19. Klassen

Klassen, Memberfunktionen, Konstruktoren, Stapel, verkettete Liste, dynamischer Speicher, Copy-Konstruktor, Zuweisungsoperator, Destruktor, Konzept Dynamischer Datentyp

Datenkapselung: `public` / `private`

```
class rational {
  int n;
  int d; // INV: d != 0
};
```

Anwendungscode:

```
rational r;
r.n = 1;      // error: n is private
r.d = 2;      // error: d is private
int i = r.n; // error: n is private
```

Datenkapselung: `public` / `private`

```
class rational {
  int n;
  int d; // INV: d != 0
};
```

Gute Nachricht: `r.d = 0` aus Versehen geht nicht mehr

Anwendungscode:

```
rational r;
r.n = 1;      // error: n is private
r.d = 2;      // error: d is private
int i = r.n; // error: n is private
```

Datenkapselung: `public` / `private`

```
class rational {
  int n;
  int d; // INV: d != 0
};
```

Gute Nachricht: `r.d = 0` aus Versehen geht nicht mehr

Schlechte Nachricht: Der Kunde kann nun gar nichts mehr machen . . .

Anwendungscode:

```
rational r;
r.n = 1;      // error: n is private
r.d = 2;      // error: d is private
int i = r.n; // error: n is private
```

Datenkapselung: `public` / `private`

```
class rational {
  int n;
  int d; // INV: d != 0
};
```

Gute Nachricht: `r.d = 0` aus Versehen geht nicht mehr

Schlechte Nachricht: Der Kunde kann nun gar nichts mehr machen . . .

. . . und wir auch nicht
(kein `operator+,...`)

Anwendungscode:

```
rational r;
r.n = 1;      // error: n is private
r.d = 2;      // error: d is private
int i = r.n; // error: n is private
```

Memberfunktionen: Deklaration

```
class rational {
public:
   // POST: return value is the numerator of *this
   int numerator () const {
     return n;
   }
   // POST: return value is the denominator of *this
   int denominator () const {
     return d;
   }
private:
   int n;
   int d; // INV: d!= 0
};
```

Memberfunktionen: Deklaration

öffentlicher Bereich

```
class rational {
public:
  // POST: return value is the numerator of *this
  int numerator () const {
    return n;
  }
  // POST: return value is the denominator of *this
  int denominator () const {
    return d;
  }
private:
   int n;
   int d; // INV: d!= 0
};
```

Memberfunktionen: Deklaration

```
class rational {
public:
  // POST: return value is the numerator of *this
  int numerator () const {
    return n;
  }
  // POST: return value is the denominator of *this
  int denominator () const {
    return d;
  }
private:
  int n;
  int d; // INV: d!= 0
};
```

öffentlicher Bereich

Memberfunktion

Memberfunktionen: Deklaration

```
class rational {
public:
  // POST: return value is the numerator of *this
  int numerator () const {
    return n;
  }
  // POST: return value is the denominator of *this
  int denominator () const {
    return d;
  }
private:
  int n;
  int d; // INV: d!= 0
};
```

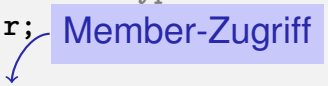
öffentlicher Bereich

Memberfunktion

Memberfunktionen haben Zugriff auf private Daten

Memberfunktionen: Aufruf

```
// Definition des Typs
class rational {
    ...
};
...
// Variable des Typs
rational r;

int n = r.numerator();   // Zaehler
int d = r.denominator(); // Nenner
```



Memberfunktionen: Definition

```
// POST: returns numerator of *this
int numerator () const
{
  return n;
}
```

Memberfunktionen: Definition ???

```
// POST: returns numerator of *this
int numerator ()  const
{
  return n;
}
```

Memberfunktionen: Definition

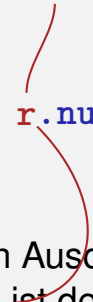
```
// POST: returns numerator of *this
int numerator () const
{
  return n;                          r.numerator()
}
```

- Eine Memberfunktion wird für einen Ausdruck der Klasse aufgerufen.

Memberfunktionen: Definition

```
// POST: returns numerator of *this
int numerator () const
{
  return n;
}
```

```
r.numerator()
```



- Eine Memberfunktion wird für einen Ausdruck der Klasse aufgerufen. In der Funktion: `*this` ist der Name dieses impliziten Arguments.

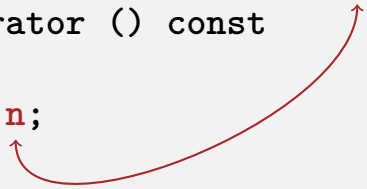
Memberfunktionen: Definition

```
// POST: returns numerator of *this
int numerator ()  const
{
  return n;                          r.numerator()
}
```

- Eine Memberfunktion wird für einen Ausdruck der Klasse aufgerufen. In der Funktion: `*this` ist der Name dieses impliziten Arguments.
- Das const bezieht sich auf `*this`

Memberfunktionen: Definition

```
// POST: returns  numerator of *this
int numerator () const
{
  return n;                    r.numerator()
}
```



- Eine Memberfunktion wird für einen Ausdruck der Klasse aufgerufen. In der Funktion: `*this` ist der Name dieses impliziten Arguments.
- Das const bezieht sich auf `*this`
- `n` ist Abkürzung für `(*this).n`

This rational vs. dieser Bruch

```
class rational {
    int n;
    ...
public:
    int numerator () const
    {
        return .n;
    }
};

rational r;
...
std::cout << r.numerator();
```

This rational vs. dieser Bruch

```
class rational {
    int n;
    ...
public:
    int numerator () const
    {
        return (*this).n;
    }
};

rational r;
...
std::cout << r.numerator();
```

This rational vs. dieser Bruch

So würde es aussehen...

```
class rational {
    int n;
    ...
public:
    int numerator () const
    {
        return (*this).n;
    }
};

rational r;
...
std::cout << r.numerator();
```

This rational vs. dieser Bruch

So würde es aussehen...

```
class rational {
    int n;
    ...
public:
    int numerator () const
    {
        return (*this).n;
    }
};

rational r;
...
std::cout << r.numerator();
```

... ohne Memberfunktionen

```
struct bruch {
    int n;
    ...
};

int numerator (const bruch* dieser)
{
    return (*dieser).n;
}

bruch r;
..
std::cout << numerator(&r);
```

Member-Definition: In-Class

```
class rational {
    int n;
    ...
public:
    int numerator () const
    {
        return n;
    }
    ....
};
```

- Keine Trennung zwischen Deklaration und Definition (schlecht für Bibliotheken)

Member-Definition: In-Class vs. Out-of-Class

```
class rational {
    int n;
    ...
public:
    int numerator () const
    {
        return n;
    }
    ....
};
```

- Keine Trennung zwischen Deklaration und Definition (schlecht für Bibliotheken)

```
class rational {
    int n;
    ...
public:
    int numerator () const;
    ...
};

int rational::numerator () const
{
  return n;
}
```

- So geht's auch.

Initialisierung? Konstruktoren!

```
class rational
{
public:
    rational (int num, int den)
        : n (num), d (den)
    {
        assert (den != 0);
    }
...
};
...
rational r (2,3); // r = 2/3
```

Initialisierung? Konstruktoren!

```
class rational
{
public:
    rational (int num, int den)
        : n (num), d (den)
    {
        assert (den != 0);
    }
...
};
...
rational r (2,3); // r = 2/3
```

Initialisierung der Membervariablen

Funktionsrumpf.

Initialisierung “rational = int”?

```
class rational
{
public:
    rational (int num)
       : n (num), d (1)
    {}
...
};
...
rational r (2);    // Explizite Initialisierung mit 2
rational s = 2;    // Implizite Konversion
```

Initialisierung “rational = int”?

```
class rational
{
public:
    rational (int num)
       : n (num), d (1)
    {}   ←—— Leerer Funktionsrumpf
...
};
...
rational r (2);    // Explizite Initialisierung mit 2
rational s = 2;    // Implizite Konversion
```

Der Default-Konstruktor

```
class rational
{
public:
    ...
    rational ()
      : n (0), d (1)
    {}
...
};
...
rational r;     // r = 0
```

Leere Argumentliste

Der Default-Konstruktor

```
class rational
{
public:
     ...
     rational ()
        : n (0), d (1)
     {}
...
};
...
rational r;     // r = 0
```

Leere Argumentliste

$\Rightarrow$ Es gibt keine uninitialisierten Variablen vom Typ rational mehr!

RAT PACK® Reloaded ...

Kundenprogramm sieht nun so aus:

```
// POST: double approximation of r
double to_double (const rational r)
{
  double result = r.numerator();
  return result / r.denominator();
}
```

RAT PACK® Reloaded ...

Kundenprogramm sieht nun so aus:

```
// POST: double approximation of r
double to_double (const rational r)
{
  double result = r.numerator();
  return result / r.denominator();
}
```

- Wir können die Memberfunktionen zusammen mit der Repräsentation anpassen. ✓

RAT PACK® Reloaded ...

vorher

```
class rational {
...
private:
  int n;
  int d;
};
```

RAT PACK® Reloaded ...

vorher

```
class rational {
...
private:
  int n;
  int d;
};
```

```
int numerator () const
{
  return n;
}
```

RAT PACK® Reloaded ...

vorher

```
class rational {
...
private:
  int n;
  int d;
};
```

```
int numerator () const
{
  return n;
}
```

---

nachher

```
class rational {
...
private:
  unsigned int n;
  unsigned int d;
  bool is_positive;
};
```

RAT PACK® Reloaded ...

vorher

```
class rational {
...
private:
  int n;
  int d;
};
```

```
int numerator () const
{
  return n;
}
```

---

nachher

```
class rational {
...
private:
  unsigned int n;
  unsigned int d;
  bool is_positive;
};
```

```
int numerator () const{
  if (is_positive)
    return n;
  else {
    int result = n;
    return -result;
  }
}
```

RAT PACK® Reloaded ?

```
class rational {
...
private:
  unsigned int n;
  unsigned int d;
  bool is_positive;
};
```

```
int numerator () const
{
  if (is_positive)
    return n;
  else {
    int result = n;
    return -result;
  }
}
```

RAT PACK® Reloaded ?

```
class rational {
...
private:
  unsigned int n;
  unsigned int d;
  bool is_positive;
};
```

```
int numerator () const
{
  if (is_positive)
    return n;
  else {
    int result = n;
    return -result;
  }
}
```

- Wertebereich von Zähler und Nenner wieder wie vorher

RAT PACK® Reloaded ?

```
class rational {
...
private:
  unsigned int n;
  unsigned int d;
  bool is_positive;
};
```

```
int numerator () const
{
  if (is_positive)
    return n;
  else {
    int result = n;
    return -result;
  }
}
```

- Wertebereich von Zähler und Nenner wieder wie vorher
- Dazu noch möglicher Überlauf

Datenkapselung noch unvollständig

Die Sicht des Kunden (`rational.h`):

```
class rational {
public:
   // POST: returns numerator of *this
   int numerator () const;
   ...
private:
  // none of my business
};
```

Datenkapselung noch unvollständig

Die Sicht des Kunden (`rational.h`):

```
class rational {
public:
   // POST: returns numerator of *this
   int numerator () const;
   ...
private:
  // none of my business
};
```

- Wir legen uns auf Zähler-/Nennertyp `int` fest.

Datenkapselung noch unvollständig

Die Sicht des Kunden (`rational.h`):

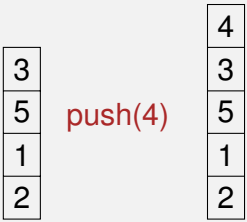
```
class rational {
public:
   // POST: returns numerator of *this
   int numerator () const;
   ...
private:
  // none of my business
};
```

- Wir legen uns auf Zähler-/Nennertyp `int` fest.
- Lösung: Nicht nur Daten, auch Typen kapseln (Handout).

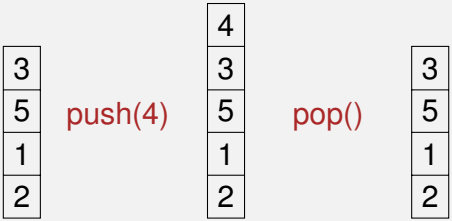
Motivation: Stapel

Motivation: Stapel

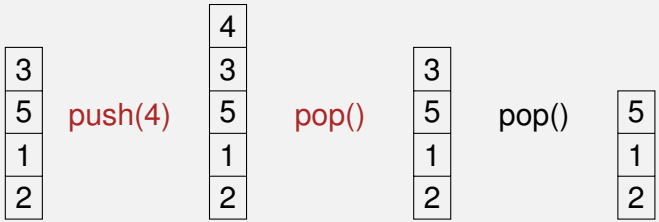
Motivation: Stapel



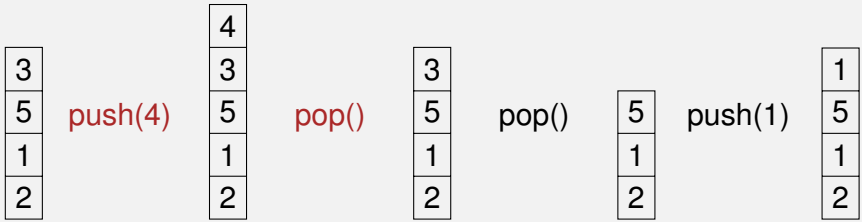
Motivation: Stapel



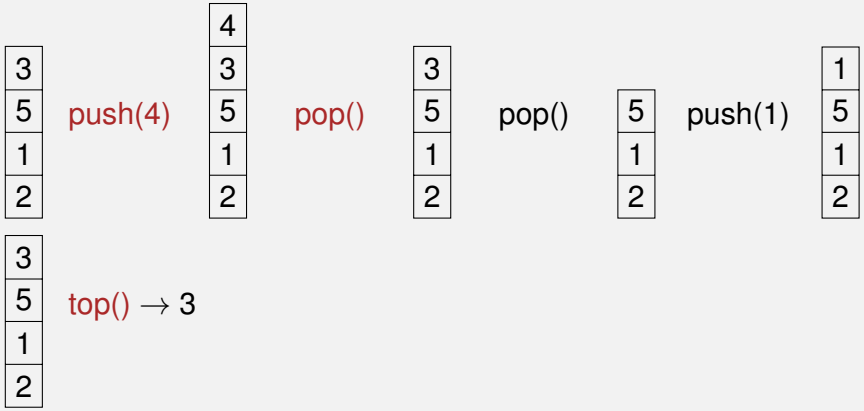
Motivation: Stapel



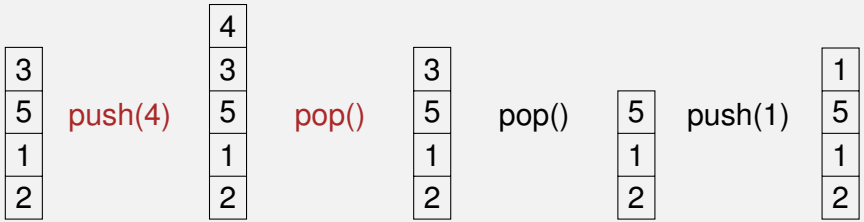
Motivation: Stapel

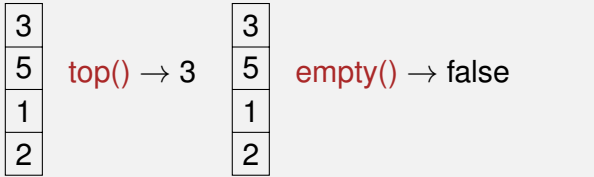


Motivation: Stapel

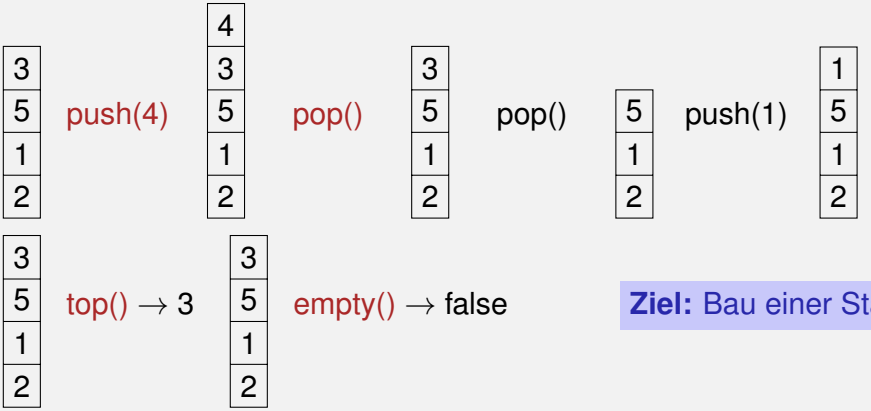


Motivation: Stapel (`push, pop, top, empty`)



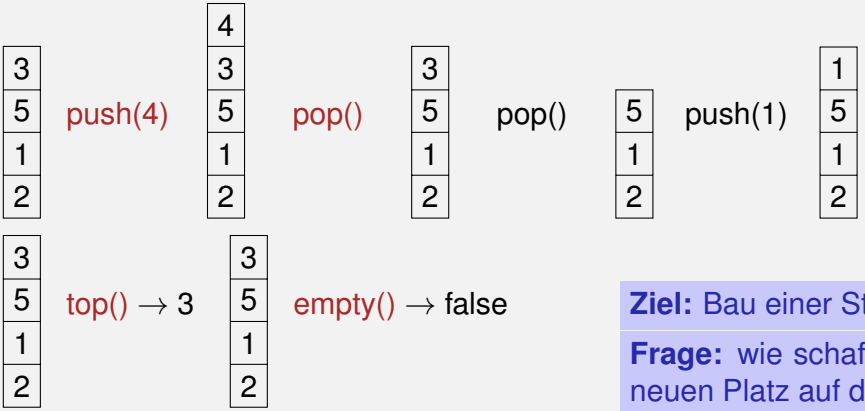


Motivation: Stapel (`push, pop, top, empty`)



Ziel: Bau einer Stapel-Klasse!

Motivation: Stapel (`push, pop, top, empty`)



Ziel: Bau einer Stapel-Klasse!

Frage: wie schaffen wir bei push neuen Platz auf dem Stapel?

Wir brauchen einen neuen Container!

Unser Haupt-Container bisher: Feld (`T[]`)

Wir brauchen einen neuen Container!

Unser Haupt-Container bisher: Feld (`T[]`)

- Zusammenhängender Speicherbereich, wahlfreier Zugriff (auf i-tes Element)

Wir brauchen einen neuen Container!

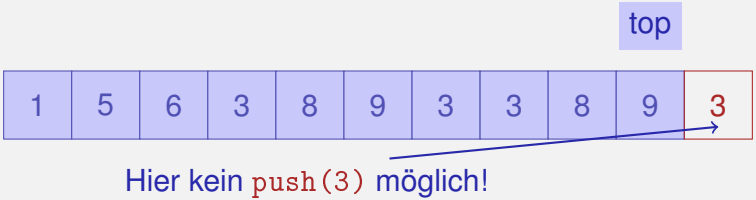
Unser Haupt-Container bisher: Feld (`T[]`)

- Zusammenhängender Speicherbereich, wahlfreier Zugriff (auf i-tes Element)
- Simulation eines Stapels durch ein Feld?

Wir brauchen einen neuen Container!

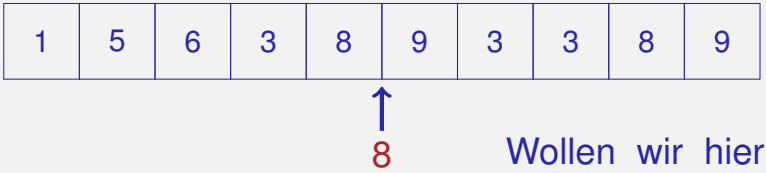
Unser Haupt-Container bisher: Feld (`T[]`)

- Zusammenhängender Speicherbereich, wahlfreier Zugriff (auf i-tes Element)
- Simulation eines Stapels durch ein Feld?
- Nein, irgendwann ist das Feld „voll“.



Arrays können wirklich nicht alles…

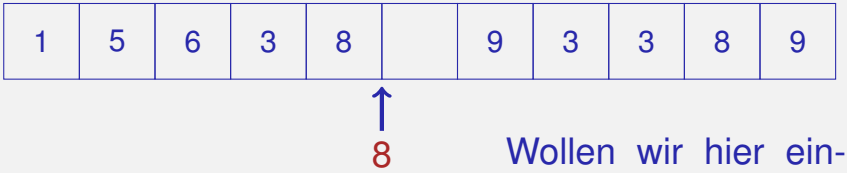
- Einfügen oder Löschen von Elementen „in der Mitte“ ist aufwändig.



Wollen wir hier einfügen, müssen wir alles rechts davon verschieben (falls da überhaupt noch Platz ist!)

Arrays können wirklich nicht alles…

- Einfügen oder Löschen von Elementen „in der Mitte“ ist aufwändig.



Wollen wir hier einfügen, müssen wir alles rechts davon verschieben (falls da überhaupt noch Platz ist!)

Arrays können wirklich nicht alles…

- Einfügen oder Löschen von Elementen „in der Mitte“ ist aufwändig.

Wollen wir hier einfügen, müssen wir alles rechts davon verschieben (falls da überhaupt noch Platz ist!)

Arrays können wirklich nicht alles…

- Einfügen oder Löschen von Elementen „in der Mitte“ ist aufwändig.

Arrays können wirklich nicht alles…

- Einfügen oder Löschen von Elementen „in der Mitte“ ist aufwändig.

Arrays können wirklich nicht alles…

- Einfügen oder Löschen von Elementen „in der Mitte“ ist aufwändig.

Wollen wir hier löschen, müssen wir alles rechts davon verschieben

Der neue Container: Verkettete Liste

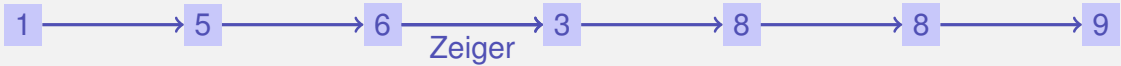
- *Kein* zusammenhängender Speicherbereich und *kein* wahlfreier Zugriff

Der neue Container: Verkettete Liste

- *Kein* zusammenhängender Speicherbereich und *kein* wahlfreier Zugriff
- Jedes Element „kennt“ seinen Nachfolger

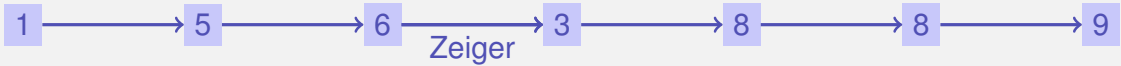
Der neue Container: Verkettete Liste

- *Kein* zusammenhängender Speicherbereich und *kein* wahlfreier Zugriff
- Jedes Element „kennt“ seinen Nachfolger



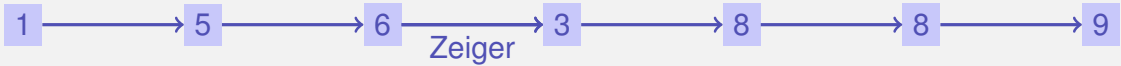
Der neue Container: Verkettete Liste

- *Kein* zusammenhängender Speicherbereich und *kein* wahlfreier Zugriff
- Jedes Element „kennt“ seinen Nachfolger
- Einfügen und Löschen beliebiger Elemente ist einfach, *auch am Anfang der Liste*

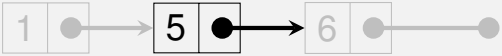


Der neue Container: Verkettete Liste

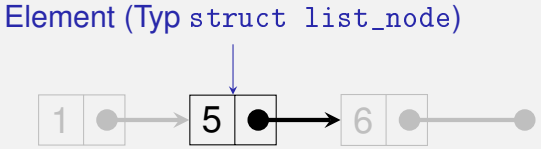
- *Kein* zusammenhängender Speicherbereich und *kein* wahlfreier Zugriff
- Jedes Element „kennt“ seinen Nachfolger
- Einfügen und Löschen beliebiger Elemente ist einfach, *auch am Anfang der Liste*
- $\Rightarrow$ Ein Stapel kann als verkettete Liste realisiert werden



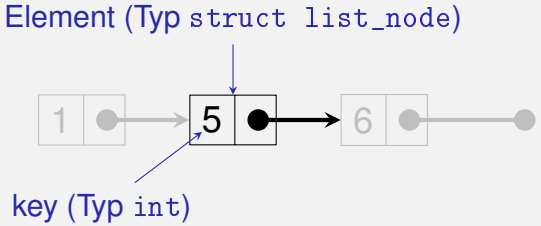
Verkettete Liste: Zoom



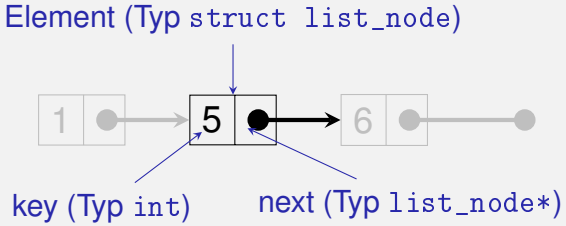
Verkettete Liste: Zoom



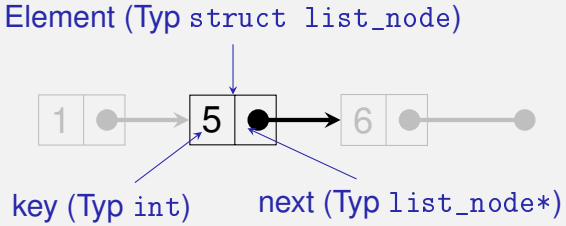
Verkettete Liste: Zoom



Verkettete Liste: Zoom

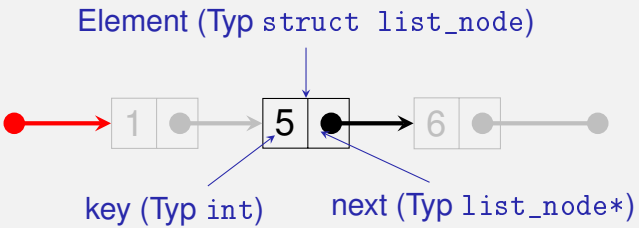


Verkettete Liste: Zoom




```
struct list_node {
  int           key;
  list_node*    next;
  // constructor
  list_node (int k, list_node* n)
    : key (k), next (n) {}
};
```

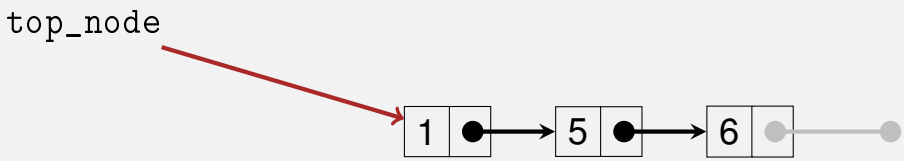
Stapel = Zeiger aufs oberste Element




```
class stack {
  list_node* top_node;
public:
   void push (int value);
   ...
};
```

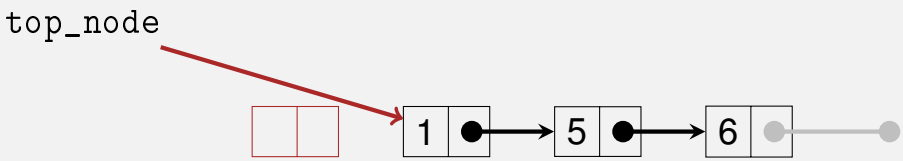
Sneak Preview: push(4)

```
void stack::push (int value)
{
  top_node = new list_node (value, top_node);
}
```



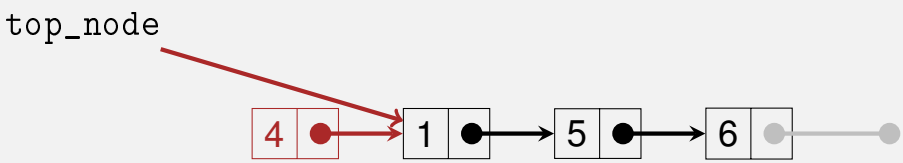
Sneak Preview: push(4)

```
void stack::push (int value)
{
  top_node = new list_node (value, top_node);
}
```



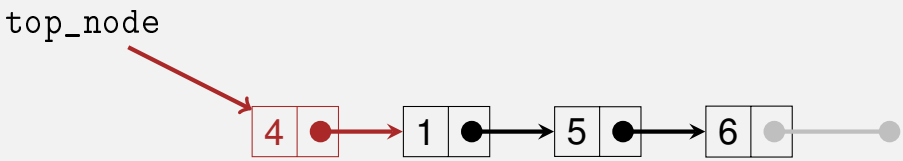
Sneak Preview: push(4)

```
void stack::push (int value)
{
  top_node = new list_node (value, top_node);
}
```

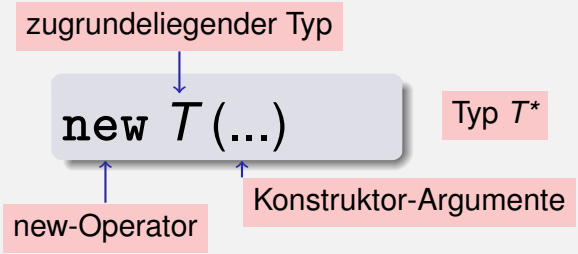


Sneak Preview: push(4)

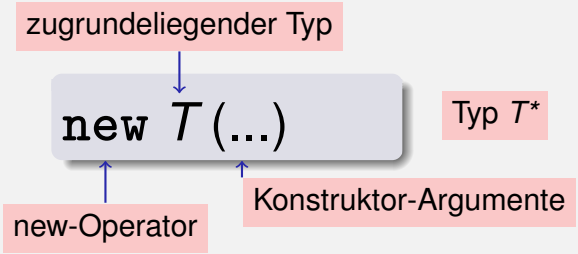
```
void stack::push (int value)
{
  top_node = new list_node (value, top_node);
}
```



Der `new`-Ausdruck

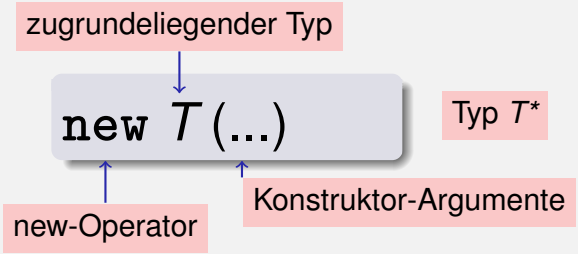


Der `new`-Ausdruck



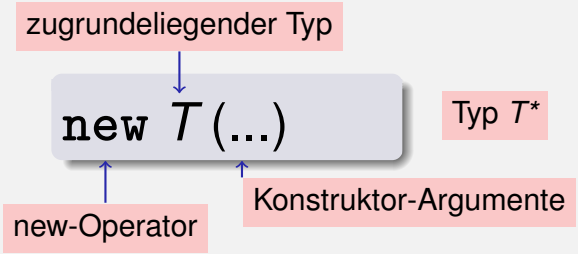
- **Effekt:** Neues Objekt vom Typ T wird im Speicher angelegt ...

Der `new`-Ausdruck



- **Effekt:** Neues Objekt vom Typ T wird im Speicher angelegt ...
- ... und mit Hilfe des passenden Konstruktors initialisiert.

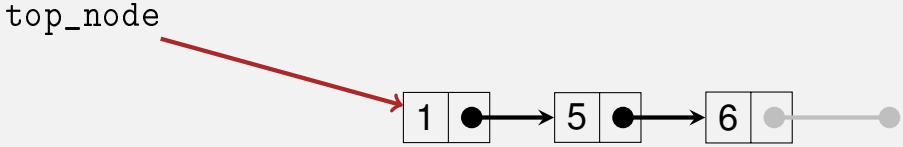
Der `new`-Ausdruck



- **Effekt:** Neues Objekt vom Typ T wird im Speicher angelegt ...
- ... und mit Hilfe des passenden Konstruktors initialisiert.
- **Wert:** Adresse des neuen Objekts

Der `new`-Ausdruck: `push(4)`

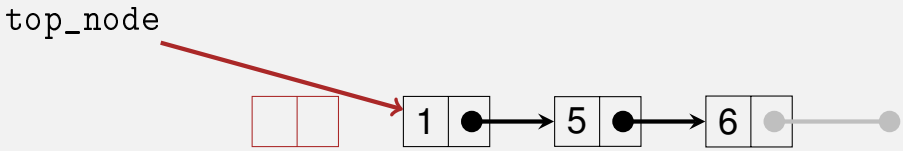
```
top_node = new list_node (value, top_node);
```



Der `new`-Ausdruck: `push(4)`

- **Effekt:** Neues Objekt vom Typ *T* wird im Speicher angelegt ...

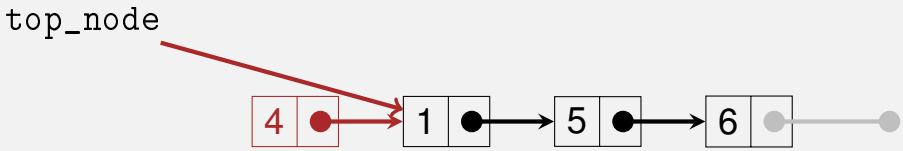
```
top_node = new list_node (value, top_node);
```



Der `new`-Ausdruck: `push(4)`

- **Effekt:** Neues Objekt vom Typ *T* wird im Speicher angelegt ...
- ... und mit Hilfe des passenden Konstruktors initialisiert.

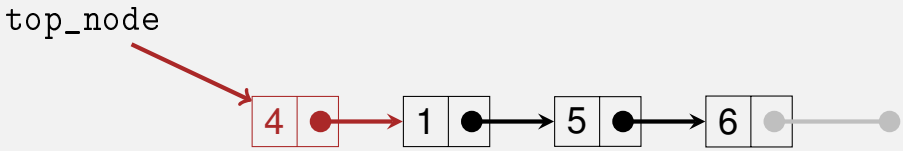
```
top_node = new list_node (value, top_node);
```



Der `new`-Ausdruck: `push(4)`

- **Effekt:** Neues Objekt vom Typ *T* wird im Speicher angelegt ...
- ... und mit Hilfe des passenden Konstruktors initialisiert.
- **Wert:** Adresse des neuen Objekts

```
top_node = new list_node (value, top_node);
```

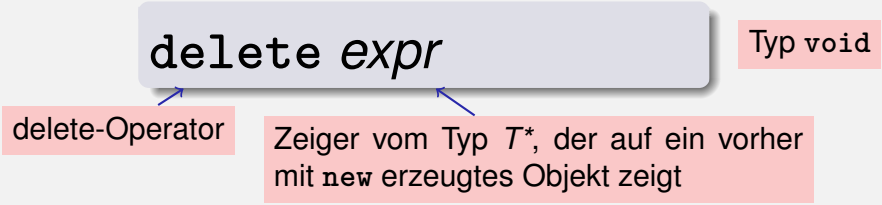


Der `delete`-Ausdruck

Objekte, die mit **`new`** erzeugt worden sind, haben *dynamische Speicherdauer:* sie „leben“, bis sie explizit *gelöscht* werden.

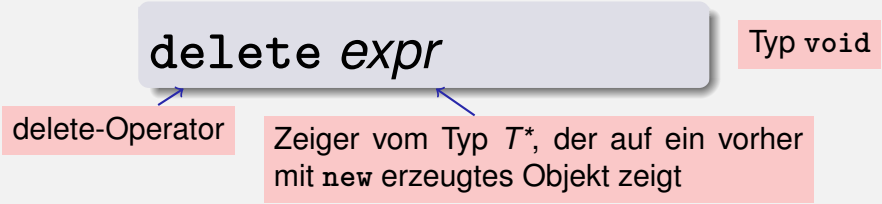
Der `delete`-Ausdruck

Objekte, die mit **`new`** erzeugt worden sind, haben *dynamische Speicherdauer:* sie „leben“, bis sie explizit *gelöscht* werden.



Der `delete`-Ausdruck

Objekte, die mit **`new`** erzeugt worden sind, haben *dynamische Speicherdauer:* sie „leben“, bis sie explizit *gelöscht* werden.



- **Effekt:** Objekt wird gelöscht, Speicher wird wieder freigegeben

Wer geboren wird, muss sterben...

Richtlinie „Dynamischer Speicher“

Zu jedem `new` gibt es ein passendes `delete`!

Wer geboren wird, muss sterben…

Richtlinie „Dynamischer Speicher“

Zu jedem `new` gibt es ein passendes `delete`!

Nichtbeachtung führt zu *Speicherlecks*:

Wer geboren wird, muss sterben...

Richtlinie „Dynamischer Speicher“

Zu jedem `new` gibt es ein passendes `delete`!

Nichtbeachtung führt zu *Speicherlecks*:

- „Alte“ Objekte, die den Speicher blockieren...

Wer geboren wird, muss sterben…

Richtlinie „Dynamischer Speicher“

Zu jedem `new` gibt es ein passendes `delete`!

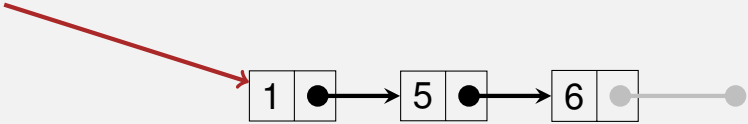
Nichtbeachtung führt zu *Speicherlecks*:

- „Alte“ Objekte, die den Speicher blockieren…
- …bis er irgendwann voll ist (heap overflow)

Weiter mit dem Stapel: pop()

```
void stack::pop()
{
    assert (!empty());
    list_node* p = top_node;
    top_node = top_node->next;
    delete p;
}
```

top_node

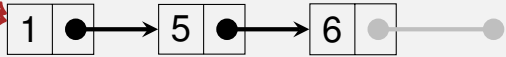


Weiter mit dem Stapel: pop()

```
void stack::pop()
{
    assert (!empty());
    list_node* p = top_node;
    top_node = top_node->next;
    delete p;
}
```

top_node

p

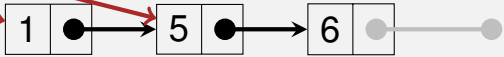


Weiter mit dem Stapel: pop()

```
void stack::pop()
{
    assert (!empty());
    list_node* p = top_node;
    top_node = top_node->next;
    delete p;
}
```

top_node

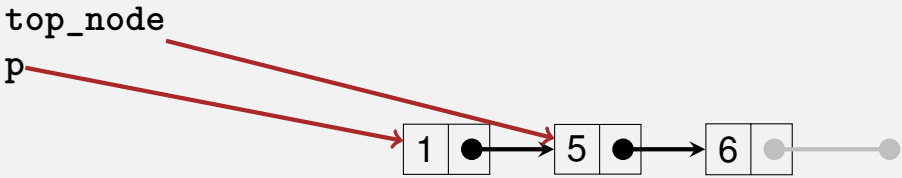
p



Weiter mit dem Stapel: pop()

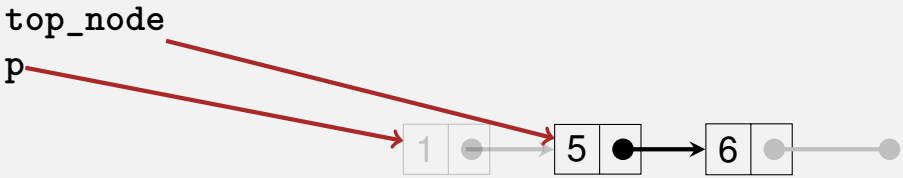
```
void stack::pop()
{
    assert (!empty());
    list_node* p = top_node;
    top_node = top_node->next;
    delete p;
}
```

Abkürzung für `(*top_node).next`



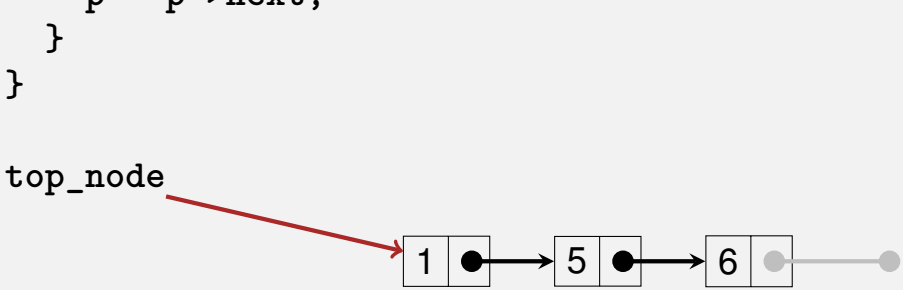
Weiter mit dem Stapel: pop()

```
void stack::pop()
{
    assert (!empty());
    list_node* p = top_node;
    top_node = top_node->next;
    delete p;
}
```



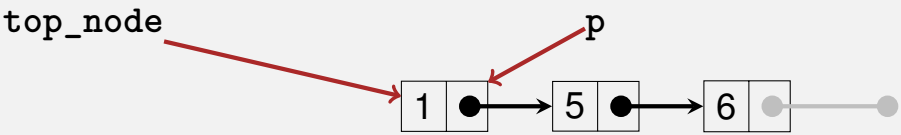
Stapel traversieren: print()

```
void stack::print (std::ostream& o) const
{
  const list_node* p = top_node;
  while (p != nullptr) {
    o << p->key << " ";
    p = p->next;
  }
}
```



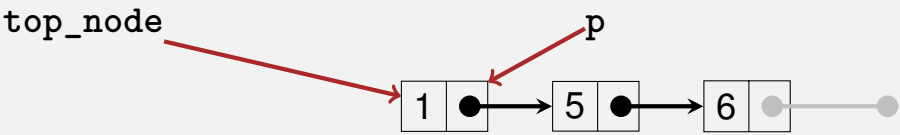
Stapel traversieren: print()

```
void stack::print (std::ostream& o) const
{
  const list_node* p = top_node;
  while (p != nullptr) {
    o << p->key << " ";
    p = p->next;
  }
}
```



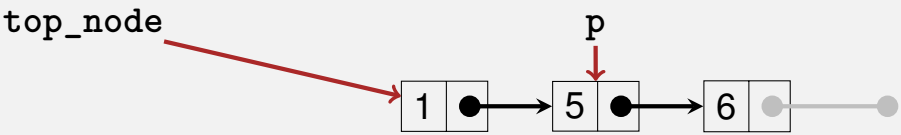
Stapel traversieren: print()

```
void stack::print (std::ostream& o) const
{
  const list_node* p = top_node;
  while (p != nullptr) {
    o << p->key << " "; // 1
    p = p->next;
  }
}
```



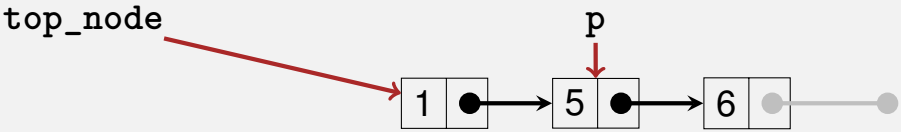
Stapel traversieren: print()

```
void stack::print (std::ostream& o) const
{
  const list_node* p = top_node;
  while (p != nullptr) {
    o << p->key << " "; // 1
    p = p->next;
  }
}
```



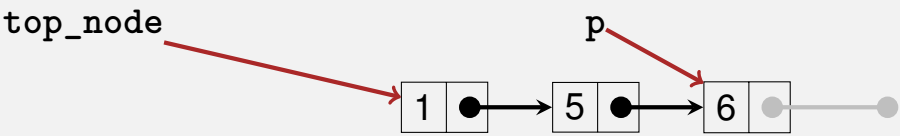
Stapel traversieren: print()

```
void stack::print (std::ostream& o) const
{
  const list_node* p = top_node;
  while (p != nullptr) {
    o << p->key << " "; // 1 5
    p = p->next;
  }
}
```



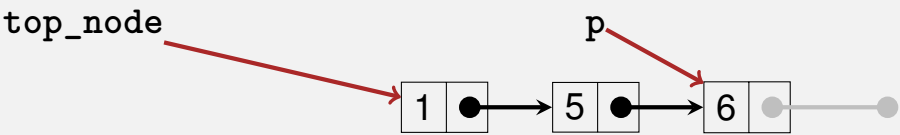
Stapel traversieren: print()

```
void stack::print (std::ostream& o) const
{
  const list_node* p = top_node;
  while (p != nullptr) {
    o << p->key << " "; // 1 5
    p = p->next;
  }
}
```



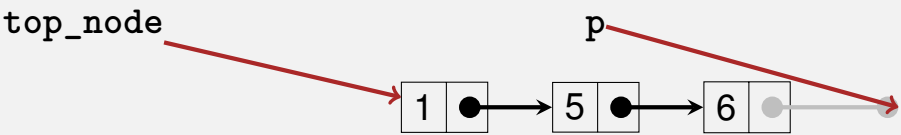
Stapel traversieren: print()

```
void stack::print (std::ostream& o) const
{
  const list_node* p = top_node;
  while (p != nullptr) {
    o << p->key << " "; // 1 5 6
    p = p->next;
  }
}
```



Stapel traversieren: print()

```
void stack::print (std::ostream& o) const
{
  const list_node* p = top_node;
  while (p != nullptr) {
    o << p->key << " "; // 1 5 6
    p = p->next;
  }
}
```



Stapel ausgeben: operator<<

```
class stack {
public:
   void push (int value) {...}
   ...
   void print (std::ostream& o) const {...}
private:
   list_node* top_node;
};
```

Stapel ausgeben: operator<<

```
class stack {
public:
   void push (int value) {...}
   ...
   void print (std::ostream& o) const {...}
private:
   list_node* top_node;
};

// POST: s is written to o
std::ostream& operator<< (std::ostream& o, const stack& s)
{
   s.print (o);
   return o;
}
```

Leerer Stapel

```
stack::stack()      // default constructor
    : top_node (nullptr)
{}
```

Leerer Stapel , `empty()`

```
stack::stack()      // default constructor
    : top_node (nullptr)
{}

bool stack::empty () const
{
  return top_node == nullptr;
}
```

Leerer Stapel , `empty()`, `top()`

```
stack::stack()     // default constructor
    : top_node (nullptr)
{}

bool stack::empty () const
{
  return top_node == nullptr;
}

int stack::top () const
{
  assert (!empty());
  return top_node->key;
}
```

Stapel fertig?

```
stack s1;
s1.push (1);
s1.push (3);
s1.push (2);
std::cout << s1 << "\n";

stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n";

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n";

s2.pop ();
```

Stapel fertig?

```
stack s1;
s1.push (1);
s1.push (3);
s1.push (2);
std::cout << s1 << "\n";

stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n";

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n";

s2.pop ();
```

Stapel fertig?

```
stack s1;
s1.push (1);
s1.push (3);
s1.push (2);
std::cout << s1 << "\n";

stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n";

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n";

s2.pop ();
```

Stapel fertig?

```
stack s1;
s1.push (1);
s1.push (3);
s1.push (2);
std::cout << s1 << "\n";

stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n";

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n";

s2.pop ();
```

Stapel fertig?

```
stack s1;
s1.push (1);
s1.push (3);
s1.push (2);
std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1

stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n";

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n";

s2.pop ();
```

Stapel fertig?

```
stack s1;
s1.push (1);
s1.push (3);
s1.push (2);
std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1

stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n";

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n";

s2.pop ();
```

Stapel fertig?

```
stack s1;
s1.push (1);
s1.push (3);
s1.push (2);
std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1

stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n";

s2.pop ();
```

Stapel fertig?

```
stack s1;
s1.push (1);
s1.push (3);
s1.push (2);
std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1

stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n";

s2.pop ();
```

Stapel fertig?

```
stack s1;
s1.push (1);
s1.push (3);
s1.push (2);
std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1

stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n"; // 3 1

s2.pop ();
```

Stapel fertig?

```
stack s1;
s1.push (1);
s1.push (3);
s1.push (2);
std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1

stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n"; // 3 1

s2.pop ();
```

Stapel fertig?

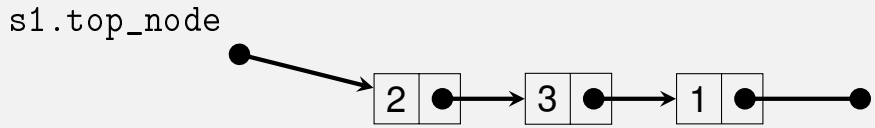
```
stack s1;
s1.push (1);
s1.push (3);
s1.push (2);
std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1

stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n"; // 3 1

s2.pop (); // Oops, Programmabsturz!
```

Stapel fertig?

Offenbar noch nicht...

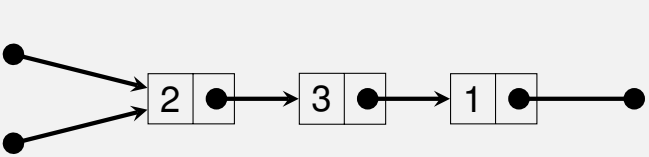
```
stack s1;
s1.push (1);
s1.push (3);
s1.push (2);
std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1

stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n"; // 3 1

s2.pop (); // Oops, Programmabsturz!
```

Was ist hier schiefgegangen?




```
...
stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n";

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n";

s2.pop ();
```

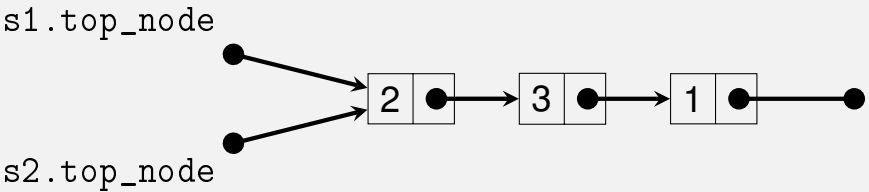
Was ist hier schiefgegangen?



Memberweise Initialisierung: kopiert nur den `top_node`-Zeiger

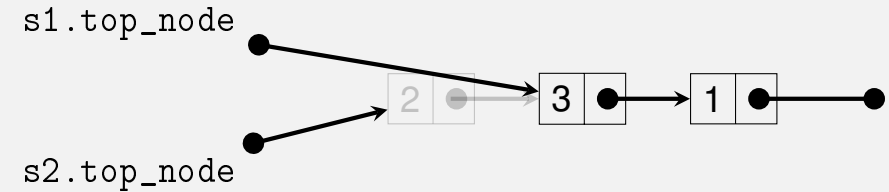
```
...
stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n";

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n";

s2.pop ();
```

Was ist hier schiefgegangen?



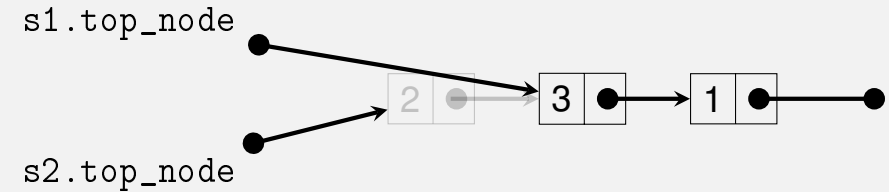

```
...
stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n";

s2.pop ();
```

Was ist hier schiefgegangen?



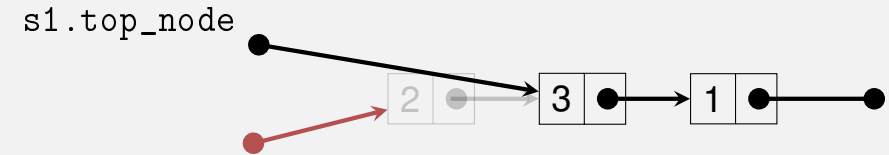

```
...
stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n";

s2.pop ();
```

Was ist hier schiefgegangen?



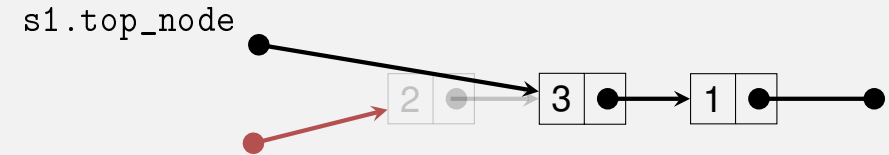

```
...
stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n"; // 3 1

s2.pop ();
```

Was ist hier schiefgegangen?



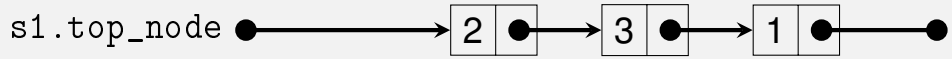

```
...
stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n"; // 3 1

s2.pop ();
```

Was ist hier schiefgegangen?



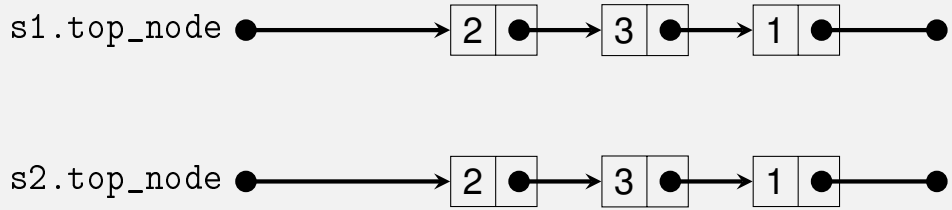

```
...
stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n"; // 3 1

s2.pop ();  // Oops, Programmabsturz!
```

Wir brauchen eine echte Kopie!



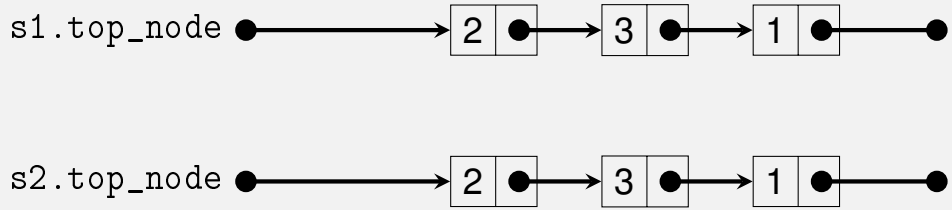

```
...
stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n";

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n";

s2.pop ();
```

Wir brauchen eine echte Kopie!



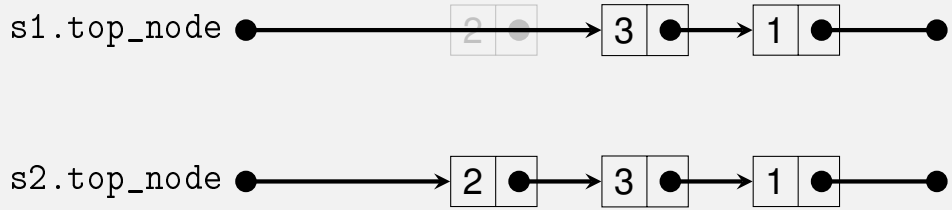

```
...
stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n";

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n";

s2.pop ();
```

Wir brauchen eine echte Kopie!



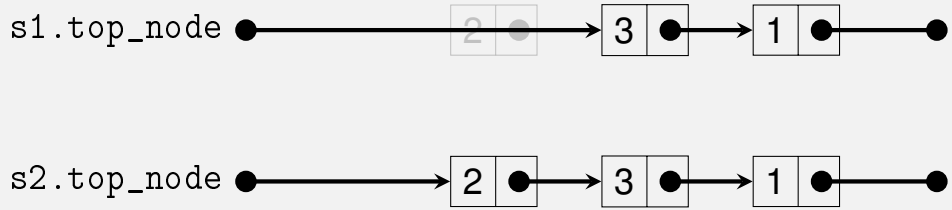

```
...
stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n";

s2.pop ();
```

Wir brauchen eine echte Kopie!



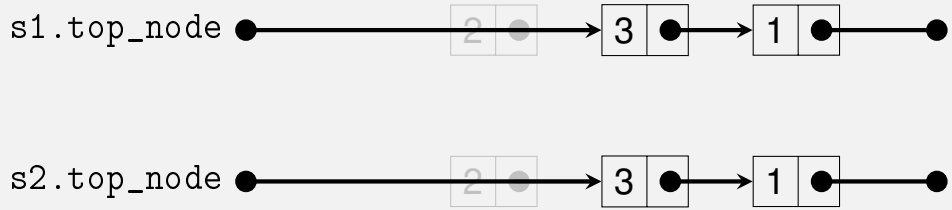

```
...
stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n";

s2.pop ();
```

Wir brauchen eine echte Kopie!



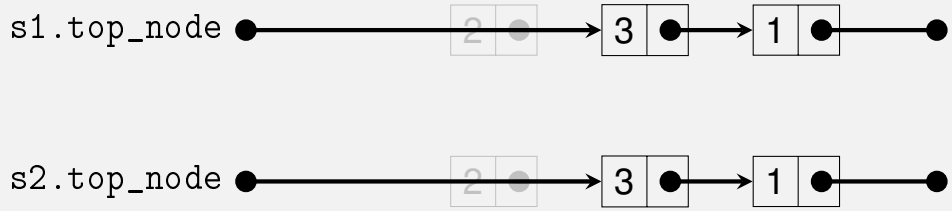

```
...
stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n"; // 3 1

s2.pop ();
```

Wir brauchen eine echte Kopie!




```
...
stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n"; // 3 1

s2.pop ();
```

Wir brauchen eine echte Kopie!

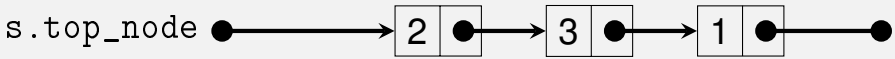



```
...
stack s2 = s1;
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n"; // 3 1

s2.pop ();  // ok
```

Mit dem Copy-Konstruktor klappt's!

Hier wird eine Kopierfunktion des `list_node` benutzt:

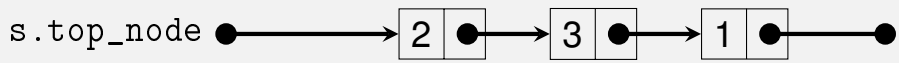
```
// POST: *this is initialized with a copy of s
stack::stack (const stack& s)
  : top_node (nullptr)
{
  if (s.top_node != nullptr)
    top_node = s.top_node->copy();
}
```



Mit dem Copy-Konstruktor klappt's!

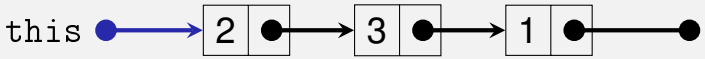
Hier wird eine Kopierfunktion des `list_node` benutzt:

```
// POST: *this is initialized with a copy of s
stack::stack (const stack& s)
  : top_node (nullptr)
{
  if (s.top_node != nullptr)
    top_node = s.top_node->copy();
}
```



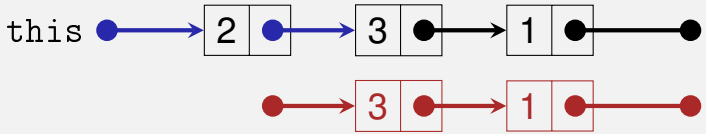
Die (rekursive) Kopierfunktion von `list_node`

```
// POST: pointer to a copy of the list starting
//       at *this is returned
list_node* list_node::copy () const
{
  if (next != nullptr)
    return new list_node (key, next->copy());
  else
    return new list_node (key, nullptr);
}
```



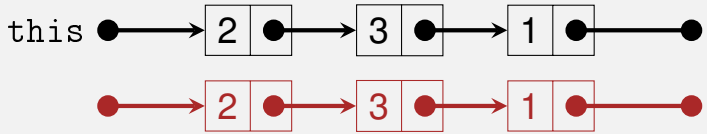
Die (rekursive) Kopierfunktion von `list_node`

```
// POST: pointer to a copy of the list starting
//       at *this is returned
list_node* list_node::copy () const
{
  if (next != nullptr)
    return new list_node (key, next->copy());
  else
    return new list_node (key, nullptr);
}
```



Die (rekursive) Kopierfunktion von `list_node`

```
// POST: pointer to a copy of the list starting
//       at *this is returned
list_node* list_node::copy () const
{
  if (next != nullptr)
    return new list_node (key, next->copy());
  else
    return new list_node (key, nullptr);
}
```



Initialisierung $\neq$ Zuweisung!

```
stack s1;
s1.push (1);
s1.push (3);
s1.push (2);
std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1

stack s2 = s1; // Initialisierung


s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n"; // 3 1
s2.pop (); // ok:  Copy-Konstruktor!
```

Initialisierung $\neq$ Zuweisung!

```
stack s1;
s1.push (1);
s1.push (3);
s1.push (2);
std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1

stack s2;
s2 = s1; // Zuweisung

s1.pop ();
std::cout << s1 << "\n"; // 3 1
s2.pop (); // Oops, Programmabsturz!
```

Mit dem Zuweisungsoperator klappt's!

Hier wird eine Aufräumfunktion des `list_node` benutzt:

```
// POST: *this (left operand) is getting a copy of s (right operand)
stack& stack::operator= (const stack& s)
{
  if (top_node != s.top_node) { // keine Selbstzuweisung!
    if (top_node != nullptr) {
      top_node->clear(); // loesche Listenknoten
      top_node = nullptr;
    }
    if (s.top_node != nullptr)
       top_node = s.top_node->copy(); // kopiere s nach *this
  }
  return *this; // Rueckgabe als L-Wert (Konvention)
}
```

Mit dem Zuweisungsoperator klappt's!

Hier wird eine Aufräumfunktion des `list_node` benutzt:

```
// POST: *this (left operand) is getting a copy of s (right operand)
stack& stack::operator= (const stack& s)
{
  if (top_node != s.top_node) { // keine Selbstzuweisung!
    if (top_node != nullptr) {
      top_node->clear(); // loesche Listenknoten
      top_node = nullptr;
    }
    if (s.top_node != nullptr)
       top_node = s.top_node->copy(); // kopiere s nach *this
  }
  return *this; // Rueckgabe als L-Wert (Konvention)
}
```

Mit dem Zuweisungsoperator klappt's!

Hier wird eine Aufräumfunktion des `list_node` benutzt:

```
// POST: *this (left operand) is getting a copy of s (right operand)
stack& stack::operator= (const stack& s)
{
  if (top_node != s.top_node) { // keine Selbstzuweisung!
    if (top_node != nullptr) {
      top_node->clear(); // loesche Listenknoten
      top_node = nullptr;
    }
    if (s.top_node != nullptr)
       top_node = s.top_node->copy(); // kopiere s nach *this
  }
  return *this; // Rueckgabe als L-Wert (Konvention)
}
```

Mit dem Zuweisungsoperator klappt's!

Hier wird eine Aufräumfunktion des `list_node` benutzt:

```
// POST: *this (left operand) is getting a copy of s (right operand)
stack& stack::operator= (const stack& s)
{
  if (top_node != s.top_node) { // keine Selbstzuweisung!
    if (top_node != nullptr) {
      top_node->clear(); // loesche Listenknoten
      top_node = nullptr;
    }
    if (s.top_node != nullptr)
       top_node = s.top_node->copy(); // kopiere s nach *this
  }
  return *this; // Rueckgabe als L-Wert (Konvention)
}
```

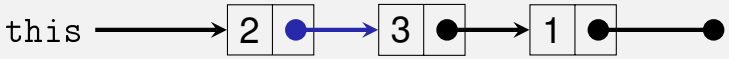
Mit dem Zuweisungsoperator klappt's!

Hier wird eine Aufräumfunktion des `list_node` benutzt:

```
// POST: *this (left operand) is getting a copy of s (right operand)
stack& stack::operator= (const stack& s)
{
  if (top_node != s.top_node) { // keine Selbstzuweisung!
    if (top_node != nullptr) {
      top_node->clear(); // loesche Listenknoten
      top_node = nullptr;
    }
    if (s.top_node != nullptr)
       top_node = s.top_node->copy(); // kopiere s nach *this
  }
  return *this; // Rueckgabe als L-Wert (Konvention)
}
```

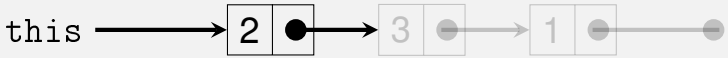
Die (rekursive) Aufräumfunktion des `list_node`

```
// POST: the list starting at *this is deleted
void list_node::clear ()
{
  if (next != nullptr)
    next->clear();
  delete this;
}
```



Die (rekursive) Aufräumfunktion des `list_node`

```
// POST: the list starting at *this is deleted
void list_node::clear ()
{
  if (next != nullptr)
    next->clear();
  delete this;
}
```



Die (rekursive) Aufräumfunktion des `list_node`

```
// POST: the list starting at *this is deleted
void list_node::clear ()
{
  if (next != nullptr)
    next->clear();
  delete this;
}
```

Zombie-Elemente

```
{
  stack s1; // local variable
  s1.push (1);
  s1.push (3);
  s1.push (2);
  std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1
}
// s1 has died (become invalid)...
```

Zombie-Elemente

```
{
  stack s1; // local variable
  s1.push (1);
  s1.push (3);
  s1.push (2);
  std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1
}
// s1 has died (become invalid)...
```

- ... aber die drei *Elemente* des Stapels `s1` leben weiter (Speicherleck)!

Zombie-Elemente

```
{
  stack s1; // local variable
  s1.push (1);
  s1.push (3);
  s1.push (2);
  std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1
}
// s1 has died (become invalid)...
```

- . . . aber die drei *Elemente* des Stapels `s1` leben weiter (Speicherleck)!
- Sie sollten zusammen mit `s1` aufgeräumt werden!

Mit dem Destruktor klappt's!

```
// POST: the dynamic memory of *this is deleted
stack::~stack()
{
  if (top_node != nullptr)
    top_node->clear();
}
```

Mit dem Destruktor klappt's!

```
// POST: the dynamic memory of *this is deleted
stack::~stack()
{
  if (top_node != nullptr)
    top_node->clear();
}
```

- löscht automatisch alle Stapelemente, wenn der Stapel ungültig wird

Mit dem Destruktor klappt's!

```
// POST: the dynamic memory of *this is deleted
stack::~stack()
{
  if (top_node != nullptr)
    top_node->clear();
}
```

- löscht automatisch alle Stapelemente, wenn der Stapel ungültig wird
- Unsere Stapel-Klasse befolgt jetzt die Richtlinie „Dynamischer Speicher“!

Dynamischer Datentyp

- Typ, der dynamischen Speicher verwaltet (z.B. unsere Klasse für Stapel)

Dynamischer Datentyp

- Typ, der dynamischen Speicher verwaltet (z.B. unsere Klasse für Stapel)
- Andere Anwendungen:
  - Listen (mit Einfügen und Löschen „in der Mitte“)
  - Bäume (nächste Woche)
  - Warteschlangen
  - Graphen

Dynamischer Datentyp

- Typ, der dynamischen Speicher verwaltet (z.B. unsere Klasse für Stapel)
- Mindestfunktionalität:
  - Konstruktoren
  - Destruktor
  - Copy-Konstruktor
  - Zuweisungsoperator

} Dreierregel: definiert eine Klasse eines davon, so sollte sie auch die anderen zwei definieren!