22. Subtyping, Polymorphie und Vererbung

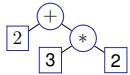
Ausdrückbäume, Aufgabenteilung und Modularisierung, Typhierarchien, virtuelle Funktionen, dynamische Bindung, Code-Wiederverwendung, Konzepte der objektorientierten Programmierung

Letzte Woche: Ausdrucksbäume

- Ziel: Arithmetische Ausdrücke repräsentieren, z.B.

  $$2 + 3 * 2$$

- Arithmetische Ausdrücke bilden eine *Baumstruktur*

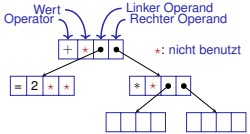


- Ausdrucksbäume bestehen aus *unterschiedlichen* Knoten: Literale (z.B. 2), binäre Operatoren (z.B. $+$), unäre Operatoren (z.B. $\sqrt{}$), Funktionsanwendungen (z.B. $\cos$), etc.

Nachteile

Implementiert mittels *eines einzigen* Knotentyps:

```
struct tnode {
  char op; // Operator ('=' for literals)
  double val; // Literal's value
  tnode* left; // Left child (or nullptr)
  tnode* right; // ...
  ...
};
```



Beobachtung: `tnode` ist die „Summe“ aller benötigten Knoten (Konstanten, Addition, . . .) ⇒ Speicherverschwendung, unelegant

Nachteile

Beobachtung: `tnode` ist die „Summe“ aller benötigten Knoten – und jede Funktion muss diese „Summe“ wieder „auseinander nehmen“, z.B.:

```
double eval(const tnode* n) {
  if (n->op == '=') return n->val; // n is a constant
  double l = 0;
  if (n->left) l = eval(n->left); // n is not a unary operator
  double r = eval(n->right);
  switch(n->op) {
    case '+': return l+r; // n is an addition node
    case '*': return l*r; // ...
    ...
```

⇒ Umständlich und somit fehleranfällig

Nachteile

```
struct tnode {
  char op;
  double val;
  tnode* left;
  tnode* right;
  ...
};
```

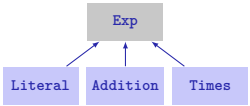
```
double eval(const tnode* n) {
  if (n->op == '=') return n->val;
  double l = 0;
  if (n->left) l = eval(n->left);
  double r = eval(n->right);
  switch(n->op) {
    case '+': return l+r;
    case '*': return l*r;
    ...
```

Dieser Code ist nicht *modular* – das ändern wir heute!

Neue Konzepte heute

1. Subtyping

- Typhierarchie: `Exp` repräsentiert allgemeine Ausdrücke, `Literal` etc. sind konkrete Ausdrücke
- Jedes `Literal` etc. ist auch ein `Exp` (Subtyp-Beziehung)



- Deswegen kann ein `Literal` etc. überall dort genutzt werden, wo ein `Exp` erwartet wird:

```
Exp* e = new Literal(132);
```


Neue Konzepte heute

2. Polymorphie und dynamische Bindung

- Eine Variable vom *statischen* Typ `Exp` kann Ausdrücke mit unterschiedlichen *dynamischen* Typen „beherbergen“:

```
Exp* e = new Literal(2); // e is the literal 2
e = new Addition(e, e); // e is the addition 2 + 2
```

- Ausgeführt werden die Memberfunktionen des *dynamischen* Typs:

```
Exp* e = new Literal(2);
std::cout << e->eval(); // 2

e = new Addition(e, e);
std::cout << e->eval(); // 4
```

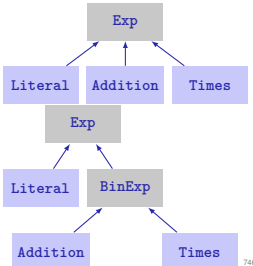

Neue Konzepte heute

3. Vererbung

- Manche Funktionalität ist für mehrere Mitglieder der Typhierarchie gleich
- Z.B. die Berechnung der Grösse (Verschachtelungstiefe) binärer Ausdrücke (`Addition`, `Times`):

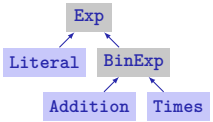
$1 + size(left\ operand) + size(right\ operand)$

⇒ Funktionalität einmal implementieren und dann an Subtypen *vererben*



Vorteile

- Subtyping, Polymorphie und dynamische Bindung ermöglichen *Modularisierung durch Spezialisierung*
- Vererbung erlaubt gemeinsamen Code trotz Modularisierung
  $\Rightarrow$ *Codeduplikation vermeiden*




```
Exp* e = new Literal(2);
std::cout << e->eval();

e = new Addition(e, e);
std::cout << e->eval();
```


Syntax und Terminologie


```
struct Exp {
  ...
}

struct BinExp : public Exp {
  ...
}

struct Times : public BinExp {
  ...
}
```

Anmerkung: Wir konzentrieren uns heute auf die neuen Konzepte (Subtyping, ...) und ignorieren den davon unabhängigen Aspekt der Kapselung (`class`, `private` vs. `public` Membervariablen)

Syntax und Terminologie


```
struct Exp {
  ...
}

struct BinExp : public Exp {
  ...
}

struct Times : public BinExp {
  ...
}
```

- `BinExp` ist eine von `Exp` *abgeleitete Klasse*[1]
- `Exp` ist die *Basisklasse*[2] von `BinExp`
- `BinExp` *erbt* von `Exp`
- Die Vererbung von `Exp` zu `BinExp` ist *öffentlich* (`public`), daher ist `BinExp` ein *Subtyp* von `Exp`
- Analog: `Times` und `BinExp`
- Subtyprelation ist transitiv: `Times` ist ebenfalls ein Subtyp von `Exp`

[1] Subklasse, Kindklasse [2] Superklasse, Elternklasse

Abstrakte Klasse `Exp` und konkrete Klasse `Literal`

```
struct Exp {
  virtual int size() const = 0;
  virtual double eval() const = 0;
};
```

... das macht `Exp` zu einer *abstrakten* Klasse

Aktiviert dynamische Bindung

Erzwingt Implementierung durch abgeleitete Klassen ...

```
struct Literal : public Exp {
  double val;

  Literal(double v);
  int size() const;
  double eval() const;
};
```

`Literal` erbt von `Exp` ...

... ist aber ansonsten eine ganz normale Klasse

`Literal`: Implementierung

```
Literal::Literal(double v): val(v) {}
```

```
int Literal::size() const {
  return 1;
}
```

```
double Literal::eval() const {
  return this->val;
}
```


Subtyping: Ein Literal ist ein Ausdruck ...

Ein Zeiger auf einen Subtyp kann überall dort verwendet werden, wo ein Zeiger auf einen Supertyp gefordert ist:

```
Literal* lit = new Literal(5);
Exp* e = lit; // OK: Literal is a subtype of Exp
```

Aber nicht umgekehrt:

```
Exp* e = ...
Literal* lit = e; // ERROR: Exp is not a subtype of Literal
```


Polymorphie: ... ein Literal verhält sich wie ein Literal

```
struct Exp {
  ...
  virtual double eval();
};

double Literal::eval() {
  return this->val;
}
```

```
Exp* e = new Literal(3);
std::cout << e->eval(); // 3
```

- *Virtuelle* Memberfunktionen: der *dynamische* Typ (hier: `Literal`) bestimmt die auszuführenden Memberfunktionen
  ⇒ *dynamische Bindung*
- Ohne `virtual` bestimmt der *statische Typ* (hier: `Exp`) die auszuführende Funktion
- Wir vertiefen das nicht weiter

Weitere Ausdrücke: `Addition` und `Times`

```
struct Addition : public Exp {
  Exp* left; // left operand
  Exp* right; // right operand
  ...
};
```

```
int Addition::size() const {
  return 1 + left->size()
           + right->size();
}
```

```
struct Times : public Exp {
  Exp* left; // left operand
  Exp* right; // right operand
  ...
};
```

```
int Times::size() const {
  return 1 + left->size()
           + right->size();
}
```

- Aufgabenteilung
- Codeduplizierung

Gemeinsamkeiten auslagern . . . : `BinExp`

```
struct BinExp : public Exp {
  Exp* left;
  Exp* right;

  BinExp(Exp* l, Exp* r);
  int size() const;
};
```

```
BinExp::BinExp(Exp* l, Exp* r): left(l), right(r) {}
```

```
int BinExp::size() const {
  return 1 + this->left->size() + this->right->size();
}
```

Bemerkung: `BinExp` implementiert `eval` nicht und ist daher, genau wie `Exp`, eine abstrakte Klasse

. . . Gemeinsamkeiten erben: `Addition`

```
struct Addition : public BinExp {
  Addition(Exp* l, Exp* r);
  double eval() const;
};
```

`Addition` erbt Membervariablen (`left`, `right`) und Funktionen (`size`) von `BinExp`

```
Addition::Addition(Exp* l, Exp* r): BinExp(l, r) {}
```

```
double Addition::eval() const {
  return
    this->left->eval() +
    this->right->eval();
}
```

Aufruf des *Superkonstruktors* (Konstruktor von `BinExp`) zwecks Initialisierung der Membervariablen `left` und `right`

. . . Gemeinsamkeiten erben: `Times`

```
struct Times : public BinExp {
  Times(Exp* l, Exp* r);
  double eval() const;
};
```

```
Times::Times(Exp* l, Exp* r): BinExp(l, r) {}
```

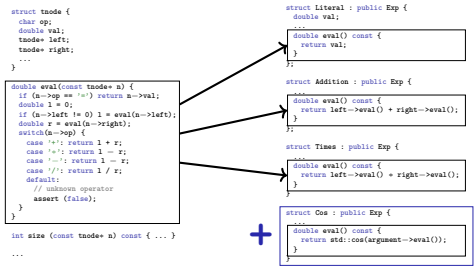
```
double Times::eval() const {
  return
    this->left->eval() *
    this->right->eval();
}
```

Beobachtung: `Additon::eval()` und `Times::eval()` sind sich sehr ähnlich und könnten ebenfalls zusammengelegt werden. Das dafür notwendige Konzept der *funktionalen Programmierung* geht jedoch über diesen Kurs hinaus.

Weitere Ausdrücke und Operationen

- Weitere Ausdrücke, als von `Exp` abgeleitete Klassen, sind möglich, z.B. $-$, $/$, $\sqrt{}$, $\cos$, $\log$
- Eine ehemalige Bonusaufgabe (Teil der heutigen Vorlesungsbeispiele auf Code Expert) veranschaulicht, was alles möglich ist: Variablen, trigonometrische Funktionen, Parsing, Pretty-Printing, numerische Vereinfachungen, symbolische Ableitungen, . . .

Mission: Monolithisch $\rightarrow$ modular ✓



Es gibt noch so viel mehr . . .

Nicht gezeigt/besprochen:

- Private Vererbung (`class B : ~~public~~ A`)
- Subtyping und Polymorphie ohne Zeiger
- Nicht-virtuelle Memberfunktionen und statische Bindung (`~~virtual~~ double eval()`)
- Überschreiben geerbter Memberfunktionen und Aufrufen der überschriebenen Implementierung
- Mehrfachvererbung (multiple inheritance)
- . . .

Objektorientierte Programmierung

Im letzten Kursdrittel wurden einige Konzepte der *objektorientierten Programmierung* vorgestellt, die auf den kommenden Folien noch einmal kurz zusammengefasst werden.

Kapselung (Wochen 10-13):

- Verbergen der Implementierungsdetails von Typen (privater Bereich) vor Benutzern
- Definition einer Schnittstelle (öffentlicher Bereich) zum kontrollierten Zugriff auf Werte und Funktionalität
- Ermöglicht das Sicherstellen von Invarianten, sowie den Austausch von Implementierungen ohne Anpassungen von Benutzercode

Objektorientierte Programmierung

Subtyping (Woche 14):

- Typhierarchien mit Super- und Subtypen können angelegt werden um Verwandtschaftbeziehungen sowie Abstraktionen und Spezialisierungen zu modellieren
- Ein Subtyp unterstützen mindestens die Funktionalität, die auch der Supertyp unterstützt – i.d.R. aber mehr, d.h. Subtypen erweitern die Schnittstelle (den öffentlichen Bereich) ihrer Supertypen
- Daher können Subtypen überall dort eingesetzt werden, wo Supertypen verlangt sind . . .
- . . . und Funktionen, die auf abstrakteren Typen (Supertypen) operieren können, können auch auf spezialisierteren Typen (Subtypen) operieren
- Die in Woche 7 vorgestellten Streams bilden eine solche Typhierarchie: `ostream` ist der abstrakte Supertyp, `ofstream` etc. sind spezialisierte Subtypen

Polymorphie und *dynamische Bindung* (Woche 14):

- Ein Zeiger vom statischen Typ T_1 kann zur Laufzeit auf Objekte vom (dynamischen) Typ T_2 zeigen, falls T_2 ein Subtyp von T_1 ist
- Wird eine virtuelle Memberfunktion von einem solchen Zeiger aus aufgerufen, so entscheidet der dynamische Typ darüber, welche Funktion ausgeführt wird
- D.h.: Trotz gleichem statischen Typ kann beim Zugriff auf eine gemeinsame Schnittstelle (Memberfunktionen) eines solchen Zeigers ein anderes Verhalten auftreten
- Zusammen mit Subtyping ermöglicht es dies, neue konkrete Typen (Streams, Ausdrücke, ...) zu einem bestehenden System hinzuzufügen, ohne dieses abändern zu müssen

— Ende der Vorlesung —

Vererbung (Woche 14):

- Abgeleitete Klassen erben die Funktionalität, d.h. die Implementierungen von Memberfunktionen, ihrer Elternklassen
- Dies ermöglicht es, gemeinsam genutzten Code wiederverwenden zu können und vermeidet so Codeduplikation
- Geerbte Implementierungen können auch überschrieben werden, um zu erreichen, dass eine abgeleitete Klasse sich anders verhält als ihre Elternklasse (im Kurs nicht gezeigt)