21. Dynamische Datentypen und Speicherverwaltung

Problem

Letzte Woche: Dynamischer Datentyp

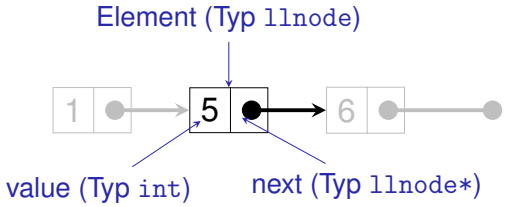
Haben im Vektor dynamischen Speicher angelegt, aber nicht wieder freigegeben. Insbesondere: keine Funktionen zum Entfernen von Elementen aus `llvec`.

Heute: Korrektes Speichermanagement!

Ziel: Stapelklasse mit Speichermanagement

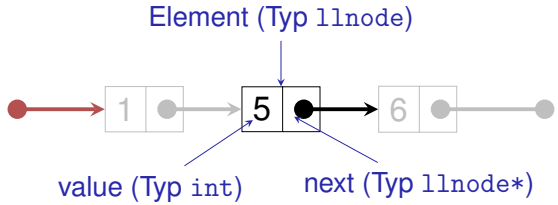
```
class stack{
public:
  // post: Element auf den Stapel legen
  void push(int value);
  // pre: Stack nicht leer
  // post: Entfernt oberstes Element vom Stapel
  void pop();
  // pre: Stack nicht leer
  // post: Gibt Wert des obersten Elementes zurück
  int top() const;
  // post: gibt zurück, ob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


Erinnerung: Verkettete Liste



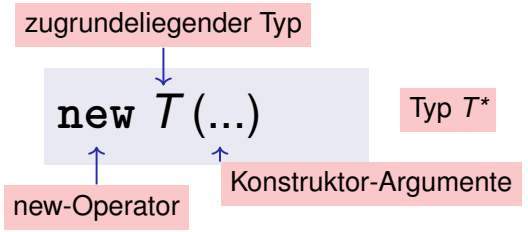

```
struct llnode {
  int value;
  llnode* next;
  // constructor
  llnode (int v, llnode* n) : value (v), next (n) {}
};
```

Stapel = Zeiger aufs oberste Element




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


Erinnerung: der `new`-Ausdruck

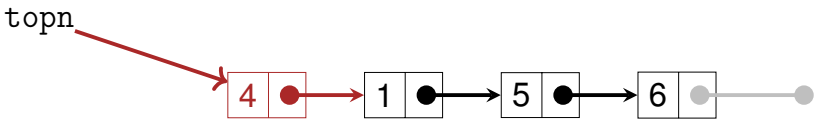


- **Effekt:** Neues Objekt vom Typ *T* wird im Speicher angelegt ...
- ... und mit Hilfe des passenden Konstruktors initialisiert.
- **Wert:** Adresse des neuen Objekts

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

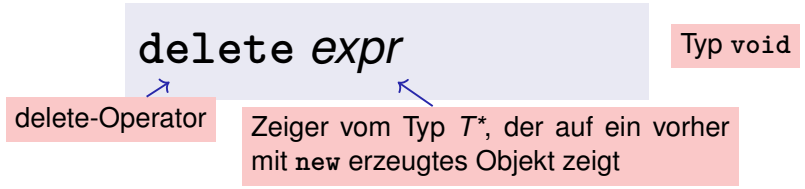
- **Effekt:** Neues Objekt vom Typ *T* wird im Speicher angelegt ...
- ... und mit Hilfe des passenden Konstruktors initialisiert.
- **Wert:** Adresse des neuen Objekts

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



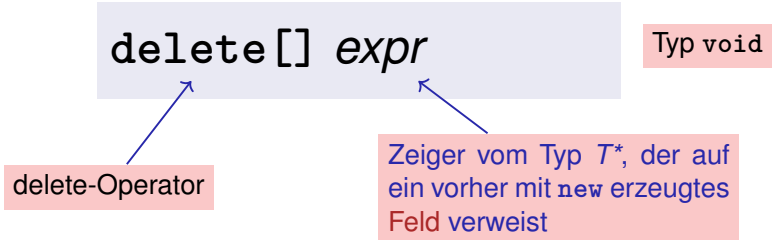
Der `delete`-Ausdruck

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



- **Effekt:** Objekt wird *dekonstruiert* (Erklärung folgt)
  ... und *Speicher wird freigegeben*.

Der `delete`-Ausdruck für Felder



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

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();
```

Speicher für t wird angelegt

Auch andere Zeiger können auf das Objekt zeigen..

... und zur Freigabe verwendet werden.

Fehler: Speicher freigegeben!

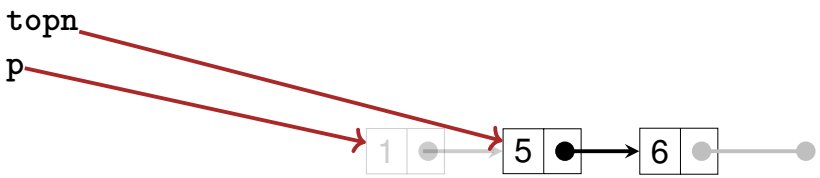
Dereferenzieren eines „dangling pointers"

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

Weiter mit dem Stapel: `pop()`

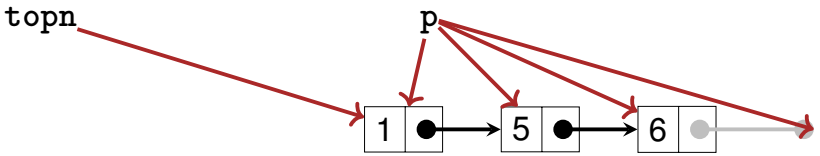
```
void stack::pop(){
    assert (!empty());
    llnode* p = topn;
    topn = topn->next;
    delete p;
}
```

Erinnerung: Abkürzung für `(*topn).next`



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)
```

- . . . 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!

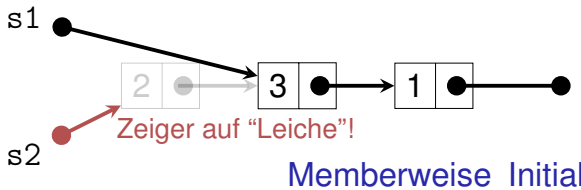
```
// POST: the dynamic memory of *this is deleted
stack::~stack(){
  while (topn != nullptr){
    llnode* t = topn;
    topn = t->next;
    delete t;
  }
}
```

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

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?



Memberweise Initialisierung: kopiert nur den `topn`-Zeiger

```
...
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

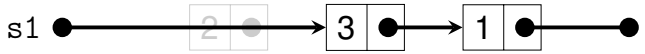
Smart-Pointers (werden hier nicht weiter vertieft):

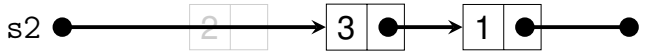
- Zähle die Anzahl Zeiger, die auf ein Objekt verweisen. Lösche nur wenn diese Anzahl auf 0 zurückfällt: **`std::shared_pointer`**
- Verhindere, dass mehrere Zeiger auf ein Objekt zeigen können: **`std::unique_pointer`**.

oder:

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

Wir erstellen eine echte Kopie!






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

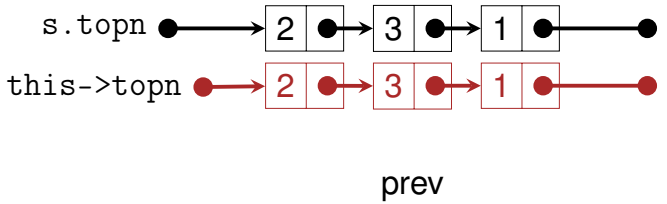
  T (`const` *T*`&` x);
- wird automatisch aufgerufen, wenn Werte vom Typ *T* mit Werten vom Typ `T` *initialisiert* werden

  T `x = t;` (t 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;
  }
}
```



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 Stapelüberlauf[6] führen. Aufrufstapel ist nämlich meist kleiner als Heapspeicher.

[6] nicht 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;
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){
  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)
}
```

Cooooler Trick! ☺

Fertig

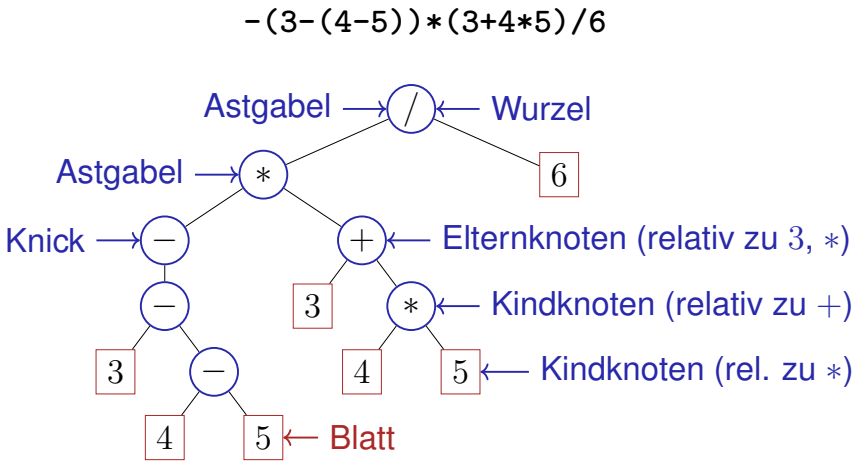
```
class stack{
public:
  stack(); // constructor
  ~stack(); // destructor
  stack(const stack& s); // copy constructor
  stack& operator=(const stack& s); // assignment operator

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


Dynamischer Datentyp

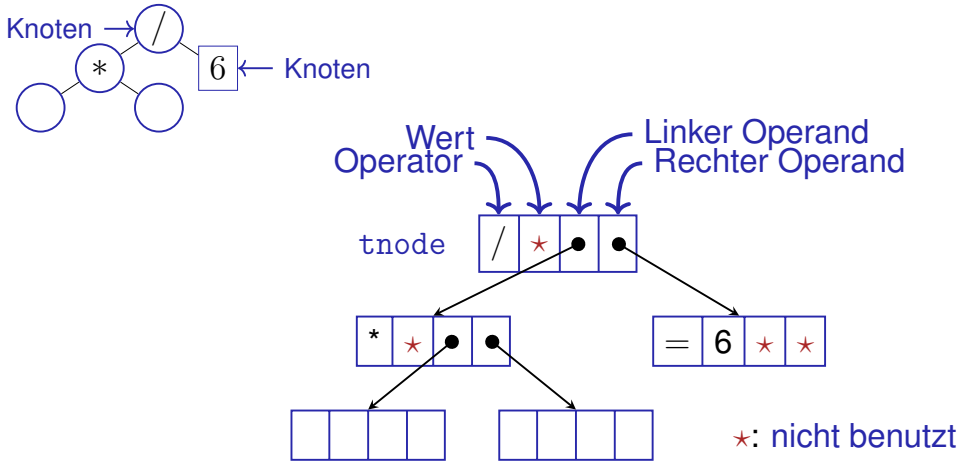
- Typ, der dynamischen Speicher verwaltet (z.B. unsere Klasse für Stapel)
- Mindestfunktionalität:
  - Konstruktoren
  - Destruktor
  - Copy-Konstruktor
  - Zuweisungsoperator

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

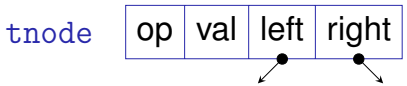
(Ausdrucks-)Bäume



Astgabeln + Blätter + Knicke = Knoten

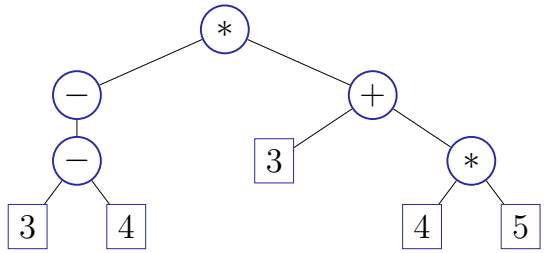


Knoten (`struct tnode`)




```
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 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

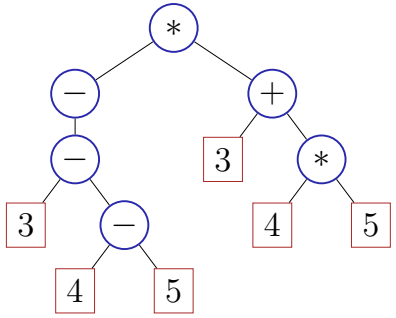
```
// POST: evaluates the subtree with root n
double eval(const tnode* n){
  assert(n);
  if (n->op == '=') return n->val; ← Blatt...
  double l = 0;                      ...oder Astgabel:
  if (n->left) l = eval(n->left); ← op unär, oder linker Ast
  double r = eval(n->right);←———— rechter Ast
  switch(n->op){
    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 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
```

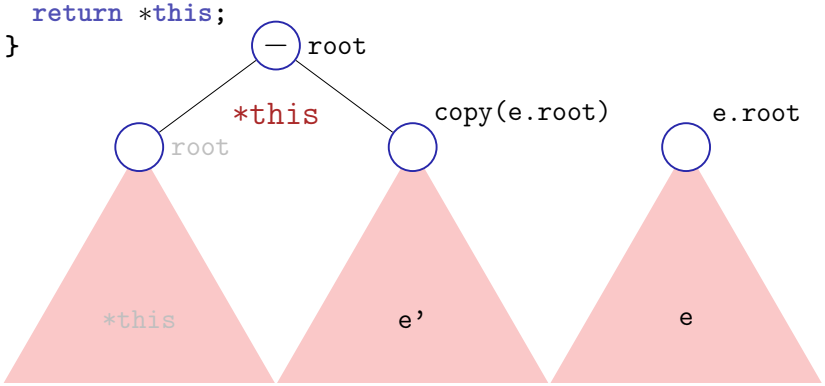

Bäume pflanzen

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

erzeugt Baum mit einem Blatt

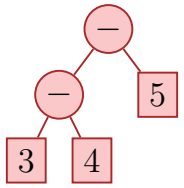
Bäume wachsen lassen

```
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;
```



Dreierregel: Bäume klonen, reproduzieren und fällen

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

texpresssion::texpression (const texpression& e)
     : root(copy(e.root)) { }

texpression::texpression& operator=(const texpression& e){
  if (root != e.root){
    texpression 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!

```
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.[7]
- Wenn Vererbung und Polymorhpie im Spiel ist, ist die Implementation der Funktionalität wie `evalute`, `print`, `clear`, `copy` (etc.) mit Memberfunktionen vorzuziehen.
- In jedem Falle implementiert man die Speicherverwaltung der zusammengesetzten Datenstruktur Liste / Baum nicht in den Knotenklassen.

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