



IMS  
Institut für Mikroelektronische Systeme  
Leibniz Universität Hannover



Leibniz  
Universität  
Hannover

# Programmierpraktikum Technische Informatik (C++)



2.6.2022

# Überblick

- Objektorientierte Programmierung II
  - Static
  - Templates
  - Namensauflösung
  - Exception Safety
  - Operatorüberladung
- Aufgaben zu Move
- Zufallszahlen
- Tutorial



IMS  
Institut für Mikroelektronische Systeme  
Leibniz Universität Hannover



Leibniz  
Universität  
Hannover

# Objektorientierte Programmierung II



IMS  
Institut für Mikroelektronische Systeme  
Leibniz Universität Hannover



Leibniz  
Universität  
Hannover

# Static

# Statische Member

```
struct Foo {
    static int count;
    static Foo createFoo();
};
```

```
//...
```

```
Foo f = Foo::createFoo();
std::cout<<Foo::count;
```

- Aus Java vielleicht bekannt: Statische Member

## Statische Member

```
struct Foo {  
    static int count;  
    static Foo createFoo();  
};
```

```
//...
```

```
Foo f = Foo::createFoo();  
std::cout<<Foo::count;
```

- Aus Java vielleicht bekannt: Statische Member
- Statische Member sind Daten und Funktionen, die zu einer Klasse gehören, aber nicht an eine Instanz gebunden sind

# Statische Member

```
struct Foo {  
    static int count;  
    static Foo createFoo();  
};
```

```
//...
```

```
Foo f = Foo::createFoo();  
std::cout<<Foo::count;
```

- Aus Java vielleicht bekannt: Statische Member
- Statische Member sind Daten und Funktionen, die zu einer Klasse gehören, aber nicht an eine Instanz gebunden sind
- Deklaration mit dem Keyword `static`

## Statische Member

```
struct Foo {  
    static int count;  
    static Foo createFoo();  
};
```

```
//...
```

```
Foo f = Foo::createFoo();  
std::cout<<Foo::count;
```

- Aus Java vielleicht bekannt: Statische Member
- Statische Member sind Daten und Funktionen, die zu einer Klasse gehören, aber nicht an eine Instanz gebunden sind
- Deklaration mit dem Keyword `static`
- Zugriff auf statische Member über `classname::member`
  - Klasse fungiert ähnlich einem Namespace für statische Member und enthaltene Typen



## Statische Member

```
struct Foo {  
    static int count;  
    static Foo createFoo();  
};
```

```
//...
```

```
Foo f = Foo::createFoo();  
std::cout<<Foo::count;
```

- Wesentlicher Unterschied zwischen statischen und normalen Membervariablen:  
Statische Membervariablen müssen außerhalb der Klasse definiert werden.  
(Definition außerhalb nicht notwendig, wenn Variable als Inline definiert (gcc 7+).)
  - Unterliegen der One Definition Rule, Definition sollte daher in einer .cpp-Datei liegen

## Statische Member

```
struct Foo {  
    static int count;  
    static Foo createFoo();  
};  
int Foo::count;  
//...  
Foo f = Foo::createFoo();  
std::cout<<Foo::count;
```

- Wesentlicher Unterschied zwischen statischen und normalen Membervariablen:  
Statische Membervariablen müssen außerhalb der Klasse definiert werden.  
(Definition außerhalb nicht notwendig, wenn Variable als Inline definiert (gcc 7+).)
  - Unterliegen der One Definition Rule, Definition sollte daher in einer .cpp-Datei liegen

## Lokale statische Variablen

- **static** kann neben Membern auch auf Funktionen und lokale Variablen angewendet werden
  - Mit jeweils unterschiedlichen Auswirkungen

## Lokale statische Variablen

- **static** kann neben Membern auch auf Funktionen und lokale Variablen angewendet werden
  - Mit jeweils unterschiedlichen Auswirkungen
- Für lokale Variablen bedeutet **static**, dass die Variable nur einmal erstellt wird

## Lokale statische Variablen

- `static` kann neben Membern auch auf Funktionen und lokale Variablen angewendet werden
  - Mit jeweils unterschiedlichen Auswirkungen
- Für lokale Variablen bedeutet `static`, dass die Variable nur einmal erstellt wird
- Die Variable wird beim ersten Durchlauf der Funktion initialisiert

## Lokale statische Variablen

- **static** kann neben Membern auch auf Funktionen und lokale Variablen angewendet werden
  - Mit jeweils unterschiedlichen Auswirkungen
- Für lokale Variablen bedeutet **static**, dass die Variable nur einmal erstellt wird
- Die Variable wird beim ersten Durchlauf der Funktion initialisiert
- Im Gegensatz zu normalen Variablen endet die Lebenszeit der Variable nicht mit Verlassen des Scopes
  - Spätere Durchläufe verwenden die im ersten Durchlauf erstellte Variable weiter, die Initialisierung wird also nicht noch einmal durchgeführt
  - Zerstörung der Variable erst mit dem Ende des Programms

## Lokale statische Variablen

- **static** kann neben Membern auch auf Funktionen und lokale Variablen angewendet werden
  - Mit jeweils unterschiedlichen Auswirkungen
- Für lokale Variablen bedeutet **static**, dass die Variable nur einmal erstellt wird
- Die Variable wird beim ersten Durchlauf der Funktion initialisiert
- Im Gegensatz zu normalen Variablen endet die Lebenszeit der Variable nicht mit Verlassen des Scopes
  - Spätere Durchläufe verwenden die im ersten Durchlauf erstellte Variable weiter, die Initialisierung wird also nicht noch einmal durchgeführt
  - Zerstörung der Variable erst mit dem Ende des Programms
- Beispiel: **static** std::string = "foo"

# Statische Funktionen und anonyme Namespaces

- Die Deklaration einer (freien) Funktion als `static` besagt, dass diese Funktion nur in der jeweiligen Compileunit existiert
  - Ermöglicht dem Compiler zusätzliche Optimierungen
  - Verschiedene Compileunits: Jeweils eigene Versionen der Funktion
  - Beispiel: `static int foo(){...}`



# Statische Funktionen und anonyme Namespaces

- Die Deklaration einer (freien) Funktion als `static` besagt, dass diese Funktion nur in der jeweiligen Compileunit existiert
  - Ermöglicht dem Compiler zusätzliche Optimierungen
  - Verschiedene Compileunits: Jeweils eigene Versionen der Funktion
  - Beispiel: `static int foo(){...}`
- Statische freie Funktionen sind in C++ deprecated
- Bevorzugte Alternative: Anonyme Namespaces

# Statische Funktionen und anonyme Namespaces

- Die Deklaration einer (freien) Funktion als `static` besagt, dass diese Funktion nur in der jeweiligen Compileunit existiert
  - Ermöglicht dem Compiler zusätzliche Optimierungen
  - Verschiedene Compileunits: Jeweils eigene Versionen der Funktion
  - Beispiel: `static int foo(){...}`
- Statische freie Funktionen sind in C++ deprecated
- Bevorzugte Alternative: Anonyme Namespaces
- Mit `namespace { ... }` wird ein anonymer Namespace erzeugt
- Anonyme Namespaces erhalten in jeder Compileunit einen (versteckten) eindeutigen Namen
  - Der “gleiche” anonyme Namespace hat in unterschiedlichen Compileunits unterschiedliche (interne) Namen
  - Vergebener Name für den Programmierer nicht relevant



IMS  
Institut für Mikroelektronische Systeme  
Leibniz Universität Hannover



Leibniz  
Universität  
Hannover

# Templates

# Templatefunktionen

```
template<typename Container>
typename Container::value_type Sum(const Container& container,
    typename Container::value_type accum)
{
    for(const auto& entry: container)
        accum += entry;
    return accum;
}
```

# Templatefunktionen

```
template<typename Container>
typename Container::value_type Sum(const Container& container,
    typename Container::value_type accum)
{
    for(const auto& entry: container)
        accum += entry;
    return accum;
}
```

- `template<TemplateArguments>` vor der eigentlichen Deklaration/Definition identifiziert ein Template
  - *TemplateArguments* in der Deklaration bereits verwendbar
- *TemplateArguments* ist kommaseparierte Liste von Deklarationen

# Templateargumente

- Typargumente werden mit `typename` *ArgumentName* oder `class` *ArgumentName* deklariert
  - Fast immer identisch
  - In einigen Situationen ist nur eine Variante erlaubt, die andere führt dann zu einem Compilerfehler

# Templateargumente

- Typargumente werden mit `typename ArgumentName` oder `class ArgumentName` deklariert
  - Fast immer identisch
  - In einigen Situationen ist nur eine Variante erlaubt, die andere führt dann zu einem Compilerfehler
- Templateargumente können auch Werte sein, Deklaration entsprechend mit `Type ArgumentName`
  - Nur Ganzzahltypen, Bool und Pointer als Nichttyp-Argumente zugelassen
  - Argument muss zur Compilezeit bekannt sein, daher Pointerargumente nur in Ausnahmefällen nützlich

# Templateargumente

- Typargumente werden mit `typename ArgumentName` oder `class ArgumentName` deklariert
  - Fast immer identisch
  - In einigen Situationen ist nur eine Variante erlaubt, die andere führt dann zu einem Compilerfehler
- Templateargumente können auch Werte sein, Deklaration entsprechend mit *Type *ArgumentName**
  - Nur Ganzzahltypen, Bool und Pointer als Nichttyp-Argumente zugelassen
  - Argument muss zur Compilezeit bekannt sein, daher Pointerargumente nur in Ausnahmefällen nützlich

```
template<typename T, unsigned I, bool B>  
void foo(T a){...}
```



# Templatefunktionen

```
template<typename Container>
typename Container::value_type Sum(const Container& container,
    typename Container::value_type accum)
{
    for(const auto& entry: container)
        accum += entry;
    return accum;
}
```

- Die Definition einer Templatefunktion muss für den Compiler sichtbar sein
  - Sonst keine Instanziierung möglich
  - Lässt sich in gewissem Maße umgehen, ist aber meistens nicht die Mühe wert
- Daher Templatefunktionen (und Klassen) im Header definieren!
  - Templates sind von der One Definition Rule ausgenommen

Templates immer im Header definieren!

## Abhängige Namen

```
template<typename Container>
typename Container::value_type Sum(const Container& container,
    typename Container::value_type accum)
{
    for(const auto& entry: container)
        accum += entry;
    return accum;
}
```

- `Container::value_type` ist sogenannter abhängiger Typ
  - Hängt vom Templateargument `Container` ab
- Kann erst bei Instanziierung des Templates ausgewertet werden
  - Syntax wird bereits beim Parsen der Deklaration überprüft
- Woher weiß der Compiler, ob `Container::value_type` ein Typ ist?
- Antwort: Gar nicht

## Abhängige Namen

```
template<typename Container>
typename Container::value_type Sum(const Container& container,
    typename Container::value_type accum)
{
    for(const auto& entry: container)
        accum += entry;
    return accum;
}
```

- Bei abhängigen Namen geht der Compiler davon aus, dass es sich um Variablen handelt
- Abhängige Typnamen müssen explizit mit `typename` als solche identifiziert werden
  - Allerdings nicht immer, an einigen Stellen, wo nur Typen stehen dürfen, kann dies weggelassen werden

## Argumentdeduzierung

```
template<typename Container>
typename Container::value_type Sum(const Container& container,
    typename Container::value_type accum)
{
    for(const auto& entry: container)
        accum += entry;
    return accum;
}
```

- Bekannt: Templateargumente können deduziert werden
  - Aufruf mit `Sum(std::vector<int>{0,1,2,3},0)` ist möglich
- **Achtung:** Abhängige Namen werden für Deduzierung ignoriert
  - `typename<T> void foo(typename T::value_type arg)` kann nicht deduziert werden
- Bei mehrfacher Deduzierung müssen die Typen übereinstimmen
  - Für `template<class T> void bar(T a, T b);` ist `bar(0, 0u)` ungültig

# Templateklassen

```
template<typename T>
class Interval {
    T Start;
    T End;
public:
    Interval(const T& start, const T& end) : Start(start), End(end) {}
    Interval Intersect(const Interval& other) const {...}
};
```

- Definition von Templateklassen wie für Templatefunktionen

# Templateklassen

```
template<typename T>
class Interval {
    T Start;
    T End;
public:
    Interval(const T& start, const T& end) : Start(start), End(end) {}
    Interval Intersect(const Interval& other) const {...}
};
```

- Definition von Templateklassen wie für Templatefunktionen
- Klassenname in ihrem Rumpf ohne Templateargumente verwendbar
  - Entspricht genau der aktuellen Instanziierung, andere Instanziierungen müssen mit Templateparameter angegeben werden

## Templateklassen

```
template<typename T>
class Interval {
    T Start;
    T End;
public:
    Interval(const T& start, const T& end) : Start(start), End(end) {}
    Interval Intersect(const Interval& other) const {...}
};
```

- Definition von Templateklassen wie für Templatefunktionen
- Klassenname in ihrem Rumpf ohne Templateargumente verwendbar
  - Entspricht genau der aktuellen Instanziierung, andere Instanziierungen müssen mit Templateparameter angegeben werden
- Alle Member müssen im Header definiert sein, insbesondere auch statische Membervariablen
  - Für `template<class T> struct Foo { static int bar; }`  
Definition etwa über `template<class T> Foo<T>::bar = 5;`

# Templatespezialisierungen

- Manchmal wird für bestimmte Typen eine dedizierte Implementation benötigt
  - Weil die generische Implementation für diesen Typ nicht möglich ist
  - Weil die generische Implementation für diesen Typ nicht optimal ist
- Nach Möglichkeit sollten diese Unterschiede nicht nach außen sichtbar sein
  - Überraschend, wenn bestimmte Typen nicht mit der Templateklasse, sondern mit einer anderen, fast identischen Klasse verwendet werden müssen



# Templatespezialisierungen

- Manchmal wird für bestimmte Typen eine dedizierte Implementation benötigt
  - Weil die generische Implementation für diesen Typ nicht möglich ist
  - Weil die generische Implementation für diesen Typ nicht optimal ist
- Nach Möglichkeit sollten diese Unterschiede nicht nach außen sichtbar sein
  - Überraschend, wenn bestimmte Typen nicht mit der Templateklasse, sondern mit einer anderen, fast identischen Klasse verwendet werden müssen
- Lösung: Templatespezialisierung
- Gibt vor, dass ein bestimmter Implementationspfad verwendet werden soll, wenn bestimmte Typen/Werte als Templateargumente eingesetzt werden

## Beispiel Templatespezialisierungen

```
template<typename T>
class Constructor
{
public:
    T construct(int a) { return T{a}; }
};
```

```
template<>
class Constructor<void>
{
public:
    void construct(int a) { }
};
```

## Variadic Templates

- In einigen Fällen ist eine variable Anzahl von Templateargumenten gewünscht
  - `std::tuple`
  - `vector.emplace_back`

## Variadic Templates

- In einigen Fällen ist eine variable Anzahl von Templateargumenten gewünscht
  - `std::tuple`
  - `vector.emplace_back`
- Möglich über eine festgelegte Anzahl an Argumenten mit Defaultwerten, die im unbenutzten Fall verwendet werden
  - Sehr unschöne Lösung
  - Willkürlich gewählte Obergrenze für Argumente

## Variadic Templates

- In einigen Fällen ist eine variable Anzahl von Templateargumenten gewünscht
  - `std::tuple`
  - `vector.emplace_back`
- Möglich über eine festgelegte Anzahl an Argumenten mit Defaultwerten, die im unbenutzten Fall verwendet werden
  - Sehr unschöne Lösung
  - Willkürlich gewählte Obergrenze für Argumente
- Seit C++11: Variadic Templates
- Definition eines Templatearguments (Argument Pack) mit `typename... name` definiert eine beliebige Anzahl an Argumenten
- Argument Pack kann mit `name...` in eine kommaseparierte Liste entpackt werden

## Variadic Templates

- In einigen Fällen ist eine variable Anzahl von Templateargumenten gewünscht
  - `std::tuple`
  - `vector.emplace_back`
- Möglich über eine festgelegte Anzahl an Argumenten mit Defaultwerten, die im unbenutzten Fall verwendet werden

```
template<typename T, typename... Types>
void emplaceBack(std::vector<T>& container, Types... values)
{
    container.push_back(T(values...)); // expand argument pack
}
```

- Definition eines Templatearguments (Argument Pack) mit `typename... name` definiert eine beliebige Anzahl an Argumenten
- Argument Pack kann mit `name...` in eine kommaseparierte Liste entpackt werden



IMS  
Institut für Mikroelektronische Systeme  
Leibniz Universität Hannover



Leibniz  
Universität  
Hannover

# Name Lookup

# Name Lookup

- Bereits angesprochen: Namensauflösung in C++ ist recht komplex
  - Im Folgenden erläuterte Regeln sind starke Vereinfachung



## Name Lookup

- Bereits angesprochen: Namensauflösung in C++ ist recht komplex
  - Im Folgenden erläuterte Regeln sind starke Vereinfachung
- Scopes werden i.A. rückwärts durchsucht
  - Zunächst wird der aktuelle Scope durchsucht, danach der übergeordnete und so weiter
  - Bei Memberfunktionen werden auch die Basisklasse und ihre übergeordneten Namespaces durchsucht
  - Die Suche wird abgebrochen, sobald der Name gefunden ist
    - Namen aus übergeordneten Scopes werden verdeckt und z.B. für Overload Resolution nicht betrachtet

# Name Lookup

- Bereits angesprochen: Namensauflösung in C++ ist recht komplex
  - Im Folgenden erläuterte Regeln sind starke Vereinfachung

- Scopes werden i.A. rückwärts durchsucht

- Zunächst wird der Scope der Funktion durchsucht

- Bei Memberfunktion: Der Scope der Klasse wird durchsucht

- Die Suche wird abgebrochen, wenn ein Name gefunden wird

- Namen aus übergeordneten Namespaces werden nicht betrachtet

```
void bar();
namespace Bar
{
    void bar(int);
    namespace Qux
    {
        void baz() { bar(); }
    }
}
```

und so weiter  
geordneten Namespaces

erload Resolution nicht

Compilerfehler:

```
error: too few arguments to function 'void
Bar::bar(int)'
```

## Name Lookup II

- Lookup für qualifizierte Namen funktioniert ähnlich
  - Für `Foo::bar()` wird im aktuellen Scope nach `Foo` gesucht, danach in übergeordnetem
  - Sobald ein `Foo` gefunden ist, wird die Suche nach `Foo` abgebrochen und in dem gefundenen `Foo` nach `bar()` gesucht
  - Compilerfehler, falls `bar` in **diesem** `Foo` nicht gefunden wird

## Name Lookup II

- Lookup für qualifizierte Namen funktioniert ähnlich
  - Für `Foo::bar()` wird im aktuellen Scope nach `Foo` gesucht, danach in übergeordnetem
  - Sobald ein `Foo` gefunden wird, wird in dem gefundenen Scope nach `bar` gesucht
  - Compilerfehler: `baz` ist nicht gefunden

```
namespace Foo
{
    void bar();
}
namespace Bar
{
    namespace Qux
    {
        void baz() { Foo::bar(); }
    }
}
```

Findet `::Foo::bar`

(Führendes `::` identifiziert globalen Namespace)

## Name Lookup II

### ■ Lookup für qualifizierte Namen funktioniert ähnlich

- Für `Foo::bar()` wird `bar()` in übergeordnetem Namespace und in dem gefundenen Namespace gesucht
- Sobald ein `Foo` gefunden wird, wird `bar()` in `Foo` nach `bar()` gesucht
- Compilerfehler, falls `bar()` nicht gefunden wird

```
namespace Foo
{
    void bar();
}

namespace Bar
{
    namespace Foo
    {}
    namespace Qux
    {
        void baz() { Foo::bar(); }
    }
}
```

Compilerfehler:

```
error: 'bar' is not a member of 'Bar::Foo'
```

## Name Lookup II

- Lookup für qualifizierte Namen funktioniert ähnlich
  - Für `Foo::bar()` wird im aktuellen Scope nach `Foo` gesucht, danach in übergeordnetem
  - Sobald ein `Foo` gefunden ist, wird die Suche nach `Foo` abgebrochen und in dem gefundenen `Foo` nach `bar()` gesucht
  - Compilerfehler, falls `bar` in **diesem** `Foo` nicht gefunden wird
- Es werden nur bereits deklarierte Namen gefunden
  - Ausnahme: Inlinedefinitionen von Memberfunktionen dürfen auch später deklarierte Member verwenden
  - In der Klasse definierte Friend-Funktionen verwenden dieselben Lookupregeln wie Memberfunktionen

## Argument Dependent Lookup

- Für unqualifizierte Funktionsaufrufe (z.B. `swap(x, y)`) kommt eine weitere Dimension hinzu:  
Argument Dependent Lookup (ADL)

## Argument Dependent Lookup

- Für unqualifizierte Funktionsaufrufe (z.B. `swap(x, y)`) kommt eine weitere Dimension hinzu:  
Argument Dependent Lookup (ADL)
- Abhängig von den Typen der Argumente werden zusätzliche Namespaces und Klassen durchsucht



## Argument Dependent Lookup

- Für unqualifizierte Funktionsaufrufe (z.B. `swap(x, y)`) kommt eine weitere Dimension hinzu:  
Argument Dependent Lookup (ADL)
- Abhängig von den Typen der Argumente werden zusätzliche Namespaces und Klassen durchsucht
- Für jedes Argument wird am Typ des Arguments eine zusätzliche Suche gestartet
  - Durchsucht den Typ selber, dessen Basisklassen und jeweils übergeordnete Namespaces

## Argument Dependent Lookup

- Für unqualifizierte Funktionsaufrufe (z.B. `swap(x, y)`) kommt eine weitere Dimension hinzu:  
Argument Dependent Lookup (ADL)
- Abhängig von den Typen der Argumente werden zusätzliche Namespaces und Klassen durchsucht
- Für jedes Argument wird am Typ des Arguments eine zusätzliche Suche gestartet
  - Durchsucht den Typ selber, dessen Basisklassen und jeweils übergeordnete Namespaces
- Durch diese Regel gehören freie Funktionen im selben Namespace zur Schnittstelle einer Klasse
  - Direkte Assoziation freier Funktionen mit den jeweiligen Klassen
  - Klarer Gegensatz zu Sprachen wie Java

## Argument Dependent Lookup

- Für unqualifizierte Funktionsaufrufe (z.B. `swap(x, y)`) kommt eine weitere Dimension hinzu:  
Argument Dependent Lookup (ADL)
- Abhängig von den Typen der Argumente werden zusätzliche Namespaces und Klassen durchsucht
- Für jedes Argument wird am Typ des Arguments eine zusätzliche Suche gestartet
  - Durchsucht den Typ selber, dessen Basisklassen und jeweils übergeordnete Namespaces
- Durch diese Regel gehören freie Funktionen im selben Namespace zur Schnittstelle einer Klasse
  - Direkte Assoziation freier Funktionen mit den jeweiligen Klassen
  - Klarer Gegensatz zu Sprachen wie Java
- Für ADL müssen Funktionen unqualifiziert aufgerufen werden

## std::swap

- Ein wichtiges Beispiel für den Nutzen von ADL ist `std::swap`
  - Definiert im Header `utility`

## std::swap

- Ein wichtiges Beispiel für den Nutzen von ADL ist `std::swap`
  - Definiert im Header `utility`
- `std::swap(a, b)` erhält die Argumente als Lvalue-Referenzen und vertauscht ihren Inhalt

## std::swap

- Ein wichtiges Beispiel für den Nutzen von ADL ist `std::swap`
  - Definiert im Header `utility`
- `std::swap(a, b)` erhält die Argumente als Lvalue-Referenzen und vertauscht ihren Inhalt

### Beispielimplementation von `std::swap`

```
void swap(T& a, T& b)
{
    T tmp{std::move(a)};
    a = std::move(b);
    b = std::move(tmp);
}
```

## std::swap

- Ein wichtiges Beispiel für den Nutzen von ADL ist `std::swap`
  - Definiert im Header `utility`
- `std::swap(a, b)` erhält die Argumente als Lvalue-Referenzen und vertauscht ihren Inhalt
- Erstellung eines Temporary oft aufwendig
  - Effizientere Implementation möglich

## std::swap

- Ein wichtiges Beispiel für den Nutzen von ADL ist `std::swap`
  - Definiert im Header `utility`
- `std::swap(a, b)` erhält die Argumente als Lvalue-Referenzen und vertauscht ihren Inhalt
- Erstellung eines Temporary oft aufwendig
  - Effizientere Implementation möglich
- Bei Entwicklung einer Klasse wird daher häufig eine spezialisierte Swaproutine geschrieben



## std::swap

- Ein wichtiges Beispiel für den Nutzen von ADL ist `std::swap`
  - Definiert im Header `utility`
- `std::swap(a, b)` erhält die Argumente als Lvalue-Referenzen und vertauscht ihren Inhalt
- Erstellung eines Temporary oft aufwendig
  - Effizientere Implementation möglich
- Bei Entwicklung einer Klasse wird daher häufig eine spezialisierte Swaproutine geschrieben
- **Problem:** Funktionen in `std` dürfen nicht überladen werden

## std::swap

- Ein wichtiges Beispiel für den Nutzen von ADL ist `std::swap`
  - Definiert im Header `utility`
- `std::swap(a, b)` erhält die Argumente als Lvalue-Referenzen und vertauscht ihren Inhalt
- Erstellung eines Temporary oft aufwendig
  - Effizientere Implementation möglich
- Bei Entwicklung einer Klasse wird daher häufig eine spezialisierte Swaproutine geschrieben
- **Problem:** Funktionen in `std` dürfen nicht überladen werden
- **Lösung:** `swap` wird im Namespace der Klasse deklariert und über ADL aufgerufen
  - Aufrufe von `swap` sollten daher immer unqualifiziert sein

## Using

- `swap(a, b)` funktioniert nur, wenn `swap` über ADL gefunden wird
  - Ansonsten muss `std::swap(a, b)` verwendet werden

## Using

- `swap(a, b)` funktioniert nur, wenn `swap` über ADL gefunden wird
  - Ansonsten muss `std::swap(a, b)` verwendet werden
- Besser wäre es, wenn `std::swap` automatisch verwendet wird, falls keine Spezialisierung über ADL gefunden wird

## Using

- `swap(a, b)` funktioniert nur, wenn `swap` über ADL gefunden wird
  - Ansonsten muss `std::swap(a, b)` verwendet werden
- Besser wäre es, wenn `std::swap` automatisch verwendet wird, falls keine Spezialisierung über ADL gefunden wird
- Lösung über `using namespace std`; möglich
  - Importiert den gesamten Namespace
  - Hebelt das Konzept von Namespaces aus

## Using

- `swap(a, b)` funktioniert nur, wenn `swap` über ADL gefunden wird
  - Ansonsten muss `std::swap(a, b)` verwendet werden
- Besser wäre es, wenn `std::swap` automatisch verwendet wird, falls keine Spezialisierung über ADL gefunden wird
- Lösung über `using namespace std`; möglich
  - Importiert den gesamten Namespace
  - Hebelt das Konzept von Namespaces aus
- `using` kann verwendet werden, um einzelne Deklarationen aus einem Namespace zu importieren
  - `using std::swap`;

# Using und Swap

```
void bubblesort(std::vector<T>& data) {  
    bool done = false;  
    while(!done) {  
        done = true;  
        for(std::size_t i = 0; i < data.size() - 1; ++i)  
            if(data[i] > data[i + 1]) {  
                using std::swap;  
                swap(data[i], data[i + 1]);  
                done = false;  
            }  
    }  
}
```

- Aufruf von swap immer mit `using std::swap; swap(a, b);`!
  - Ähnliches gilt für einige andere Funktionen der Standardbibliothek, insbesondere `std::begin` und `std::end`

## Using und Swap

```
void bubblesort(std::vector<T>& data) {  
    bool done = false;  
    while(!done) {  
        done = true;  
        for(std::size_t i = 0; i < data.size() - 1; ++i)  
            if(data[i] > data[i + 1]) {  
                using std::swap;  
                swap(data[i], data[i + 1]);  
                done = false;  
            }  
    }  
}
```

- Aufruf von swap immer mit `using std::swap; swap(a, b);`!
  - Ähnliches gilt für einige andere Funktionen der Standardbibliothek, insbesondere `std::begin` und `std::end`
- `using`-Deklarationen immer so eng wie möglich halten
  - Nur benötigte Funktionalität importieren, nur im jeweilig kleinsten umschließenden Scope





IMS  
Institut für Mikroelektronische Systeme  
Leibniz Universität Hannover



Leibniz  
Universität  
Hannover

# Exception-Safety

# Exception-Safety

- Exceptionsicherheit ist wichtiges Konzept in der Programmierung
  - Beachtung dieses Konzepts besonders für die korrekte Implementation von Copy/Move-Operationen wichtig (später mehr)

## Exception-Safety

- Exceptionsicherheit ist wichtiges Konzept in der Programmierung
  - Beachtung dieses Konzepts besonders für die korrekte Implementation von Copy/Move-Operationen wichtig (später mehr)
- Elementare Frage: In welchem Zustand befinden sich die Datenstrukturen, falls eine Operation eine Exception wirft?
  - Die Struktur könnte korrupt sein
  - Korrekte Programmausführung nach Fangen der Exception vielleicht nicht möglich

## Exception-Safety

- Exceptionsicherheit ist wichtiges Konzept in der Programmierung
  - Beachtung dieses Konzepts besonders für die korrekte Implementation von Copy/Move-Operationen wichtig (später mehr)
- Elementare Frage: In welchem Zustand befinden sich die Datenstrukturen, falls eine Operation eine Exception wirft?
  - Die Struktur könnte korrupt sein
  - Korrekte Programmausführung nach Fangen der Exception vielleicht nicht möglich
- Bei Betrachtung der Exception Safety werden Operationen in Kategorien eingeteilt

# Kategorien der Exception-Safety

- No-Throw Guarantee: Die Operation kann nicht fehlschlagen

## Kategorien der Exception-Safety

- No-Throw Guarantee: Die Operation kann nicht fehlschlagen
- Strong Guarantee: Die Operation ist entweder erfolgreich oder ohne sichtbaren Effekte
  - Bei Fehlschlag wird die Datenstruktur im ursprünglichen Zustand (vor Beginn der Operation) belassen
  - Transaktionssemantik

## Kategorien der Exception-Safety

- No-Throw Guarantee: Die Operation kann nicht fehlschlagen
- Strong Guarantee: Die Operation ist entweder erfolgreich oder ohne sichtbaren Effekte
  - Bei Fehlschlag wird die Datenstruktur im ursprünglichen Zustand (vor Beginn der Operation) belassen
  - Transaktionssemantik
- Basic Guarantee: Zustand bei Fehlschlag ist undefiniert, aber gültig
  - Es dürfen keine Ressourcen (v.a. Speicher) geleakt werden

## Kategorien der Exception-Safety

- No-Throw Guarantee: Die Operation kann nicht fehlschlagen
- Strong Guarantee: Die Operation ist entweder erfolgreich oder ohne sichtbaren Effekte
  - Bei Fehlschlag wird die Datenstruktur im ursprünglichen Zustand (vor Beginn der Operation) belassen
  - Transaktionssemantik
- Basic Guarantee: Zustand bei Fehlschlag ist undefiniert, aber gültig
  - Es dürfen keine Ressourcen (v.a. Speicher) geleakt werden
- No Guarantee: Keinerlei Garantien über den Zustand der Anwendung



## Kategorien der Exception-Safety

- No-Throw Guarantee: Die Operation kann nicht fehlschlagen
- Strong Guarantee: Die Operation ist entweder erfolgreich oder ohne sichtbaren Effekte
  - Bei Fehlschlag wird die Datenstruktur im ursprünglichen Zustand (vor Beginn der Operation) belassen
  - Transaktionssemantik
- Basic Guarantee: Zustand bei Fehlschlag ist undefiniert, aber gültig
  - Es dürfen keine Ressourcen (v.a. Speicher) geleakt werden
- No Guarantee: Keinerlei Garantien über den Zustand der Anwendung
- Immer eine möglichst hohe Garantie anstreben!

# Exception-Safety und Komposition

- Viele Funktionen rufen intern andere Funktionen auf
  - Welche Garantien gelten für derart zusammengesetzte Funktionen?

## Exception-Safety und Komposition

- Viele Funktionen rufen intern andere Funktionen auf
  - Welche Garantien gelten für derart zusammengesetzte Funktionen?
- Werden ausschließlich No-Throw-Operationen ausgeführt, so ist die Funktion selbst auch No-Throw

## Exception-Safety und Komposition

- Viele Funktionen rufen intern andere Funktionen auf
  - Welche Garantien gelten für derart zusammengesetzte Funktionen?
- Werden ausschließlich No-Throw-Operationen ausgeführt, so ist die Funktion selbst auch No-Throw
- Erfüllen alle Operationen die Basic Guarantee, so gilt dies auch für die Funktion
  - No-Throw und Strong Guarantee beinhalten jeweils die Basic Guarantee

## Exception-Safety und Komposition

- Viele Funktionen rufen intern andere Funktionen auf
  - Welche Garantien gelten für derart zusammengesetzte Funktionen?
- Werden ausschließlich No-Throw-Operationen ausgeführt, so ist die Funktion selbst auch No-Throw
- Erfüllen alle Operationen die Basic Guarantee, so gilt dies auch für die Funktion
  - No-Throw und Strong Guarantee beinhalten jeweils die Basic Guarantee
- Werden mehrere Operationen mit Strong Guarantee aufgerufen, erfüllt die Funktion nicht zwingend die Strong Guarantee
  - Transaktionssemantik nicht garantiert
  - Basic Guarantee ist allerdings erfüllt

## Exception-Safety und Komposition

- Viele Funktionen rufen intern andere Funktionen auf
  - Welche Garantien gelten für derart zusammengesetzte Funktionen?
- Werden ausschließlich No-Throw-Operationen ausgeführt, so ist die Funktion selbst auch No-Throw
- Erfüllen alle Operationen die Basic Guarantee, so gilt dies auch für die Funktion
  - No-Throw und Strong Guarantee beinhalten jeweils die Basic Guarantee
- Werden mehrere Operationen mit Strong Guarantee aufgerufen, erfüllt die Funktion nicht zwingend die Strong Guarantee
  - Transaktionssemantik nicht garantiert
  - Basic Guarantee ist allerdings erfüllt
- Für eine Strong Guarantee dürfen nach einer Änderung persistenter Daten nur noch No-Throw-Operationen ausgeführt werden!

# Noexcept

- Für exceptionsicheren Code sind No-Throw-Routinen wichtig

## Noexcept

- Für exceptionsicheren Code sind No-Throw-Routinen wichtig
- Kennzeichnung von No-Throw-Operationen im Quelltext ist sinnvoll
  - Erleichtert das Schreiben von Code mit starker Exceptionsicherheit
  - Ermöglicht Optimierungen abhängig von der Exceptionsicherheit gewisser Operationen



# Noexcept

- Für exceptionsicheren Code sind No-Throw-Routinen wichtig
- Kennzeichnung von No-Throw-Operationen im Quelltext ist sinnvoll
  - Erleichtert das Schreiben von Code mit starker Exceptionsicherheit
  - Ermöglicht Optimierungen abhängig von der Exceptionsicherheit gewisser Operationen
- Seit C++11: noexcept-Spezifikation
  - Beispiel: `int foo(int a, int b) noexcept {...}`

## Noexcept

- Für exceptionsicheren Code sind No-Throw-Routinen wichtig
- Kennzeichnung von No-Throw-Operationen im Quelltext ist sinnvoll
  - Erleichtert das Schreiben von Code mit starker Exceptionsicherheit
  - Ermöglicht Optimierungen abhängig von der Exceptionsicherheit gewisser Operationen
- Seit C++11: noexcept-Spezifikation
  - Beispiel: `int foo(int a, int b) noexcept {...}`
- noexcept-Funktionen dürfen keine Exceptions werfen
  - Selbe Regeln wie für Destruktoren: Exceptions dürfen die Funktion nicht verlassen, `try...catch` in der Funktion ist Ok
  - Bei Verstößen wird `std::terminate` aufgerufen und das Programm beendet (ohne Destruktoraufrufe!)



IMS  
Institut für Mikroelektronische Systeme  
Leibniz Universität Hannover



Leibniz  
Universität  
Hannover

# Operatorüberladung

# Überladung von Operatoren

- Für Klassen der Standardbibliothek werden bereits häufig Operatoren verwendet
  - Beispiele: `std::string{"foo"} == "foo"` oder  
`std::unique_ptr<int> u{...}; *u = 5;`

# Überladung von Operatoren

- Für Klassen der Standardbibliothek werden bereits häufig Operatoren verwendet
  - Beispiele: `std::string{"foo"} == "foo"` oder  
`std::unique_ptr<int> u{...}; *u = 5;`
- Man sagt, die Operatoren sind für die jeweilige Klasse **überladen**

# Überladung von Operatoren

- Für Klassen der Standardbibliothek werden bereits häufig Operatoren verwendet
  - Beispiele: `std::string{"foo"} == "foo"` oder  
`std::unique_ptr<int> u{...}; *u = 5;`
- Man sagt, die Operatoren sind für die jeweilige Klasse **überladen**
- Jetzt auch Überladung von Operatoren für eigene Klassen

# Überladung von Operatoren

- Für Klassen der Standardbibliothek werden bereits häufig Operatoren verwendet
  - Beispiele: `std::string{"foo"} == "foo"` oder  
`std::unique_ptr<int> u{...}; *u = 5;`
- Man sagt, die Operatoren sind für die jeweilige Klasse **überladen**
- Jetzt auch Überladung von Operatoren für eigene Klassen
- Die meisten Operatoren können in C++ überladen werden
  - Ausnahmen: Scope Zugriff (`::`), Memberzugriff (`.` und `.*`), Ternary Operator (`?:`), `sizeof` und `typeid`

# Operatorüberladung

```
struct Vec {
    double x;
    double y;
    Vec& operator+=(const Vec& b) {
        this->x += b.x;
        this->y += b.y;
        return *this;
    }
};

Vec operator+(const Vec& a, const Vec& b){
    Vec tmp(a);
    tmp += b;
    return tmp;
}
```

- Viele Operatoren können als Memberfunktion oder als freie Funktion überladen werden
  - `friend`-Funktionen sind freie Funktionen!
- Für Memberfunktion wird erstes Argument des Operators als `this` übergeben
- Freie Funktionen für ADL im Namespace der Klasse definieren



# Operatorüberladung

```
struct Vec {
    double x;
    double y;
    Vec& operator+=(const Vec& b) {
        this->x += b.x;
        this->y += b.y;
        return *this;
    }
};

Vec operator+(const Vec& a, const Vec& b){
    Vec tmp(a);
    tmp += b;
    return tmp;
}
```

- Überladene Operatoren sind Funktionen mit speziellem Namen
  - Analog zu Konstruktoren und Destruktoren
- Name für einen überladenen Operator: `operator`*op*
  - Beispiel: `operator==`

## Freie Funktionen oder Memberfunktionen

- Viele Operatoren können als freie Funktionen oder Memberfunktionen überladen werden
  - Ausnahmen: =, [], (), -> nur als Memberfunktionen

## Freie Funktionen oder Memberfunktionen

- Viele Operatoren können als freie Funktionen oder Memberfunktionen überladen werden
  - Ausnahmen: `=`, `[]`, `()`, `->` nur als Memberfunktionen
- Welche Variante ist zu bevorzugen?

## Freie Funktionen oder Memberfunktionen

- Viele Operatoren können als freie Funktionen oder Memberfunktionen überladen werden
  - Ausnahmen: `=`, `[]`, `()`, `->` nur als Memberfunktionen
- Welche Variante ist zu bevorzugen?
- Wesentlicher Unterschied: `this`-Argument von Memberfunktionen muss den entsprechenden Typ haben
  - Keine impliziten Konvertierungen (außer abgeleitete zu Basisklasse)
  - Asymmetrische Operatoren (z.B. `2*Vec(1,2)`) nicht implementierbar

## Freie Funktionen oder Memberfunktionen

- Viele Operatoren können als freie Funktionen oder Memberfunktionen überladen werden
  - Ausnahmen: `=`, `[]`, `()`, `->` nur als Memberfunktionen
- Welche Variante ist zu bevorzugen?
- Wesentlicher Unterschied: **this**-Argument von Memberfunktionen muss den entsprechenden Typ haben
  - Keine impliziten Konvertierungen (außer abgeleitete zu Basisklasse)
  - Asymmetrische Operatoren (z.B. `2*Vec(1,2)`) nicht implementierbar
- Für einige Operatoren machen implizite Konvertierungen (im ersten Argument) wenig Sinn, daher als Memberfunktionen implementieren
  - Unäre Operatoren (z.B. `++X`)
  - Kombinierte Zuweisungsoperationen (z.B. `X+=Y`)

## Freie Funktionen oder Memberfunktionen

- Viele Operatoren können als freie Funktionen oder Memberfunktionen überladen werden
  - Ausnahmen: `=`, `[]`, `()`, `->` nur als Memberfunktionen
- Welche Variante ist zu bevorzugen?
- Wesentlicher Unterschied: **this**-Argument von Memberfunktionen muss den entsprechenden Typ haben
  - Keine impliziten Konvertierungen (außer abgeleitete zu Basisklasse)
  - Asymmetrische Operatoren (z.B. `2*Vec(1,2)`) nicht implementierbar
- Für einige Operatoren machen implizite Konvertierungen (im ersten Argument) wenig Sinn, daher als Memberfunktionen implementieren
  - Unäre Operatoren (z.B. `++X`)
  - Kombinierte Zuweisungsoperationen (z.B. `X+=Y`)
- Symmetrisch definierte Operatoren als freie Funktionen definieren
  - Arithmetische Operatoren (z.B. `X+Y`), Vergleichsoperatoren (z.B. `X<Y`)

## Ausgabe über Streamout

- Streamout-Operator nicht als Memberfunktion implementierbar

## Ausgabe über Streamout

- Streamout-Operator nicht als Memberfunktion implementierbar
- Grund: Erstes Argument von `cout<<MyClass()` ist Outstream
  - `std::ostream` kann als Teil der Standardbibliothek nicht modifiziert werden
  - Wäre keine gut skalierende Lösung



## Ausgabe über Streamout

- Streamout-Operator nicht als Memberfunktion implementierbar
- Grund: Erstes Argument von `cout<<MyClass()` ist Outstream
  - `std::ostream` kann als Teil der Standardbibliothek nicht modifiziert werden
  - Wäre keine gut skalierende Lösung
- Streamausgabe daher immer als freie Funktion implementieren!

## Ausgabe über Streamout

- Streamout-Operator nicht als Memberfunktion implementierbar
- Grund: Erstes Argument von `cout<<MyClass()` ist Outstream
  - `std::ostream` kann als Teil der Standardbibliothek nicht modifiziert werden
  - Wäre keine gut skalierende Lösung
- Streamausgabe daher immer als freie Funktion implementieren!
- Streamparameter immer als Referenz übergeben und zurückgeben!

## Ausgabe über Streamout

- Streamout-Operator nicht als Memberfunktion implementierbar
- Grund: Erstes Argument von `cout<<MyClass()` ist Outstream
  - `std::ostream` kann als Teil der Standardbibliothek nicht modifiziert werden
  - Wäre keine gut skalierende Lösung
- Streamausgabe daher immer als freie Funktion implementieren!
- Streamparameter immer als Referenz übergeben und zurückgeben!

```
struct Vec
{
    double x;
    double y;
};
std::ostream& operator<<(std::ostream& os, const Vec& v)
{ return os<<"("<<v.x<<" , "<<v.y<<" )"; }
```

# Allgemeine Regeln zur Operatorüberladung

- Operatorüberladungen sollten intuitiv verständlich sein
  - Nur Operatorüberladung verwenden, wenn das Verhalten gängiger Konvention entspricht

# Allgemeine Regeln zur Operatorüberladung

- Operatorüberladungen sollten intuitiv verständlich sein
  - Nur Operatorüberladung verwenden, wenn das Verhalten gängiger Konvention entspricht
- Zusammengehörige Operatoren immer gemeinsam überladen
  - Beispiele: + und +=, == und !=, ...

# Allgemeine Regeln zur Operatorüberladung

- Operatorüberladungen sollten intuitiv verständlich sein
  - Nur Operatorüberladung verwenden, wenn das Verhalten gängiger Konvention entspricht
- Zusammengehörige Operatoren immer gemeinsam überladen
  - Beispiele: + und +=, == und !=, ...
- Wichtige Grundregel: Normale Transformationsregeln von Operationen sollten auch für überladene Operatoren eingehalten werden
  - $a+=b$  sollte dasselbe Ergebnis wie  $a=a+b$  liefern
  - $a<b$ ,  $b>a$ ,  $!(a>=b)$  und  $!(b<=a)$  sollten alle das gleiche Ergebnis liefern

# Allgemeine Regeln zur Operatorüberladung

- Operatorüberladungen sollten intuitiv verständlich sein
  - Nur Operatorüberladung verwenden, wenn das Verhalten gängiger Konvention entspricht
- Zusammengehörige Operatoren immer gemeinsam überladen
  - Beispiele: + und +=, == und !=, ...
- Wichtige Grundregel: Normale Transformationsregeln von Operationen sollten auch für überladene Operatoren eingehalten werden
  - $a+=b$  sollte dasselbe Ergebnis wie  $a=a+b$  liefern
  - $a<b$ ,  $b>a$ ,  $!(a \geq b)$  und  $!(b \leq a)$  sollten alle das gleiche Ergebnis liefern
- Von zusammengehörigen Operatoren wird nur einer vollständig implementiert, die anderen verwenden diese Implementation!

# Copy Constructor und Assignment-Operator

- C++-Objekte haben Value-Semantik, werden also häufig kopiert



# Copy Constructor und Assignment-Operator

- C++-Objekte haben Value-Semantik, werden also häufig kopiert
- Kopieroperation kann wie andere Operationen in C++ umdefiniert werden

# Copy Constructor und Assignment-Operator

- C++-Objekte haben Value-Semantik, werden also häufig kopiert
- Kopieroperation kann wie andere Operationen in C++ umdefiniert werden
- C++ kennt dafür zwei Konstrukte
  - Copy-Constructor für Initialisierung durch Kopie (`std::string str{otherStr};`)
  - Assignment-Operator für Zuweisung auf ein bestehendes Objekt (`str = otherStr;`)

## Copy Constructor und Assignment-Operator

- C++-Objekte haben Value-Semantik, werden also häufig kopiert
- Kopieroperation kann wie andere Operationen in C++ umdefiniert werden
- C++ kennt dafür zwei Konstrukte
  - Copy-Constructor für Initialisierung durch Kopie (`std::string str{otherStr};`)
  - Assignment-Operator für Zuweisung auf ein bestehendes Objekt (`str = otherStr;`)
- Werden, wenn nicht manuell definiert, vom Compiler generiert

# Überladung von Kopieroperationen

```
class Foo {  
private:  
    int* ptr;  
public:  
    //other constructors and functions  
    Foo(const Foo& other): ptr(new int(*other.ptr)) {}  
    Foo& operator=(const Foo& other) {  
        if(this != &other)  
            *this->ptr = *other.ptr;  
        return *this;  
    }  
    ~Foo() { delete this->ptr; }  
};
```

# Überladung von Kopieroperationen

```
class Foo {
private:
    int* ptr;
public:
    //other constructors and functions
    Foo(const Foo& other): ptr(new int(*other.ptr)) {}
    Foo& operator=(const Foo& other) {
        if(this != &other)
            *this->ptr = *other.ptr;
        return *this;
    }
    ~Foo() { delete this->ptr; }
};
```

- Copy-Konstruktor ist normaler Konstruktor, erhält einen Parameter vom Typ `const T&`

# Überladung von Kopieroperationen

```
class Foo {
private:
    int* ptr;
public:
    //other constructors and functions
    Foo(const Foo& other): ptr(new int(*other.ptr)) {}
    Foo& operator=(const Foo& other) {
        if(this != &other)
            *this->ptr = *other.ptr;
        return *this;
    }
    ~Foo() { delete this->ptr; }
};
```

- Assignment-Operator hat Parameter vom Typ `const T&` und gibt `T&` zurück
  - Rückgabewert sollte immer `*this` sein
  - Parametertyp darf auch `T` sein
  - Auf Behandlung von Selbstzuweisung achten

# Rvalue-Referenzen

- `T&&` definiert eine Rvalue-Referenz
  - Wie “normale” Referenzen, zeigen aber explizit auf Rvalues
  - Achtung: Eine Rvalue-Referenz ist selber ein Lvalue und benötigt `std::move`, um als Rvalue verwendet zu werden

## Rvalue-Referenzen

- **T&&** definiert eine Rvalue-Referenz
  - Wie “normale” Referenzen, zeigen aber explizit auf Rvalues
  - Achtung: Eine Rvalue-Referenz ist selber ein Lvalue und benötigt `std::move`, um als Rvalue verwendet zu werden
- Funktionen dürfen weder Lvalue- noch Rvalue-Referenzen auf temporäre Objekte oder lokale Variablen zurückgeben!



## Rvalue-Referenzen

- `T&&` definiert eine Rvalue-Referenz
  - Wie “normale” Referenzen, zeigen aber explizit auf Rvalues
  - Achtung: Eine Rvalue-Referenz ist selber ein Lvalue und benötigt `std::move`, um als Rvalue verwendet zu werden
- Funktionen dürfen weder Lvalue- noch Rvalue-Referenzen auf temporäre Objekte oder lokale Variablen zurückgeben!
- Bereits bekannt: Lvalues können mit `std::move` in Rvalues umgewandelt werden
  - Bedeutung: Wert wird danach nicht mehr verwendet, nur noch neue Zuweisung oder Zerstörung möglich

## Rvalue-Referenzen

- `T&&` definiert eine Rvalue-Referenz
  - Wie “normale” Referenzen, zeigen aber explizit auf Rvalues
  - Achtung: Eine Rvalue-Referenz ist selber ein Lvalue und benötigt `std::move`, um als Rvalue verwendet zu werden
- Funktionen dürfen weder Lvalue- noch Rvalue-Referenzen auf temporäre Objekte oder lokale Variablen zurückgeben!
- Bereits bekannt: Lvalues können mit `std::move` in Rvalues umgewandelt werden
  - Bedeutung: Wert wird danach nicht mehr verwendet, nur noch neue Zuweisung oder Zerstörung möglich
- Funktionen können nach Lvalue- bzw. Rvalueness ihrer Argumente überladen werden
  - Beispiel: `foo(std::string&&)` und `foo(const std::string&)`
  - Implementation für Rvalues kann performanter sein, da Inhalt des Objekts nicht mehr gebraucht wird

# Move-Operationen

- Zur Erinnerung: `std::move` ist lediglich ein Cast von einem Referenztyp in einen anderen
  - Nur für den Compiler relevant, erzeugt keine Laufzeitoperationen
  - Bewirkt insbesondere noch keine Verschiebung von Daten

## Move-Operationen

- Zur Erinnerung: `std::move` ist lediglich ein Cast von einem Referenztyp in einen anderen
  - Nur für den Compiler relevant, erzeugt keine Laufzeitoperationen
  - Bewirkt insbesondere noch keine Verschiebung von Daten
- Auswirkungen erst bei Aufruf von für Rvalues überladenen Funktionen

# Move-Operationen

- Zur Erinnerung: `std::move` ist lediglich ein Cast von einem Referenztyp in einen anderen
  - Nur für den Compiler relevant, erzeugt keine Laufzeitoperationen
  - Bewirkt insbesondere noch keine Verschiebung von Daten
- Auswirkungen erst bei Aufruf von für Rvalues überladenen Funktionen
- Insbesondere zwei Operationen werden häufig nach Rvalueness überladen:
  - Konstruktoren: **Copy-Constructor** (erhält `const T&`) und **Move-Constructor** (erhält `T&&`)
  - Zuweisungsoperator: **Copy-Assignment** (erhält `const T&`) bzw. **Move-Assignment** (erhält `T&&`)

## Move-Operationen

- Zur Erinnerung: `std::move` ist lediglich ein Cast von einem Referenztyp in einen anderen
  - Nur für den Compiler relevant, erzeugt keine Laufzeitoperationen
  - Bewirkt insbesondere noch keine Verschiebung von Daten
- Auswirkungen erst bei Aufruf von für Rvalues überladenen Funktionen
- Insbesondere zwei Operationen werden häufig nach Rvalueness überladen:
  - Konstruktoren: **Copy-Constructor** (erhält `const T&`) und **Move-Constructor** (erhält `T&&`)
  - Zuweisungsoperator: **Copy-Assignment** (erhält `const T&`) bzw. **Move-Assignment** (erhält `T&&`)
- Andere Funktionen werden selten nach Rvalueness überladen
  - `foo(const A&, const B&, const C&, const D&)`  
würde bereits  $2^4 = 16$  Overloads benötigen

## Move-Constructor und -Assignment

- Compiler generiert Move-Operationen ebenso wie Copy-Operationen automatisch
  - Außer wenn eine der folgenden Operationen manuell definiert ist:  
Copy-Constructor, Copy-Assignment, Destructor
  - Manuelle Definition einer Move-Operation unterdrückt auch die automatische Erzeugung der anderen

## Move-Constructor und -Assignment

- Compiler generiert Move-Operationen ebenso wie Copy-Operationen automatisch
  - Außer wenn eine der folgenden Operationen manuell definiert ist:  
Copy-Constructor, Copy-Assignment, Destructor
  - Manuelle Definition einer Move-Operation unterdrückt auch die automatische Erzeugung der anderen
- Move-Operationen können gegenüber Kopien deutlich effizienter sein
  - Die Kopieroperation eines Vektors alloziert Speicher und kopiert den gesamte Inhalt des Containers
  - Die Moveoperation ändert lediglich die internen Pointer



# Automatische Verwendung von Move-Operationen

- Auch ohne Verwendung von `std::move` werden an verschiedenen Stellen Move-Operationen verwendet

## Automatische Verwendung von Move-Operationen

- Auch ohne Verwendung von `std::move` werden an verschiedenen Stellen Move-Operationen verwendet
- Temporaries sind Rvalues und werden automatisch verschoben statt kopiert

## Automatische Verwendung von Move-Operationen

- Auch ohne Verwendung von `std::move` werden an verschiedenen Stellen Move-Operationen verwendet
- Temporaries sind Rvalues und werden automatisch verschoben statt kopiert
- In `return`-Statements werden lokale Variablen als Rvalues aufgefasst
  - Rückgabe per-Value erzeugt in der Regel nur eine Move-Operation
  - Auch die Move-Operation kann häufig rausoptimiert werden

## Automatische Verwendung von Move-Operationen

- Auch ohne Verwendung von `std::move` werden an verschiedenen Stellen Move-Operationen verwendet
- Temporaries sind Rvalues und werden automatisch verschoben statt kopiert
- In `return`-Statements werden lokale Variablen als Rvalues aufgefasst
  - Rückgabe per-Value erzeugt in der Regel nur eine Move-Operation
  - Auch die Move-Operation kann häufig rausoptimiert werden
- In der Standardbibliothek werden, wenn möglich, Move-Operationen statt Kopien durchgeführt
  - Aber wann ist es möglich?

## Exception Safety und Move

- Damit die Verwendung von Move möglich ist, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:

## Exception Safety und Move

- Damit die Verwendung von Move möglich ist, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:
  - 1 Das alte Objekt darf nicht mehr benötigt werden
    - Offensichtlich

## Exception Safety und Move

- Damit die Verwendung von Move möglich ist, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:
  - 1 Das alte Objekt darf nicht mehr benötigt werden
    - Offensichtlich
  - 2 Es muss eine Strong Guarantee gewährleistet werden

## Exception Safety und Move

- Damit die Verwendung von Move möglich ist, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:
  - 1 Das alte Objekt darf nicht mehr benötigt werden
    - Offensichtlich
  - 2 Es muss eine Strong Garantie gewährleistet werden
- Beispiel: Reallokation eines `std::vector`
  - Drei Schritte: Neuen Speicher allozieren, Elemente kopieren oder verschieben, alten Speicher freigeben



## Exception Safety und Move

- Damit die Verwendung von Move möglich ist, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:
  - 1 Das alte Objekt darf nicht mehr benötigt werden
    - Offensichtlich
  - 2 Es muss eine Strong Garantie gewährleistet werden
- Beispiel: Reallokation eines `std::vector`
  - Drei Schritte: Neuen Speicher allozieren, Elemente kopieren oder verschieben, alten Speicher freigeben
- Alte Objekte im Vector werden nicht mehr benötigt, da sie nach der Operation zerstört werden würden

## Exception Safety und Move

- Damit die Verwendung von Move möglich ist, müssen zwei Bedingungen erfüllt sein:
  - 1 Das alte Objekt darf nicht mehr benötigt werden
    - Offensichtlich
  - 2 Es muss eine Strong Garantie gewährleistet werden
- Beispiel: Reallokation eines `std::vector`
  - Drei Schritte: Neuen Speicher allozieren, Elemente kopieren oder verschieben, alten Speicher freigeben
- Alte Objekte im Vector werden nicht mehr benötigt, da sie nach der Operation zerstört werden würden
- Wie steht es mit der Strong Garantie?

## Exception Safety und Move II

- Strong Guarantee wird bei der Vectorreallokation dadurch erreicht, dass erst nach dem Befüllen der neue Speicher eingehängt wird

## Exception Safety und Move II

- Strong Guarantee wird bei der Vectorreallokation dadurch erreicht, dass erst nach dem Befüllen der neue Speicher eingehängt wird
- Werden Items verschoben und ein Move-Constructor wirft eine Exception, verletzt dies die Strong Guarantee

## Exception Safety und Move II

- Strong Guarantee wird bei der Vectorreallokation dadurch erreicht, dass erst nach dem Befüllen der neue Speicher eingehängt wird
- Werden Items verschoben und ein Move-Constructor wirft eine Exception, verletzt dies die Strong Guarantee
- Move-Operationen werden in Standardcontainern nur verwendet, wenn sie No-Throw sind
  - Kennzeichnung als `noexcept`
  - Automatisch generierte Konstruktoren/Operatoren sind `noexcept`, wenn die entsprechenden Operationen der Member dies sind

## Exception Safety und Move II

- Strong Guarantee wird bei der Vectorreallokation dadurch erreicht, dass erst nach dem Befüllen der neue Speicher eingehängt wird
- Werden Items verschoben und ein Move-Constructor wirft eine Exception, verletzt dies die Strong Guarantee
- Move-Operationen werden in Standardcontainern nur verwendet, wenn sie No-Throw sind
  - Kennzeichnung als `noexcept`
  - Automatisch generierte Konstruktoren/Operatoren sind `noexcept`, wenn die entsprechenden Operationen der Member dies sind

Für Move-Constructor und Move-Assignment immer `noexcept` anstreben!

## Das Copy-and-Swap-Idiom

- Für Copy-Assignment ist eine Strong Garantie wünschenswert, für Move-Assignment eine No-Throw Garantie

## Das Copy-and-Swap-Idiom

- Für Copy-Assignment ist eine Strong Garantie wünschenswert, für Move-Assignment eine No-Throw Garantie
- Einfacher Ansatz: Das sog. Copy-and-Swap-Idiom



## Das Copy-and-Swap-Idiom

- Für Copy-Assignment ist eine Strong Guarantee wünschenswert, für Move-Assignment eine No-Throw Guarantee
- Einfacher Ansatz: Das sog. Copy-and-Swap-Idiom

```
struct Foo{
    std::string      name;
    std::vector<int> data;
    //Copy-Ctor und Move-Ctor
    friend void swap(Foo& a, Foo& b) noexcept {
        using std::swap;
        swap(a.name, b.name);
        swap(a.data, b.data);
    }
    Foo& operator=(const Foo& other) {
        Foo tmp(other);
        swap(*this, tmp);
        return *this;
    }
    Foo& operator=(Foo&& other) noexcept {
        Foo tmp(std::move(other));
        swap(*this, tmp);
        return *this;
    }
};
```

## Das Copy-and-Swap-Idiom erklärt

```
friend void swap(Foo& a, Foo& b) noexcept {  
    using std::swap;  
    swap(a.name, b.name);  
    swap(a.data, b.data);  
}  
Foo& operator=(const Foo& other) {  
    Foo tmp(other);  
    swap(*this, tmp);  
    return *this;  
}  
};
```

- Eigentliche Kopie wird in den Copy-Constructor ausgelagert
  - Wiederverwendung von Code
  - Die Kopie kann zwar fehlschlagen, modifiziert aber noch keine persistenten Daten

## Das Copy-and-Swap-Idiom erklärt

```
friend void swap(Foo& a, Foo& b) noexcept {
    using std::swap;
    swap(a.name, b.name);
    swap(a.data, b.data);
}
Foo& operator=(const Foo& other) {
    Foo tmp(other);
    swap(*this, tmp);
    return *this;
}
};
```

- Eigentliche Kopie wird in den Copy-Constructor ausgelagert
  - Wiederverwendung von Code
  - Die Kopie kann zwar fehlschlagen, modifiziert aber noch keine persistenten Daten
- Swap-Implementationen sind per Konvention `noexcept`
  - **Achtung:** Gilt für `std::swap` nur, wenn Move-Operationen `noexcept`
  - Copy-and-Swap benötigt zwingend spezialisierte Swap-Implementation!

## Das Copy-and-Swap-Idiom erklärt

```
friend void swap(Foo& a, Foo& b) noexcept {
    using std::swap;
    swap(a.name, b.name);
    swap(a.data, b.data);
}
Foo& operator=(const Foo& other) {
    Foo tmp(other);
    swap(*this, tmp);
    return *this;
}
};
```

- Eigentliche Kopie wird in den Copy-Constructor ausgelagert
  - Wiederverwendung von Code
  - Die Kopie kann zwar fehlschlagen, modifiziert aber noch keine persistenten Daten
- Swap-Implementationen sind per Konvention `noexcept`
  - **Achtung:** Gilt für `std::swap` nur, wenn Move-Operationen `noexcept`
  - Copy-and-Swap benötigt zwingend spezialisierte Swap-Implementation!
- Nach der ersten Änderung persistenter Daten nur noch No-Throw Operationen, somit ist eine Strong Garantie gewährleistet

## Defaulted und Deleted Member

- Spezielle Member (Copy-, Move- und Defaultconstructor,...) werden normalerweise automatisch generiert

## Defaulted und Deleted Member

- Spezielle Member (Copy-, Move- und Defaultconstructor,...) werden normalerweise automatisch generiert
- In vielen Fällen wäre automatisch generierte Implementation ausreichend, auch wenn die Generierung unterdrückt ist
  - z.B.: Virtuelle Destruktoren

## Defaulted und Deleted Member

- Spezielle Member (Copy-, Move- und Defaultconstructor,...) werden normalerweise automatisch generiert
- In vielen Fällen wäre automatisch generierte Implementation ausreichend, auch wenn die Generierung unterdrückt ist
  - z.B.: Virtuelle Destruktoren
- C++11 erlaubt es, spezielle Member explizit auf Default zu setzen
  - Syntax: *Member-deklaration* = `default`;

## Defaulted und Deleted Member

- Spezielle Member (Copy-, Move- und Defaultconstructor,...) werden normalerweise automatisch generiert
- In vielen Fällen wäre automatisch generierte Implementation ausreichend, auch wenn die Generierung unterdrückt ist
  - z.B.: Virtuelle Destruktoren
- C++11 erlaubt es, spezielle Member explizit auf Default zu setzen
  - Syntax: *Member-deklaration* = **default**;
- Manchmal ist auch Unterdrückung der automatischen Generierung sinnvoll
  - Insbesondere für Copy- und Move-Operationen, wenn die Klasse selber Ressourcen verwaltet



## Defaulted und Deleted Member

- Spezielle Member (Copy-, Move- und Defaultconstructor,...) werden normalerweise automatisch generiert
- In vielen Fällen wäre automatisch generierte Implementation ausreichend, auch wenn die Generierung unterdrückt ist
  - z.B.: Virtuelle Destruktoren
- C++11 erlaubt es, spezielle Member explizit auf Default zu setzen
  - Syntax: *Member-deklaration* = **default**;
- Manchmal ist auch Unterdrückung der automatischen Generierung sinnvoll
  - Insbesondere für Copy- und Move-Operationen, wenn die Klasse selber Ressourcen verwaltet
- Mit **=delete**; kann automatische Generierung unterbunden werden
  - Gibt an, dass die Funktion nicht existiert, darf also auch nicht mehr manuell definiert werden

## Beispiel Default und Deleted Member

```
class ResManager
{
private:
    Ressource Data;
public:
    ResManager(const std::string& name);
    ResManager() = default;

    ResManager(const ResManager&) = delete;
    ResManager(ResManager&&) = default;
    ResManager& operator=(const ResManager&) = delete;
    ResManager& operator=(ResManager&&) = default;

    void reset(const std::string& name);
    void reset(const char*) = delete;

    virtual ~ResManager() = default;
};
```

## Beispiel Default und Deleted Member

```
class ResManager
{
private:
    Ressource Data;
public:
    ResManager(const std::string& name);
    ResManager() = default;

    ResManager(const ResManager&) = delete;
    ResManager(ResManager&&) = default;
    ResManager& operator=(const ResManager&) = delete;
    ResManager& operator=(ResManager&&) = default;

    void reset(const std::string& name);
    void reset(const char*) = delete;

    virtual ~ResManager() = default;
};
```

## Beispiel Default und Deleted Member

```
class ResManager
{
private:
    Ressource Data;
public:
    ResManager(const std::string& name);
    ResManager() = default;

    ResManager(const ResManager&) = delete;
    ResManager(ResManager&&) = default;
    ResManager& operator=(const ResManager&) = delete;
    ResManager& operator=(ResManager&&) = default;

    void reset(const std::string& name);
    void reset(const char*) = delete;

    virtual ~ResManager() = default;
};
```

## Beispiel Default und Deleted Member

```
class ResManager
{
private:
    Ressource Data;
public:
    ResManager(const std::string& name);
    ResManager() = default;

    ResManager(const ResManager&) = delete;
    ResManager(ResManager&&) = default;
    ResManager& operator=(const ResManager&) = delete;
    ResManager& operator=(ResManager&&) = default;

    void reset(const std::string& name);
    void reset(const char*) = delete;

    virtual ~ResManager() = default;
};
```

## Beispiel Default und Deleted Member

```
class ResManager
{
private:
    Ressource Data;
public:
    ResManager(const std::string& name);
    ResManager() = default;

    ResManager(const ResManager&) = delete;
    ResManager(ResManager&&) = default;
    ResManager& operator=(const ResManager&) = delete;
    ResManager& operator=(ResManager&&) = default;

    void reset(const std::string& name);
    void reset(const char*) = delete;

    virtual ~ResManager() = default;
};
```

## Beispiel Default und Deleted Member

```
class ResManager
{
private:
    Ressource Data;
public:
    ResManager(const std::string& name);
    ResManager() = default;

    ResManager(const ResManager&) = delete;
    ResManager(ResManager&&) = default;
    ResManager& operator=(const ResManager&) = delete;
    ResManager& operator=(ResManager&&) = default;

    void reset(const std::string& name);
    void reset(const char*) = delete;

    virtual ~ResManager() = default;
};
```

# Regel der Null

- Wann sollten Copy- und Assignment-Operationen überladen werden?



## Regel der Null

- Wann sollten Copy- und Assignment-Operationen überladen werden?
- Besser vermeiden: Regel der Null

## Regel der Null

- Wann sollten Copy- und Assignment-Operationen überladen werden?
- Besser vermeiden: Regel der Null
- Empfehlung: Klassen werden als Komposition von Komponenten entwickelt, die die Ressourcen verwalten
  - Compilergenerierte Operationen sollten ausreichen

## Regel der Null

- Wann sollten Copy- und Assignment-Operationen überladen werden?
- Besser vermeiden: Regel der Null
- Empfehlung: Klassen werden als Komposition von Komponenten entwickelt, die die Ressourcen verwalten
  - Compilergenerierte Operationen sollten ausreichen
- Alle Klassen, die dennoch Ressourcen selbst verwalten, sollten dem Single Responsibility Prinzip folgen
  - Bedeutet, dass sie **nur** zur Verwaltung der Ressource dienen
  - Sofern möglich sollten sie auch nur eine Ressource verwalten

## Regel der Null

- Wann sollten Copy- und Assignment-Operationen überladen werden?
- Besser vermeiden: Regel der Null
- Empfehlung: Klassen werden als Komposition von Komponenten entwickelt, die die Ressourcen verwalten
  - Compilergenerierte Operationen sollten ausreichen
- Alle Klassen, die dennoch Ressourcen selbst verwalten, sollten dem Single Responsibility Prinzip folgen
  - Bedeutet, dass sie **nur** zur Verwaltung der Ressource dienen
  - Sofern möglich sollten sie auch nur eine Ressource verwalten
- Klassen zur Ressourcenverwaltung existieren zum Großteil bereits in Bibliotheken
  - Bei ihrer Entwicklung sind die Regeln bzgl. Vorhandensein der Operationen aber zu beachten



# Aufgaben zu Move



# Einleitung

- Es folgen einige Szenarien zu Move
- Aus Gründen der Einfachheit wird dafür `std::string` verwendet

# Einleitung

- Es folgen einige Szenarien zu Move
- Aus Gründen der Einfachheit wird dafür `std::string` verwendet
- Bei strikter Befolgung des Standards wirft dies Probleme auf
  - Move-Semantik von `std::string` besagt, dass ein String nach dem Move in einem validen, aber unspezifizierten Zustand ist
  - Nicht sehr hilfreich, um das Verhalten zu erläutern
- Verwendung eines Typs mit spezifiziertem Verhalten würde Code komplizierter machen

# Einleitung

- Es folgen einige Szenarien zu Move
- Aus Gründen der Einfachheit wird dafür `std::string` verwendet
- Bei strikter Befolgung des Standards wirft dies Probleme auf
  - Move-Semantik von `std::string` besagt, dass ein String nach dem Move in einem validen, aber unspezifizierten Zustand ist
  - Nicht sehr hilfreich, um das Verhalten zu erläutern
- Verwendung eines Typs mit spezifiziertem Verhalten würde Code komplizierter machen
- Daher Annahme über die Implementation:  
Ein String, dessen Inhalt in einen anderen gemoved wurde, ist leer
  - Ist in der Realität abhängig vom Compiler und der Implementation nicht garantiert



## Aufgabe A

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes?

```
void foo(std::string)      {}  
void bar(const std::string&) {}  
void bar(std::string&&)    {}  
int main()  
{  
    std::string str = "Hello world!";  
    foo(str);  
    std::cout<<str<<std::endl;  
}
```

## Aufgabe A

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes?

```
void foo(std::string)      {}  
void bar(const std::string&) {}  
void bar(std::string&&)    {}  
int main()  
{  
    std::string str = "Hello world!";  
    foo(str);  
    std::cout<<str<<std::endl;  
}
```

- Antwort: "Hello world!"
- Begründung:
  - str ist Lvalue-Referenz
  - Daher wird der Copy-Constructor von std::string verwendet

## Aufgabe A

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes?

```
void foo(std::string)      {}  
void bar(const std::string&) {}  
void bar(std::string&&)    {}  
int main()  
{  
    std::string str = "Hello world!";  
    foo(std::move(str));  
    std::cout<<str<<std::endl;  
}
```

## Aufgabe A

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes?

```
void foo(std::string)      {}  
void bar(const std::string&) {}  
void bar(std::string&&)    {}  
int main()  
{  
    std::string str = "Hello world!";  
    foo(std::move(str));  
    std::cout<<str<<std::endl;  
}
```

- Leere Zeile
- Begründung:
  - Antwort: `std::move(str)` wandelt `str` in eine Rvalue-Referenz um
  - Daher wird der Move-Constructor von `std::string` verwendet
  - Inhalt von `str` wird in das Argument von `foo` verschoben, `str` ist danach leer

## Aufgabe A

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes?

```
void foo(std::string)      {}
void bar(const std::string&) {}
void bar(std::string&&)    {}
int main()
{
    std::string str = "Hello world!";
    bar(str);
    std::cout<<str<<std::endl;
}
```

## Aufgabe A

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes?

```
void foo(std::string)      {}
void bar(const std::string&) {}
void bar(std::string&&)    {}
int main()
{
    std::string str = "Hello world!";
    bar(str);
    std::cout<<str<<std::endl;
}
```

- Antwort: "Hello world!"
  - str ist Lvalue-Referenz
  - Daher wird der `const std::string&` Overload von bar verwendet
  - str wird somit nicht modifiziert

## Aufgabe A

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes?

```
void foo(std::string)      {}  
void bar(const std::string&) {}  
void bar(std::string&&)    {}  
int main()  
{  
    std::string str = "Hello world!";  
    bar(std::move(str));  
    std::cout<<str<<std::endl;  
}
```

## Aufgabe A

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes?

```
void foo(std::string)      {}
void bar(const std::string&) {}
void bar(std::string&&)    {}
int main()
{
    std::string str = "Hello world!";
    bar(std::move(str));
    std::cout<<str<<std::endl;
}
```

■ Antwort: "Hello world!"

- std::move(str) ist Rvalue-Referenz
- Also wird der std::string&& Overload von bar verwendet
- Aber: Rumpf von bar modifiziert das Argument nicht
- str ist nach dem Aufruf somit weiterhin unmodifiziert



## Aufgabe B

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes?

```
std::string foo(std::string&& arg) {  
    std::string baz{arg};  
    return baz;  
}  
  
int main() {  
    std::string bar = "foo";  
    std::string qux = foo(std::move(bar));  
    std::cout<<bar<<" "<<qux<<std::endl;  
}
```

## Aufgabe B

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes?

```
std::string foo(std::string&& arg) {  
    std::string baz{arg};  
    return baz;  
}  
  
int main() {  
    std::string bar = "foo";  
    std::string qux = foo(std::move(bar));  
    std::cout<<bar<<" "<<qux<<std::endl;  
}
```

■ Antwort: "foo foo"

■ Begründung:

- Innerhalb von `foo` ist `arg` ein Lvalue
- Sinnvolles Verhalten, da `arg` in dem Methodenrumpf beliebig häufig verwendet werden kann
- `std::string baz{arg};` erstellt somit eine Kopie von `arg`
- `arg` ist also wiederum nach dem Aufruf weiterhin unmodifiziert

## Aufgabe B

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes?

```
std::string foo(std::string&& arg) {  
    std::string baz{std::move(arg)};  
    return baz;  
}  
  
int main() {  
    std::string bar = "foo";  
    std::string qux = foo(std::move(bar));  
    std::cout<<bar<<" "<<qux<<std::endl;  
}
```

## Aufgabe B

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes?

```
std::string foo(std::string&& arg) {
    std::string baz{std::move(arg)};
    return baz;
}

int main() {
    std::string bar = "foo";
    std::string qux = foo(std::move(bar));
    std::cout<<bar<<" "<<qux<<std::endl;
}
```

- Antwort: " foo"
- Begründung:
  - `std::move` wandelt `arg` für den Konstruktoraufbau in einen Rvalue um
  - Also wird der Move-Constructor aufgerufen, der Inhalt von `arg` wird in `baz` verschoben
  - `arg` und damit auch `bar` sind hinterher leer

## Aufgabe C

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes an der markierten Stelle?

```
struct Foo {
    Foo() { std::cout<<"default-ctor!\n"; }
    Foo(const Foo&) { std::cout<<"copy-ctor!\n"; }
    Foo(Foo&&) { std::cout<<"move-ctor!\n"; }
    Foo& operator=(const Foo&) { std::cout<<"copy-assign!\n"; return *this; }
    Foo& operator=(Foo&&) { std::cout<<"move-assign!\n"; return *this; }
};

Foo bar(Foo arg) {
    Foo b = arg;
    b = std::move(arg);
    return b;
}

Foo baz(Foo arg) { return arg; }

int main() {
    Foo a;
    Foo b{std::move(a)};
    b = baz(bar(b));
}
```

## Aufgabe C

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes an der markierten Stelle?

```
struct Foo {  
    Foo() { std::cout<<"default-ctor!\n"; }  
    Foo(const Foo&) { std::cout<<"copy-ctor!\n"; }  
    Foo(Foo&&) { std::cout<<"move-ctor!\n"; }  
    Foo& operator=(const Foo&) { std::cout<<"copy-assign!\n"; return *this; }  
    Foo& operator=(Foo&&) { std::cout<<"move-assign!\n"; return *this; }  
};  
Foo bar(Foo arg) {  
    Foo b = arg;  
    b = std::move(arg);  
    return b;  
}  
Foo baz(Foo arg) { return arg; }  
int main() {  
    Foo a;  
    Foo b{std::move(a)};  
    b = baz(bar(b));  
}
```

## Aufgabe C

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes an der markierten Stelle?

```
struct Foo {  
    Foo() { std::cout<<"default-ctor!\n"; }  
    Foo(const Foo&) { std::cout<<"copy-ctor!\n"; }  
    Foo(Foo&&) { std::cout<<"move-ctor!\n"; }  
    Foo& operator=(const Foo&) { std::cout<<"copy-assign!\n"; return *this; }  
    Foo& operator=(Foo&&) { std::cout<<"move-assign!\n"; return *this; }  
};  
Foo bar(Foo arg) {  
    Foo b = arg;  
    b = std::move(arg);  
    return b;  
}  
Foo baz(Foo arg) { return arg; }  
int main() {  
    Foo a;  
    Foo b{std::move(a)};  
    b = baz(bar(b));  
}
```

"default-ctor!"

## Aufgabe C

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes an der markierten Stelle?

```
struct Foo {
    Foo() { std::cout<<"default-ctor!\n"; }
    Foo(const Foo&) { std::cout<<"copy-ctor!\n"; }
    Foo(Foo&&) { std::cout<<"move-ctor!\n"; }
    Foo& operator=(const Foo&) { std::cout<<"copy-assign!\n"; return *this; }
    Foo& operator=(Foo&&) { std::cout<<"move-assign!\n"; return *this; }
};

Foo bar(Foo arg) {
    Foo b = arg;
    b = std::move(arg);
    return b;
}

Foo baz(Foo arg) { return arg; }

int main() {
    Foo a;
    Foo b{std::move(a)};
    b = baz(bar(b));
}
```



## Aufgabe C

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes an der markierten Stelle?

```
struct Foo {  
    Foo() { std::cout<<"default-ctor!\n"; }  
    Foo(const Foo&) { std::cout<<"copy-ctor!\n"; }  
    Foo(Foo&&) { std::cout<<"move-ctor!\n"; }  
    Foo& operator=(const Foo&) { std::cout<<"copy-assign!\n"; return *this; }  
    Foo& operator=(Foo&&) { std::cout<<"move-assign!\n"; return *this; }  
};  
Foo bar(Foo arg) {  
    Foo b = arg;  
    b = std::move(arg);  
    return b;  
}  
Foo baz(Foo arg) { return arg; }  
int main() {  
    Foo a;  
    Foo b{std::move(a)};  
    b = baz(bar(b));  
}
```

"move-ctor!"

## Aufgabe C

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes an der markierten Stelle?

```
struct Foo {
    Foo() { std::cout<<"default-ctor!\n"; }
    Foo(const Foo&) { std::cout<<"copy-ctor!\n"; }
    Foo(Foo&&) { std::cout<<"move-ctor!\n"; }
    Foo& operator=(const Foo&) { std::cout<<"copy-assign!\n"; return *this; }
    Foo& operator=(Foo&&) { std::cout<<"move-assign!\n"; return *this; }
};

Foo bar(Foo arg) {
    Foo b = arg;
    b = std::move(arg);
    return b;
}

Foo baz(Foo arg) { return arg; }

int main() {
    Foo a;
    Foo b{std::move(a)};
    b = baz(bar(b));
}
```

## Aufgabe C

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes an der markierten Stelle?

```
struct Foo {
    Foo() { std::cout<<"default-ctor!\n"; }
    Foo(const Foo&) { std::cout<<"copy-ctor!\n"; }
    Foo(Foo&&) { std::cout<<"move-ctor!\n"; }
    Foo& operator=(const Foo&) { std::cout<<"copy-assign!\n"; return *this; }
    Foo& operator=(Foo&&) { std::cout<<"move-assign!\n"; return *this; }
};

Foo bar(Foo arg) {
    Foo b = arg;
    b = std::move(arg);
    return b;
}

Foo baz(Foo arg) { return arg; }

int main() {
    Foo a;
    Foo b{std::move(a)};
    b = baz(bar(b));
}
```

"copy-ctor!"

## Aufgabe C

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes an der markierten Stelle?

```
struct Foo {
    Foo() { std::cout<<"default-ctor!\n"; }
    Foo(const Foo&) { std::cout<<"copy-ctor!\n"; }
    Foo(Foo&&) { std::cout<<"move-ctor!\n"; }
    Foo& operator=(const Foo&) { std::cout<<"copy-assign!\n"; return *this; }
    Foo& operator=(Foo&&) { std::cout<<"move-assign!\n"; return *this; }
};

Foo bar(Foo arg) {
    Foo b = arg;
    b = std::move(arg);
    return b;
}

Foo baz(Foo arg) { return arg; }

int main() {
    Foo a;
    Foo b{std::move(a)};
    b = baz(bar(b));
}
```

## Aufgabe C

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes an der markierten Stelle?

```
struct Foo {
    Foo() { std::cout<<"default-ctor!\n"; }
    Foo(const Foo&) { std::cout<<"copy-ctor!\n"; }
    Foo(Foo&&) { std::cout<<"move-ctor!\n"; }
    Foo& operator=(const Foo&) { std::cout<<"copy-assign!\n"; return *this; }
    Foo& operator=(Foo&&) { std::cout<<"move-assign!\n"; return *this; }
};

Foo bar(Foo arg) {
    Foo b = arg;
    b = std::move(arg);
    return b;
}

Foo baz(Foo arg) { return arg; }

int main() {
    Foo a;
    Foo b{std::move(a)};
    b = baz(bar(b));
}
```

"copy-ctor!": Keine Zuweisung, sondern Initialisierung bei Definition einer Variablen

## Aufgabe C

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes an der markierten Stelle?

```
struct Foo {
    Foo() { std::cout<<"default-ctor!\n"; }
    Foo(const Foo&) { std::cout<<"copy-ctor!\n"; }
    Foo(Foo&&) { std::cout<<"move-ctor!\n"; }
    Foo& operator=(const Foo&) { std::cout<<"copy-assign!\n"; return *this; }
    Foo& operator=(Foo&&) { std::cout<<"move-assign!\n"; return *this; }
};

Foo bar(Foo arg) {
    Foo b = arg;
    b = std::move(arg);
    return b;
}

Foo baz(Foo arg) { return arg; }

int main() {
    Foo a;
    Foo b{std::move(a)};
    b = baz(bar(b));
}
```

## Aufgabe C

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes an der markierten Stelle?

```
struct Foo {
    Foo() { std::cout<<"default-ctor!\n"; }
    Foo(const Foo&) { std::cout<<"copy-ctor!\n"; }
    Foo(Foo&&) { std::cout<<"move-ctor!\n"; }
    Foo& operator=(const Foo&) { std::cout<<"copy-assign!\n"; return *this; }
    Foo& operator=(Foo&&) { std::cout<<"move-assign!\n"; return *this; }
};

Foo bar(Foo arg) {
    Foo b = arg;
    b = std::move(arg);
    return b;
}

Foo baz(Foo arg) { return arg; }

int main() {
    Foo a;
    Foo b{std::move(a)};
    b = baz(bar(b));
}
```

"move-assign!"

## Aufgabe C

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes an der markierten Stelle?

```
struct Foo {  
    Foo() { std::cout<<"default-ctor!\n"; }  
    Foo(const Foo&) { std::cout<<"copy-ctor!\n"; }  
    Foo(Foo&&) { std::cout<<"move-ctor!\n"; }  
    Foo& operator=(const Foo&) { std::cout<<"copy-assign!\n"; return *this; }  
    Foo& operator=(Foo&&) { std::cout<<"move-assign!\n"; return *this; }  
};  
Foo bar(Foo arg) {  
    Foo b = arg;  
    b = std::move(arg);  
    return b;  
}  
Foo baz(Foo arg) { return arg; }  
int main() {  
    Foo a;  
    Foo b{std::move(a)};  
    b = baz(bar(b));  
}
```



## Aufgabe C

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes an der markierten Stelle?

```
struct Foo {
    Foo() { std::cout<<"default-ctor!\n"; }
    Foo(const Foo&) { std::cout<<"copy-ctor!\n"; }
    Foo(Foo&&) { std::cout<<"move-ctor!\n"; }
    Foo& operator=(const Foo&) { std::cout<<"copy-assign!\n"; return *this; }
    Foo& operator=(Foo&&) { std::cout<<"move-assign!\n"; return *this; }
};

Foo bar(Foo arg) {
    Foo b = arg;
    b = std::move(arg);
    return b;
}

Foo baz(Foo arg) { return arg; }

int main() {
    Foo a;
    Foo b{std::move(a)};
    b = baz(bar(b));
}
```

"move-ctor!": Compiler hat einige Move-Constructoren herausoptimiert

## Aufgabe C

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes an der markierten Stelle?

```
struct Foo {
    Foo() { std::cout<<"default-ctor!\n"; }
    Foo(const Foo&) { std::cout<<"copy-ctor!\n"; }
    Foo(Foo&&) { std::cout<<"move-ctor!\n"; }
    Foo& operator=(const Foo&) { std::cout<<"copy-assign!\n"; return *this; }
    Foo& operator=(Foo&&) { std::cout<<"move-assign!\n"; return *this; }
};

Foo bar(Foo arg) {
    Foo b = arg;
    b = std::move(arg);
    return b;
}

Foo baz(Foo arg) { return arg; }

int main() {
    Foo a;
    Foo b{std::move(a)};
    b = baz(bar(b));
}
```

## Aufgabe C

Was ist die Ausgabe des folgenden Codes an der markierten Stelle?

```
struct Foo {
    Foo() { std::cout<<"default-ctor!\n"; }
    Foo(const Foo&) { std::cout<<"copy-ctor!\n"; }
    Foo(Foo&&) { std::cout<<"move-ctor!\n"; }
    Foo& operator=(const Foo&) { std::cout<<"copy-assign!\n"; return *this; }
    Foo& operator=(Foo&&) { std::cout<<"move-assign!\n"; return *this; }
};

Foo bar(Foo arg) {
    Foo b = arg;
    b = std::move(arg);
    return b;
}

Foo baz(Foo arg) { return arg; }

int main() {
    Foo a;
    Foo b{std::move(a)};
    b = baz(bar(b));
}
```

"move-assign!"



IMS  
Institut für Mikroelektronische Systeme  
Leibniz Universität Hannover



Leibniz  
Universität  
Hannover

# Zufallszahlen

# Zufallszahlen in C++

## ■ Random Engine

- Erzeugt Folge von Pseudo-Zufallszahlen ausgehend von einem Startwert (Seed)
- `std::default_random_engine re;`

# Zufallszahlen in C++

## ■ Random Engine

- Erzeugt Folge von Pseudo-Zufallszahlen ausgehend von einem Startwert (Seed)
- `std::default_random_engine re;`

## ■ Random Device

- Quelle “echter” Zufallszahlen (z.B. Uhrzeit), sinnvoll nur für Startwert einer Random Engine
- `std::random_device rd;`

# Zufallszahlen in C++

## ■ Random Engine

- Erzeugt Folge von Pseudo-Zufallszahlen ausgehend von einem Startwert (Seed)
- `std::default_random_engine re;`

## ■ Random Device

- Quelle "echter" Zufallszahlen (z.B. Uhrzeit), sinnvoll nur für Startwert einer Random Engine
- `std::random_device rd;`

## ■ Random Distribution

- Erzeugt speziell verteilte Zufallszahlen
- Viele Verteilungen vorhanden: Gleichverteilung (int oder double), Normalverteilung, ...
- Verwendet eine Random Engine
- Bsp.: Gleichverteilte ganze Zahl zwischen 1 und 100:  
`std::uniform_int_distribution<int> u(1,100);`  
`int r = u(re);` erzeugt eine Zufallszahl

# Zufallszahlen in C++

## ■ Random Engine

- Erzeugt Folge von Pseudo-Zufallszahlen ausgehend von einem Startwert (Seed)
- `std::default_random_engine re;`

## ■ Random Device

- Que... Random Engine
- `std::random_device rd{};`
- `std::default_random_engine engine{rd()};`

## ■ Random Distribution

- `std::uniform_int_distribution<int> dist{5,10};`
- `for(size_t i = 0; i < 10; ++i)`
- Erzeuge Zufallszahl  
`std::cout<<dist(engine)<<std::endl;`
- Viele Verteilungen vorhanden: Gleichverteilung (int oder double), Normalverteilung, ...
- Verwendet eine Random Engine
- Bsp.: Gleichverteilte ganze Zahl zwischen 1 und 100:  
`std::uniform_int_distribution<int> u(1,100);`  
`int r = u(re);` erzeugt eine Zufallszahl