

Programmierpraktikum C und C++

Speicherverwaltung und Lebenszyklus



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Roland Kluge

roland.kluge@es.tu-darmstadt.de

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

Wo leben meine Daten? ... und wie lange?



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Stack

Statischer Speicher mit begrenzter Größe

Sehr effizient

Automatische Speicherfreigabe bei Rückkehr zur aufrufenden Funktion

Heap

Dynamischer Speicher mit „beliebiger“ Größe

Relativ teuer

Flexible Speicherverwaltung zum beliebigen Zeitpunkt

Stack und Heap – Beispiel

C++

```
int intOnStack = 42;  
cout << intOnStack << endl;
```

```
int *intOnHeap = new int(42);  
cout << intOnHeap << endl;  
cout << *intOnHeap << endl;
```

```
Building buildingOnStack(3);  
buildingOnStack.runSimulation();
```

```
Building *buildingOnHeap =  
    new Building(3);  
buildingOnHeap->runSimulation();
```

```
delete intOnHeap;  
delete buildingOnHeap;
```

„Primitiv“ auf dem
Stack

„Primitiv“ auf
dem Heap

Objekt auf
dem Stack

Objekt auf
dem Heap

Heap
aufräumen

Java

```
int intOnStack = 42;  
System.out.println(intOnStack);
```

// Not possible!

// Not possible!

```
Building buildingOnHeap =  
    new Building(3);  
buildingOnHeap.runSimulation();
```

// Handled by Garbage Collector!



Intermezzo



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

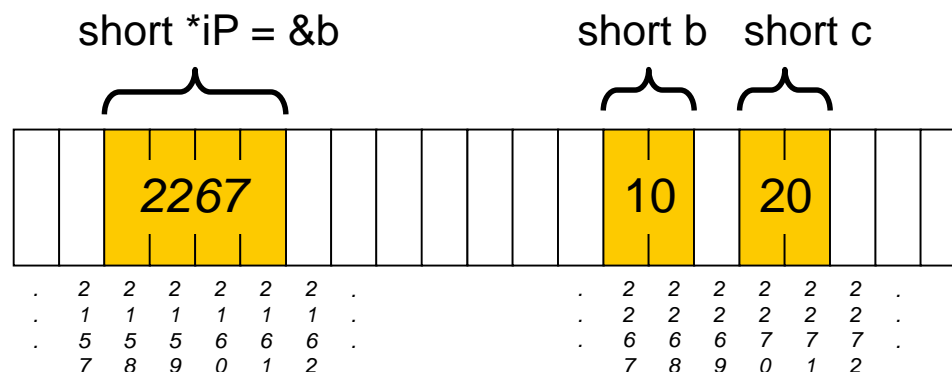
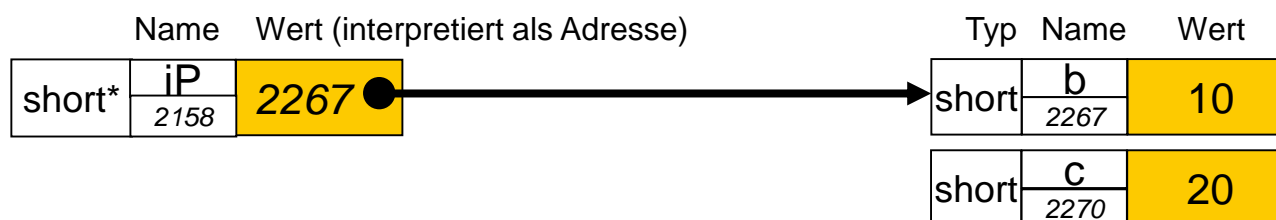
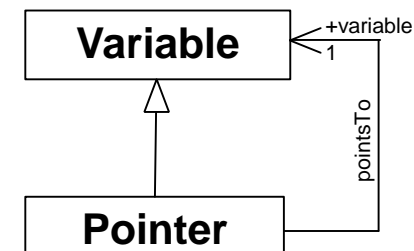
Wieso braucht man überhaupt Speicher auf dem Heap, wenn der Stack die Speicherverwaltung übernimmt und auch noch so viel effizienter ist?



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



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



Variablen und Zeiger: Syntax



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Deklaration (und
Default-Initialisierung)
eines Zeigers vom Typ
*int** (Zeiger auf *int*)

```
int i = 42;
```

```
int *iP;
```

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

```
iP = &i;
```

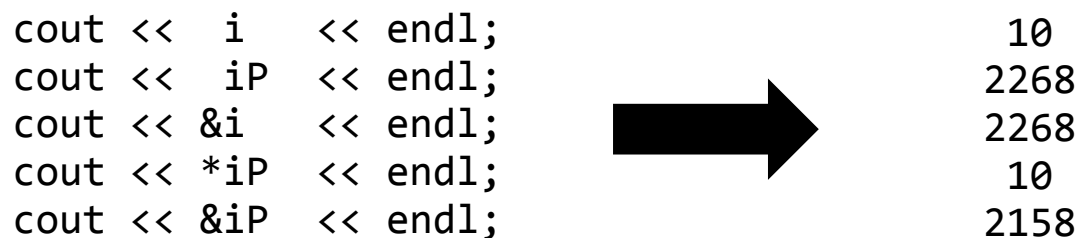
Dereferenzierung
eines Zeigers, um den
Inhalt zu erhalten

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

```
int *jP = iP;
```

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





Intermezzo

Braucht man wirklich Zeiger? Wieso kann man nicht einfach nur normale Variablen verwenden? Wäre doch viel einfacher, oder?



Unveränderlichkeit - *const*



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Zeiger auf Konstante

vs.

Unveränderlicher Zeiger

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

```
iP = &i;
```

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

„Assignment of read-only variable iP“

```
int i;  
int j = 7;
```

```
int *const jP = &j;
```

```
(*jP)++;
```

```
jP = &i;
```

„Assignment of read-only variable jP“

Muss sofort initialisiert werden, kann nicht neu definiert werden

Unveränderlicher Zeiger auf Konstante:

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



Eselsbrücke:
Das *const* bezieht sich immer auf das „Nächstliegende“.



Was ist eine (C++)-Referenz?

Eine **Referenz** ist ein **const Zeiger**, der automatisch dereferenziert wird („Syntactic Sugar“).

```
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;
```

Verhält sich
wie Variable

Intermezzo

Wieso soll ich konsequent ***const*** verwenden?

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

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

Gibt es eigentlich einen Unterschied zwischen

`int* iP`

und

`int *iP`

?



Wieso *const*?

1. **Compiler** kann automatisch die Absichten des Programmierers **statisch** durchsetzen (es gibt einen guten Grund wieso etwas *const* sein soll!)
2. Compiler kann viele **Optimierungen** durchführen mit dem Wissen darüber, was *const* ist und was nicht
3. Absicht des Programms wird dem Leser „**expliziter**“.
4. Wird für **Objekte** und **Methoden** sinnvoll verallgemeinert (sehen wir gleich am Beispiel)



Objektorientierung mit *const*



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

```
class Building {  
public:  
    Building(int numberOfFloors);  
    ~Building();
```

```
void printFloorPlan() const;
```

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

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

building darf nicht
verändert werden

```
void iDoNotChangeAnything(const Building &building) {  
    building.printFloorPlan();  
}
```

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



Übersicht – Wo kann *const* auftauchen?



```
const int numFloors;
```

```
const Elevator &elevator;
```

Unveränderliches Attribut (-> Initialisierungsliste nötig!).

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

Konstante

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

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

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

Methodenparameter *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*).



Konstruktor, Destruktor und Copy-Konstruktor



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT



Konstruktor, Destruktor und Copy-Konstruktor



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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

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

Copy-Konstruktor

Destruktor

```
Floor::Floor(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;  
}
```



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(0);  
    iWorkOnACopy(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)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Wieso nicht?

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(0);  
    iUseAReference(floor);  
}
```

Eine Referenz wird
„per Wert übergeben“



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)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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(0);  
    iUseAConstReference(floor);  
}
```



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



**Dies sollte grundsätzlich die
Default-Übergabestrategie sein.**



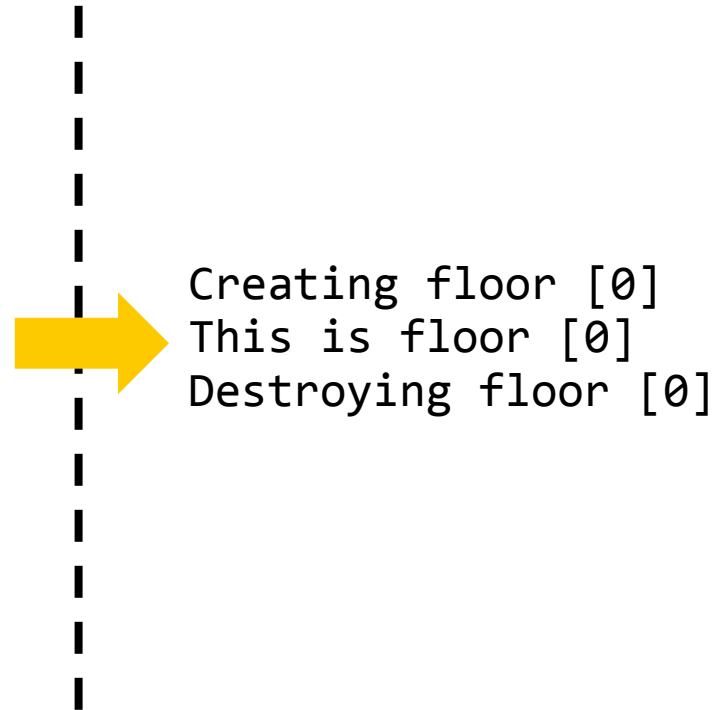
Parameterübergabe bei Methodenaufrufen (III)



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

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(0);  
    iUseAPointer(&floor);  
}
```



Intermezzo

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

Schlagwort: *Const Correctness*

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

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





Assignment Operator

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

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

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

```
inline void operator=(const EnergyMinimizingStrategy &a) {  
    cout << "operator= called" << endl;  
}  
};
```

?

Was soll das?

!

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



Rule of Three:

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

Beispiel:

```
#include <fstream>

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

private:
    std::ofstream logFile;
};
```

Default Copy-
Konstruktor versucht,
logFile zu kopieren.

Ist das schlau?

Rule of Three:

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 **inkonsistenten Verhalten** kommen.



Stolperfallen bei der Speicherverwaltung

1. Hängende Zeiger
2. Speicherlecks



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;  
}
```

Hier wird eine **Referenz**
auf eine **lokale Variable**
zurückgegeben!

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

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



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

```
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;
}
```



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

g++ ist in der Lage, zu erkennen, wann
Kopien vermieden werden können:

http://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;  
}
```



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

Nach dem Löschen
immer auf „null“ setzen!



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

Extrem gefährlich!



Creating floor [0]
Destroying floor [1]



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

Wieso ist das hier
einfach nur doof?



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



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

```
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?  
}
```

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

```
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!  
}
```

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



Smart Pointer: Boost to the rescue

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

[Herb Sutter](#), [Andrei Alexandrescu](#), [C++ Coding Standards](#)



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

Array

Filesystem

Lambda

Odeint

Chrono

Function(al)

Math
(advanced)

Smart Ptr

Date Time

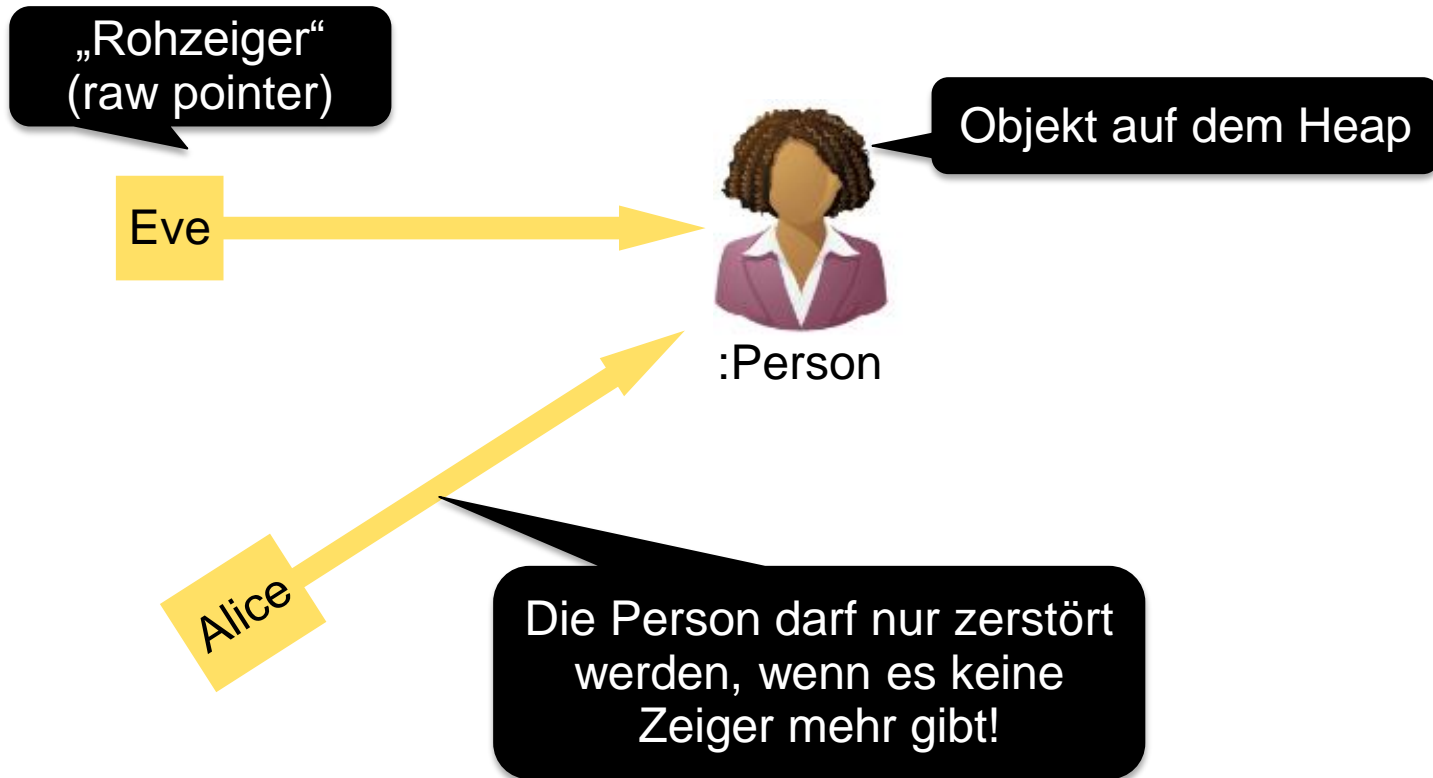
Graph

MPI

System



Ohne Smart Pointer



Intermezzo

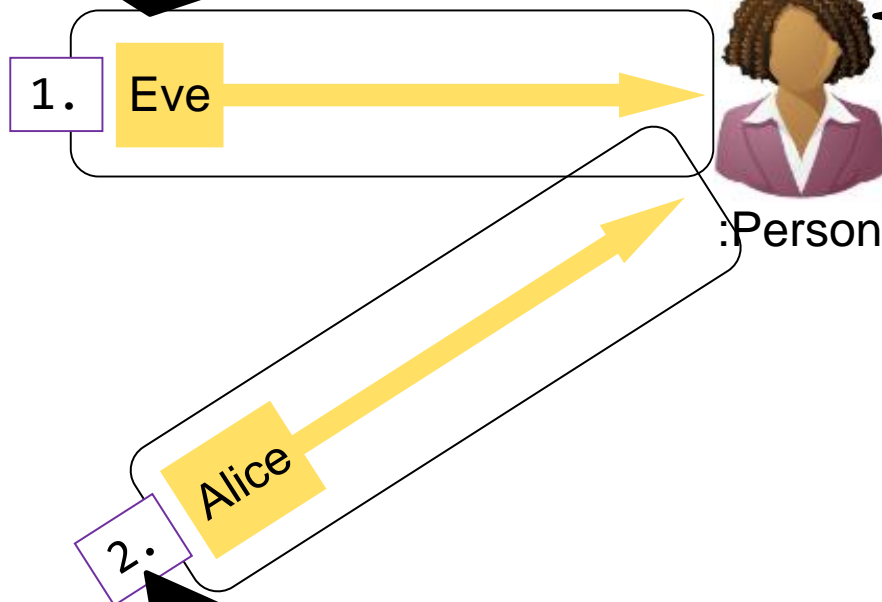
Wie könnte man das Problem lösen? Wir müssen ja irgendwie entscheiden wann ein Objekt gelöscht werden darf ...



Mit `boost::shared_ptr`

Smart Pointer (auf dem Stack)
als **Wrapper** für Rohzeiger

Objekt auf dem Heap



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

Jedes mal wenn ein Smart
Pointer zerstört wird, wird der
Referenzcounter erniedrigt.

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

Ohne Smart Pointer



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Person.h

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

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

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

private:
    const string name;
};
```

Person.cpp

```
#include "Person.h"
#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;
}
```



Ohne SmartPointer



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

```
#include "Person.h"
```

```
void makeSmallTalkWith(const Person &person){
    cout << "Isn't the weather quite 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

Created Eve

Greeting Eve
Isn't the weather quite pleasant today,
Eve?

Created Sir
Isn't the weather quite pleasant today,
Sir?

Good bye Sir

Greeting Eve
Isn't the weather quite pleasant today,
Eve?

Created Sir
Isn't the weather quite pleasant today,
Sir?

Good bye Sir

Good bye Eve



Mit boost::shared_ptr

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

Person.h

```
#include <boost/shared_ptr.hpp>
```

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

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

private:
    const string name;
};
```

```
typedef boost::shared_ptr<Person>
PersonPtr;
```

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

Person.cpp

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

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;
}
```



Mit boost::shared_ptr



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

main.cpp

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

#include "Person.h"

void makeSmallTalkWith(ConstPersonPtr person){
    cout << "Isn't the weather quite 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);
}
```

Created Eve

Greeting Eve
Isn't the weather quite pleasant today,
Eve?

Created Sir
Isn't the weather quite pleasant today,
Sir?
Good bye Sir

Greeting Eve
Isn't the weather quite pleasant today,
Eve?

Created Sir
Isn't the weather quite pleasant today,
Sir?
Good bye Sir

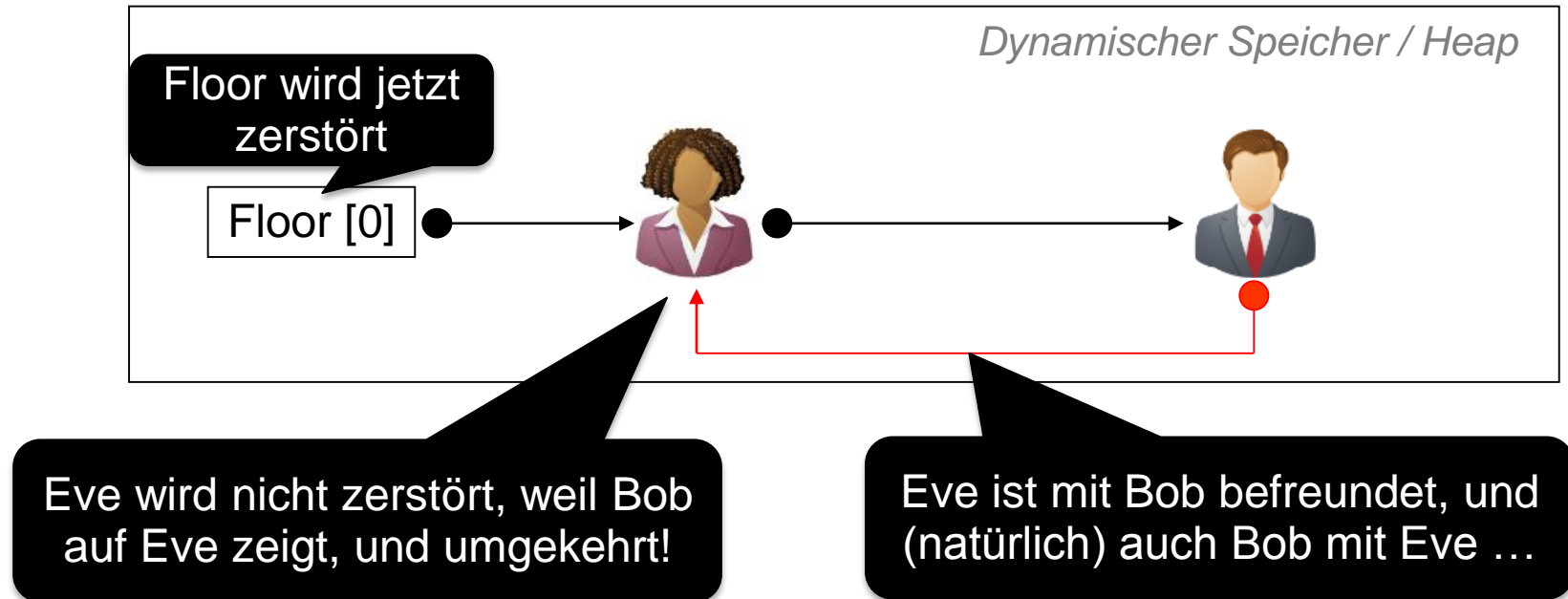
Good bye Eve



Weak SmartPointer: Motivation

boost::shared_ptr ist nicht perfekt:

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



- **weak_ptr** für eine Richtung der Beziehung zwischen Personen verwenden (z.B.: Eve zeigt stark auf Bob, Bob schwach auf Eve)
- **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 **shared_ptr**) bereits auf die Person zeigt
- Person wird gelöscht, sobald nur noch schwache Zeiger darauf verweisen

Intermezzo

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?





Mögliche Lösung für zyklische Zeiger

- Wir verzichten einfach ganz auf Zeiger.

```
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!



Mögliche Lösung für zyklische Zeiger II



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

```
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
```

Kann man mit immutablen
Objekten (wie `java.lang.String`)
umgehen.



Zusammenfassung

