Systemprogrammierung

Teil 7: C++ Standardbibliothek

Templates, Ein-/Ausgabe, Strings, Container, Algorithmen, Iteratoren, intelligente Zeiger

Prof. Dr. H. Drachenfels
Hochschule Konstanz

Version 6.0
5.6.2023

C++ Standardbibliothek: Überblick 

Die C++ Standardbibliothek enthält die C Standardbibliothek und zusätzlich vor allem templatebasierte Erweiterungen, die auf der maßgeblich von Alexander Stepanow entwickelten STL *(Standard Template Library)* beruhen:

- erweiterbare objektorientierte Ein-/Ausgabe mit Streams

  std::istream, std::ostream, ...
- Zeichenketten

  std::string
- Container und Iteratoren

  std::vector, std::array, std::list, ...
- Algorithmen

  std::max, std::find, ...
- intelligente Zeiger *(smart pointers)*

  std::unique_ptr, std::shared_ptr, std::weak_ptr
- ...

C++ Templates: Syntax

C++ kennt verschieden Arten von Templates:

- Klassentemplates definieren Familien von Klassen

  `template<` *Parameterliste* **`>`** **`class`** *Klassenname* ...

- Funktionstemplates definieren Familien von Funktionen

  `template<` *Parameterliste* **`>`** *Typ* *Funktionsname* **`(`** ... **`)`** ...

- ...

Template-Parameterlisten können verschiedene Arten von Parametern enthalten:

- Typ-Parameter: **`template<typename`** *Name* **`>`** ...

  bei der Instanziierung muss ein Typ als Argument angegeben werden

- Nichttyp-Parameter: **`template<`** *Typ* *Name* **`>`** ...

  bei der Instanziierung muss ein konstanter Ausdruck als Argument angegeben werden, z.B. ein Literal

  als Typen sind ganzzahlige, Zeiger-, Referenz- und Aufzählungstypen erlaubt

- ...

C++ Templates: Vergleich mit Java

C++ Templates sind sehr viel mächtiger als die Generics von Java:

- in Java gibt es keine Nichttyp-Parameter
- in Java sind nur Klassen als Argumente für Typ-Parameter erlaubt,
  in C++ sind dagegen alle Typen als Argumente erlaubt,
  auch Grundtypen wie z.B. `int` und abgeleitete Typen wie z.B. `int*`
- bei Java gibt es nur eine Implementierung eines Generics

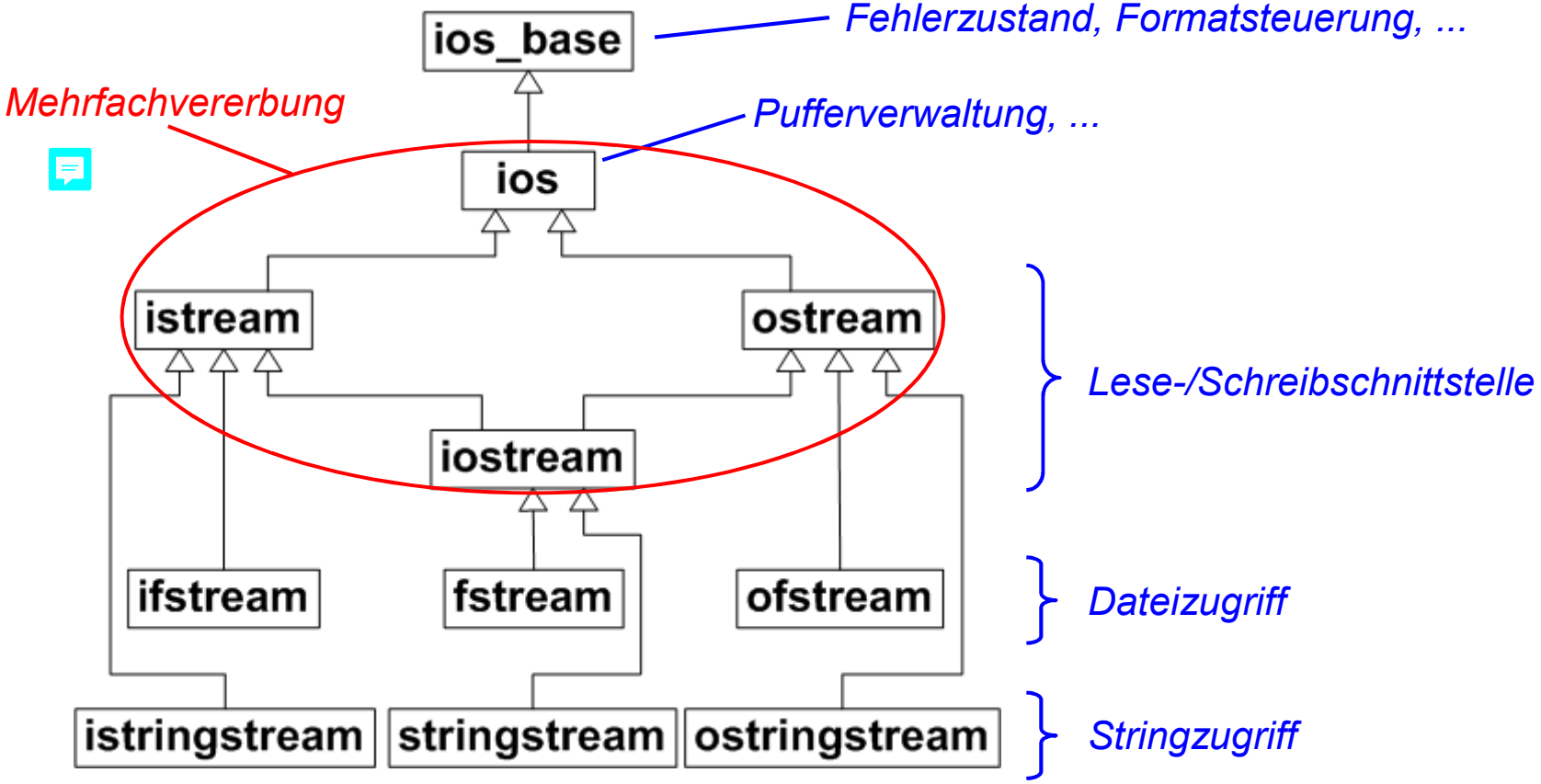
  der Compiler ersetzt die Typ-Parameter durch die Klasse `Object` und ergänzt bei der Benutzung der Generics entsprechende Up- und Downcasts
- bei C++ erstellt der Compiler für jede Instanziierung eines Templates mit anderen Argumenten per Copy und Paste eine eigene Implementierung 

  kommen in einem Programm viele unterschiedliche Argumente für das gleiche Template vor, kann wegen der mehrfachen Vervielfältigung der Implementierung die Übersetzung lange dauern und der ausführbare Code sehr umfangreich werden

  bei Fehlern in Templates sind die Fehlermeldungen des Compilers oft sehr umfangreich und schwer zu verstehen

C++ Standardbibliothek: Ein-/Ausgabe (1)

Klassen-Hierarchie der Ein-/Ausgabe-Streams *(vereinfacht, eigentlich Templates)*



C++ Standardbibliothek: Ein-/Ausgabe (2)

Prinzipieller Aufbau der Entitätsklasse für Ausgabe-Streams *(vereinfacht)*:

```
class ostream : virtual public ios {
public:
    // Ausgabeoperatoren für u.a. alle Grundtypen:
    ostream& operator<<(int);
    ...
    // Ausgabeoperatoren für Manipulatoren:
    ostream& operator<<(ostream& (*)(ostream&));
    ...
    // Zeichenausgabe und Pufferleerung:
    ostream& put(char);
    ostream& flush();
    ...
};
```

virtual: Unterklassen von ostream sollen bei Mehrfachvererbung nur einmal von ios erben

Ein Manipulator ist eine Funktion, die vom Ausgabeoperator aufgerufen wird

```
// Manipulatoren:
ostream& endl(ostream&);
ostream& flush(ostream&);
...
```

```
// globale Variablen:
extern ostream cout;
extern ostream cerr;
...
```

C++ Standardbibliothek: Ein-/Ausgabe (3)

- Verwenden von ostream-Funktionen:

```
#include <iostream>

std::cout.setf(std::ios_base::fixed, std::ios_base::floatfield);
std::cout.precision(1);
std::cout << 1.26 << std::endl; // gibt 1.3 aus

std::cout.width(4);
std::cout.fill('0');
std::cout << 1 << std::endl; // gibt 0001 aus
```

gilt nur für die nächste Ausgabe

- das gleiche mit Manipulatoren:

```
#include <iostream> // cout, operator<<, fixed, endl
#include <iomanip>  // setprecision, setw, setfill

std::cout << std::fixed << std::setprecision(1) << 1.26 << std::endl;
std::cout << std::setw(4) << std::setfill('0') << 1 << std::endl;
```

C++ Standardbibliothek: Ein-/Ausgabe (4)

Prinzipieller Aufbau der Entitätsklasse für Eingabe-Streams *(vereinfacht)*:

```
class istream : virtual public ios {
public:
    // Eingabeoperatoren für alle Grundtypen:
    istream& operator>>(int&);
    ...
    // Eingabeoperatoren für Manipulatoren:
    istream& operator>>(ios_base& (*)(ios_base&));
    ...
    // Zeichen- und Zeichenketteneingabe:
    istream& get(char&);
    istream& getline(char*, int);
    ...
};

// Manipulatoren:
ios_base& hex(ios_base&);
...
```

virtual: Unterklassen von istream sollen bei Mehrfachvererbung nur einmal von ios erben

```
// globale Variablen:
extern istream cin;
...
```

C++ Standardbibliothek: Ein-/Ausgabe (5)

- Verwenden von istream-Funktionen

```
#include <iostream>

std::cin.setf(ios_base::hex, ios_base::basefield);
int n;
std::cin >> n;    // liest hexadezimale Zahl
std::cout << n << std::endl;    // gibt n dezimal aus
```

- das gleiche mit Manipulatoren

```
#include <iostream>   // cin, operator>>, hex

int n;
std::cin >> std::hex >> n;    // liest hexadezimale Zahl
std::cout << n << std::endl;    // gibt n dezimal aus
```

C++ Standardbibliothek: Ein-/Ausgabe (6)

Prinzipieller Aufbau der Entitätsklassen für File-Streams *(vereinfacht)*:

```
class ofstream : public ostream
{
public:
      ofstream();
      ofstream(const char*);
      bool is_open();
      void open(const char*);
      void close();
      ...
};
```

Lesezugriff mit ifstream analog

- Verwenden von ofstream-Funktionen:

```
std::ofstream aFile;
aFile.open("Beispiel.txt");
aFile << "Hallo\n";
... // Schreiben wie bei std::cout
aFile.close();
```

- das gleiche mit Konstruktor und Destruktor:

```
std::ofstream aFile("Beispiel.txt");
aFile << "Hallo\n";
...
// Destruktor von aFile sorgt für das close
```

C++ Standardbibliothek: std::string (1)

Ausschnitt aus der Wertklasse **std::string** *(vereinfacht)*:

```
class string {
public:
    // Default- / Copy- / Move-Konstruktoren, Destruktor, Copy- / Move-Zuweisungen:
    ...
    // Typanpassungs-Konstruktor und Copy-Zuweisung für C-Strings:
    string(const char *s);
    string& operator=(const char *s);
    // String-Konkatenation:
    string& operator+=(const string& str);
    string& operator+=(const char *s);
    // Datenabfragen:
    const char *c_str() const;
    unsigned length() const;
    const char& operator[](unsigned pos) const;
    char& operator[](unsigned pos);
    ...
};
```

C++ Standardbibliothek: std::string (2)

Operatoren außerhalb der Wertklasse **std::string** *(vereinfacht)*:

```
// Verknüpfungen
string operator+(const string& s1, const string& s2);
...
// Vergleiche
bool operator==(const string& s1, const string& s2);
...
// Ein-/Ausgabe
istream& operator>>(istream& is, string& s);
ostream& operator<<(ostream& os, const string &s);
...
```

Anwendungsbeispiel:

```
#include <string>   // damit std::string bekannt ist

char buffer[10];
std::cin >> buffer;   // Risiko eines Pufferüberlaufs

std::string s;
std::cin >> s;        // string-Objekt und operator>> sorgen für genug Speicher
```

Beispielprogramm std::string

```
#include <iostream>
#include <string>

int main()
{
    std::string a = "halli"; // a("halli")
    std::string s = "hallo"; // s("hallo")
    std::string t; // leerer String

    // compare, copy and concatenate strings
    if (a < s) // operator<(a, s)
    {
        t = a + s; // t.operator=(operator+(a, s))
    }

    // print string values and addresses
    std::cout << a << '\n' << s << '\n' << t << '\n'; // operator<<(..., ...)
    std::cout << sizeof a << '\n' << sizeof s << '\n' << sizeof t << '\n';
    std::cout << a.length() << '\n' << s.length() << '\n' << t.length() << '\n';
}
```

C++ Standardbibliothek: Container std::vector (1)

Ausschnitt aus dem Wertklassen-Template **std::vector<>** *(vereinfacht)*:

```
template <typename T> class vector
{
public:
    explicit vector(std::size_t n);
    // Default- / Copy- / Move-Konstruktoren, Destruktor, Copy- / Move-Zuweisungen:
    ...
    // Datenabfragen:
    std::size_t size() const;
    void resize(std::size_t n, T c = T());
    T& operator[](std::size_t i);
    T& at(std::size_t i);
    ...
};

template <typename T>
bool operator==(const vector<T>& v, const vector<T>& w);
...
```

Elementtyp als Template-Parameter

C++ Standardbibliothek: Container std::vector (2)

- zu fast jedem Typ kann ein Vektortyp abgeleitet werden:

```
#include <vector> // damit std::vector<> bekannt ist

// Vektor von vier ganzen Zahlen, alle mit 0 initialisiert:
std::vector<int> vi(4);

// Vektor von zwei Strings, mit Leerstrings initialisiert:
std::vector<std::string> vs(2);
```

- ein Vektor kennt im Gegensatz zum C-Array seine Länge:

```
for (unsigned i = 0; i < vi.size(); i++) ...
```

- Vektorzugriff per `[]` ohne oder per `.at()` mit Indexprüfung:

```
vi[2] = 1; // vi.operator[](2) = 1;
vi.at(2) = 1;
```

- ein Vektor kann im Gegensatz zum C-Array per Zuweisungs-Operator kopiert und per Vergleichsoperatoren verglichen werden

C++ Standardbibliothek: Container std::array

Seit C++11 gibt es zusätzlich zu std::vector<> ein vereinfachtes Klassentemplate **std::array<>** für Arrays mit statischer Länge:

Array-Länge als Nichttyp-Parameter

```
template <typename T, std::size_t N> class array
{
public:
    T _elemente[N];
    // Konstuktoren, Destruktor, Zuweisungsoperatoren vom Compiler implizit erzeugt ...
    unsigned size() const;
    T& operator[](std::size_t i);
    T& at(std::size_t i);
    ...
};

template <typename T, std::size_t N>
bool operator==(const array<T,N>& v, const array<T,N>& w);
...
```

Name des eingebetteten C-Arrays im Standard nicht festgelegt

Beispielprogramm std::vector<>

```
#include <iostream>
#include <vector> // alternativ: #include <array>

int main()
{
    std::vector<int> v(4); // alternativ: std::array<int,4> v;
    v.at(0) = 3421;
    v.at(1) = 3442;
    v.at(2) = 3635;
    v.at(3) = 3814;
    // print vector values
    for (std::size_t i = 0; i < v.size(); ++i)
    {
        std::cout << i << ": " << v[i] << '\n'; // v.operator[](i)
    }
    // print vector size
    std::cout << "sizeof v = " << sizeof v << '\n';
    std::cout << "v.size() = " << v.size() << '\n';
}
```

C++ Standardbibliothek: Algorithmus std::max<>

Das Funktions-Template **std::max<>** zur Bestimmung des Maximums zweier Werte ist für jeden Werttyp nutzbar, der **operator<** unterstützt:

```
template<typename T>
const T& max(const T& a, const T& b);
```

- Beispiel:

```
#include <algorithm>  // damit std::max<> bekannt ist

int main()
{
    // T = int
    int n = std::max(1, 2);

    // T = std::string
    std::string s = std::max(std::string("abc"), std::string("def"));
}
```

Was würde std::max("abc", "def") liefern?

C++ Standardbibliothek: Algorithmus std::find<> (1)

Das Funktions-Template **std::find<>** zur linearen Suche eines Werts ist für jeden Typ mit zugeordnetem Iterator-Typ nutzbar:

```
template<typename I, typename T>
I find(I first, I last, const T& value);
```

- Beispiel mit einfachem C-Array:

```
#include <algorithm> // damit std::find<> bekannt ist
...
int a[] = {3421, 3442, 3635, 3814};
int *begin = a; // Zeiger auf Elementtyp dienen als Iteratoren
int *end = a + 4;

auto i = std::find(begin, end, 3442); // I = int* und T = int
if (i != end) {
     std::cout << *i << " ist in a enthalten\n";
}
```

C++ Standardbibliothek: Algorithmus std::find<> (2)

- Beispiel mit C++ Container:

```
#include <array>       // alternativ vector, list, ...
#include <algorithm>   // damit std::find<> bekannt ist
...
std::array<int,4> a{3421, 3442, 3635, 3814};
// std::vector<int> a{3421, 3442, 3635, 3814};
// std::list<int> a{3421, 3442, 3635, 3814};
auto begin = a.begin();
auto end = a.end();

auto i = std::find(begin, end, 3442);
if (i != end) {
     std::cout << *i << " ist in a enthalten\n";
}
```

C++ Standardbibliothek: Iteratoren (1)

Damit C++ Algorithmen wie std::find<> mit einer Container-Klasse funktionieren, muss die Klasse einen Typ **iterator** sowie Memberfunktionen **begin()** und **end()** bereitstellen *(vereinfacht)*

- Beispiel std::array<>: ein einfacher Zeiger auf Elementtyp dient als Iterator

```
template <typename T, std::size_t N>
class array
{
public:
    ...
    typedef T* iterator;
    iterator begin()  { return &this->_elemente[0]; }
    iterator end()    { return &this->_elemente[N]; }
};
```

C++ Standardbibliothek: Iteratoren (2)

- Beispiel intlist aus Teil 5: Iterator mit zusätzlichen Typnamen

```
class intlist final {
    ...
    class iterator final {
        ... // operator!=, operator*, operator++ wie in Teil 5
        typedef std::input_iterator_tag iterator_category;
        typedef T value_type;
        typedef std::ptrdiff_t difference_type;
        typedef T* pointer;
        typedef T& reference;
    };
    ...
};
```

Typnamen, die in den Funktions-Templates der C++ Bibliothek benutzt werden, z.B. in std::find

Seit C++11 statt ***typedef*** *auch alternative Syntax:* ***using*** *value_type* ***= T;***

C++ Standardbibliothek: Intelligente Zeiger (1)

Einfache Zeigervariable *(raw pointers)* sind eine regelmäßige Fehlerquelle:

- es kommt zu Speicherlecks *(memory leaks)*, wenn für mit **`new`** allokierten Heap-Speicher das zugehörige **`delete`** fehlt
- es kommt zu Speicherzugriffsfehlern, wenn ein Zeiger weiter dereferenziert wird, obwohl der referenzierte Speicher gar nicht mehr allokiert ist *(dangling pointers)*

Intelligente Zeiger *(smart pointers)* sind Wrapper für einfache Zeiger:

- das Klassentemplate **`std::unique_ptr<T>`** bindet die Lebensdauer eines Heap-Speicherstücks vom Typ T exklusiv an die Lebensdauer einer Variablen

  *Der Destruktor der Zeigerklasse garantiert den **`delete`** -Aufruf.*

- das Klassentemplate **`std::shared_ptr<T>`** ergänzt Heap-Speicherstücke um einen Referenzzähler und erlaubt so mehrere Zeiger pro Speicherstück

  *Konstruktoren, Destruktor und Copy-Zuweisung zählen den Referenzzähler hoch und runter. Bei einem Zählerstand 0 wird **`delete`** aufgerufen.*

  Zyklische Referenzierungen müssen mit `std::weak_ptr<T>` aufgelöst werden.

C++ Standardbibliothek: Intelligente Zeiger (2)

Ausschnitt aus dem Klassentemplate **std::unique_ptr<>** *(vereinfacht)*:

```
template <typename T> class unique_ptr
{
private:
    T *_p;
public:
    unique_ptr();
    explicit unique_ptr(T *p);
    unique_ptr(unique_ptr&& u);  // nur Move-Konstruktor, kein Copy-Konstruktor
    ~unique_ptr();
    unique_ptr& operator=(unique_ptr&& u); // nur Move-Zuweisung
    T& operator*() const;
    T* operator->() const;
    ...
};
```

*Objekte der Klasse **unique_ptr** sind nicht kopierbar. Dadurch wird die Bindung des referenzierten Speicherbereichs an die Lebensdauer genau einer Variablen sichergestellt.*

C++ Standardbibliothek: Intelligente Zeiger (3)

Ausschnitt aus dem Klassentemplate **std::shared_ptr<>** *(vereinfacht)*:

```
template <typename T> class shared_ptr
{
private:
    T *_M_ptr;
    _control_block *_M_pi;  // der Kontrollblock enthält den Referenzzähler
public:
    shared_ptr();
    explicit shared_ptr(T *p);
    shared_ptr(const shared_ptr& s);
    shared_ptr(shared_ptr&& s);
    ~shared_ptr();
    shared_ptr& operator=(const shared_ptr& s);
    shared_ptr& operator=(shared_ptr&& s);
    T& operator*() const;
    T* operator->() const;
    ...
};
```

Objekte der Klasse ***shared_ptr*** *sind kopierbar. Jede Kopie erhöht den Referenzzähler um 1.*

Beispielprogramm Intelligente Zeiger (1)

- Fabrikfunktion für die Entitätenklasse termin aus Teil 5:

```
class termin final
{
     ...
public:
     static std::unique_ptr<termin> new_instance(const datum&,
                                                 const std::string&);
     ...
};
```

- Implementierung der Fabrikfunktion:

```
std::unique_ptr<termin> termin::new_instance(const datum& d, const std::string& s)
{
     return std::unique_ptr<termin>(new termin(d, s));
}
```

Beispielprogramm Intelligente Zeiger (2)

- Objektbenutzung:

```
...
std::list<std::shared_ptr<termin>> pruefer_kalender;
std::list<std::shared_ptr<termin>> kandidaten_kalender;

std::shared_ptr<termin> pruefung
   = termin::new_instance(datum::heute(), "Pruefung Systemprogrammierung");

pruefer_kalender.push_back(pruefung);      // Referenzzähler = 2
kandidaten_kalender.push_back(pruefung);   // Referenzzähler = 3

pruefung->verschieben({1, 4, 2040});       // Aufruf operator->()
...
```

Die Destruktoraufrufe für pruefung, kandidaten_kalender und pruefer_kalender zählen den Referenzzähler des Termin-Objekts herunter, beim letzten Aufruf wird ***delete*** *aufgerufen*

C++ Standardbibliothek: Index

Ausgabe-Stream 7-5,7-6
dangling pointer 7-22
Eingabe-Stream 7-7,7-8
File-Stream 7-9
Funktionstemplate 7-2
intelligenter Zeiger 7-22
Iterator 7-20,7-21
Klassentemplate 7-2
memory leak 7-22
smart pointer 7-22
std::array 7-15
std::find 7-18,7-19
std::istream 7-7
std::max 7-17
std::ofstream 7-9
std::ostream 7-5
std::shared_ptr 7-22,7-24
std::string 7-10,7-11,7-12
std::unique_ptr 7-22,7-23
std::vector 7-13,7-14,7-16
Stream 7-4
Template 7-2,7-3