

24. Subtyping, Polymorphie und Vererbung

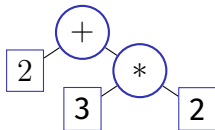
Ausdrucksbäume, Aufgabenteilung und Modularisierung, Typhierarchien, virtuelle Funktionen, dynamische Bindung, Code-Wiederverwendung, Konzepte der objektorientierten Programmierung

Letzte Woche: Ausdrucksbäume

- Ziel: Arithmetische Ausdrücke repräsentieren, z.B.

$$2 + 3 * 2$$

- Arithmetische Ausdrücke bilden eine *Baumstruktur*

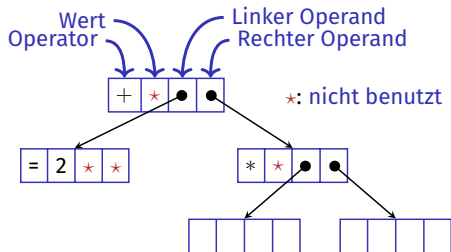


- Ausdrucksbäume bestehen aus *unterschiedlichen* Knoten: Literale (z.B. 2), binäre Operatoren (z.B. +), unäre Operatoren (z.B. $\sqrt{\quad}$), Funktionsanwendungen (z.B. \cos), etc.

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, ...) \Rightarrow 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;  
        ...  
    }
```

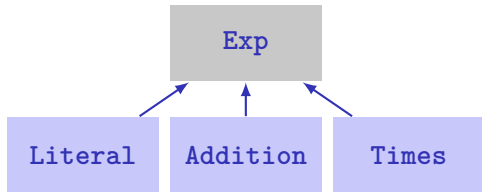
Dieser Code ist nicht *modular* – das ändern wir heute!

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
```

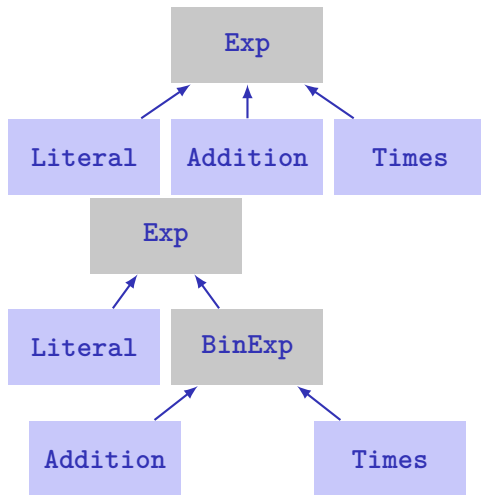
Neue Konzepte heute

3. Vererbung

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

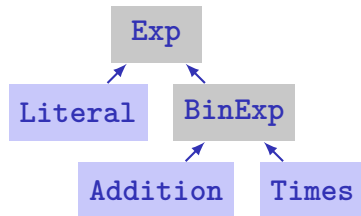
$$1 + \text{size}(\text{left operand}) + \text{size}(\text{right operand})$$

⇒ Funktionalität einmal implementieren und dann an Subtypen *vererben*



Vorteile

- Subtyping, Polymorphie und dynamische Bindung ermöglichen *Modularisierung durch Spezialisierung*
- Vererbung erlaubt gemeinsamen Code trotz Modularisierung
⇒ *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

¹Subklasse, Kindklasse

²Superklasse, Elternklasse

Abstrakte Klasse Exp und konkrete Klasse Literal

```
struct Exp {
```

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

```
    virtual int size() const = 0;
```

```
    virtual double eval() const = 0;
```

```
};
```

↑ Aktiviert dynamische Bindung

Erzwingt Implementierung durch abgeleitete Klassen ...

```
struct Literal : public Exp {
```

← Literal erbt von Exp ...

```
    double val;
```

```
    Literal(double v);
```

```
    int size() const;
```

← ...ist aber ansonsten eine ganz normale Klasse

```
    double eval() const;
```

```
};
```

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 Membervari-
ablen 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 → modular ✓

```
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 != 0) l = eval(n->left);  
    double r = eval(n->right);  
    switch(n->op) {  
        case '+': return l + r;  
        case '*': return l * r;  
        case '-': return l - r;  
        case '/': return l / r;  
        default:  
            // unknown operator  
            assert (false);  
    }  
}
```

```
int size (const tnode* n) const { ... }  
...
```

```
struct Literal : public Exp {  
    double val;  
    ...  
    double eval() const {  
        return val;  
    }  
};
```

```
struct Addition : public Exp {  
    ...  
    double eval() const {  
        return left->eval() + right->eval();  
    }  
};
```

```
struct Times : public Exp {  
    ...  
    double eval() const {  
        return left->eval() * right->eval();  
    }  
};
```

+

```
struct Cos : public Exp {  
    ...  
    double eval() const {  
        return std::cos(argument->eval());  
    }  
};
```

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)
- ...

Gute Neuigkeit: Das heutige Kapitel (24. Subtyping, Polymorphie und Vererbung) ist *nicht* prüfungsrelevant

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

Objektorientierte Programmierung

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

Objektorientierte Programmierung

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)

25. Zusammenfassung

Zweck und Format

Nennung der wichtigsten Stichwörter zu den Kapiteln. Checkliste: „kann ich mit jedem Begriff etwas anfangen?“

- Ⓜ Motivation: Motivierendes Beispiel zum Kapitel
- Ⓚ Konzepte: Konzepte, die nicht von der Implementation (Sprache) C++abhängen
- Ⓢ Sprachlich (C++): alles was mit der gewählten Sprache zusammenhängt
- Ⓑ Beispiele: genannte Beispiele der Vorlesung

Kapitelüberblick

- 1. Einführung
- 2. Ganze Zahlen
- 3. Wahrheitswerte
- 4. Defensives Programmieren
- 5./6. Kontrollanweisungen
- 7./8. Fließkommazahlen
- 9./10. Funktionen
- 11. Referenztypen
- 12.-15. Vektoren, Texte und Strings
- 16./17. Rekursion
- 18. Structs und Overloading
- 19. Klassen
- 20./21. Dynamische Datenstrukturen
- 22. Container, Iteratoren und Algorithmen
- 23. Dynamische Datentypen und Speicherverwaltung
- 24. Subtyping, Polymorphie und Vererbung

1. Einführung

Ⓜ

- Euklidischer Algorithmus

Ⓚ

- Algorithmus, Turingmaschine, Programmiersprachen, Kompilation, Syntax und Semantik
- Werte und Effekte, (Fundamental)typen, Literale, Variablen, Bezeichner, Objekte, Ausdrücke, Operatoren, Anweisungen

Ⓢ

- Include-Direktiven `#include <iostream>`
- Hauptfunktion `int main(){...}`
- Kommentare, Layout `// Kommentar`
- Typen, Variablen, L-Wert `a` , R-Wert `a+b`
- Ausdrucksanweisung `b=b*b;` , Deklarationsanweisung `int a;`, Rückgabeeanweisung `return 0;`

2. Ganze Zahlen

- (M) Celsius to Fahrenheit
- (K) Assoziativität und Präzedenz, Stelligkeit
- Ausdrucksbäume, Auswertungsreihenfolge
- Arithmetische Operatoren
- Binärzahldarstellung, Hexadezimale Zahlen, Wertebereich
- Zahlendarstellung mit Vorzeichen, Zweierkomplement
- (S) Arithmetische Operatoren `9 * celsius / 5 + 32`
- Inkrement / Dekrement `expr++`
- Arithmetische Zuweisungen `expr1 += expr2`
- Konversion `int` \leftrightarrow `unsigned int`
- (B) Celsius to Fahrenheit, Ersatzwiderstand

3. Wahrheitswerte

(K)

- Boole'sche Funktionen, Vollständigkeit
- DeMorgan'sche Regeln

(S)

- Der Typ `bool`
- Logische Operationen `a && !b`
- Relationale Operationen `x < y`
- Präzedenzen `7 + x < y && y != 3 * z`
- Kurzschlussauswertung `x != 0 && z / x > y`
- Die `assert`-Anweisung, `#include <cassert>`

(B)

- Div-Mod Identität.

4. Defensives Programmieren

Ⓚ

- Assertions und Konstanten

Ⓢ

- Die `assert`-Anweisung, `#include <cassert>`
- `const int speed_of_light=2999792458`

Ⓑ

- Assertions für den GGT

5./6. Kontrollanweisungen

(M)

- Linearer Kontrollfluss vs. interessante Programme, Spaghetti-Code

(K)

- Auswahlanweisungen, Iterationsanweisungen
- (Vermeidung von) Endlosschleifen, Halteproblem
- Sichtbarkeits- und Gültigkeitsbereich, Automatische Speicherdauer
- Äquivalenz von Iterationsanweisungen

(S)

- if Anweisungen `if (a % 2 == 0) {..}`
- for Anweisungen `for (unsigned int i = 1; i <= n; ++i) ...`
- while und do-Anweisungen `while (n > 1) {...}`
- Blöcke, Sprunganweisungen `if (a < 0) continue;`
- Switch Anweisung `switch(grade) {case 6: }`

(B)

- Summenberechnung (Gauss), Primzahltest, Collatz-Folge, Fibonacci Zahlen, Taschenrechner, Notenausgabe

7./8. Fließkommazahlen

Ⓜ

- Richtig Rechnen: Celsius / Fahrenheit

Ⓚ

- Fixkomma- vs. Fließkommazahldarstellung
- (Löcher im) Wertebereich
- Rechnen mit Fließkommazahlen, Umrechnung
- Fließkommazahlensysteme, Normalisierung, IEEE Standard 754
- *Richtlinien für das Rechnen mit Fließkommazahlen*

Ⓢ

- Typen `float`, `double`
- Fließkommaliterale `1.23e-7f`

Ⓑ

- Celsius/Fahrenheit, Euler, Harmonische Zahlen

9./10. Funktionen

(M)

- Potenzberechnung

(K)

- Kapselung von Funktionalität
- Funktionen, formale Argumente, Aufrufargumente
- Gültigkeitsbereich, Vorwärts-Deklaration
- Prozedurales Programmieren, Modularisierung, Getrennte Übersetzung
- *Stepwise Refinement*

(S)

- Funktionsdeklaration, -definition `double pow(double b, int e){ ... }`
- Funktionsaufruf `pow (2.0, -2)`
- Der typ `void`

(B)

- Potenzberechnung, perfekte Zahlen, Minimum, Kalender

11. Referenztypen

(M)

- Funktion Swap

(K)

- Werte-/ Referenzsemantik, Pass by Value / Pass by Reference, Return by Reference
- Lebensdauer von Objekten / Temporäre Objekte
- Konstanten

(S)

- Referenztyp `int& a`
- Call by Reference und Return by Reference `int& increment (int& i)`
- Const-Richtlinie, Const-Referenzen, Referenzrichtlinie

(B)

- Swap, Inkrement

12.-15 Vektoren und Strings

M

- Iteration über Daten: Sieb des Eratosthenes

K

- Vektoren, Speicherlayout, Wahlfreier Zugriff
- (Fehlende) Grenzenprüfung
- Vektoren
- Zeichen: ASCII, UTF8, Texte, Strings

S

- Vektor Typen `std::vector<int> a {4,3,5,2,1};`
- Zeichen und Texte, der Typ `char` `char c = 'a';`, Konversion nach `int`
- Vektoren von Vektoren
- Ströme `std::istream`, `std::ostream`

B

- Sieb des Eratosthenes, Caesar-Code, Kürzeste Wege

16./17. Rekursion

- Ⓜ
 - Rekursive math. Funktionen, Das n-Queen Problem, , Lindenmayer-Systeme, Kommandozeilenrechner
- Ⓚ
 - Rekursion
 - Aufrufstapel, Gedächtnis der Rekursion
 - Korrektheit, Terminierung,
 - Rekursion vs. Iteration
 - Backtracking, EBNF, Formale Grammatiken, Parsen
- Ⓑ
 - Fakultät, GGT, Sudoku-Löser, Taschenrechner

18. Structs und Overloading

(M)

- Datentyp Rationale Zahlen selber bauen

(K)

- Heterogene Datenstruktur
- Funktions- und Operator-Overloading
- Datenkapselung

(S)

- Struct Definition `struct rational {int n; int d;};`
- Mitgliedszugriff `result.n = a.n * b.d + a.d * b.n;`
- Initialisierung und Zuweisung,
- Überladen von Funktionen `pow(2)` vs. `pow(3,3);`, Überladen von Operatoren

(B)

- rationale Zahlen, komplexe Zahlen

19. Klassen

- (M) Rationale Zahlen mit Kapselung
- (K) Kapselung, Konstruktion, Mitgliedsfunktionen
- (S) Klassen `class rational { ... };`
 - Zugriffssteuerung `public: / private:`
 - Mitgliedsfunktionen `int rational::denominator () const`
 - Das implizite Argument der Memberfunktionen
- (B) Endlicher Ring, Komplexe Zahlen

20./21. Dynamische Datenstrukturen

- ④ ■ Unser eigener Vektor
- ④ ■ Allokation, Zeiger-Typen, Verkettete Liste, Allokation, Deallokation, Dynamischer Datentyp
- ④ ■ Die `new` Anweisung
 - Zeiger `int* x;`, Nullzeiger `nullptr.`
 - Adress-, Dereferenzoperator `int *ip = &i; int j = *ip;`
 - Zeiger und Const `const int *a;`
- ④ ■ Verkettete Liste, Stack

22. Container, Iteratoren und Algorithmen

- ① ■ Vektoren sind Container
- ② ■ Iterieren mit Zeigern
 - Container und Iteratoren
 - Algorithmen
- ③ ■ Iteratoren `std::vector<int>::iterator`
 - Algorithmen der Standardbibliothek `std::fill (a, a+5, 1);`
 - Einen Iterator implementieren
 - Iteratoren und `const`
- ④ ■ Ausgeben eines Vektors, einer Menge

23. Dynamische Datentypen und Speicherverwaltung

(M)

- Stack
- Ausdrucksbaum

(K)

- Richtlinie „Dynamischer Speicher“
- Gemeinsamer Zeiger-Zugriff
- Dynamischer Datentyp
- Baumstruktur

(S)

- `new` und `delete`
- Desktruktor `stack::~~stack()`
- Kopierkonstruktor `stack::stack(const stack& s)`
- Zuweisungsoperator `stack& stack::operator=(const stack& s)`
- Dreierregel

(B)

- Binäre Ausdrucksbäume

24. Subtyping, Polymorphie und Vererbung

- Ⓜ ■ Erweitern und Verallgemeinern von Ausdrucksbäumen
- Ⓚ ■ Subtyping
 - Polymorphie und dynamische Bindung
 - Vererbung
- Ⓢ ■ Basisklasse `struct Exp{}`
 - Abgeleitete Klasse `struct BinExp: public Exp{}`
 - Abstrakte Klasse `struct Exp{virtual int size() const = 0...}`
 - Polymorphie `virtual double eval()`
- Ⓟ ■ Ausdrucksknoten und Erweiterungen

Ende

Ende der Vorlesung.