2. C++ vertieft (II): Templates

Was lernen wir heute?

- Templates von Klassen
- Funktionentemplates
- Spezialisierung
- Templates mit Werten

Motivation

Ziel: generische Vektor-Klasse und Funktionalität.

Beispiele

```
Vector<double> vd(10);
Vector<int> vi(10);
Vector<char> vi(20);

auto nd = vd * vd; // norm (vector of double)
auto ni = vi * vi; // norm (vector of int)
```

Typen als Template Parameter

1. Ersetze in der konkreten Implementation einer Klasse den Typ, der generisch werden soll (beim Vektor: `double`) durch einen Stellvertreter, z.B. `T`.
2. Stelle der Klasse das Konstrukt `template<typename T>`[2] voran (ersetze `T` ggfs. durch den Stellvertreter)..

Das Konstrukt `template<typename T>` kann gelesen werden als "für alle Typen `T`".

[2] gleichbedeutend: `template<class T>`

Typen als Template Parameter

```
template <typename ElementType>
class Vector{
    std::size_t size;
    ElementType* elem;
public:
    ...
    Vector(std::size_t s):
        size{s},
        elem{new ElementType[s]}{}
    ...
    ElementType& operator[](std::size_t pos){
        return elem[pos];
    }
    ...
}
```

Template Instanzierung

`Vector<typeName>` erzeugt Typinstanz von `Vector` mit `ElementType=typeName`.
Bezeichnung: Instanzierung.

Beispiele

```
Vector<double> x;        // vector of double
Vector<int> y;           // vector of int
Vector<Vector<double>> x; // vector of vector of double
```

Type-checking

Templates sind weitgehend Ersetzungsregeln zur Instanzierungszeit und während der Kompilation. Es wird immer so wenig geprüft wie nötig und so viel wie möglich.

Beispiel

```
template <typename T>
class Pair{
    T left; T right;
public:
    Pair(T l, T r):left{l}, right{r}{}
    T min(){
        return left < right ? left : right;
    }
};
```

Beispiel

```
template <typename T>
class Pair{
    T left; T right;
public:
    Pair(T l, T r):left{l}, right{r}{}
    T min(){
        return left < right ? left : right;
    }
};
```

```
Pair<int> a(10,20); // ok
auto m = a.min(); // ok
Pair<Pair<int>> b(a,Pair<int>(20,30)); // ok
auto n = b.min(); no match for operator< !
```

Generische Programmierung

Generische Komponenten sollten eher als Generalisierung eines oder mehrerer Beispiele entwickelt werden als durch Ableitung von Grundprinzipien.

```
template <typename T>
class Vector{
public:
  Vector();
  Vector(std::size_t);
  ~Vector();
  Vector(const Vector&);
  Vector& operator=(const Vector&);
  Vector (Vector&&);
  Vector& operator=(Vector&&);
  const T& operator[] (std::size_t) const;
  T& operator[] (std::size_t);
  std::size_t size() const;
  T* begin();
  T* end();
  const T* begin() const;
  const T* end() const;
}
```

Funktionentemplates

1. Ersetze in der konkreten Implementation einer Funktion den Typ, der generisch werden soll durch einen Stellverterter, z.B. `T`,
2. Stelle der Funktion das Konstrukt `template<typename T>`[3] voran (ersetze `T` ggfs. durch den Stellverterter).

[3] gleichbedeutend: `template<class T>`

Funktionentemplates

```
template <typename T>
void swap(T& x, T&y){
    T temp = x;
    x = y;
    y = temp;
}
```

Typen der Aufrufparameter determinieren die Version der Funktion, welche (kompiliert und) verwendet wird:

```
int x=5;
int y=6;
swap(x,y); // calls swap with T=int
```

Grenzen der Magie

```
template <typename T>
void swap(T& x, T&y){
    T temp = x;
    x = y;
    y = temp;
}
```

Eine unverträgliche Version der Funktion wird nicht erzeugt:

```
int x=5;
double y=6;
swap(x,y); // error:  no matching function for ...
```

.. auch mit Operatoren

```
template <typename T>
class Pair{
    T left; T right;
public:
    Pair(T l, T r):left{l}, right{r}{}
    T min(){ return left < right? left: right; }
    std::ostream& print (std::ostream& os) const{
        return os << "("<< left << "," << right<< ")";
    }
};

template <typename T>
std::ostream& operator<< (std::ostream& os, const Pair<T>& pair){
    return pair.print(os);
}
```

.. auch mit Operatoren

```
template <typename T>
class Pair{
    T left; T right;
public:
    Pair(T l, T r):left{l}, right{r}{}
    T min(){ return left < right? left: right; }
    std::ostream& print (std::ostream& os) const{
        return os << "("<< left << "," << right<< ")";
    }
};

template <typename T>
std::ostream& operator<< (std::ostream& os, const Pair<T>& pair){
    return pair.print(os);
}
```

```
Pair<int> a(10,20); // ok
std::cout << a; // ok
```

Praktisch!

```
// Output of an arbitrary container
template <typename T>
void output(const T& t){
    for (auto x: t)
        std::cout << x << " ";
    std::cout << "\n";
}

int main(){
  std::vector<int> v={1,2,3};
  output(v); // 1 2 3
}
```

Explizite Typangabe

```
// input of an arbitrary pair
template <typename T>
Pair<T> read(){
        T left;
        T right;
        std::cin << left << right;
        return Pair<T>(left,right);
}
...

auto p = read<double>();
```

Explizite Typangabe

```
// input of an arbitrary pair
template <typename T>
Pair<T> read(){
        T left;
        T right;
        std::cin << left << right;
        return Pair<T>(left,right);
}
...

auto p = read<double>();
```

Wenn der Typ bei der Instanzierung nicht inferiert werden kann, muss er explizit angegeben werden.

Mächtig!

```
template <typename T> // square number
T sq(T x){
    return x*x;
}
template <typename Container, typename F>
void  apply(Container& c, F f){ // x <- f(x) forall x in c
    for(auto& x: c)
        x = f(x);
}
int main(){
  std::vector<int> v={1,2,3};
  apply(v,sq<int>);
  output(v); // 1 4 9
}
```

Spezialisierung

```
template <>
class Pair<bool>{
    short both;
public:
    Pair(bool l, bool r):both{(l?1:0) + (r?2:0)} {};
    std::ostream& print (std::ostream& os) const{
        return os << "("<< both % 2 << "," << both /2 << ")";
    }
};
```

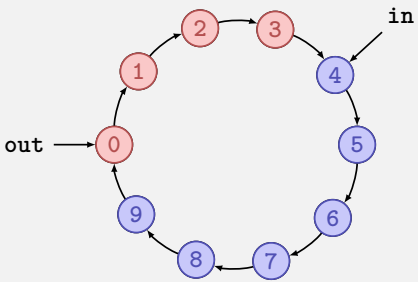
Spezialisierung

```
template <>
class Pair<bool>{
    short both;
public:
    Pair(bool l, bool r):both{(l?1:0) + (r?2:0)} {};
    std::ostream& print (std::ostream& os) const{
        return os << "("<< both % 2 << "," << both /2 << ")";
    }
};
```

```
Pair<int> i(10,20); // ok -- generic template
std::cout << i << std::endl; // (10,20);
Pair<bool> b(true, false); // ok -- special bool version
std::cout << b << std::endl; // (1,0)
```

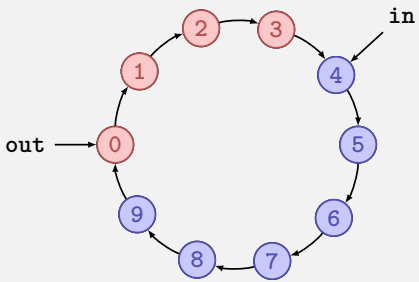
Templateparametrisierung mit Werten

```
template <typename T, int size>
class CircularBuffer{
  T buf[size] ;
  int in; int out;
```



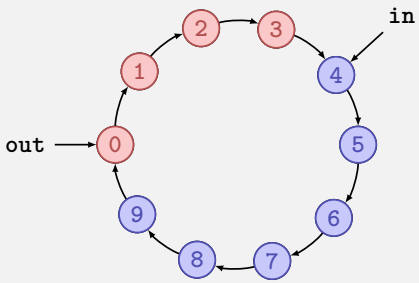
Templateparametrisierung mit Werten

```
template <typename T, int size>
class CircularBuffer{
  T buf[size] ;
  int in; int out;
public:
  CircularBuffer():in{0},out{0}{};
  bool empty(){
    return in == out;
  }
  bool full(){
    return (in + 1) % size == out;
  }
```



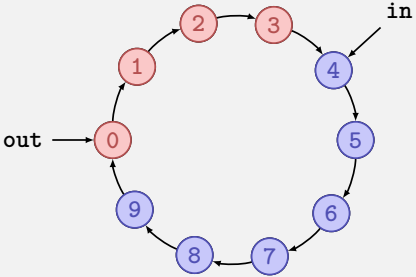
Templateparametrisierung mit Werten

```
template <typename T, int size>
class CircularBuffer{
  T buf[size] ;
  int in; int out;
public:
  CircularBuffer():in{0},out{0}{};
  bool empty(){
    return in == out;
  }
  bool full(){
    return (in + 1) % size == out;
  }
  void put(T x); // declaration
  T get();       // declaration
};
```



Templateparametrisierung mit Werten

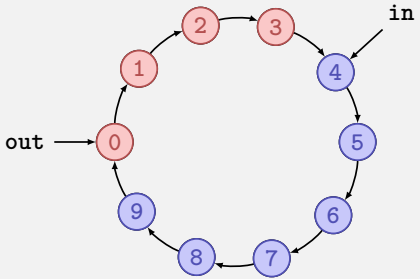
```
template <typename T, int size>
void CircularBuffer<T,size>::put(T x){
    assert(!full());
    buf[in] = x;
    in = (in + 1) % size;
}
```



Templateparametrisierung mit Werten

```
template <typename T, int size>
void CircularBuffer<T,size>::put(T x){
    assert(!full());
    buf[in] = x;
    in = (in + 1) % size;
}

template <typename T, int size>
T CircularBuffer<T,size>::get(){
    assert(!empty());
    T x = buf[out];
    out = (out + 1) % size;
    return x;
}
```

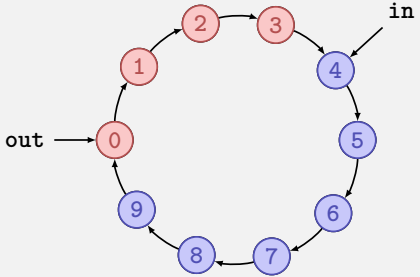


Templateparametrisierung mit Werten

```
template <typename T, int size>
void CircularBuffer<T,size>::put(T x){
    assert(!full());
    buf[in] = x;
    in = (in + 1) % size;
}

template <typename T, int size>
T CircularBuffer<T,size>::get(){
    assert(!empty());
    T x = buf[out];
    out = (out + 1) % size;
    return x;
}
```

Optimierungspotential, wenn size $= 2^k$.



Übung heute

- Implementieren Sie einen *generischen* dynamischen Vektor, der Indexoperatoren anbietet, über effizientes Speichermanagement verfügt und *Iteration* unterstützt.
- Wandeln Sie einen Sortieralgorithmus auf Indizes eines int-Vektors in einen *generischen Sortieralgorithmus auf einem Iterator* um.