

21. Dynamische Datentypen und Speicherverwaltung

Problem

Letzte Woche: Dynamischer Datentyp

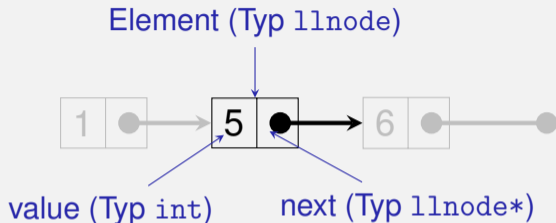
Haben im Vektor dynamischen Speicher angelegt, aber nicht wieder freigegeben. Insbesondere: keine Funktionen zum Entfernen von Elementen aus `llvec`.

Heute: Korrektes Speichermanagement!

Ziel: Stapelklasse mit Speichermanagement

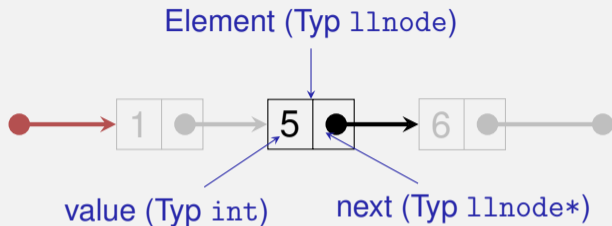
```
class stack{
public:
    // post: Element auf den Stapel legen
    void push(int value);
    // pre: Stack nicht leer
    // post: Entfernt oberstes Element vom Stapel
    void pop();
    // pre: Stack nicht leer
    // post: Gibt Wert des obersten Elementes zurück
    int top() const;
    // post: gibt zurück, ob Stack leer ist
    bool empty() const;
    // post: gibt den Stapel aus
    void print(std::ostream& out) const;
    ...
};
```

Erinnerung: Verkettete Liste



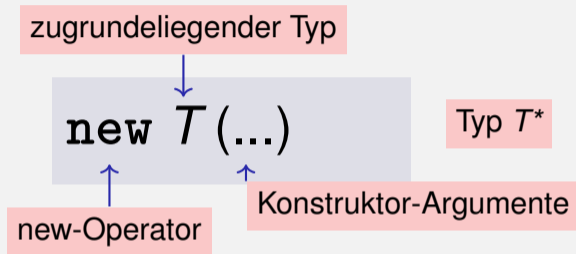
```
struct llnode {  
    int value;  
    llnode* next;  
    // constructor  
    llnode (int v, llnode* n) : value (v), next (n) {}  
};
```

Stapel = Zeiger aufs oberste Element



```
class stack {  
public:  
    void push (int value);  
    ...  
private:  
    llnode* topn;  
};
```

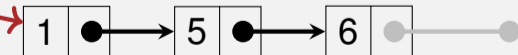
Erinnerung: der `new`-Ausdruck



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

```
void stack::push(int value){  
    topn = new llnode (value, topn);  
}
```

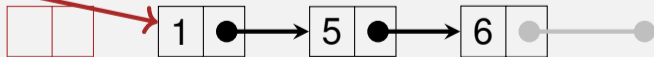
topn



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

```
void stack::push(int value){  
    topn = new llnode (value, topn);  
}
```

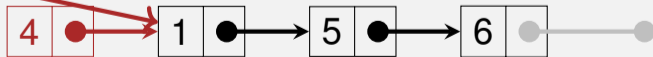
topn



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

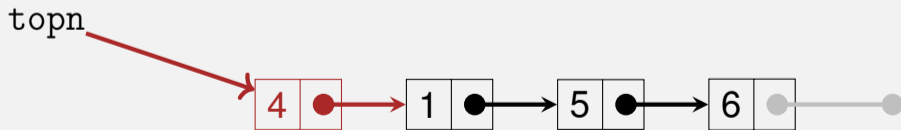
```
void stack::push(int value){  
    topn = new llnode (value, topn);  
}
```

topn



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

```
void stack::push(int value){  
    topn = new llnode (value, topn);  
}
```

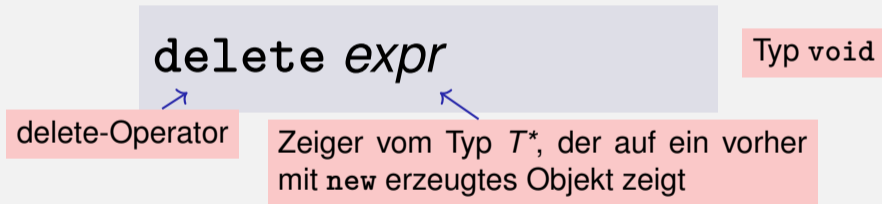


Der delete-Ausdruck

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

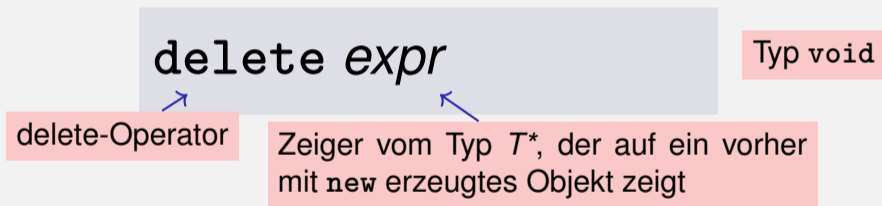
Der delete-Ausdruck

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 *dekonstruiert* (Erklärung folgt)
... und *Speicher wird 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**)

Aufpassen mit `new` und `delete`!

```
rational* t = new rational;  
rational* s = t;  
delete s;  
int nominator = (*t).denominator();
```

Aufpassen mit `new` und `delete`!

```
rational* t = new rational;
rational* s = t;
delete s;
int nominator = (*t).denominator();
```

← Speicher für t wird angelegt

Aufpassen mit `new` und `delete`!

```
rational* t = new rational; ← Speicher für t wird angelegt  
rational* s = t; ← Auch andere Zeiger können auf das Objekt zeigen..  
delete s;  
int nominator = (*t).denominator();
```

Aufpassen mit `new` und `delete`!

```
rational* t = new rational; ← Speicher für t wird angelegt  
rational* s = t; ← Auch andere Zeiger können auf das Objekt zeigen..  
delete s; ← ... und zur Freigabe verwendet werden.  
int nominator = (*t).denominator();
```

Aufpassen mit `new` und `delete`!

```
rational* t = new rational; ← Speicher für t wird angelegt  
rational* s = t; ← Auch andere Zeiger können auf das Objekt zeigen..  
delete s; ← ... und zur Freigabe verwendet werden.  
int nominator = (*t).denominator(); } Fehler: Speicher freigegeben!
```

↑
Dereferenzieren eines „dangling pointers“

- Zeiger auf freigegebene Objekte: hängende Zeiger (*dangling pointers*)

Aufpassen mit `new` und `delete`!

```
rational* t = new rational; ← Speicher für t wird angelegt
rational* s = t; ← Auch andere Zeiger können auf das Objekt zeigen..
delete s; ← ... und zur Freigabe verwendet werden.
int nominator = (*t).denominator(); } Fehler: Speicher freigegeben!
```

↑
Dereferenzieren eines „dangling pointers“

- Zeiger auf freigegebene Objekte: hängende Zeiger (*dangling pointers*)
- Mehrfache Freigabe eines Objektes mit `delete` ist ein ähnlicher schwerer Fehler.

Weiter mit dem Stapel:

pop()

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

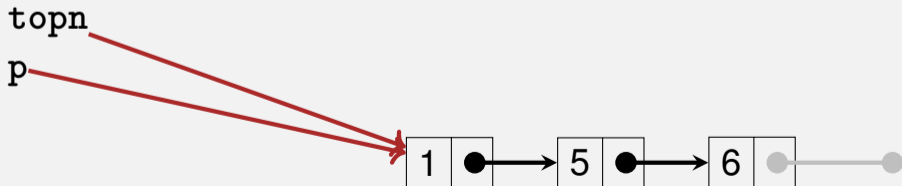
topn



Weiter mit dem Stapel:

pop()

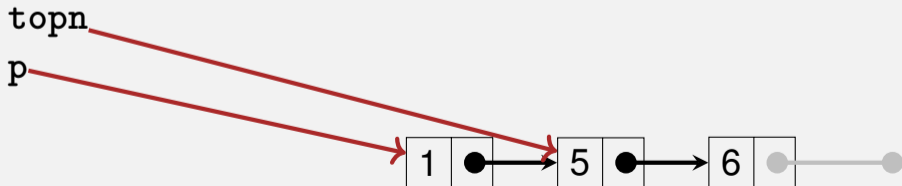
```
void stack::pop(){  
    assert (!empty());  
    llnode* p = topn;  
    topn = topn->next;  
    delete p;  
}
```



Weiter mit dem Stapel:

pop()

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

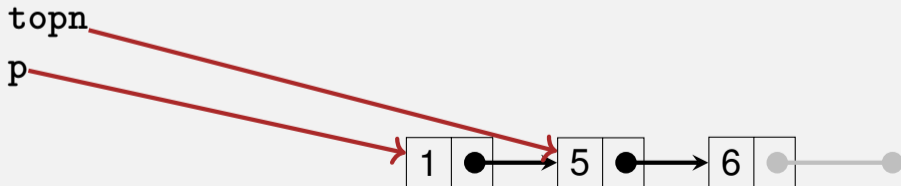


Weiter mit dem Stapel:

pop()

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

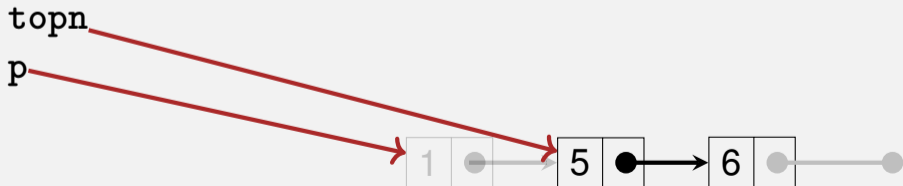
Erinnerung: Abkürzung für (*topn).next



Weiter mit dem Stapel:

pop()

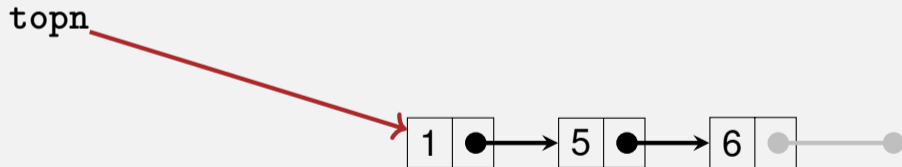
```
void stack::pop(){  
    assert (!empty());  
    llnode* p = topn;  
    topn = topn->next;  
    delete p;  
}
```



Stapel ausgeben:

print()

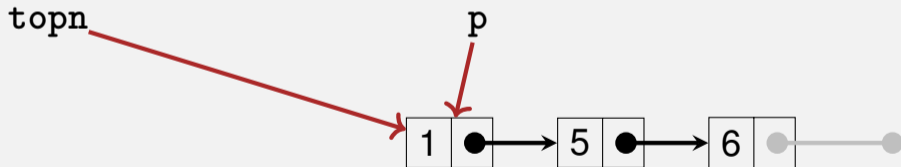
```
void stack::print (std::ostream& out) const {  
    for(const llnode* p = topn; p != nullptr; p = p->next)  
        out << p->value << " ";  
}
```



Stapel ausgeben:

print()

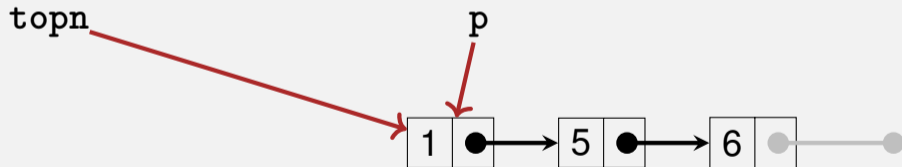
```
void stack::print (std::ostream& out) const {  
    for(const llnode* p = topn; p != nullptr; p = p->next)  
        out << p->value << " ";  
}
```



Stapel ausgeben:

print()

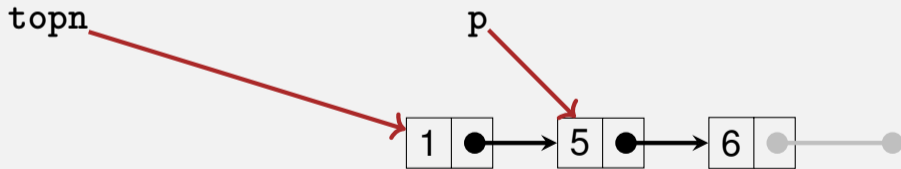
```
void stack::print (std::ostream& out) const {  
    for(const llnode* p = topn; p != nullptr; p = p->next)  
        out << p->value << " "; // 1  
}
```



Stapel ausgeben:

print()

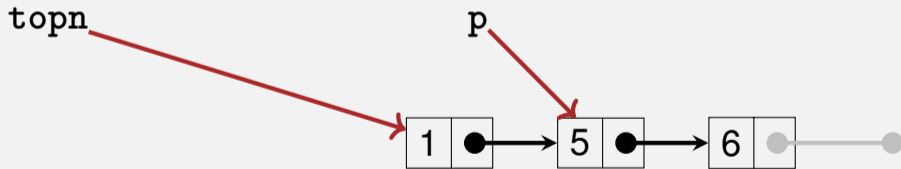
```
void stack::print (std::ostream& out) const {  
    for(const llnode* p = topn; p != nullptr; p = p->next)  
        out << p->value << " "; // 1  
}
```



Stapel ausgeben:

print()

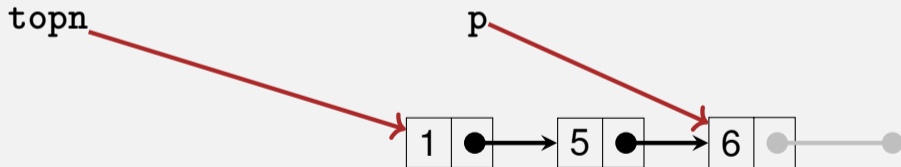
```
void stack::print (std::ostream& out) const {  
    for(const llnode* p = topn; p != nullptr; p = p->next)  
        out << p->value << " "; // 1 5  
}
```



Stapel ausgeben:

print()

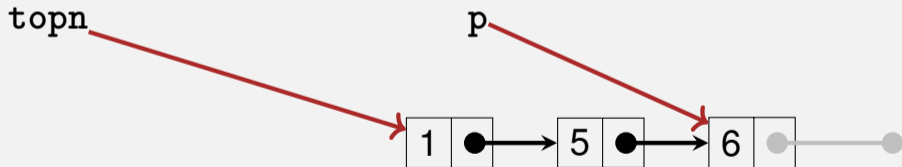
```
void stack::print (std::ostream& out) const {  
    for(const llnode* p = topn; p != nullptr; p = p->next)  
        out << p->value << " "; // 1 5  
}
```



Stapel ausgeben:

print()

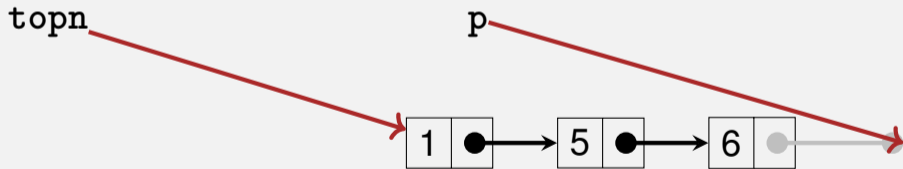
```
void stack::print (std::ostream& out) const {  
    for(const llnode* p = topn; p != nullptr; p = p->next)  
        out << p->value << " "; // 1 5 6  
}
```



Stapel ausgeben:

print()

```
void stack::print (std::ostream& out) const {  
    for(const llnode* p = topn; p != nullptr; p = p->next)  
        out << p->value << " "; // 1 5 6  
}
```



Stapel ausgeben:

operator<<

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

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

empty(), top()

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

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

Leerer Stapel

```
class stack{
public:
    stack() : topn (nullptr) {} // default constructor

    void push(int value);
    void pop();
    void print(std::ostream& out) const;
    int top() const;
    bool empty() const;
private:
    llnode* topn;
}
```

Zombie-Elemente

```
{  
    stack s1; // lokale Variable  
    s1.push (1);  
    s1.push (3);  
    s1.push (2);  
    std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1  
}  
// s1 ist gestorben (nicht mehr zugreifbar)
```


Zombie-Elemente

```
{  
    stack s1; // lokale Variable  
    s1.push (1);  
    s1.push (3);  
    s1.push (2);  
    std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1  
}  
// s1 ist gestorben (nicht mehr zugreifbar)
```

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

Zombie-Elemente

```
{  
    stack s1; // lokale Variable  
    s1.push (1);  
    s1.push (3);  
    s1.push (2);  
    std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1  
}  
// s1 ist gestorben (nicht mehr zugreifbar)
```

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

Der Destruktor

- Der Destruktor einer Klasse T ist die eindeutige Memberfunktion mit Deklaration

$$\sim T ();$$

- Wird automatisch aufgerufen, wenn die Speicherdauer eines Klassenobjekts vom Typ T endet – z.B. bei Aufruf von `delete` auf einem Objekt vom Typ T^* oder wenn der Gültigkeitsbereich eines Objektes vom Typ T endet.
- Falls kein Destruktor deklariert ist, so wird er automatisch erzeugt und ruft die Destruktoren für die Membervariablen auf (Zeiger `topn`, kein Effekt – Grund für Zombie-Elemente)

Mit dem Destruktor klappt's!

```
// POST: the dynamic memory of *this is deleted
stack::~~stack(){
    while (topn != nullptr){
        llnode* t = topn;
        topn = t->next;
        delete t;
    }
}
```

Mit dem Destruktor klappt's!

```
// POST: the dynamic memory of *this is deleted
stack::~~stack(){
    while (topn != nullptr){
        llnode* t = topn;
        topn = t->next;
        delete t;
    }
}
```

- löscht automatisch alle Stapelemente, wenn der Stapel ungültig wird

Mit dem Destruktor klappt's!

```
// POST: the dynamic memory of *this is deleted
stack::~~stack(){
    while (topn != nullptr){
        llnode* t = topn;
        topn = t->next;
        delete t;
    }
}
```

- löscht automatisch alle Stapелеlemente, wenn der Stapel ungültig wird
- Unsere Stapel-Klasse scheint jetzt die Richtlinie “Dynamischer Speicher” zu befolgen (?)

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!
```

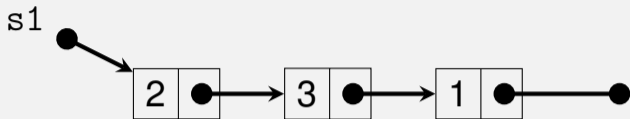
```
stack s1;  
s1.push (1);  
s1.push (3);  
s1.push (2);  
std::cout << s1 << "\n"; // 2 3 1
```

```
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?



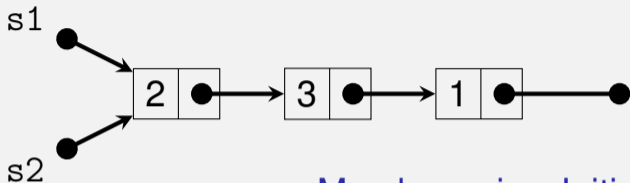
...

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

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

```
s2.pop ();
```

Was ist hier schiefgegangen?



Memberweise Initialisierung: kopiert
nur den topn-Zeiger

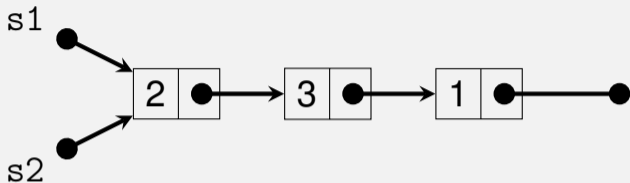
...

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

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

```
s2.pop ();
```

Was ist hier schiefgegangen?



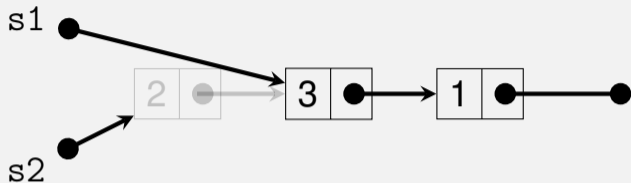
...

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

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

```
s2.pop ();
```

Was ist hier schiefgegangen?



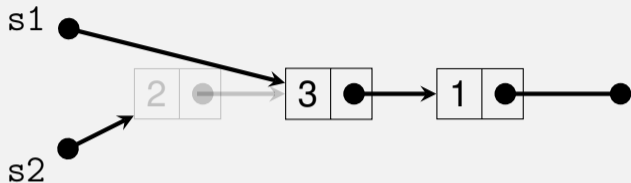
...

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

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

```
s2.pop ();
```

Was ist hier schiefgegangen?



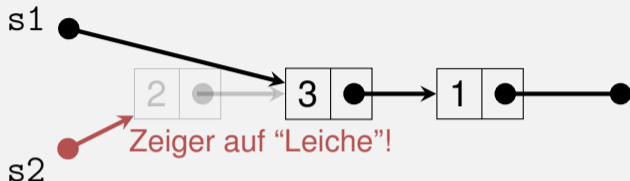
...

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

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

```
s2.pop ();
```

Was ist hier schiefgegangen?



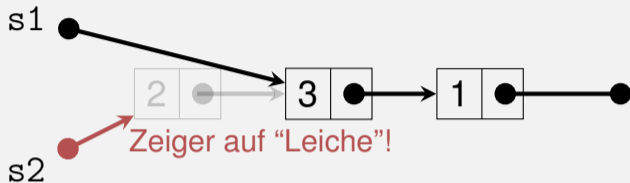
...

```
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!
```

Das eigentliche Problem

Schon das geht schief:

```
{
  stack s1;
  s1.push(1);
  stack s2 = s1;
}
```

Beim Verlassen des Gültigkeitsbereiches werden beide Stacks aufgeräumt (dekonstruiert). Aber beide Stacks versuchen dieselben Daten zu löschen, denn sie haben *Zugriff auf denselben Zeiger*.

Lösungsmöglichkeiten

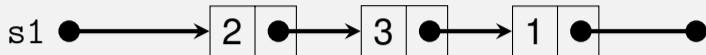
Smart-Pointers (werden hier nicht weiter vertieft):

- Zähle die Anzahl Zeiger, die auf ein Objekt verweisen. Lösche nur wenn diese Anzahl auf 0 zurückfällt: `std::shared_pointer`
- Verhindere, dass mehrere Zeiger auf ein Objekt zeigen können: `std::unique_pointer`.

oder:

- Wir erstellen eine echte Kopie aller Daten – wie folgt.

Wir erstellen eine echte Kopie!



...

```
stack s2 = s1;
```

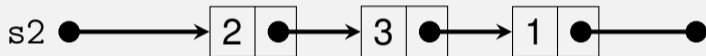
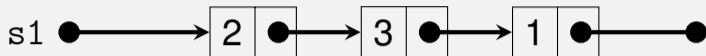
```
std::cout << s2 << "\n";
```

```
s1.pop ();
```

```
std::cout << s1 << "\n";
```

```
s2.pop ();
```

Wir erstellen eine echte Kopie!



...

```
stack s2 = s1;
```

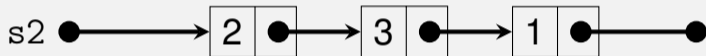
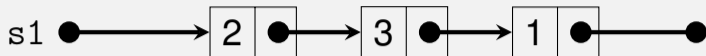
```
std::cout << s2 << "\n";
```

```
s1.pop ();
```

```
std::cout << s1 << "\n";
```

```
s2.pop ();
```

Wir erstellen eine echte Kopie!



...

```
stack s2 = s1;
```

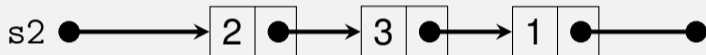
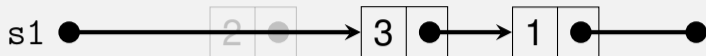
```
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1
```

```
s1.pop ();
```

```
std::cout << s1 << "\n";
```

```
s2.pop ();
```

Wir erstellen eine echte Kopie!



...

```
stack s2 = s1;
```

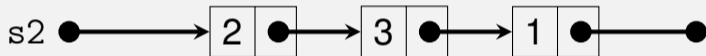
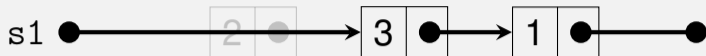
```
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1
```

```
s1.pop ();
```

```
std::cout << s1 << "\n";
```

```
s2.pop ();
```

Wir erstellen eine echte Kopie!



...

```
stack s2 = s1;
```

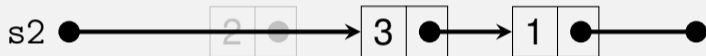
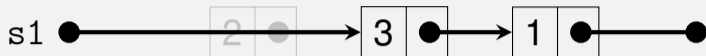
```
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1
```

```
s1.pop ();
```

```
std::cout << s1 << "\n"; // 3 1
```

```
s2.pop ();
```


Wir erstellen eine echte Kopie!



...

```
stack s2 = s1;
```

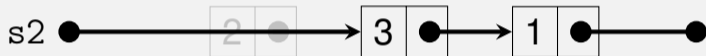
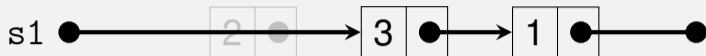
```
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1
```

```
s1.pop ();
```

```
std::cout << s1 << "\n"; // 3 1
```

```
s2.pop ();
```

Wir erstellen eine echte Kopie!



...

```
stack s2 = s1;
```

```
std::cout << s2 << "\n"; // 2 3 1
```

```
s1.pop ();
```

```
std::cout << s1 << "\n"; // 3 1
```

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

Der Copy-Konstruktor

- Der Copy-Konstruktor einer Klasse T ist der eindeutige Konstruktor mit Deklaration

$$T(\text{const } T\& x);$$

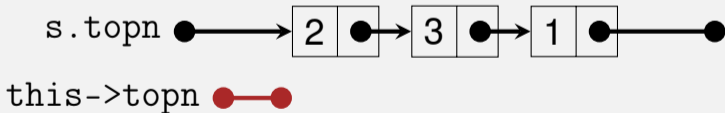
- wird automatisch aufgerufen, wenn Werte vom Typ T mit Werten vom Typ T *initialisiert* werden

$$T\ x = t; \quad (t \text{ vom Typ } T)$$
$$T\ x(t);$$

- Falls kein Copy-Konstruktor deklariert ist, so wird er automatisch erzeugt (und initialisiert memberweise – Grund für obiges Problem)

Mit dem Copy-Konstruktor klappt's!

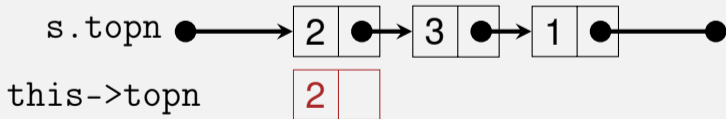
```
// POST: *this is initialized with a copy of s
stack::stack (const stack& s) : topn (nullptr) {
    if (s.topn == nullptr) return;
    topn = new llnode(s.topn->value, nullptr);
    llnode* prev = topn;
    for(llnode* n = s.topn->next; n != nullptr; n = n->next){
        llnode* copy = new llnode(n->value, nullptr);
        prev->next = copy;
        prev = copy;
    }
}
```



prev

Mit dem Copy-Konstruktor klappt's!

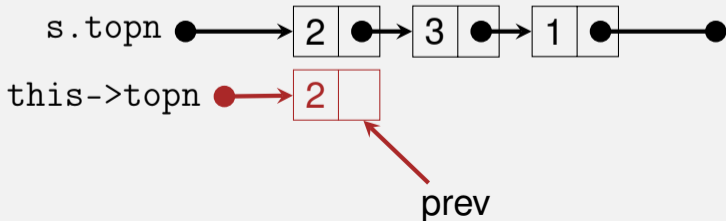
```
// POST: *this is initialized with a copy of s
stack::stack (const stack& s) : topn (nullptr) {
    if (s.topn == nullptr) return;
    topn = new llnode(s.topn->value, nullptr);
    llnode* prev = topn;
    for(llnode* n = s.topn->next; n != nullptr; n = n->next){
        llnode* copy = new llnode(n->value, nullptr);
        prev->next = copy;
        prev = copy;
    }
}
```



prev

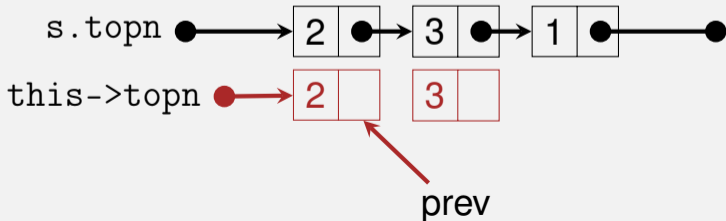
Mit dem Copy-Konstruktor klappt's!

```
// POST: *this is initialized with a copy of s
stack::stack (const stack& s) : topn (nullptr) {
    if (s.topn == nullptr) return;
    topn = new llnode(s.topn->value, nullptr);
    llnode* prev = topn;
    for(llnode* n = s.topn->next; n != nullptr; n = n->next){
        llnode* copy = new llnode(n->value, nullptr);
        prev->next = copy;
        prev = copy;
    }
}
```



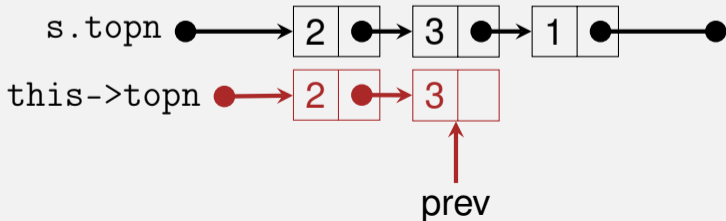
Mit dem Copy-Konstruktor klappt's!

```
// POST: *this is initialized with a copy of s
stack::stack (const stack& s) : topn (nullptr) {
    if (s.topn == nullptr) return;
    topn = new llnode(s.topn->value, nullptr);
    llnode* prev = topn;
    for(llnode* n = s.topn->next; n != nullptr; n = n->next){
        llnode* copy = new llnode(n->value, nullptr);
        prev->next = copy;
        prev = copy;
    }
}
```



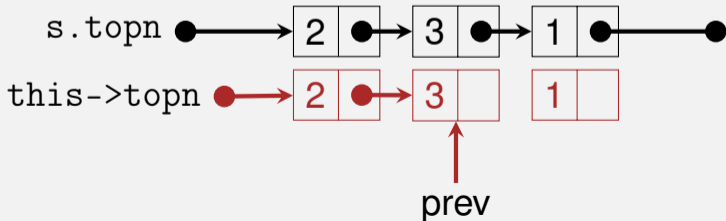
Mit dem Copy-Konstruktor klappt's!

```
// POST: *this is initialized with a copy of s
stack::stack (const stack& s) : topn (nullptr) {
    if (s.topn == nullptr) return;
    topn = new llnode(s.topn->value, nullptr);
    llnode* prev = topn;
    for(llnode* n = s.topn->next; n != nullptr; n = n->next){
        llnode* copy = new llnode(n->value, nullptr);
        prev->next = copy;
        prev = copy;
    }
}
```



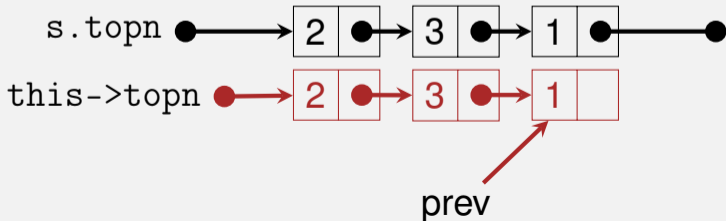
Mit dem Copy-Konstruktor klappt's!

```
// POST: *this is initialized with a copy of s
stack::stack (const stack& s) : topn (nullptr) {
    if (s.topn == nullptr) return;
    topn = new llnode(s.topn->value, nullptr);
    llnode* prev = topn;
    for(llnode* n = s.topn->next; n != nullptr; n = n->next){
        llnode* copy = new llnode(n->value, nullptr);
        prev->next = copy;
        prev = copy;
    }
}
```



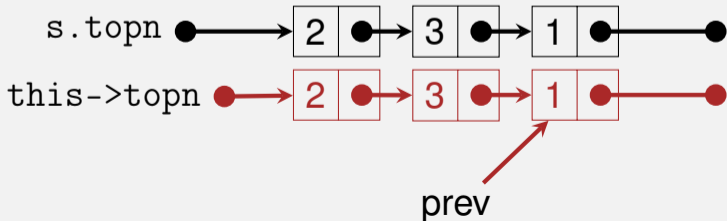
Mit dem Copy-Konstruktor klappt's!

```
// POST: *this is initialized with a copy of s
stack::stack (const stack& s) : topn (nullptr) {
    if (s.topn == nullptr) return;
    topn = new llnode(s.topn->value, nullptr);
    llnode* prev = topn;
    for(llnode* n = s.topn->next; n != nullptr; n = n->next){
        llnode* copy = new llnode(n->value, nullptr);
        prev->next = copy;
        prev = copy;
    }
}
```



Mit dem Copy-Konstruktor klappt's!

```
// POST: *this is initialized with a copy of s
stack::stack (const stack& s) : topn (nullptr) {
    if (s.topn == nullptr) return;
    topn = new llnode(s.topn->value, nullptr);
    llnode* prev = topn;
    for(llnode* n = s.topn->next; n != nullptr; n = n->next){
        llnode* copy = new llnode(n->value, nullptr);
        prev->next = copy;
        prev = copy;
    }
}
```



NB: rekursives Kopieren

```
llnode* copy (node* that){  
    if (that == nullptr) return nullptr;  
    return new llnode(that->value, copy(that->next));  
}
```

Elegant, oder?

⁷nicht von dem Stapel, den wir gerade implementieren, sondern vom Aufrufstapel der Rekursion

NB: rekursives Kopieren

```
llnode* copy (node* that){  
    if (that == nullptr) return nullptr;  
    return new llnode(that->value, copy(that->next));  
}
```

Elegant, oder? Warum haben wir das nicht gleich so gemacht?

⁷nicht von dem Stapel, den wir gerade implementieren, sondern vom Aufrufstapel der Rekursion

NB: rekursives Kopieren

```
llnode* copy (node* that){  
    if (that == nullptr) return nullptr;  
    return new llnode(that->value, copy(that->next));  
}
```

Elegant, oder? Warum haben wir das nicht gleich so gemacht?

Grund: verkettete Listen können sehr lang werden. Dann könnte `copy` zum Stapelüberlauf⁷ führen. Aufrufstapel ist nämlich meist kleiner als Heapspeicher.

⁷nicht von dem Stapel, den wir gerade implementieren, sondern vom Aufrufstapel der Rekursion

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!
```


Der Zuweisungsoperator

- Überladung von `operator=` als Memberfunktion
- Wie Copy-Konstruktor ohne Initialisierer, aber zusätzlich
 - Freigabe des Speichers für den „alten“ Wert
 - Prüfen auf Selbstzuweisungen (`s1=s1`), die keinen Effekt haben sollen
- Falls kein Zuweisungsoperator deklariert ist, so wird er automatisch erzeugt (und weist memberweise zu – Grund für obiges Problem)

Mit dem Zuweisungsoperator klappt's!

```
// POST: *this (left operand) becomes a  
//           copy of s (right operand)  
stack& stack::operator= (const stack& s)
```

Mit dem Zuweisungsoperator klappt's!

```
// POST: *this (left operand) becomes a  
//           copy of s (right operand)  
stack& stack::operator= (const stack& s){  
    if (topn != s.topn){ // keine Selbstzuweisung
```

Mit dem Zuweisungsoperator klappt's!

```
// POST: *this (left operand) becomes a
//           copy of s (right operand)
stack& stack::operator= (const stack& s){
    if (topn != s.topn){ // keine Selbstzuweisung
        stack copy = s; // Kopierkonstruktor
    }
}
```

Mit dem Zuweisungsoperator klappt's!

```
// POST: *this (left operand) becomes a  
//           copy of s (right operand)  
stack& stack::operator= (const stack& s){  
    if (topn != s.topn){ // keine Selbstzuweisung  
        stack copy = s; // Kopierkonstruktor  
        std::swap(topn, copy.topn); // copy hat nun den Müll!
```

Mit dem Zuweisungsoperator klappt's!

```
// POST: *this (left operand) becomes a
//           copy of s (right operand)
stack& stack::operator= (const stack& s){
    if (topn != s.topn){ // keine Selbstzuweisung
        stack copy = s; // Kopierkonstruktor
        std::swap(topn, copy.topn); // copy hat nun den Müll!
    } // copy wird aufgeräumt -> Dekonstruktion
    return *this; // Rueckgabe als L-Wert (Konvention)
}
```

Mit dem Zuweisungsoperator klappt's!

```
// POST: *this (left operand) becomes a
//           copy of s (right operand)
stack& stack::operator= (const stack& s){
    if (topn != s.topn){ // keine Selbstzuweisung
        stack copy = s; // Kopierkonstruktor
        std::swap(topn, copy.topn); // copy hat nun den Müll!
    } // copy wird aufgeräumt -> Dekonstruktion
    return *this; // Rueckgabe als L-Wert (Konvention)
}
```

Cooler Trick! 😊

Fertig

```
class stack{
public:
    stack(); // constructor
    ~stack(); // destructor
    stack(const stack& s); // copy constructor
    stack& operator=(const stack& s); // assignment operator

    void push(int value);
    void pop();
    int top() const;
    bool empty() const;
    void print(std::ostream& out) const;
private:
    llnode* topn;
}
```


Dynamischer Datentyp

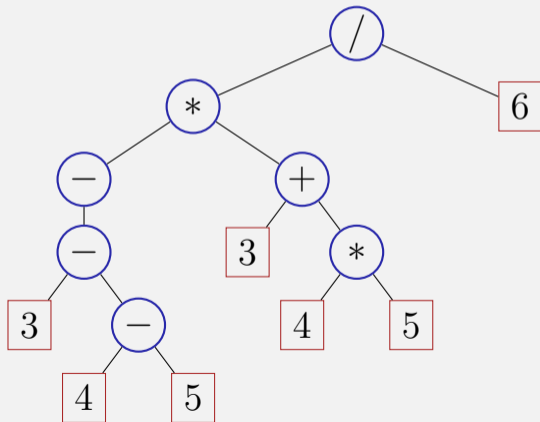
- Typ, der dynamischen Speicher verwaltet (z.B. unsere Klasse für Stapel)
- Mindestfunktionalität:
 - Konstruktoren
 - Destruktor
 - Copy-Konstruktor
 - Zuweisungsoperator

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 muss sie auch die anderen zwei definieren!

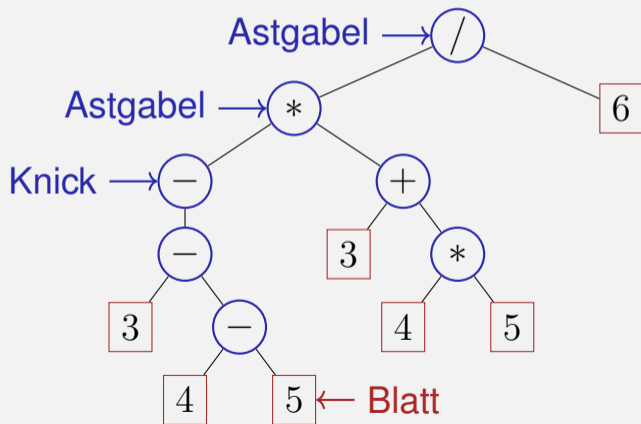
(Ausdrucks-)Bäume

$$-(3-(4-5))*(3+4*5)/6$$



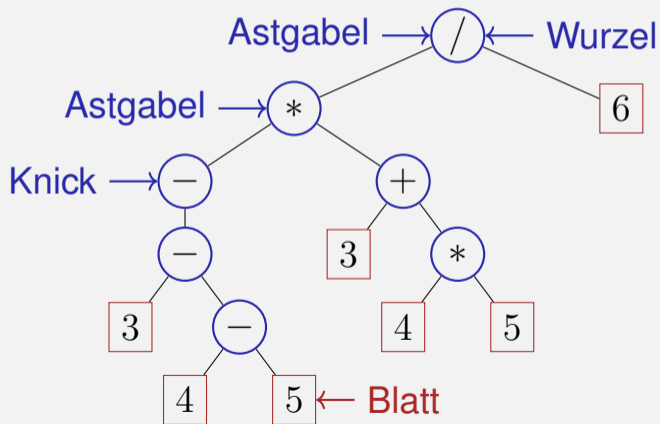
(Ausdrucks-)Bäume

$$-(3-(4-5))*(3+4*5)/6$$



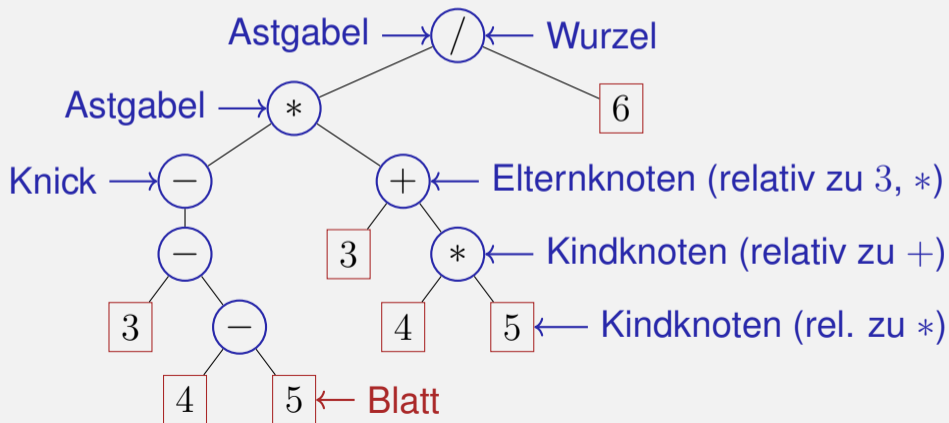
(Ausdrucks-)Bäume

$$-(3-(4-5))*(3+4*5)/6$$

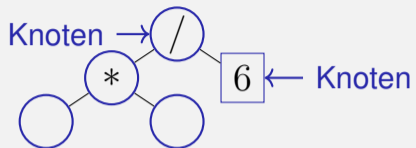


(Ausdrucks-)Bäume

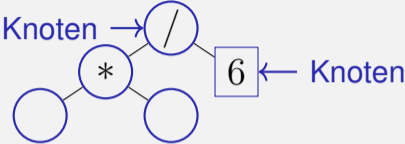
$$-(3-(4-5))*(3+4*5)/6$$



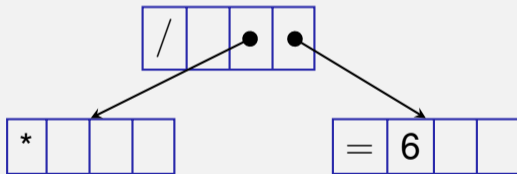
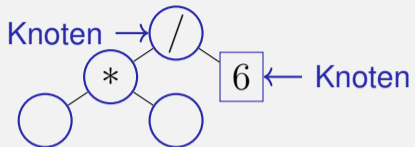
Astgabeln + Blätter + Knicke = Knoten



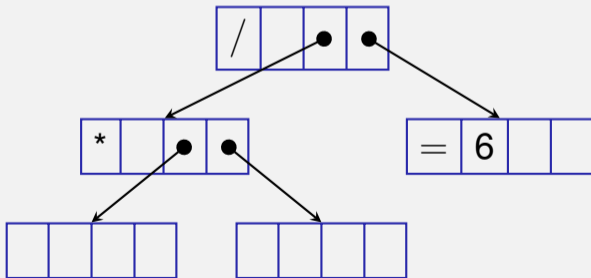
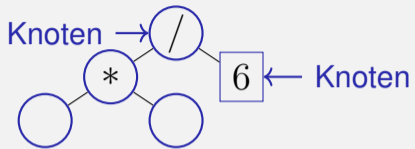
Astgabeln + Blätter + Knicke = Knoten



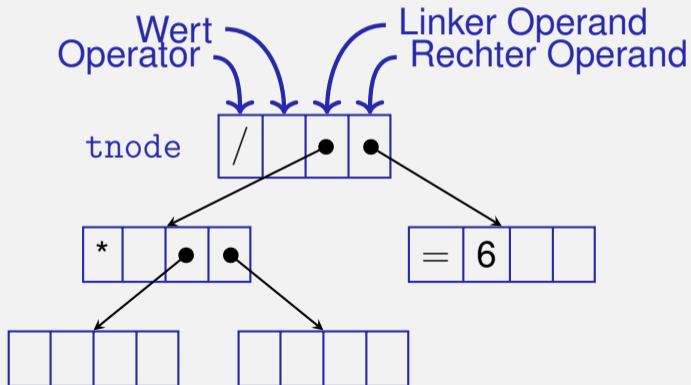
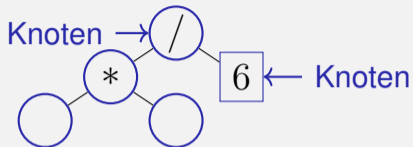
Astgabeln + Blätter + Knicke = Knoten



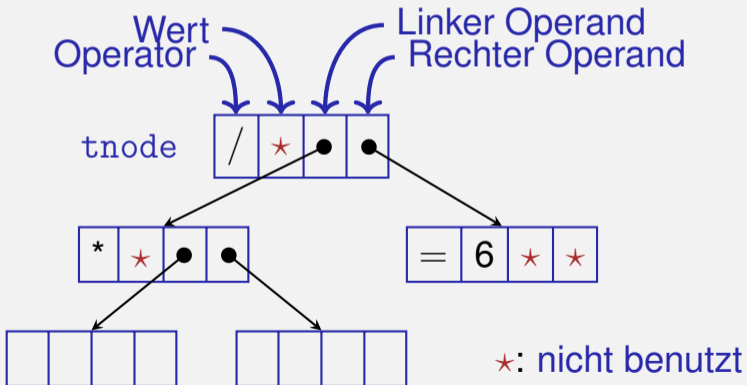
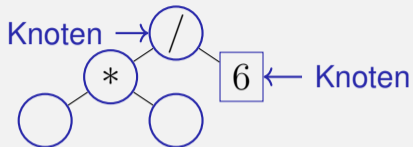
Astgabeln + Blätter + Knicke = Knoten



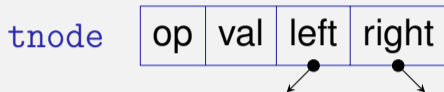
Astgabeln + Blätter + Knicke = Knoten



Astgabeln + Blätter + Knicke = Knoten



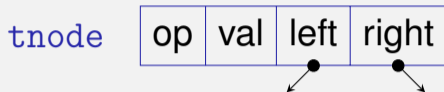
Knoten (struct tnode)



```
struct tnode {
    char op; // leaf node: op is '='
             // internal node: op is '+', '-', '*', or '/'
    double val;
    tnode* left;
    tnode* right;

    tnode(char o, double v, tnode* l, tnode* r)
        : op(o), val(v), left(l), right(r) {}
};
```

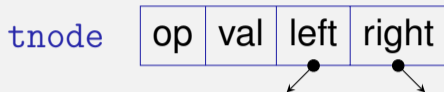
Knoten (struct tnode)



```
struct tnode {
    char op; // leaf node: op is '='
             // internal node: op is '+', '-', '*', or '/'
    double val;
    tnode* left; // == nullptr for unary minus
    tnode* right;

    tnode(char o, double v, tnode* l, tnode* r)
        : op(o), val(v), left(l), right(r) {}
};
```

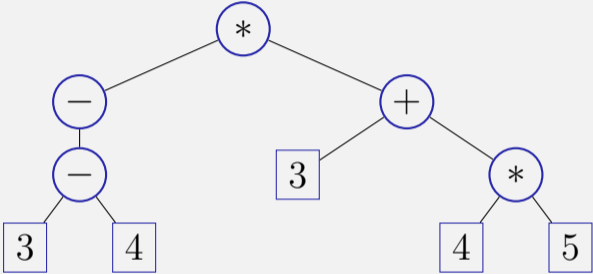
Knoten (struct tnode)



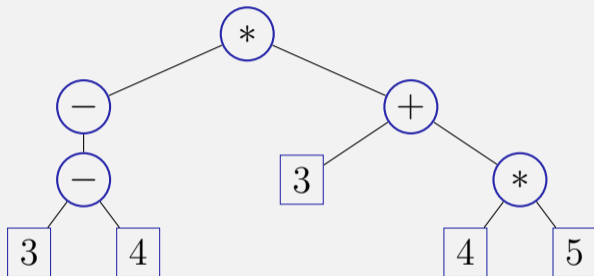
```
struct tnode {
    char op; // leaf node: op is '='
             // internal node: op is '+', '-', '*', or '/'
    double val;
    tnode* left; // == nullptr for unary minus
    tnode* right;

    tnode(char o, double v, tnode* l, tnode* r)
        : op(o), val(v), left(l), right(r) {}
};
```

Grösse = Knoten in Teilbäumen zählen

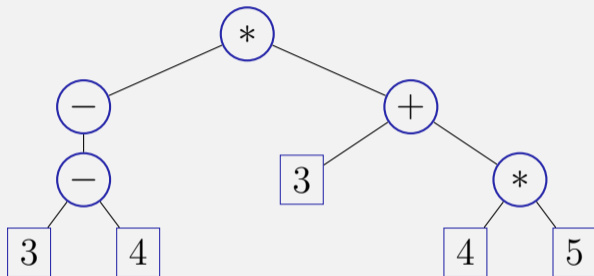


Grösse = Knoten in Teilbäumen zählen



- Grösse eines Blattes: 1
- Grösse anderer Knoten: 1 + Gesamtgrösse aller Kindknoten

Grösse = Knoten in Teilbäumen zählen



- Grösse eines Blattes: 1
- Grösse anderer Knoten: 1 + Gesamtgrösse aller Kindknoten
- Z.B. Grösse des „+“-Knoten ist 5

Knoten in Teilbäumen zählen

```
// POST: returns the size (number of nodes) of
//       the subtree with root n
int size (const tnode* n) {
    if (n){ // shortcut for n != nullptr
        return size(n->left) + size(n->right) + 1;
    }
    return 0;
}
```



Teilbäume auswerten

```
// POST: evaluates the subtree with root n
```

```
double eval(const tnode* n){  
    assert(n);  
    if (n->op == '=') return n->val; ← Blatt...  
    double l = 0;                               ...oder Astgabel:  
    if (n->left) l = eval(n->left); ← op unär, oder linker Ast  
    double r = eval(n->right); ← rechter Ast  
    switch(n->op){  
        case '+': return l+r;  
        case '-': return l-r;  
        case '*': return l*r;  
        case '/': return l/r;  
        default: return 0;  
    }  
}
```



Teilbäume klonen

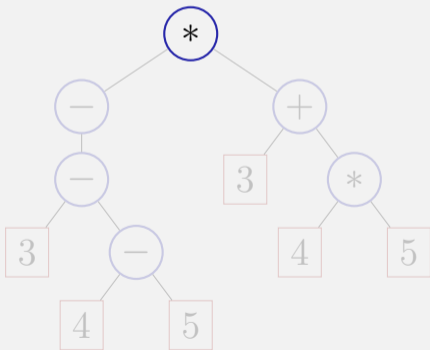
```
// POST: a copy of the subtree with root n is made
//       and a pointer to its root node is returned
tnode* copy (const tnode* n) {
    if (n == nullptr)
        return nullptr;
    return new tnode (n->op, n->val, copy(n->left), copy(n->right));
}
```



Teilbäume fällen

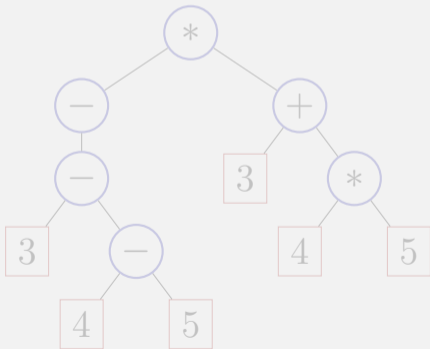
```
// POST: all nodes in the subtree with root n are deleted
```

```
void clear(tnode* n) {  
    if(n){  
        clear(n->left);  
        clear(n->right);  
        delete n;  
    }  
}
```



Teilbäume fällen

```
// POST: all nodes in the subtree with root n are deleted
void clear(tnode* n) {
    if(n){
        clear(n->left);
        clear(n->right);
        delete n;
    }
}
```



Teilbäume nutzen

```
// Construct a tree for  $1 - (-(3 + 7))$ 
tnode* n1 = new tnode( '=', 3, nullptr, nullptr);
tnode* n2 = new tnode( '=', 7, nullptr, nullptr);
tnode* n3 = new tnode( '+', 0, n1, n2);
tnode* n4 = new tnode( '-', 0, nullptr, n3);
tnode* n5 = new tnode( '=', 1, nullptr, nullptr);
tnode* root = new tnode( '-', 0, n5, n4);

// Evaluate the overall tree
std::cout << "1 - (-(3 + 7)) = " << eval(root) << '\n';

// Evaluate a subtree
std::cout << "3 + 7 = " << eval(n3) << '\n';

clear(root); // free memory
```

Bäume pflanzen

```
class texpression {  
public:  
    texpression (double d) ← erzeugt Baum mit  
        : root (new tnode ('=', d, 0, 0)) {}  
    ...  
private:  
    tnode* root;  
};
```

Bäume wachsen lassen

```
texpression& texpression::operator-= (const texpression& e)
{
    assert (e.root);
    root = new tnode ('-', 0, root, copy(e.root));
    return *this;
}
```



Bäume wachsen lassen

```
texpression& texpression::operator-= (const texpression& e)
{
    assert (e.root);
    root = new tnode ('-', 0, root, copy(e.root));
    return *this;
}
```



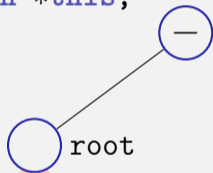
*this



e

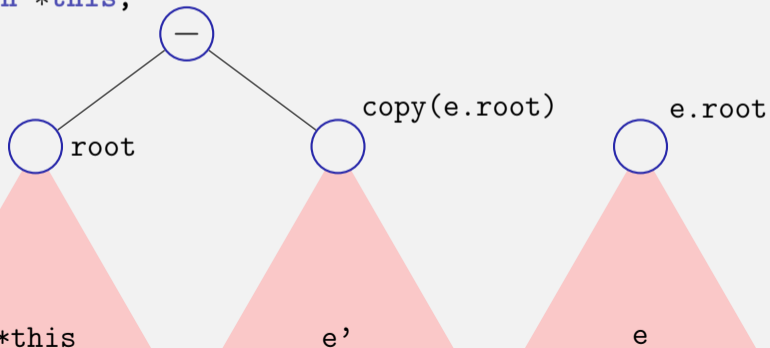
Bäume wachsen lassen

```
texpression& texpression::operator-= (const texpression& e)
{
    assert (e.root);
    root = new tnode ('-', 0, root, copy(e.root));
    return *this;
}
```



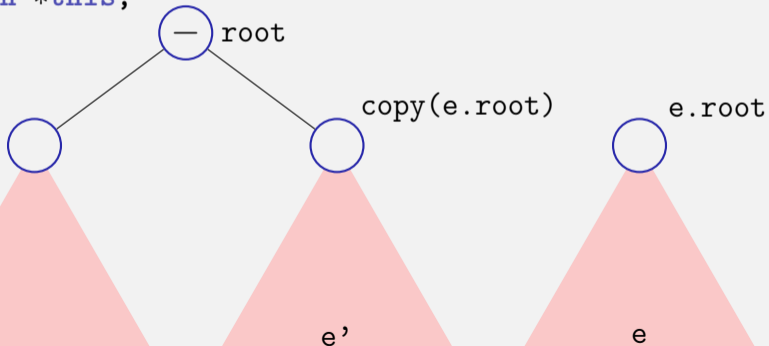
Bäume wachsen lassen

```
texpression& texpression::operator-= (const texpression& e)
{
    assert (e.root);
    root = new tnode ('-', 0, root, copy(e.root));
    return *this;
}
```



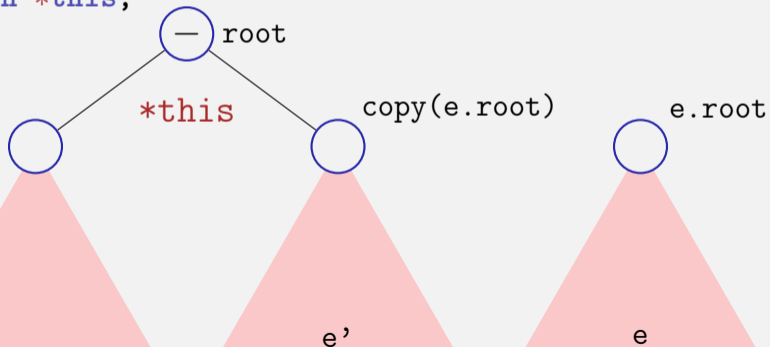
Bäume wachsen lassen

```
texpression& texpression::operator-= (const texpression& e)
{
    assert (e.root);
    root = new tnode ('-', 0, root, copy(e.root));
    return *this;
}
```



Bäume wachsen lassen

```
texpression& texpression::operator-= (const texpression& e)
{
    assert (e.root);
    root = new tnode ('-', 0, root, copy(e.root));
    return *this;
}
```



Bäume züchten

```
texpression operator- (const texpression& l,  
                      const texpression& r){  
    texpression result = l;  
    return result -= r;  
}
```

```
texpression a = 3;  
texpression b = 4;  
texpression c = 5;  
texpression d = a-b-c;
```

Bäume züchten

```
texpression operator- (const texpression& l,  
                      const texpression& r){  
    texpression result = l;  
    return result -= r;  
}
```

```
texpression a = 3;  
texpression b = 4;  
texpression c = 5;  
texpression d = a-b-c;
```

3

Bäume züchten

```
texpression operator- (const texpression& l,  
                      const texpression& r){  
    texpression result = l;  
    return result -= r;  
}
```

```
texpression a = 3;  
texpression b = 4;  
texpression c = 5;  
texpression d = a-b-c;
```

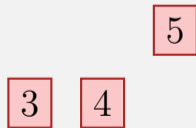
3

4

Bäume züchten

```
texpression operator- (const texpression& l,  
                      const texpression& r){  
    texpression result = l;  
    return result -= r;  
}
```

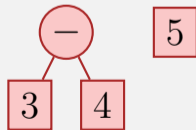
```
texpression a = 3;  
texpression b = 4;  
texpression c = 5;  
texpression d = a-b-c;
```



Bäume züchten

```
expression operator- (const expression& l,  
                      const expression& r){  
    expression result = l;  
    return result -= r;  
}
```

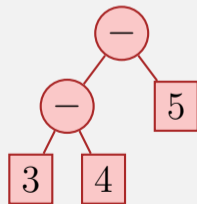
```
expression a = 3;  
expression b = 4;  
expression c = 5;  
expression d = a-b-c;
```



Bäume züchten

```
expression operator- (const expression& l,  
                    const expression& r){  
    expression result = l;  
    return result -= r;  
}
```

```
expression a = 3;  
expression b = 4;  
expression c = 5;  
expression d = a-b-c;
```



Dreierregel: Bäume klonen, reproduzieren und fällen

```
expression::~~expression(){  
    clear(root);  
}
```

```
expression::expression (const expression& e)  
    : root(copy(e.root)) { }
```

```
expression::expression& operator=(const expression& e){  
    if (root != e.root){  
        expression cp = e;  
        std::swap(cp.root, root);  
    }  
    return *this;  
}
```


Zusammengefasst

```
class texpression{
public:
    texpression (double d); // constructor
    ~texpression(); // destructor
    texpression (const texpression& e); // copy constructor
    texpression& operator=(const texpression& e); // assignment op
    texpression operator-();
    texpression& operator-=(const texpression& e);
    texpression& operator+=(const texpression& e);
    texpression& operator*=(const texpression& e);
    texpression& operator/=(const texpression& e);
    double evaluate();
private:
    tnode* root;
};
```

Werte zu Bäumen!

```
// term = factor { "*" factor | "/" factor }
double term (std::istream& is){
    double value = factor (is);
    while (true) {
        if (consume (is, '*'))
            value *= factor (is);
        else if (consume (is, '/'))
            value /= factor (is);
    }
    return value;
}
```

calculator.cpp
(Ausdruckswert)

Werte zu Bäumen!

```
using number_type = double;
```

```
// term = factor { "*" factor | "/" factor }  
number_type term (std::istream& is){  
    number_type value = factor (is);  
    while (true) {  
        if (consume (is, '*'))  
            value *= factor (is);  
        else if (consume (is, '/'))  
            value /= factor (is);  
        else  
            return value;  
    }  
}
```

double_calculator.cpp
(Ausdruckswert)

Werte zu Bäumen!

```
using number_type = texpression ;
```

```
// term = factor { "*" factor | "/" factor }
number_type term (std::istream& is){
    number_type value = factor (is);
    while (true) {
        if (consume (is, '*'))
            value *= factor (is);
        else if (consume (is, '/'))
            value /= factor (is);
        else
            return value;
    }
}
```

double_calculator.cpp
(Ausdruckswert)

→

texpression_calculator.cpp
(Ausdrucksbaum)

Abschliessende Bemerkung

- Wir haben in dieser Vorlesung die Knoten für Liste und Baum bewusst ohne Memberfunktionen implementiert. Wir betrachten sie nämlich als reine Datencontainer ohne eigene Intelligenz.⁸
- Wenn Vererbung und Polymorphie im Spiel ist, ist die Implementation der Funktionalität wie `evaluate`, `print`, `clear`, `copy` (etc.) mit Memberfunktionen vorzuziehen.
- In jedem Falle implementiert man die Speicherverwaltung der zusammengesetzten Datenstruktur Liste / Baum nicht in den Knotenklassen.

⁸Teile der Implementation waren so sogar einfacher, da der Fall `n==nullptr` einfacher abgefangen werden kann