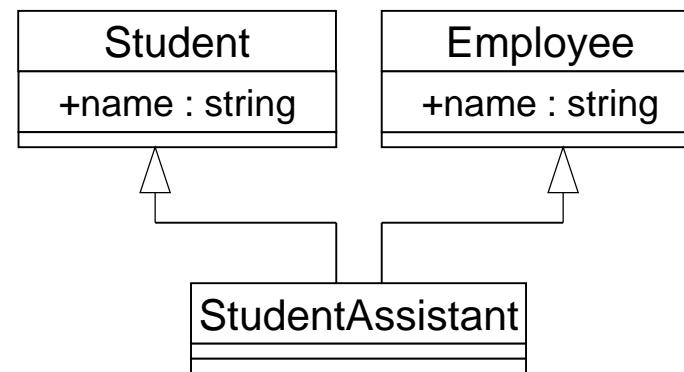
Schnittstellenvererbung:

Wenn die Oberklassen nur **pure virtual** Methoden enthalten, dann ist Mehrfachvererbung überhaupt kein Problem

! Dies entspricht der Verwendung von **Interfaces** in Java!

Implementierungsvererbung:

Wird aber von mehreren Oberklassen wirklich **Implementierung** geerbt, so kann das zu Problemen führen...



Konzept

Exkurs: Mehrfachvererbung in Java (I)



- **Frage:** Wie wird in Java die folgende Situation gelöst?
- **Antwort:** Gar nicht – darf so nicht vorkommen!

```
interface InterfaceA {      int run();      }
interface InterfaceB {      boolean run();     }

public class MyClass implements InterfaceA, InterfaceB {

    @Override
    public int run() {
        return 0;
    }
}
```

Error: The return type
is incompatible with
InterfaceB.run()



Exkurs: Mehrfachvererbung in Java? (II)



- Seit Java 1.8: Statische Methoden mittels "default" in Interfaces mögliche
- ... und damit auch neue Probleme 😞

```
interface InterfaceA {      default int run() { return 0; }      }
interface InterfaceB {      default int run() { return 1; }      }
```

```
public class MyClass implements InterfaceA, InterfaceB {
}
```

Error: class MyClass inherits
unrelated defaults for run() from
types InterfaceA and InterfaceB



Programmierpraktikum C und C++

Fortgeschrittene Themen



ES Real-Time Systems Lab

Prof. Dr. rer. nat. Andy Schürr

Dept. of Electrical Engineering and Information Technology

Dept. of Computer Science (adjunct Professor)

www.es.tu-darmstadt.de

Roland Kluge

roland.kluge@es.tu-darmstadt.de

Fortgeschrittene Themen in C++



1. Templates



2. Funktionszeiger und Funktionsobjekte

```
void (*fp1)(const string&)
            = print<string>;
fp1("foo"); // ::::> foo
```

3. Überblick der Standard C++ Library

```
#include <algorithms>
#include <priority_queue>
#include <functional>
```

4. Buildprozess mit Makefiles

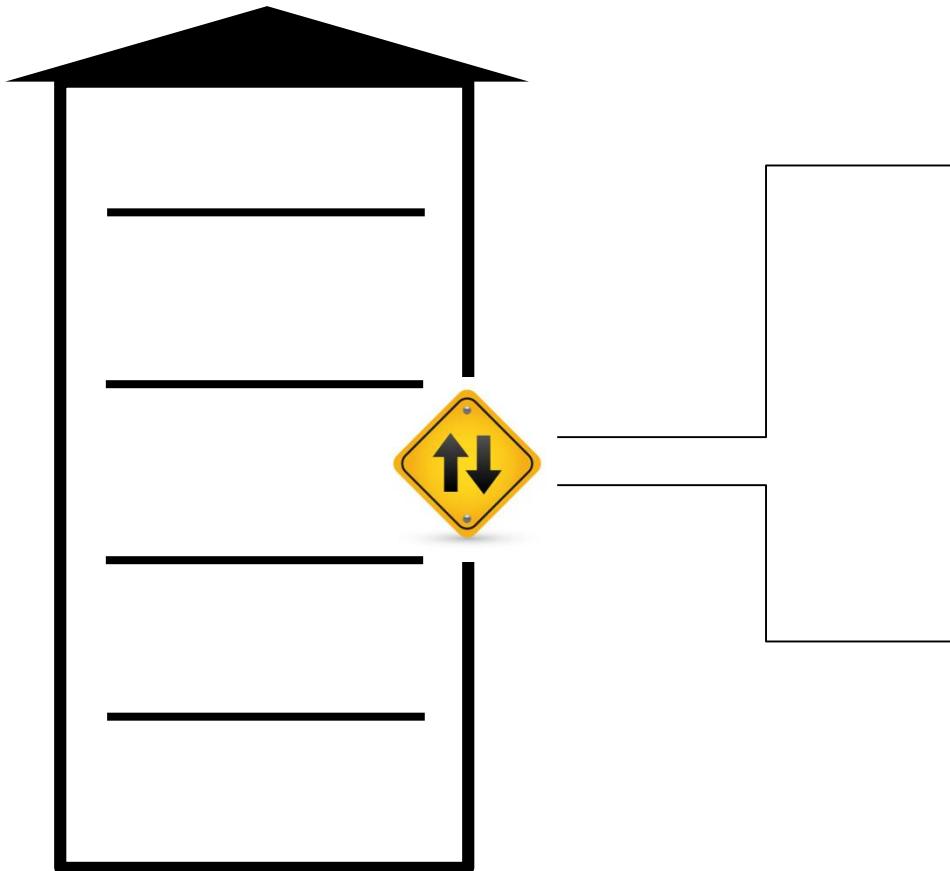
```
all: main.exe

main.exe: main.o Cat.o Dog.o
g++ -o main.exe main.o Cat.o Dog.o
```



TEMPLATES

Generische Programmierung: Motivation



Ziel: Aufzüge für bestimmte Zwecke

- Person mit Ziel
- Lastenaufzug
- Reinigungspersonal
- Feuerwehr
- Speisen
- ...

Trotzdem: immer noch ein Aufzug, der rauf-/runterfährt, etc.

https://en.wikipedia.org/wiki/Generic_programming

void*: Generische Programmierung in C



```
struct ListElement {
    struct ListElement *next;
    struct ListElement *prev;
    void *content;
};

struct List {
    struct ListElement *firstElement;
};

int main(int argc, char **argv) {
    struct ListElement firstElement;
    firstElement.content = "some string";
    firstElement.next = NULL;

    struct List list;
    list.firstElement = &firstElement;

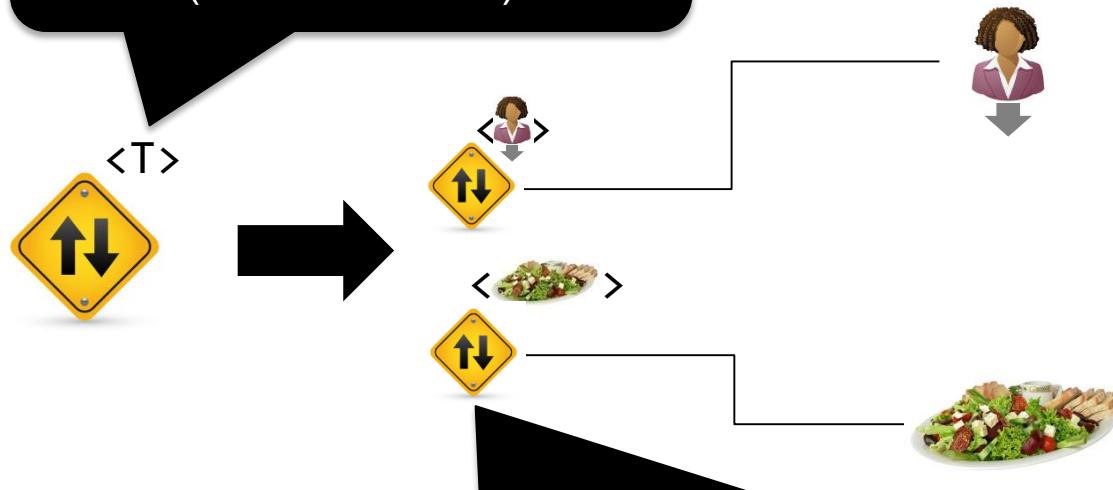
    printf("First address: 0x%p\n", list.firstElement);
    printf("First content: '%s'\n", (const char*)list.firstElement->content);
}
```

Typinformation geht verloren –
so ähnlich wie bei Java-Listen
vor den Generics

Expliziter cast nötig

Templates in C++: Idee

Implementierung mit einem
Typ **parametrisieren**
(= "Platzhalter")



Bei Bedarf wird die richtige Version der
Implementierung **zur Kompilierzeit generiert**
("textuelle Ersetzung der Platzhalter")

Beispiel: Template-Klasse Elevator<T>



```
template<typename T = Person>
class Elevator<T> {
public:
    Elevator(){
        cout << "Elevator()" << endl;
    }
    ~Elevator(){
        cout << "~Elevator()" << endl;
    }

    void placeInElevator(const T *object){
        cout << "Adding " << object->getName()
            << " with weight: "
            << object->getWeight() #
            << " to elevator.";
        cout << endl;

        transportedObjects.push_back(object);
    }

private:
    std::vector<const T*> transportedObjects;
};
```

- C++-Templates induzieren ein **implizites "Interface"** durch die **Art der Verwendung** der generischen Typparameter

Class Templates: Syntax am Beispiel



```
class Person {  
public:  
    Person(const string& name, int weight);  
    ~Person();  
  
    inline const string& getName() const {  
        return name;  
    }  
  
    inline int getWeight() const {  
        return weight;  
    }  
  
private:  
    const string name;  
    int weight;  
};
```

```
class Dish {  
public:  
    Dish(const string& name);  
    ~Dish();  
  
    inline const string& getName() const {  
        return name;  
    }  
  
    inline double getWeight() const {  
        return 1.5;  
    }  
  
private:  
};
```

Unterschiedliche Rückgabetypen

Template-Spezialisierung: Elevator<T>



- Durch die Belegung des Typparameters (hier: T) entsteht eine (neue) Belegung des Klassentemplates (sog. **Spezialisierung** des Templates)

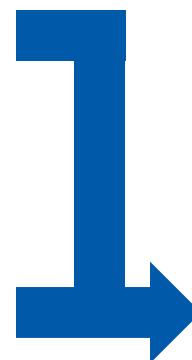
Verwendungsstelle

```
int main() {
    Elevator<> myElevator;
    Elevator<Person> myElevator2;
}
```

```
template<typename T = Person>
class Elevator {
// ...
};
```

Template

C++-Templates sind eher mit einem **Codegenerator** als mit Java-Genericss zu vergleichen!



```
template<>
class Elevator<Person> {
public:
    Elevator(){
        cout << "Elevator()" << endl;
    }
    ~Elevator(){
        cout << "~Elevator()" << endl;
    }

    void placeInElevator(const Person *object){
        cout << "Adding " << object->getName()
            << " with weight: "
            << object->getWeight() #
            << " to elevator.";
        cout << endl;

        transportedObjects.push_back(object);
    }

private:
    std::vector<const Person*> transportedObjects;
};
```

Spezialisiertes Template

Function Templates: Syntax am Beispiel



```
template<typename S, typename T>
S totalWeight(T *start, T *end, std::string things)
{
    S total = 0;

    while(start != end){
        total += start->getWeight();
    }

    cout << "Total weight of " << things
        << " is " << total;
    cout << endl;

    return total;
}
```

Mehrere Typparameter möglich
(auch bei Klassen-Templates)

Typ kann genauso wie in einer Klasse **frei verwendet** werden

Dies ist besonders für
generische Algorithmen sehr nützlich

Templates: Verwendung

Defaulttyp *Person* wird verwendet



```
int main(int argc, char **argv) {
Elevator<> elevator;

Person people[] = {Person("Tony", 75),
                   Person("Lukas", 14)};
elevator.placeInElevator(people);
elevator.placeInElevator(people + 1);

int totalAsInt = totalWeight<int, Person>
    (people, people + 2, "people");

Elevator<Dish> dumbwaiter;

Dish dishes[] = {Dish("Jollof Rice"),
                 Dish("Roasted Chicken")};

dumbwaiter.placeInElevator(dishes);
dumbwaiter.placeInElevator(dishes + 1);

double totalAsDouble = totalWeight<double, Dish>
    (dishes, dishes + 2,
     "dishes");
}
```

Primitive Datentypen können auch verwendet werden (anders als bei Java)

Elevator()

Person(Tony,75)
Person(Lukas,14)

Adding Tony with weight: 75 to elevator.
Adding Lukas with weight: 14 to elevator.

Total weight of people is 89

Elevator()

Dish(Jollof Rice)
Dish(Roasted Chicken)

Adding Jollof Rice with weight: 1.5 to elevator.
Adding Roasted Chicken with weight: 1.5 to elevator.

Total weight of dishes is 3

~Dish(Roasted Chicken)
~Dish(Jollof Rice)
~Elevator()
~Person(Lukas,14)
~Person(Tony,75)
~Elevator()

Intermezzo



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Was ist genau damit gemeint, dass Templates eine Schnittstelle induzieren?

Was sind Vorteile und Nachteile dieser Art von "impliziten" Schnittstellen?

Was ist der Unterschied zwischen C++-Templates und Java-Generics?



Induzierte Schnittstelle



Template-Code

```
template<typename S, typename T>
S totalWeight(T *start, T *end){
    S total = 0;
    while(start != end){
        total += start++->getWeight();
    }
    cout << "Total weight of "
         << " is " << total;
         << endl;
    return total;
}
```

Induzierte Schnittstellen

```
class T {
    double getWeight();
    // or comparable return type
};

class S {
public:
    S(int i);
    void operator+=(double d);
    // or comparable parameter
};

std::ostream& operator<<(std::ostream&, const S&);
```

Mixins: Mehrfachvererbung trifft Templates



```
template<
    class Logger,
    class Security,
    class OperatingSystem,
    class Platform
>
class System :
    public Logger,
    public Security,
    public OperatingSystem,
    public Platform
{
    // Nothing else needed!
};
```

Mixins werden als Typparameter definiert...

...und "reingemischt" mit Mehrfachvererbung!

Mixins: Mehrfachvererbung trifft Templates



```
int main(int argc, char **argv) {  
  
    System<ConsoleLogger, PasswordSecurity, MacOSX, Enterprise> system;  
  
    system.print("Yihaa!");  
  
    std::cout << "Password accepted: " << system.checkPassword("*****")  
        << std::endl;  
  
}
```

Benutzer kann eine konkrete
Implementierung
"zusammenmischen"

Und das Verhalten der Instanz
wird dadurch flexibel
kombiniert und **konfiguriert**



Die C++ **Standard Template Library** (STL) macht ausgiebigen
Gebrauch von Mixins

Vergleich mit Mehrfachvererbung



1. **Schnittstellenvererbung** (→ Mehrfachvererbung in Java)
sinnvoll, nützlich (Design!) und zumeist unproblematisch
2. **Implementierungsvererbung** (→ Mehrfachvererbung in C++)
problematischer und zu vermeiden (Komposition vorziehen, vgl. Employment-Klasse in HiWi-Beispiel)
3. **Mixins** durchaus sinnvoll – eigentlich eine Art Komposition



FUNKTIONSZEIGER, FUNKTIONSOBJEKTE/FUNKTOREN UND METHODENZEIGER

Funktionszeiger: Beispiel (I)



```
class Timer {
public:
    double measureDuration(
        unsigned long iterations,
        void (*fp)(unsigned long)) {
        tic();
        fp(iterations);
        toc();
        return getElapsedTime();
    }
```

```
void tic();
void toc();
double getElapsedTime()
};
```

```
void mySophisticatedAlgorithm(unsigned long iterations);
```

```
#include <iostream>
```

```
int main() {
    Timer t;
    std::cout << "Duration for 100 iterations: "
    << t.measureDuration(100, mySophisticatedAlgorithm) << std::endl;
    std::cout << "Duration for 1000 iterations: "
    << t.measureDuration(1000, mySophisticatedAlgorithm) << std::endl;
}
```

Methode, um die Laufzeit von Funktionen zu messen.

Allerdings: Nicht generisch – nur geeignet für Funktionen, die genau einen `unsigned long`-Parameter und `void` als Rückgabewert haben.

Funktionszeiger: Beispiel (II)

```
template<typename F, typename T>
void applyToSequence(F function, T* begin, T* end){
    while (begin != end) function(*begin++);
}
```

function wird hier als Funktion übergeben und kann als solche direkt verwendet werden

```
template<typename S>
void print(const S& s){
    std::cout << "::::> " << s << std::endl;
}
```

Ermöglicht kompakte, elegante, und sehr generische Algorithmen

```
void validateAges(int a){
    if(a > 100 || a < 0){
        std::cout << a << " is not a valid age!" << std::endl;
    }
}
```

```
int main() {
    int n[] = {-1, 20, 33, 120};
    applyToSequence(print<int>, n, n + 4);
    applyToSequence(validateAges, n, n + 4);
}
```

Verwendung ist **sehr leichtgewichtig** und erfordert keine extra Klassen oder Schnittstellen für viele kleinen Funktionen



Funktionszeiger: Beispiel (II)

```
template<typename S>
void print(const S& s){
    cout << "::::> " << s << endl;
}

void validateAges(int a){
    if(a > 100 || a < 0){
        std::cout << a << " is not a valid age!" << std::endl;
    }
}

int main() {
    void (*fp1)(const string&) = print<string>;
    void (*fp2)(int) = validateAges;

    fp1("foo");    // ::::> foo
    fp2(500);      // 500 is not a valid age
}
```

Zeiger auf eine Funktion
mit const string&
Parameter

Verwendung wie ein
normaler
Funktionsaufruf

Funktionszeiger: Syntax

```
void (*fp1)(const string&) = print<string>;
```

Typ des
Rückgabewerts

Zeigertyp, Klammern
sind notwendig um
Rückgabetyp und Zeiger
auseinanderzuhalten

Name der
Variable

Liste der **Parametertypen**
der Funktionen, auf die
gezeigt werden soll

Adresse der Funktion (hier
durch Instanziierung eines
Funktion-Templates)

```
// Call the function  
fp1("foo");
```

Funktoren aka. Funktionsobjekte



```
class ConsoleLogger {  
public:  
    ConsoleLogger();  
    ~ConsoleLogger();  
  
    inline void operator()(int i) const {  
        std::cout << "user:~ /$ " << i << std::endl;  
    }  
};  
  
template<typename F, typename T>  
void applyToSequence(F function, T* begin, T* end){  
    while (begin != end) function(*begin++);  
}  
  
int main() {  
    int n[] = {-1, 20, 33, 120};  
    applyToSequence(ConsoleLogger(), n, n + 4);  
}
```

operator() erlaubt, Objekte mit Funktionssyntax anzusprechen

Syntax bleibt hier identisch, obwohl wir eine Methode aufrufen

Jetzt kann eine Instanz der Klasse (ein Funktionsobjekt) übergeben werden



Methodenzeiger: Beispiel

```
class ConsoleLogger {  
public:  
    ConsoleLogger();  
    ~ConsoleLogger();  
  
    inline void print(const string& message) const {  
        cout << "user:~ /$" << message << endl;  
    }  
};  
  
void main() {  
  
    void (ConsoleLogger::*fp3)(const string&) const =  
        &ConsoleLogger::print;  
  
    ConsoleLogger logger;  
  
    (logger.*fp3)("bar"); // user:~ /$ bar  
}
```

Normale Methode
einer Klasse

Methodenzeiger sind
spezielle Funktionszeiger

Beim Zeiger auf Methoden muss die
Klasse als "Scope" angegeben werden

Aufruf nur mit einer Instanz
der Klasse möglich

Methodenzeiger: Syntax

Klasse der Methode

Name der Variable

Liste der **Parametertypen** der Funktionen, auf die gezeigt werden soll

```
void (ConsoleLogger::*fp1)(const string&) =  
&ConsoleLogger::print;
```

Typ des Rückgabewerts

Zeigertyp, Klammern sind notwendig um Rückgabetyp und Zeiger auseinanderzuhalten

Adresse der Methode

```
ConsoleLogger logger;  
ConsoleLogger *loggerPtr;  
(logger.*fp3)("bar");  
(loggerPtr->*fp3)("bar");
```

Aufruf über Dereferenzierung des Methodenzeigers

Funktionszeiger vs. Methodenzeiger



```
class C {  
public:  
    template<typename S>  
    void print(const S& s) { /* ... */}  
    void validateAges(int a) { /* ... */}  
};
```

```
template<typename C, typename F, typename T>  
void applyToSequence(C object, F method, T* begin, T* end) {  
    while (begin != end)  
        (object.*method)(*begin++);  
}
```

```
int main() {  
    int n[] = { -1, 20, 33, 120 };  
    applyToSequence(print<int>, n, n + 4);  
    applyToSequence(validateAges, n, n + 4);  
  
    applyToSequence(C(), &C::print<int>, n, n + 4);  
    applyToSequence(C(), &C::validateAges, n, n + 4);  
}
```

Zeiger auf **Methoden** können nicht auf die gleiche Art und Weise übergeben werden

... entsprechend ändert sich der Aufruf.

Exkurs: Automatische Typableitung



- C++-Typen können **komplex** werden
 - `std::vector<std::string>::const_iterator x = v.begin();`
 - `const std::string& (*fp)(const std::string&);`
- **Neues Schlüsselwort auto** macht das Leben einfacher
 - `auto x = v.begin();`
 - `for (auto x : v) {std::cout << x << std::endl;}`
- In der Klausur aus didaktischen Gründen **verboten** ☺

Exkurs: Lambdas (C++11)



- **Lambda-Ausdruck** = anonyme Funktion (ohne zugewiesenen Namen)

- **C++11:**

- Weiterer Mechanismus, um "Verhalten als Parameter zu übergeben"
 - In Kombination mit `auto` extrem mächtig und zugleich kompakt!
 - Beispiel:

```
auto prefix = "Info: ";
auto print = [=] (const std::string &msg)
    {std::cout << prefix << msg << std::endl;};
print("Hello World!"); // Output: Info: Hello World!
```

- Mittels `[]` kann die Variable `prefix` aus dem Kontext von `print` "**eingefangen**" werden (`[=]` "by value", `[&]` "by reference")

- **In Java seit 1.8**

- Beispiel:
`Arrays.asList(1,2,3).stream()
 .map(x -> x*x)
 .filter(x -> x < 7).collect(Collectors.toString());`

z.B. <http://www.cprogramming.com/c++11/c++11-lambda-closures.html>
viele Beispiele: https://en.wikipedia.org/wiki/Anonymous_function

Exkurs: Der Fluch des Most Vexing Parse



- Warum funktioniert das Folgende nicht?

```
class Building{  
public:  
    int floorCount;  
};  
int main() {  
    Building b();  
    b.floorCount;  
}
```

- Fehlermeldung:

In function 'int main()': 7:7: error: request for member 'floorCount' in 'b', which is of non-class type 'Building()'

- Grund: Der C++-Compiler interpretiert b als einen Funktionszeiger, der auf eine parameterlose, Building-zurückgebende Funktion zeigt.
- Lösung: Klammern weglassen oder Initialisierungsliste (ab C++11)

```
int main() {  
    Building b2;  
    Building b3{};  
}
```

https://en.wikipedia.org/wiki/Most_vexing_parse

Intermezzo



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Wieso sind Zeiger auf Funktionen nützlich?

Gibt es auch Nachteile?

(*) Sind Zeiger auf Funktionen in C++
genauso flexibel wie richtige "Zeiger auf
Funktionen" in (funktionalen)
Programmiersprachen wie
Scheme/Lisp/Haskell/Ruby/Python?



Zeiger auf Funktionen: Fazit



- Zeiger auf Funktionen ermöglichen einen eher **funktionalen Programmierstil** (ideal für generische Algorithmen).
- Mithilfe von Funktionszeigern kann man auch in C Polymorphie erreichen.
- In Verbindung mit Templates entsteht typischerweise ein **schlankeres, kompakteres Design** als in Java (reine OO)
- **Ideal für kleine Funktionen**, um einen Wildwuchs an kleinen Klassen (z.B. mit jeweils nur einer Methode und ohne Zustand) zu vermeiden
- Sobald die implementierte Funktionalität komplexer wird (-> Zustand), sind **Funktionsobjekte** oder **Methodenzeiger** (je nach Kontext) sinnvoll.



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

STANDARD TEMPLATE LIBRARY (STL)

Generische STL-Algorithmen: std::copy



```
template <class InputIterator, class OutputIterator>
OutputIterator copy (InputIterator first, InputIterator last, OutputIterator result);
```

Parameters:
`first, last`

STL-weite Konvention zur Nutzung von Iteratoren

Input iterators to the initial and final positions in a sequence to be copied. The range used is `[first, last)`, which contains all the elements between `first` and `last`, including the element pointed by `first` but not the element pointed by `last`.

`result`

Output iterator to the initial position in the destination sequence. This shall not point to any element in the range `[first, last)`.

Return Value:

An iterator to the end of the destination range where elements have been copied.

<http://www.cplusplus.com/reference/algorithm/copy/>

Generische STL-Algorithmen: std::copy



```
template <class InputIterator, class OutputIterator>
OutputIterator copy (InputIterator first, InputIterator last, OutputIterator result);
```

```
#include <iostream>
#include <algorithm>
#include <iterator>
#include <vector>
```

```
int main(int argc, char **argv) {
    int numbers[] = {1,2,3,4,5};
    vector<int> result;

    std::copy(numbers, numbers + 5, std::back_inserter(result));

    std::copy(result.begin(), result.end(),
              std::ostream_iterator<int>(std::cout, ", "));
}
```

Erzeugt einen **OutputIterator** aus
einem Behälter (vector)

STL-Behälter bieten
InputIteratoren an

Erzeugt einen **OutputIterator**
aus einem Stream (cout)

<http://www.cplusplus.com/reference/algorithm/copy/>

Generische STL-Algorithmen:

std::remove_copy_if



```
template <class InputIterator, class OutputIterator, class UnaryPredicate>
OutputIterator remove_copy_if ( InputIterator first, InputIterator last,
                               OutputIterator result, UnaryPredicate pred);
```

Wie `copy`, aber ein Prädikat definiert, was ausgelassen wird.

Parameters:

`first, last, result` -> [Wie bei `copy`]
`pred`

Unary function that accepts an element in the range as argument, and returns a value convertible to `bool`. The value returned indicates whether the element is to be removed from the copy (if true, it is not copied).

The function shall not modify its argument.

This can either be a function pointer or a function object.

Return Value:

An iterator pointing to the end of the copied range, which includes all the elements in `[first, last)` except those for which `pred` returns true.

http://www.cplusplus.com/reference/algorithm/remove_copy_if/

Generische STL-Algorithmen: std::remove_copy_if



```
template <class InputIterator, class OutputIterator, class UnaryPredicate>
OutputIterator remove_copy_if ( InputIterator first, InputIterator last,
                               OutputIterator result, UnaryPredicate pred);
```

```
bool even(int i){_____
    return i % 2 == 0;
}
```

Funktion even entscheidet
was ausgelassen wird

```
int main(int argc, char **argv) {
    int numbers[] = {1,2,3,4,5};
    vector<int> result(numbers, numbers + 5);

    remove_copy_if(result.begin(), result.end(),
                  ostream_iterator<int>(cout, ", "),
                  even); // 1, 3, 5
}
```

Funktionszeiger oder
Funktionsobjekt übergeben

http://www.cplusplus.com/reference/algorithm/remove_copy_if/

Generische Behälter: std::priority_queue



```
template <class T,  
         class Container = vector<T>,  
         class Compare = less<  
                         typename Container::value_type>  
         >  
  
class priority_queue;
```

Typ vom Inhalt der Warteschlange

Typ des darunterliegenden Behälters (`std::vector<T>` wird als Default verwendet)

Binäres Prädikat (`less` wird als Default verwendet)

Damit Compiler weiß, dass `value_type` ein Typ ist

Default Template-Parameter erlauben **einfache**, aber bei Bedarf **konfigurierbare** Verwendung!

http://www.cplusplus.com/reference/queue/priority_queue/

Generische Behälter: std::priority_queue



```
template <class T,  
         class Container = vector<T>,  
         class Compare = less<typename Container::value_type> >  
class priority_queue;
```

```
#include <iostream>  
#include <queue>  
#include <functional>  
  
using namespace std;  
  
template<class T>  
void process_queue(T& queue){  
    while(!queue.empty()){

        cout << queue.top()
            << ",";
        queue.pop();
    }
}
```

Einfache Hilfsfunktion
für die Ausgabe

```
int main(int argc, char **argv) {  
    int numbers[] = {3,2,1,5,4};  
  
    std::priority_queue<int>  
        descending(numbers, numbers + 5);  
    process_queue(descending);
                                // 5,4,3,2,1  
  
    std::priority_queue<int,
                        vector<int>,
                        greater<int> >
        ascending(numbers, numbers + 5);  
    process_queue(ascending);
                                // 1,2,3,4,5
}
```

http://www.cplusplus.com/reference/queue/priority_queue/

Intermezzo



Was ist "schöner"? Was ist fehleranfälliger? Was ist kompakter?

```
std::remove_copy_if(result.begin(),                      // first
                    result.end(),                        // last
                    ostream_iterator<int>(cout, ", "), // result
                    even);                           // predicate
```

VS

```
template<class T, typename InputIterator, typename OutputIterator>
void myCopyRemoveIf(
    InputIterator first, InputIterator last,
    OutputIterator result) {
    for (T iter = first; iter != last; ++iter)
    {
        if (!P(*iter)) {
            (*result) = *iter
            ++result;
        }
    }
}
```



Standard Template Library: Fazit



- **Mächtig, effizient, ausgereift und gut dokumentiert**
- Anspruchsvoll zu erlernen (erfordert Wissen über Templates, Funktoren, Iteratoren, Mixins, ...)
- **Boost** als "Brutkasten" für die nächsten Standards
- Vielleicht sogar als **der Vorteil** von C++ zu betrachten!



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

MAKEFILES

Makefiles: Motivation



- Indem wir Eclipse-Projekte verwenden, **binden wir uns an diese IDE**.
- Tatsächlich gab es früher gar keine so mächtigen IDEs wie heute ...
- ... aber trotzdem große C/C++-Projekte mit **hunderten von Dateien/Klassen** und **noch mehr Abhängigkeiten**.

?

Wie soll man da den Überblick bewahren?

!

Mittels Regeln!

Target

Abhängigkeiten

Makefile

all: main.exe

main.exe: main.o Building.o Floor.o #...

g++ \$^ -o \$@

% .o: %.cpp

g++ -MMD -MP -c \$< -o \$@

Befehl, um Target zu bauen

1 Tab Einrückung zur Gruppierung von Befehlen

"Make is an expert system." [1]

- **Eingabe:** Regelmenge (fix) + Zustand des Workspaces (variabel)
- **Ausgabe:** Notwendige Buildschritte (z.B. "Erzeuge main.o, Erzeuge prog")

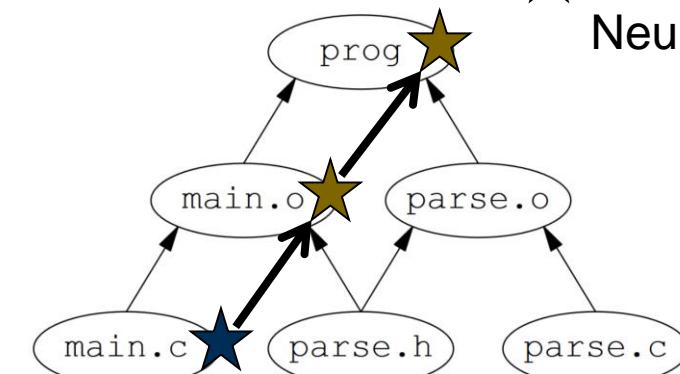
```

OBJ = main.o parse.o
prog: $(OBJ)
      $(CC) -o $@ $(OBJ)
main.o: main.c parse.h
        $(CC) -c main.c
parse.o: parse.c parse.h
        $(CC) -c parse.c
  
```

Makefile (Regelmenge)



Workspace



Directed Acyclic Graph

Veränderung
 Notwendige Neuberechnung

[1] Miller, P.A. (1998), "Recursive Make Considered Harmful," AUUGN Journal of AUUG Inc., 19(1), pp. 14-25.

Makefiles: Struktur



```
srcs = $(wildcard *.cpp)  
objs = $(srcs:.cpp=.o)  
deps = $(srcs:.cpp=.d)
```

```
all: main.exe
```

```
main.exe: $(objs)  
g++ $^ -o $@
```

```
%.o: %.cpp  
g++ -MMD -MP -c $< -o $@
```

```
clean:  
rm -rf $(objs) $(deps) main.exe
```

```
-include $(deps)
```

Erzeugt Listen aller Impl-Dateien und der entsprechenden *Object Files*.

Erstes Target ist immer der **Default-Einstiegspunkt**. Eclipse will *all*.

Platzhalter: \$^ - Abh.; \$@ - Target

"Suffixregel"; \$< - Input; \$@ - output

Löschen-Regel

Include-Dependencies (später)

Makefiles: Ablauf



```
srcs = $(wildcard *.cpp)
objs = $(srcs:.cpp=.o)
deps = $(srcs:.cpp=.d)
```

```
all: main.exe
```

```
main.exe: $(objs)
g++ $^ -o $@
```

```
%.o: %.cpp
```

```
g++ -MMD -MP -c $< -o $@
```

```
clean:
```

```
rm -rf $(objs) $(deps) main.exe
```

```
-include $(deps)
```

1. Damit ich *all* erfüllen kann, brauche ich *main.exe*.
2. Falls ich kein *main.exe* habe, brauche ich alle *.o*-Dateien, um *main.exe* daraus zu linken.
3. Falls eine der *.o*-Dateien neuer ist als *main.exe*, muss ich *main.exe* trotzdem neu bauen.
4. Analog läuft es für die Kompilierung der *.o*-Dateien.

Makefiles: Include-Dependencies



```
srcs = $(wildcard *.cpp)
objs = $(srcs:.cpp=.o)
deps = $(srcs:.cpp=.d)
```

```
all: main.exe
```

```
main.exe: $(objs)
g++ $^ -o $@
```

```
%.o: %.cpp
g++ -MMD -MP -c $< -o $@
```

```
clean:
rm -rf $(objs) $(deps) main.exe
```

```
-include $(deps)
```

- Wenn sich ein Header ändert, müssen alle abhängigen Dateien (`#include`) neu gebaut werden.
- Wo sind eigentlich die **Header**?
- Dazu dienen die Flags **-MMD -MP** und **-include \$(deps)**.

z.B.

Building.d

Building.o: Building.cpp Floor.hpp Person.hpp #...
nop

Floor.hpp:
nop

Person.hpp
nop

Makefiles: .PHONY

- **Ziel = Dateinamen(smuster)** (bspw. main.exe)
 - In unserem Beispiel: verletzt durch Ziele all und clean
 - Kein Problem, solange es keine Datei mit namen *all* oder *clean* gibt – andernfalls würde keines der Recipes ausgeführt werden, da zumindest *clean* keine Vorbedingungen hat
- **Lösung:** .PHONY-Deklaration

```
# Declares that targets 'all' and 'clean'  
# shall always be executed  
  
.PHONY: all clean  
  
clean:  
    rm -rf $(objs) $(deps) main.exe
```

https://www.gnu.org/software/make/manual/html_node/Phony-Targets.html

Makefiles: Fazit

- **Buildtools** sind ab einer bestimmten Projektgröße **unabdingbar**.
- Makefiles erlauben **inkrementelles Bauen von Projekten**...
 - ... müssen aber gepflegt werden und sind **nicht-trivial zu erlernen**.
- **Alternativen:** Makefile-Generatoren und andere Buildtools
 - *cmake, qmake*: Generatoren für Makefiles (letzterer von Qt)
 - *Ant, Maven, Ivy, Gradle*: ... eher für Java gedacht



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

ABSCHLUSS DES C++-TEILS

Java vs. C++: Stärken und Schwächen?



▪ Plattformunabhängigkeit?

- **Java**: "Binary" kann "überall" verwendet werden ("Write once, run anywhere"). Achtung bei Pfad-/Dateinamen
- **C++**: Muss neu kompiliert werden, Standardbibliothek/STL/Boost stellen sicher, dass nur minimale Plattformabhängigkeiten bestehen ("Write once, compile anywhere")

▪ Geschwindigkeit?

- (Ausführungsgeschwindigkeit vs. Entwicklungsgeschwindigkeit (inkl. Testen/Debugging)?)
- **Java**: (sozusagen) interpretiert, aber mit Just-in-Time Compilation
- **C++**: deutlich größerer Sprachumfang, schwieriger zu meistern
- Spannendes Paper von Google: <https://research.google.com/pubs/pub37122.html>

▪ Sicherheit?

- **Java**: Angriffe über Schwächen in der JVM möglich
- **C++**: Zahlreiche Angriffe über Speicherüberläufe (Stichwort: Nullterminierung)

Look down!

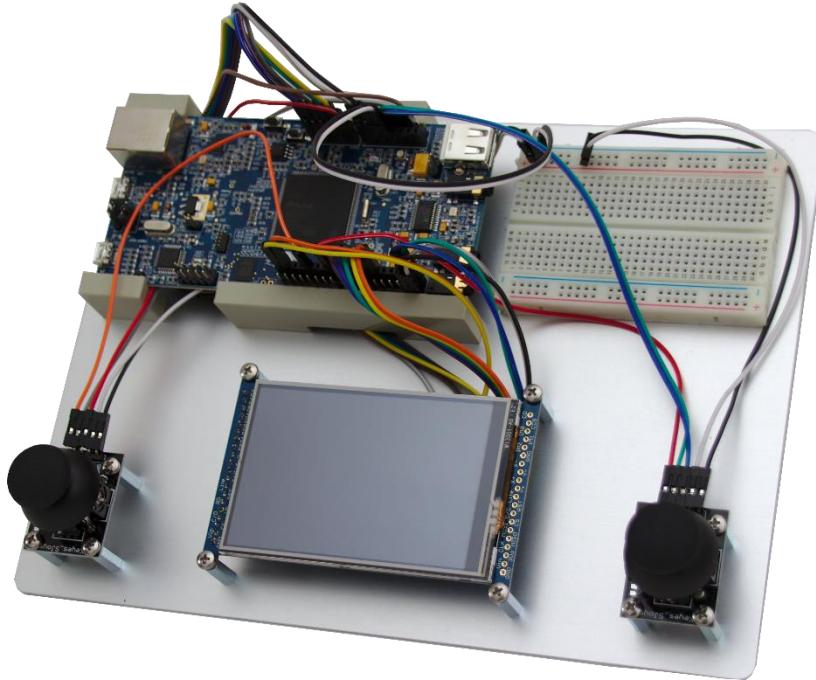
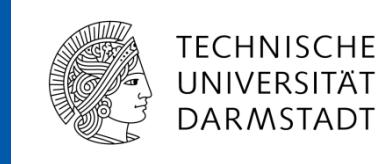


TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Nützliche Kommentare
finden sich
auch in den PowerPoint-Notizen!

Programmierpraktikum C und C++

C für Microcontroller – Einführung



ES Real-Time Systems Lab

Prof. Dr. rer. nat. Andy Schürr

Dept. of Electrical Engineering and Information Technology

Dept. of Computer Science (adjunct Professor)

www.es.tu-darmstadt.de

Roland Kluge

roland.kluge@es.tu-darmstadt.de

Ziele des C-Teils



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Die Eigenheiten von (Embedded) C kennenlernen.

- **Unterschiede zu C++:** Was macht C anders als C++?
- **Bitoperationen:** Bits setzen, löschen, "kippen", "verschieben" (auch für C++)
- **Peripherie ansteuern:** lesen/schreiben, Memory-mapped I/O, Polling, volatile Variablen

Unterschiede von C und C++



- **C-Standardbibliothek ist eingebettet in C++-Standardbibliothek**
 - Relativ umfangreich (Stringmanipulation, printf,...)
 - z.B. #include <cstdlib> oder #include <stdlib.h>
- **Limitierungen**
 - Keine Objektorientierung (Vererbung, Klassen,...) → Nur structs
 - Keine Namensräume → Sichtbarkeit über static, extern
 - Keine String-Klasse → nur nullterminierte char-Arrays (vgl. Parameterübergabe von main)
 - Keine Templates → Ausweichen über void*
 - Keine Referenzen → nur Pointer und Werte
 - Keine Exceptions → Error Codes (int)
- **Unterschiede**
 - **Konstanten** wurden **früher** mittels Präprozessor-Direktiven abgelegt
 - z.B. #define ID "123abc" – gleiche Benennungskonvention ist kein Zufall.
 - **Leere Parameterliste:** "don't care" → void signalisiert eine leere Parameterliste.
 - z.B. int getHour(); → int getHour(void);
 - **Konventionen** für Dateiendungen: .c/.h statt .cpp/.hpp
 - **Speicherverwaltung:** malloc und free statt new und delete

Bits und Bytes



- In Embedded C wird oft **auf einzelnen Bits von (ganzzahligen) Variablen** operiert (char, short, int, long)

- **Basistyp:** unsigned char = 1 Byte
 - Plattformunabhängig!

- **Hexadezimalnotation in C/C++:**
Aufteilung in zwei Halb-Bytes

- **Beispiele:**

- `unsigned char x = 0xA4;`
// Bit pattern: 1010 1000
- `unsigned int x = 0xF1BC;`
// Bit pattern: 1111 0001 1011 1100

Hex. Halbbyte	Bits	Hex. Halbbyte	Bits
0	0000	8	1000
1	0001	9	1001
2	0010	A	1010
3	0011	B	1011
4	0100	C	1100
5	0101	D	1101
6	0110	E	1110
7	0111	F	1111

Bitoperationen – Überblick

- Bitoperationen sind nur für **ganzzahlige Datentypen** definiert (char, short, int, long, longlong)
- "outplace"- und "inplace"-Variante (z.B. & und &=)
- **Logische Operatoren** (||, &&, !) behandeln **ganzen Wert**

Auch in C++
verfügbar!

Op.	Symbo l	Beschreibung	Beispiel
AND	&	Bitweises Und (Logisch: &&)	$111_2 \& 101_2 = 101_2$
OR		Bitweises Oder (Logisch:)	$1000_2 1_2 = 1001_2$
XOR	^	Bitweises exkl. Oder (Logisch: !=)	$1000_2 1011_2 = 0011_2$
NOT	~	Bitweise Negation (Logisch: !)	$\sim 1000_2 = 0111_2$
Right shift	>>	Verschiebung aller Stellen nach rechts (Füllen mit '0'/'1' von links)	$0100_2 >> 2 = 0001_2$
Left shift	<<	Verschiebung aller Stellen nach links (Füllen mit '0'/'1' von rechts)	$0001_2 << 3 = 1000_2$

<http://cpp.sh/76cw6>

http://openbook.rheinwerk-verlag.de/c_von_a_bis_z/006_c_operatoren_005.htm

Bitoperationen – Bytes manipulieren



Grundidee: Erzeuge eine **Maske**, die nur an den **gewünschten Stellen** ein '0' bzw. '1' hat.

```
#include <iostream>
int main() {
    unsigned char b = 16; // b = 0x10
    // Set 5th bit of b
    b = b | (1 << 5); // or: b |= 32 , or b |= 0x20
    std::cout << "b=" << (int)b << std::endl; // 48 = 0x30
```

Wir zählen **Bits von 0** an:
0.Bit, ..., 7.Bit

```
// Unset 2nd bit of b
b = 7; // = 4+2+1 = 0x03
b = b & (~ (1 << 2)); // or: b &= ~4 , or b &= 0xFB
std::cout << "b=" << (int)b << std::endl; // 3 = 0x03
```

```
// Determine status of 6th bit of b
b = 192; // = 128+64 = 0xC0
char isBitSet = b & (1 << 6); // or: b & 64 , or: b & 0x40
std::cout << "6th bit set: " << (int)isBitSet << std::endl; // 64
```

```
// Flip 3rd bit of b
b = 9; // = 8+1 = 0x09
b = b ^ (1 << 3); // or: b ^= 8 , or: b ^= 0x08
std::cout << "b=" << (int)b << std::endl; // 1 = 0x01
b = b ^ (1 << 3); // or: b ^= 8 , or: b ^= 0x08
std::cout << "b=" << (int)b << std::endl; // 9 = 0x09
```

b	00010000
mask	00100000
b'	00110000

b	00000111
mask	11111011
b'	00000011

b	11000000
mask	01000000
b'	00000011

b	00001001
mask	00001000
b'	00000001
b''	00001001

}

Bitoperationen – Rechnen



▪ Positive Zahlen

- **Left shift** entspricht Multiplikation mit 2
- **Right shift** entspricht Division durch 2
- Verhalten bei **negativen Zahlen** abhängig von Zahlendarstellung (z.B. Zweierkomplement)

```
#include <iostream>
using namespace std;
int main() {
    // Shifting positive numbers
    cout << " 1 << 1 = " << (1 << 1) << endl; //  1 << 1 = 2
    cout << " 1 << 2 = " << (1 << 2) << endl; //  1 << 2 = 4
    cout << " 1 >> 1 = " << (1 >> 1) << endl; //  1 >> 1 = 0 (= 1 div 2)
    cout << "16 >> 2 = " << (16 >> 2) << endl; // 16 >> 2 = 4
    cout << "17 >> 2 = " << (17 >> 2) << endl; // 17 >> 2 = 4 (= 17 div 4)

    // Shifting negative numbers
    cout << " -1 << 1 = " << (-1 << 1) << endl; // -1 << 1 = -2
    cout << " -1 << 2 = " << (-1 << 2) << endl; // -1 << 2 = -4
    cout << " -1 >> 1 = " << (-1 >> 1) << endl; // -1 >> 1 = -1
    cout << "-16 >> 2 = " << (-16 >> 2) << endl; // -16 >> 2 = -4
    cout << "-17 >> 2 = " << (-17 >> 2) << endl; // -17 >> 2 = -5
}
```

Übrigens: Undefined Behavior falls Shift-Weite negativ

<http://cpp.sh/75wgv>

Schlüsselwort volatile – Motivation



▪ Beispiel:

- Zwei Threads kommunizieren über die globale Variable **signal**.
- Der **Empfänger-Thread wartet** mit einer **while**-Schleife darauf, dass **signal** sich ändert ("**Busy Waiting**").
- Es ist *möglich*, dass der Compiler die **while**-Schleife zu einer Endlosschleife macht, da **signal** innerhalb von **receiverThread** nicht mehr verändert wird :

```
while(signal == 0)
→ while(true);
```

```
#include <stdio.h> // For printf
#include <unistd.h> // For sleep

int signal;

void receiverThread(void) {
    signal = 0; // Set default state
    while(signal == 0); // Empty loop
    printf("Received signal!\n");
}

void senderThread(void) {
    sleep(10000);
    signal = 1;
}

int main() {
    // Start receiverThread asynchronously
    // Start senderThread asynchronously
    // Wait for threadA and threadB to terminate
}
```

Schlüsselwort volatile – Überblick



- Mithilfe des Schlüsselworts **volatile** deklariert man Variablen, **deren Wert sich jederzeit unerwartet (aus Compiler-Sicht) ändern kann.**

Auch in C++
verfügbar!

Syntax

- `volatile int i;` → Der Wert von i kann sich ändern
 - (äquivalent zu) `int volatile i;`
- `volatile int *iP;` → Die gespeicherte Adresse kann sich ändern.
- `volatile int *volatile iP;` → Adresse und Wert können sich ändern

Einsatzgebiete

- Manipulation von geteilten Variablen durch mehrere Threads (→ Motivation)
- Memory-mapped I/O (→ später)
- Manipulation von globalen Variablen durch Interrupt Service Routinen (→ nicht in diesem Praktikum)

<https://barrgroup.com/Embedded-Systems/How-To/C-Volatile-Keyword>

Schlüsselwort **volatile** – Korrektes Beispiel



- **Lösung:**

Globale Variable `signal` als **volatile** deklarieren.

```
#include <stdio.h> // For printf
#include <unistd.h> // For sleep

volatile int signal;

void receiverThread(void) {
    signal = 0; // Set default state
    while(signal == 0); // Empty loop
    printf("Received signal!\n");
}

void senderThread(void) {
    sleep(10000);
    signal = 1;
}

int main() {
    // Start receiverThread asynchronously
    // Start senderThread asynchronously
    // Wait for threadA and threadB to terminate
}
```

Memory-mapped I/O – Motivation

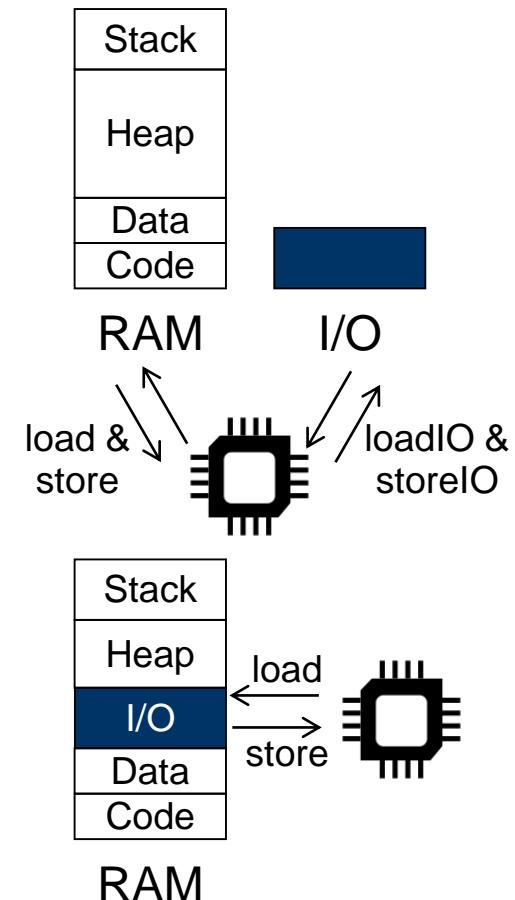
Wie greife ich auf die Peripherie eines Prozessors zu?

▪ Port-mapped I/O

- Der Prozessor besitzt spezielle Befehle und einen eigenen Adressraum, um auf Peripherie zuzugreifen.
- (+) Vollständiger Arbeitsspeicher für Applikation verfügbar
- (-) Größerer Befehlssatz (Software, Hardware, Lernkurve)

▪ Memory-mapped I/O

- Ein Teil des Arbeitsspeichers ist "virtuell" für die Peripherie reserviert.
- (+) Einheitlicher Zugriff auf "normalen" Speicher und Peripherie-Daten
- (-) Verlust eines Teils des Speicherraums
- **Variablen, die auf den gemappten Adressraum zugreifen, müssen volatile sein, da sich die Werte der Peripherie jederzeit ändern können!**



Experimentierboard - Eckdaten

- **Evaluationsboard FM4-176L-S6E2CC-ETH**

- 200MHz ARM® Cortex®-M4 von Cypress
- 2MB Flash, 256KB SRAM, 190 GPIOs
- Schnittstellen: Ethernet, USB host+device, CAN, LIN, SPI, I2S, I2C, UART, Taster, digital und analog, JTAG-Debugging
- Arduino-Uno-kompatibel
- Sensoren: Beschleunigung, Licht

- **Touchdisplay Adafruit HXD8357D**

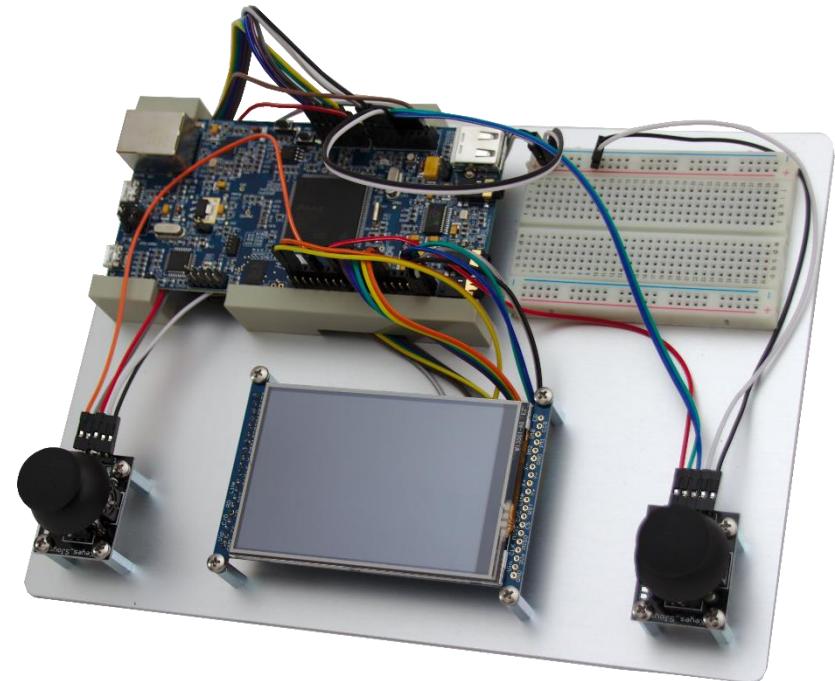
- 3.5", 320x480px
- Resistives Touch
- SD-Kartenleser

- **2-Achsen Analog-Joystick**

- X,Y und Drucktaster
- PS2 Look-and-Feel

- **Breadboard**

- 400 Kontakte
- Zum freien Experimentieren

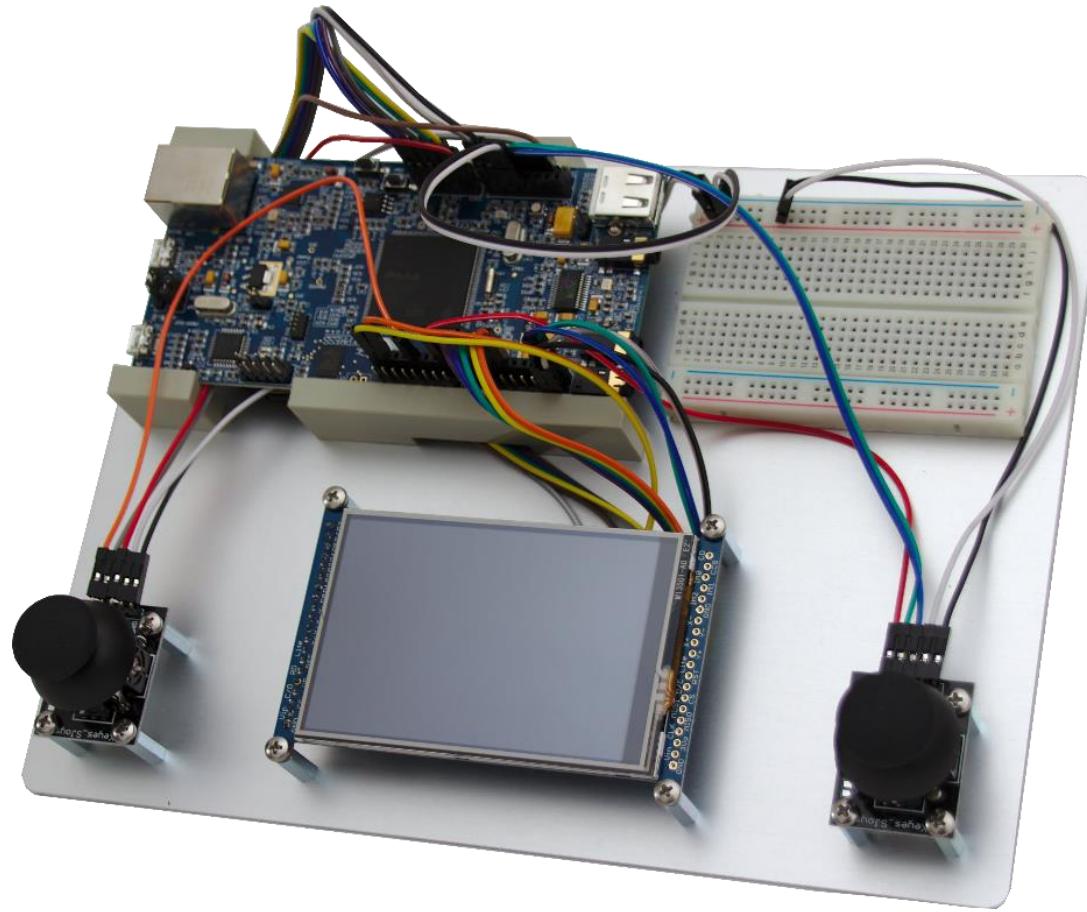


<https://www.adafruit.com/product/2050>
<http://www.cypress.com/documentation/development-kitsboards/sk-fm4-176l-s6e2cc-fm4-family-quick-start-guide>

Viel Spaß!



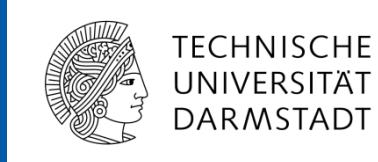
TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Quelle: Real-Time Systems Lab

Programmierpraktikum C und C++

C für Microcontroller – Einführung



Dieser Abschnitt
bezieht sich auf die
alte Plattform des
C/C++-Praktikums,
die bis 2016 genutzt
wurde.



Roland Kluge

roland.kluge@es.tu-darmstadt.de

Lab
chürr
ology
ssor)

www.es.tu-darmstadt.de

Entwicklungsboard

MB96F348HSB Mikrocontroller

- Prozessortaktung: bis 56 MHz
- RAM: 24 KiB
- Flash: 576 KiB
- 82 I/O Pins
- Analog/Digital-Wandler mit 24 Kanälen
- CAN / UART

4

Starterkit SK-16FX-EUROscope

- Zwei 7-Segment-Anzeigen
- Zwei Druckschalter
- Stromversorgung über USB (5V)

1

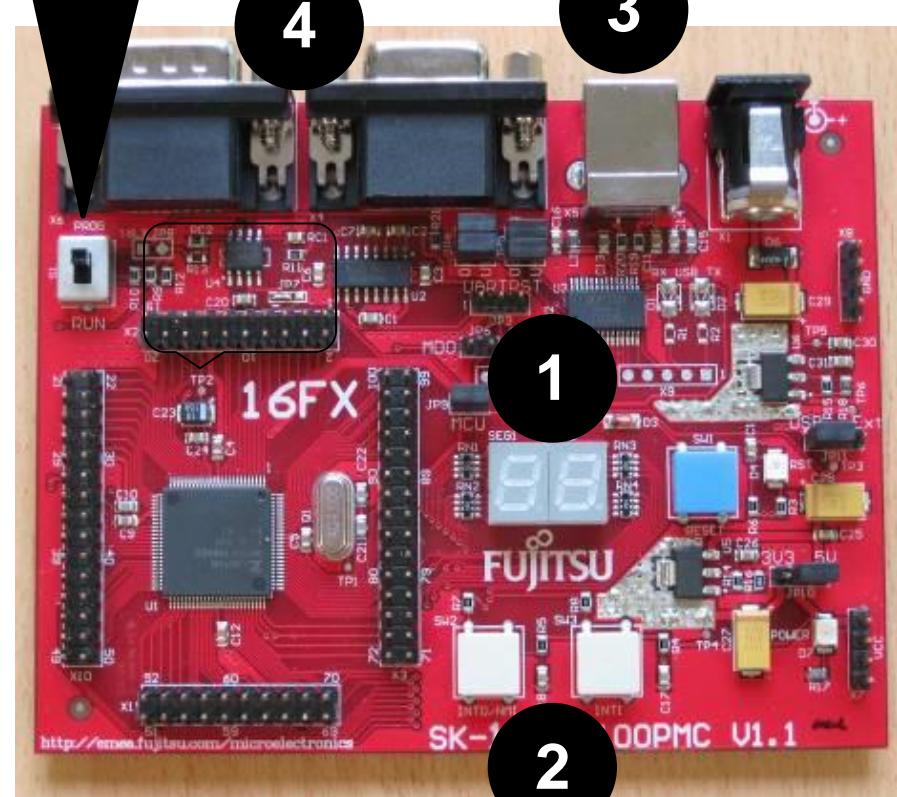
3

2

1

4

3



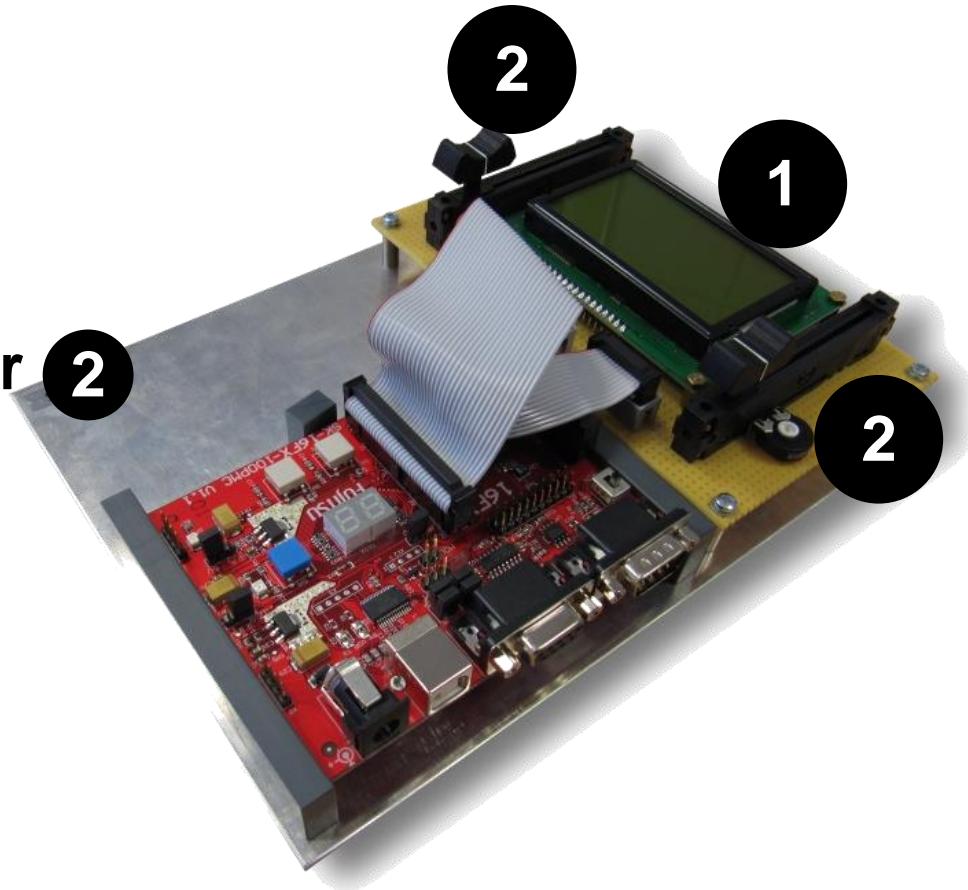
Erweiterungen gegenüber der Standardausführung

Deprecated

LC-Display 1

- AV128641 von Anag Vision
- Vollgraphisch
- 128 x 64 Pixel
- Hintergrundbeleuchtet

Zwei Schiebepotentiometer 2



- Von **Fujitsu Microelectronics Ltd.**
 - Später: Spansion – Heute: Cypress
- Unterstützt nur **ANSI C90**,
 - Zusätzlich auch **einzelige Kommentare (//)**
 - Variablen-deklaration am Anfang einer Funktion (sogar Schleifenzähler)
- **Busy Waiting:** Compiler enthält eine interne Funktion namens **__wait_nop()**, die eine CPU-Instruktion zum Warten für einen Taktzyklus ("NOP") auslöst
- **Konstanten** werden standardmäßig im **ROM** gespeichert, nicht im RAM (RAM ist wertvoll, da nur 24 KiB zur Verfügung stehen)

Mikrocontroller: Keine standardisierte "Umgebung" **Deprecated**

- Compiler kann nicht wissen, welche Komponenten angeschlossen sind
- Es gibt **keine Ausgabe über printf()**
 - Alternative: 7-Segment-Anzeige, LCD(, LEDs)
 - Es ist sehr empfehlenswert, sich eine eigene kleine Debugging-Bibliothek zu schreiben
- Ansteuerung externer Komponenten muss vom Entwickler selber durchgeführt werden
 - Wird zum Teil unterstützt durch fertige Bibliotheken



- **Umfangreiche und flexible Hardware → erfordert Konfiguration**
 - Realisiert über Register
 - Im Controller integrierte "Variablen" mit unterschiedlicher Größe
 - Zugriff im Code über Präprozessor-Konstanten (z.B. PDR00, DDR01,...)
 - Bedeutung unterschiedlich je nach Register
 - Ganzes oder Teil des Registers als Zahlenwert, z.B. als Zähler
 - Einzelne Bits als "Schalter/Switch" für bestimmte Funktion, z.B. einzelnes Ausgangspin auf High oder Low
- **Kommunikation mit Außenwelt über**
 - Einzelne digitale Ein/Ausgänge
 - Analoge Eingänge
 - Schnittstellen, z.B.
 - UART (serielle Schnittstelle)
 - CAN (serieller Bus)

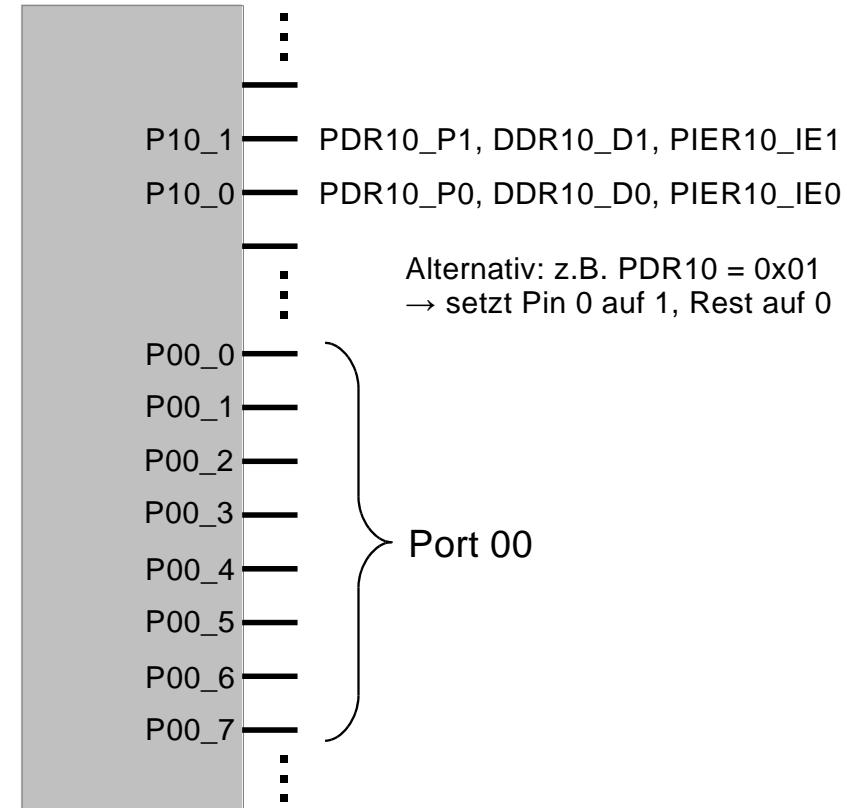


Mikrocontroller: Digitale Ein/Ausgänge **Deprecated**

8 Pins = Port

Je Pin mehrere Register, u.a.:

- **Port-Data-Register (PDR)**
 - Als *Eingang*: Abfrage des Zustandes
 - Als *Ausgang*: Setzen des Pegels
 - z.B. PDR07_P0
- **Data-Direction-Register (DDR)**
 - Setzen auf Eingang oder Ausgang
 - 0 → Eingang, 1 → Ausgang
 - z.B. DDR07_D0
- **Port-Input-Enable-Register (PIER)**
 - Bei Eingangspin den Eingang aktiv schalten
 - z.B. PIER07_IE0



Beispielcode: Pins abfragen

Deprecated

```
/* Beispiel: Pins als Eingang */
char status;
DDR07_D0 = 0;           // Pin 0 von Port 07 als Input
PIER07_IE0 = 1;         // Pin 0 von Port 07 als Eingang aktiv

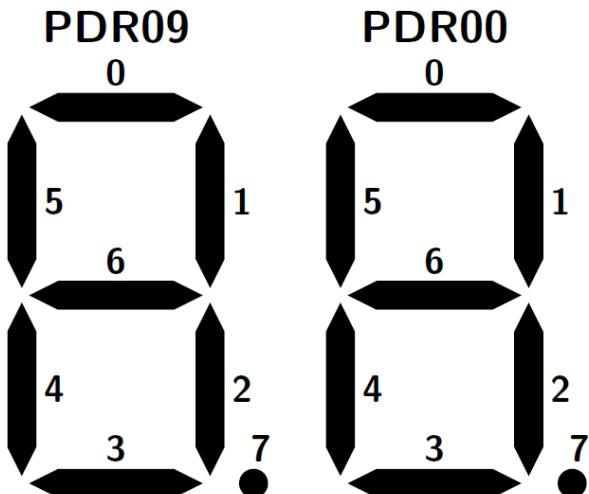
status = PDR07_P0;      // Pegel an Pin 0 von Port 07 abfragen
                       // -> Status des linken Tasters
```



Beispielcode: 7-Segment-Anzeige

Deprecated

```
/* Beispiel: 7-Segment-Anzeige */  
DDR00 = 0xff;      // Alle Pins von Port 00 als Output  
PDR00 = 0xff;      // Alle Pins von Port 00 auf High-Pegel  
                   // -> Rechte 7-Segment-Anzeige komplett aus  
  
PDR00_P7 = 0;      // Pin 7 von Port 00 auf Low-Pegel  
                   // -> Punkt der rechten 7-Segment-Anzeige an
```



Beispielcode: Analog/Digital-Wandler

Deprecated

8 Bit oder 10 Bit Genauigkeit (wir verwenden 8 Bit)

Wandlungsmodi (z.B. mehrere Eingänge sequentiell wandeln)

- Wir verwenden **Stop Mode**: ein Kanal wird einmal pro Startsignal gewandelt
- Start- und Endkanal erhalten bei jeder Wandlung einen identischen Wert

```
unsigned char result;

// Initialisierung des AD-Wandlers
ADCS_MD    = 3;      // ADC Stop Modus
ADCS_S10   = 1;      // 8 Bit Genauigkeit
ADER0_ADE2 = 1;      // Analoge Eingänge aktivieren: AN2 + AN3
ADER0_ADE3 = 1;      // (ADER0: Eingänge AN0 bis AN7)

// A/D-Wandlung durchführen
ADSR = 0x6C00 + (3 << 5) + 3;          // Start- und End-Kanal 3

ADCS_STRT = 1;           // A/D-Wandler starten
while (ADCS_INT == 0) { } // Warten bis A/D-Wandlung beendet
result = ADCR1;          // Ergebnis speichern
ADCS_INT = 0;             // Bit auf 0 für nächste Wandlung
```



Deprecated

TECHNISCHE ANMERKUNGEN

Projektvorlagen

Deprecated

- Die **Projektvorlagen** enthalten Code, der euch beim Starten hilft.
 - Pfad: `~/CPPP/Repos/tud-cppp/exercises/projects/day5`
 - Einfach außerhalb des Repos (bspw. in `~/CPPP/Workspace`) ablegen und loslegen.

Anschluss des Boards an die Virtuelle Maschine

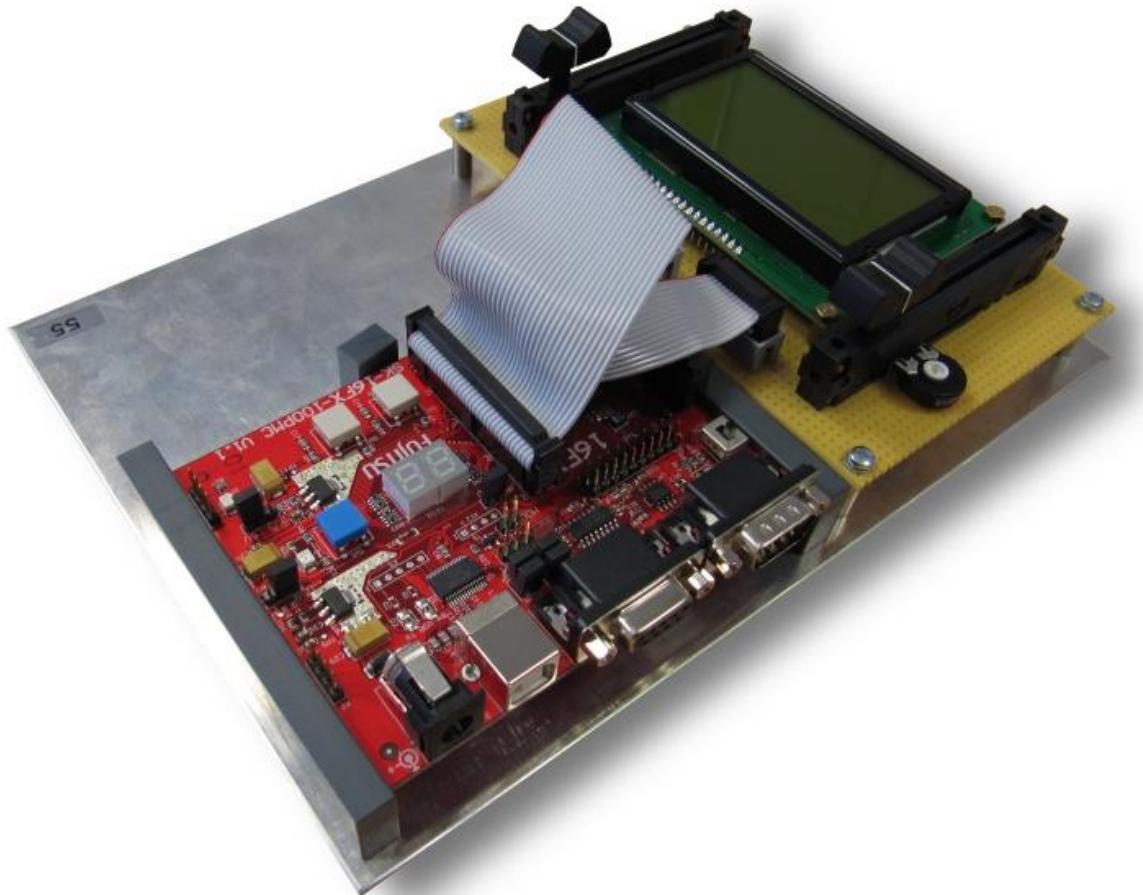
Deprecated

- Im **Host-System** wird eine USB-zu-Seriell-Schnittstelle erstellt
 - Windows: Im Geräte-Manager prüfen, welcher Ports erscheint, wenn das Board angesteckt wird (bspw. USB Serial Port -> COM4)
 - Linux: Nach `/dev/ttyUSB0` (o.ä.) Ausschau halten.
 - Mac: Nach `/dev/ttyp.usbserial-[SERIENNR]` suchen
- In der **Konfiguration der VM** ("Ändern...", vor dem Start!) wird z.B. COM4 bzw. `/dev/ttyUSB0` des Hosts auf den ersten COM-Port des Guest gelegt ("Host-Schnittstelle")
- **In der VM** ist dieser serielle Port als `/dev/ttys0` verfügbar (in VM-Konfiguration als COM1 bezeichnet)
 - Die Makefiles sind so aufgebaut, dass dann alles automatisch ablaufen sollte.



Viel Spaß!

Deprecated



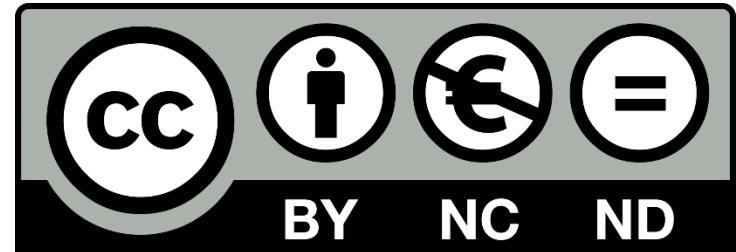
Quelle: Real-Time Systems Lab

Lizenz

Dieses Werk ist lizenziert unter einer
Creative Commons Namensnennung - Nicht
kommerziell - Keine Bearbeitungen 4.0
International Lizenz

<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

Die Logos der TU Darmstadt und des
Fachgebiets Echtzeitsysteme unterliegen
der Fair-Use-Konvention.



Beteiligte Autoren (alphabetisch):
Anthony Anjorin,
Matthias Gazzari,
Nicolas Himmelmann,
Puria Izady,
Philipp Joncyk,
Roland Kluge

Zum Weiterlesen



▪ C++ Rvalue References Explained

- Seit C++11 unterstützt C++ die sogenannte Move-Semantik, die z.B. beim Zuweisen von Objekten einen Speicher-/Laufzeit-effizienten Transfer von Objekten ermöglicht
- Siehe http://thbecker.net/articles/rvalue_references/section_01.html

▪ Tipps zum Überladen von Operatoren

- "Wie überlade ich Operatoren für meine Klasse, sodass niemand überrascht wird."
- <http://courses.cms.caltech.edu/cs11/material/cpp/donnie/cpp-ops.html>

Bildnachweis und Credits



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- **Titelbild "Organisatorisches" (Papierstapel):** CC BY-SA 3.0, by Jonathan Joseph Bondhus on Wiki Commons, URL: https://commons.wikimedia.org/wiki/Paper#/media/File:Stack_of_Copy_Paper.jpg
- **Lächelndes Fragezeichen:** "attribution", by katieyunholmes: smiley face clip art animated, URL: <http://cliparts.co/clipart/2613703>
- **Fotos des Experimentierboards:** CC BY-SA 3.0, Real-Time Systems Lab

Credits



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

- **Code-Highlighting:** Danke an <https://tohtml.com/c/>
- **Online-Beispiele:** Danke an <http://cpp.sh/>