13. Generics

Prof. Dr. Harald Gall

Institut für Informatik
Universität Zürich

http://seal.ifi.uzh.ch

University of Zurich
Department of Informatics

s.e.a.l.
software evolution & architecture lab

Lernziele

- Wie kann man mehr Flexibilität hinsichtlich der Typen erreichen?
- Wie kann man Typen als Variablen verwenden?
- Was sind Generics und wie setzt man diese ein?
- Was ist der Unterschied zu Vererbung und Interfaces?
- Was muss bei Generics beachtet werden?

Motivation

- Container und Elemente
- Beispiel: Knotenklasse
- Probleme
- Generische Typen
- Verwechslungsgefahr
- Begriffe

Container und Elemente

- Container = Klassen zum Speichern anderer Objekte als Elemente
- Beispiele:
  - Strings (eingeschränkt), Arrays, Collections
- Arbeitsweise eines Containers unabhängig vom konkreten Elementtyp
- Problem: Definition neuer Containertypen

Beispiel: Knotenklasse

- Idee
- Knoteninformation
- Knotenklasse
- Konstruktoren
- Aufbau eines Baums
- Getter und Setter

Knotenklasse: Problem

- Elementtyp Object erlaubt beliebige Knoteninformation (via Autoboxing auch primitive Typen)
- Aber: selber Knotentyp innerhalb eines Baums oft sinnvoll oder notwendig
- Keine Unterstützung durch Knotenklasse. Beispiel:

```
Node n1 = new Node("foo");
Node n2 = new Node(3.141592);
Node n0 = new Node(23, n1, n2);
```

- Auslesen von Knoteninformationen erfordert Typecast, weil getInfo als Ergebnis nur Object liefert:

```
String s = (String)n.getInfo();
```

- Typecasts immer problematisch

Generische Typen

- Lösung: Generische Klassen
  - Definition: Elementtyp bleibt unbestimmt, vertreten durch eine Typvariable
  - Verwendung:
    konkretes Typargument ersetzt die Typvariable der Definition ⇒ neuer Typ
- Beispiel Knotenklasse:
  - Definition: Typvariable für Knoteninformation (statt Object)
  - Verwendung:
    Angabe eines konkretes (Referenz-)Typs für die Typvariable, fixiert Typ der Knoteninformation

Verwechslungsgefahr

- Begrifflich ähnlich wie Argumente und Parameter bei Methodenaufrufen
- Aber:
  - Methodenaufrufe werden zur Laufzeit abgewickelt (von der JVM),
  - Ersetzen von Typargumenten beim Übersetzen (vom Compiler)
- Völlig verschiedene Mechanismen!

Begriffe

- Generische Klasse = Klasse mit Typvariablen
- Generischer Typ = Typangabe aus generischer Klasse + konkretem Typargument
- 1 generische Klasse ⇒ viele generische Typen
- Interfaces in diesem Zusammenhang unter dem Begriff "Klasse" subsumiert

Definition und Anwendung

- Typvariable
- Typvariable im Rumpf
- Generische Typen
- Typprüfung
- Generische Interfaces
- Implementierung generischer Interfaces
- Mehrere Typvariablen
- Mehrere Typargumente

Typvariable

- Definition einer generischen Klasse ≈ normale, nicht-generische Klasse
- Aber: Typvariable in spitzen Klammern nach dem Klassennamen:

```
class Node<T>
{...}
```

- Typvariable = beliebiger Java-Identifier
- Per Konvention einzelner Großbuchstabe in alphabetischer Nähe zum "T"

Typvariable im Rumpf

- Im Klassenrumpf: Typvariable (weitgehend) wie konkreter Typ

```
class Node<T> {
    private T info;
    private Node<T> left;
    private Node<T> right;
}
```

- Konstruktoren akzeptieren als Parameter nur gleiche Typvariablen (Knoten mit gleichen Typvariablen):

```
Node(T i) {
      this(i, null, null);
}
Node(T i, Node<T> l, Node<T> r) {
      info = i;
      left = l;
      right = r;
}
```

Typvariable im Rumpf (2)

- Ergebnis der Getter und Parameter der Setter beziehen sich auf die Typvariable:

```
...
T getInfo()                 {...}
Node<T> getLeft()           {...}
Node<T> getRight()          {...}
void setInfo(T i)           {...}
void setLeft(Node<T> l)     {...}
void setRight(Node<T> r)    {...}
```

Generische Typen

- "Anwendung" einer generischen Klasse: Konkretes Typargument für die Typvariable
- Generische Klasse + Typargument = generischer Typ
- Jeder generische Typ ist eigenständig, gleichrangig zu anderen Javatypen. Beispiel: String-Knoten

```
Node<String> ns;
ns = new Node<String>("foo");
```

- In einem Programm *verschiedene generische Typen derselben generischen Klasse* erlaubt:

```
...
Node<Integer> ni;
ni = new Node<Integer>(1);
Node<Rational> nr;
nr = new Node<Rational>(new Rational(2, 3));
```

Typprüfung

- `Node<String>` und `Node<Integer>` sind inkompatibel:

```
Node<Integer> ni;
ni = new Node<String>("foo");     // Typfehler
```

- Nur Bäume mit Knoten desselben Typs konstruierbar:

```
Node<Integer> ni = new Node<Integer>(1);
Node<String> ns = new Node<String>("foo", ni, null);
//Typfehler
```

- Typecasts nicht mehr nötig:

```
String s = ns.getInfo();                  // ohne Typecast
Node<String> l = ns.getLeft();
```

- Compiler sichert korrekte Verwendung ab, keine Tests zur Laufzeit

Generische Interfaces

- Generische Interfaces enstprechend zu generischen Klassen
- Beispiel: Generisches Interface `Taggable` mit zwei Methoden zum
  - Anbringen einer Markierung (engl. "tag") und
  - Ablesen der Markierung
- Definition:

```
interface Taggable<T> {
    void setTag(T tag);
    T getTag();
}
```

Implementierung generischer Interfaces

- Nicht-generische Klasse kann generisches Interface durch Angabe eines Typarguments implementieren
- Beispiel:

```
class Someclass implements Taggable<String> {
    private String tag;

    public void setTag(String t) {...}
    public String getTag() {...}

    ...
}
```

Implementierung generischer Interfaces (2)

- Generische Klasse kann generisches Interface durch "Übergabe" der Typvariablen implementieren
- Beispiel:

```
class Node<T> implements Taggable<T> {
    private T tag;

    public void setTag(T t)      {...}
    public T getTag()            {...}

    ...
}
```

- Knoteninformation und Tag haben hier denselben Typ

Mehrere Typvariablen

- Beliebig viele Typparameter einer generische Klasse
- Beispiel: generische Klasse `Pair` verknüpft zwei Objekte

```
class Pair<T, U> {
    private final T first;
    private final U second;
}
```

- Typvariablen T, U = unbekannte, unabhängige Typen

```
class Pair<T, U> {
    Pair(T fst, U snd) {
        first = fst;
        second = snd;
    }
    T getFirst() {
        return first;
    }
    U getSecond() {
        return second;
} }
```

Mehrere Typargumente

- Generische Klasse mit mehreren Typvariablen ⇒ mehrere Typargumente, eines für jede Typvariable

```
Pair<String, Integer> psi;
```

- Compiler verhindert Typfehler

```
Pair<String, Integer> p;
p = new Pair<String, Integer>("foo", 1);
int i = p.getFirst();                    // Fehler!
int j = p.getSecond();                    // ok
```

- Generische Typen = vollwertige Typen --> selbst als Typargumente zulässig:

```
Pair<Integer, Pair<String, Integer>> pp;
pp = new Pair<Integer, Pair<String, Integer>>(23, p);
int k = pp.getSecond().getSecond();     // ok
```

Typebounds

- Idee
- Beispiel
- Mehrfache Typebounds
- Beispiel
- Typebounds mit Typvariablen
- Problem

Typebounds: Idee

- Generische Klasse akzeptiert (bisher) beliebige Typargumente
- Oft sinnvoll: Einschränkung der Typargumente
- Lösung: Typebound bei der Definition einer generischen Klasse:

```
class Someclass<T extends U>
{...}
```

- Folge: spätere Typargumente müssen zum Typebound U kompatibel sein
- "`extends`" hier für Klassen und Interfaces

Typebounds: Beispiel

- Beispiel: Knoten mit ausschließlich numerischen Informationen:

```
class Node<T extends Number>
{...}
```

- `Number` ist Basisklasse von `Integer`, `Double` etc., nicht aber von beispielsweise `String`, `Object`
- Compiler lehnt unpassende Typargumente ab:

```
Node<Integer> ni;   // ok
Node<Double> nd;    // ok
Node<Object> no;    // Fehler!
Node<String> ns;    // Fehler!
```

Mehrfache Typebounds

- Liste von Typebounds ⇒ mehrfache Einschränkungen
- Typvariablen müssen zu jedem Typebound kompatibel sein
- Syntax:

```
class Someclass<T extends U1 & U2 & U3...>
{...}
```

- Einschränkung:
- Erster Typebound U1 darf ein beliebiger Typ sein
- Weitere Typebounds U2, U3, ... müssen Interfaces sein
- Reihenfolge der weiteren Typebounds nach dem ersten irrelevant

Beispiel

- Bäume sollen auf Streams geschrieben werden können ⇒ müssen das Interface `Serializable` implementieren
- Bäume sollen kopierbar sein ⇒ müssen das Interface `Cloneable` implementieren
- Gilt ebenso für Knoteninformation
- Einfordern mit Typebounds:

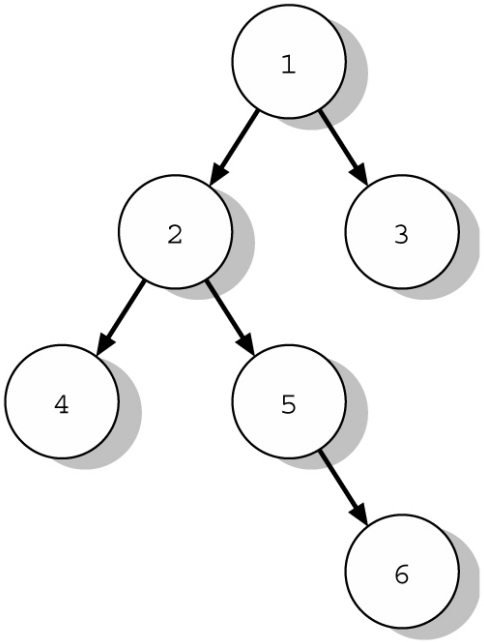
```
class Node<T extends Serializable & Cloneable>
{...}
```

- Knoten damit selbst serialisierbar und kopierbar:

```
class Node<T extends Serializable & Cloneable>
    implements Serializable, Cloneable
{...}
```

Typebounds mit Typvariablen

- Beispiel: geordnete Bäume
- Bezüglich jedes Knotens: alle Informationen im linken Teilbaum kleiner und alle Informationen im rechten Teilbaum größer oder gleich
- Binärer Baum:



Binärer Baum

- Voraussetzung: Knoteninformationen kann verglichen werden
- Technisch: Knotentyp implementiert das Interface `Comparable`
- `Comparable` ist ein generisches Interface
- Definition einer generischen Knotenklasse für geordnete Bäume:

```
class Node<T extends Comparable<T>>
{...}
```

- Compiler stellt Konsistenz sicher:

```
Node<String> ns;    // ok
Node<Integer> ni;   // ok
Node<Object> no;    // Fehler
```

Binärer Baum (2)

- Lösung noch mangelhaft: Von Comparable abgeleitete Klasse wird nicht als Typargument akzeptiert
- Beispiel:

```
class Base implements Comparable<Base>
{...}

class Derived extends Base
{...}


...
Node<Base> nb;       // ok
Node<Derived> nd;    // Fehler
```

- Problem: Typebound verlangt, dass das Typargument selbst direkt Comparable implementiert ⇒ zu streng
- Lösung: contravariante Wildcardtypen

Wildcardtypen

- Motivation
- Invarianz
- Bivarianz
- Covarianz
- Contravarianz
- Gegenüberstellung Varianzen
- Varianzen und Objekte
- Wozu Wildcardtypen?

Motivation

- Kompatibilität eines Typs T zu einem Typ U (kurz T → U) heisst:
  - Werte vom Typ T können Variablen vom Typ U zugewiesen werden.

```
T t = ...;
U u = t;
```

- Kompatibilität zwischen Typen bisher:
  - Implizite Typkonversion: für bestimmte primitive Typen, zB int → double
  - Implementierung: Klasse zu Interface, einschließlich Arrays
  - Vererbung: Abgeleitete Klasse zu Basisklasse, zB String → Object, einschließlich Arrays
  - Autoboxing: Primitiver Typ zu Wrapperklasse, zB int → Integer
  - Auto-Unboxing: Wrapperklasse zu primitivem Typ, zB Integer → int
- Generische Typen der gleichen generischen Klasse bisher inkompatibel
- Mit Wildcardtypen Einführung von Kompatibilitäten ⇒ mehr Flexibilität

Invarianz

- Generische Typen der gleichen generischen Klasse bisher inkompatibel
- Kompatibilität zwischen Typargumenten wird ignoriert
- Beispiel: `Integer` ist kompatibel zu `Number`, aber `Node<Integer>` nicht kompatibel zu `Node<Number>`

```
Number n = new Integer(23);                 // ok
Node<Number> nn = new Node<Integer>(23);  // Fehler
```

- Bezeichnung als "Invarianz":
  Eine Variation des Typargumentes bzgl. der Vererbungshierarchie wird nicht auf die generischen Typen übertragen.

Bivarianz

- Generischer Typ mit Wildcardzeichen "?" als Typargument = Wildcardtyp
- Syntax: C<?>
- Beispiel: Node<?> nx;
- Wildcardtyp erlaubt zur Definition von Variablen, nicht zu Instanziierung von Objekten (siehe Interfaces und ABCs)
- Beispiel:

```
Node<?> nx;
nx = new Node<?>(); // Fehler!
```

Kompatibilität

- Jeder generische Typ derselben generischen Klasse ist kompatibel zum Wildcardtyp
- Allgemein (→ heißt "ist kompatibel zu"):
  - C<A> → C<?>
  - für jedes A
- Beispiel:

```
Node<?> nx;
nx = new Node<String>("foo");
nx = new Node<Integer>(1);
nx = new Node<Double>(3.14);
```

- Bezeichnung als “Bivarianz”
  Zu einem Wildcardtyp sind alle generischen Typen der gleichen generischen Klasse kompatibel.

Ähnlichkeit zur Ableitung

- Kompatibilität konkreter generischer Typ → Wildcardtyp ist asymmetrisch:

```
Node<?> nx;
...
Node<String> ns = nx;                    // Fehler
```

- Verhältnis formal ähnlich wie Ableitung:
  - konkreter generischer Typ → Wildcardtyp
  - abgeleitete Klasse → Basisklasse

Anwendung

- Wildcardtypen sinnvoll, wenn das konkrete Typargument keine Rolle spielt
- Beispiel: Methode `nodesCount` zum Zählen der Knoten in einem Baum
- Inhalt der Knoten irrelevant, nur Baumstruktur wichtig

```
class Util {
    int nodesCount(Node<?> n)
    {
      if(n == null)
         return 0;
      else
         return 1 + nodesCount(n.getLeft())
                  + nodesCount(n.getRight());
    }
    ...
}
```

Einschränkungen

- Compiler kennt konkreten Typ des Wildcardargumentes nicht
- Kein lesender Zugriff mit konkretem Typargument:

```
Node<?> nx;
...
Integer i = nx.getInfo();     // Fehler
```

- Kein schreibender Zugriff mit konkretem Typargument:

```
Node<?> nx;
...
nx.setInfo(1);          // Fehler
```

- Das tatsächliche, konkrete Typargument zur Laufzeit spielt keine Rolle:

```
Node<?> nx;
nx = new Node<Integer>(23);
Integer i = nx.getInfo();     // Fehler
nx.setInfo(1);          // Fehler
```

Begrenzte Zugriffe

- Compiler kennt das Typargument zur Laufzeit nicht
- Jeder Referenztyp ist kompatibel zu Object ⇒ Lesen als Object immer möglich:

```
Node<?> nx;
...
Object x = nx.getInfo();          // ok
```

- `null` ist kompatibel zu jedem Referenztyp => Schreiben von null immer möglich:

```
Node<?> nx;
...
nx.setInfo(null);          // ok
```

Covarianz

- Wildcard ? führt zu Kompatibilität mit generischen Typen aller Typargumente
- Einschränken auf bestimmte Typargumente mit Typebound
- Syntax: `C<? extends B>`
- Nur generische Typen kompatibel, deren Typargument zu B kompatibel ist
- Beispiel:

```
Node<? extends Number> n;
n = new Node<Integer>(23);          // ok
n = new Node<Object>(new Object());     // Fehler
```

Covarianz: Kompatibilität

- Bezeichnung als "Covarianz":
  Die Kompatibilität der generischen Typen folgt der Kompatibilität des Typargumentes.
- Allgemein ("→" heißt "ist kompatibel zu"):
  - C<A> → C<? extends B>
  - wenn A → B

- Typebound B = "Upper-Typebound": Aus Sicht einer Vererbungshierarchie die "Obergrenze" für konkrete Typargumente

Covariante Arrays

- Arrays verhalten sich covariant:
  - A[] → B[]
  - wenn A → B
- Problem: Lücke im statischen Typsystem!

```
Number[] a = new Integer[23];
a[0] = new Double(3.14);          // ArrayStoreException
```

- Ohne weitere Schutzmassnahmen: Fehler übertragen auf covariante Wildcardtypen:

```
Node n = new Node(23);
n.setInfo(3.14);                  // ??
```

Gesperrte Schreibzugriffe

- Schutz gegen Lücke im statischen Typsystem: Keine schreibenden Zugriffe über covariante Wildcardtypen. Z.B
- Beispiel:

```
Node<? extends Number> n;
...
n.setInfo(1);                // Schreiben - unzulässig
```

- Ratio: "? extends Number" ist irgendein zu Number kompatibler Typ, vielleicht Byte; Integer muss zu diesem Typ nicht kompatibel sein
- Ausnahme: `null` passt zu jedem Referenztyp, wird immer akzeptiert

```
Node<? extends Number> n;
...
n.setInfo(null);             // Schreiben von null - ok
```

Gesperrte Schreibzugriffe (2)

- Lesender Zugriff kein Problem:

```
Node<? extends Number> n;
...
Number x = n.getInfo();      // Lesen - ok
```

- Ratio: Welcher konkrete Typ sich immer hinter "? extends Number" verbirgt, er ist mit Sicherheit kompatibel zu Number

Beispiel Covarianz

- Methode `copyFrom` der generischen Klasse `Node<T>`: Erwartet einen anderen Knoten als Parameter, kopiert dessen Information in den eigenen Knoten
- Information im eigenen Knoten hat Typ T, kann ein Objekt vom Typ T oder einem dazu kompatiblen Typ aufnehmen
- Parameter von `copyFrom`: Wildcard mit T als Upper-Typebound
- Definition von `copyFrom`:

```
class Node<T> {
    ...
    void copyFrom(Node<? extends T> other)
    {
       info = other.getInfo();
    }
}
```

Beispiel Covarianz (2)

- Aufruf von copyFrom:

```
Node<Number> n;
Node<Integer> i;
...
n.copyFrom(i);      // ok
i.copyFrom(n);      // Fehler
```

Contravarianz

- Einschränkung des Typarguments
- Neue Form der Einschränkung auf Basisklassen
- Syntax: `C<? super B>`
- Nur generische Typen kompatibel, zu deren Typargument B kompatibel ist (Vorsicht: Verwechslungsgefahr)
- Beispiel:

```
Node<? super Number> n;
n = new Node<Integer>(23);              //
Fehler
n = new Node<Object>(new Object());     // ok
```

Contravarianz: Definition

- Contravarianz:
  Die Kompatibilität der generischen Typen läuft der Kompatibilität des Typargumentes entgegen.
- Allgemein ("→" heißt "ist kompatibel zu"):
  - C<A> → C<? extends B>
  - wenn A ← B
- Typebound B = Lower-Typebound: Aus Sicht einer Vererbungshierarchie die "Untergrenze" für konkrete Typargumente

Gesperrte Lesezugriffe

- Keine lesenden Zugriffe über contravariante Wildcardtypen, zB

```
Node<? super Number> n;
...
Number x = n.getInfo();      // Lesen - unzulässig
```

- Ratio: "? super Number" ist Number selbst oder irgendeine Basisklasse von Number. Der Typ kann nicht einfach als Number behandelt werden.
- Ausnahme: An Object kann jeder Referenztyp zugewiesen werden:

```
Node<? super Number> n;
...
Object x = n.getInfo();      // Lesen als Object - ok
```

Gesperrte Lesezugriffe (2)

- Schreibender Zugriff unproblematisch

```
Node<? extends Number> n;
...
n.setInfo(1);              // Schreiben - ok
```

- Ratio: Was immer sich hinter "? extends Number" verbirgt, eine Number kann mit Sicherheit zugewiesen werden

Beispiel Contravarianz

- Methode `copyTo` der generischen Klasse `Node<T>`: Erwartet einen anderen Knoten als Parameter, kopiert die eigene Information in den anderen Knoten
- Information im eigenen Knoten hat Typ T, kann in jeden fremden Knoten geschrieben werden, der auch den Typ T oder eine Basisklasse davon hat
- Parameter von `copyTo`: Wildcard mit T als Lower-Typebound
- Definition von `copyTo`:

```
class Node<T> {
    ...
    void copyTo(Node<? super T> other)
    {
        other.setInfo(info);
    }
}
```

Beispiel Contravarianz (2)

- Aufruf von copyTo:

```
Node<Number> n;
Node<Integer> i;
...
n.copyTo(i);        // Fehler
i.copyTo(n);        // ok
```

Knoten geordneter Bäume

```
class Node<T extends Comparable<T>>
{...}
```

- Von Comparable abgeleitete Klasse wird nicht als Typargument akzeptiert --> Lösung: Irgendeine Basisklasse des Typarguments muss Comparable implementieren:

```
class Node<T extends Comparable<? super T>>
{...}
```

- Beispiel:

```
class Base implements Comparable<Base>
{...}

class Derived extends Base
{...}


...
Node<Base> nb;          // ok
Node<Derived> nd;       // ok
```

Varianzen: Gegenüberstellung

- Vier Arten der Varianz:

	Art	*Lesen*	*Schreiben*	*kompatible Typargumente*
Invarianz	`C<T>`	erlaubt	erlaubt	`T`
Bivarianz	`C<?>`	verboten	verboten	alle
Covarianz	`C<? extends B>`	erlaubt	verboten	`B` und abgeleitete
Contravarianz	`C<? super B>`	verboten	erlaubt	`B` und Basistypen

Varianzen und Objekte

- Varianz: Einschränkungen für Variablen, nicht Objekte
- Beispiel:

```
Node<Integer> i = new Node<Integer>(23);
```

- Zuweisen an covarianten Wildcardtyp ⇒ kein schreibender Zugriff über diese Variable:

```
Node<? extends Number> n = i;
n.setInfo(24);                  // Fehler
```

- Knoten selbst nicht betroffen:

```
i.setInfo(24);                  // ok
```

Wozu Wildcardtypen?

- Mit Wildcardtypen flexiblerer Code
- Methoden mit Parametern von Wildcardtypen akzeptieren Argumente vieler unterschiedlicher generischer Typen
- Nachteil: Compiler muss Einschränkungen auferlegen, um die statische Typprüfung durchzuhalten
- Ohne lückenlose statische Typprüfung: Fehlerfrei übersetztes Programm kann zur Laufzeit mit Typfehler abstürzen

Kontrollfragen

- Wie werden in Java Generics spezifiziert?
- Was ist der Unterschied zwischen Generics und Inheritance? Was passiert zur Laufzeit?
- Was ist der Unterschied zwischen einer Generics und einem Interface?
- Was ist ein Wildcardtyp?
- Was ist eine Varianz und welche 4 Arten werden unterschieden?

Zusammenfassung

- *Generische Klasse* = Klasse mit Typvariablen
- Generischer Typ = Generische Klasse + Typargument

- 1 generische Klasse ⇒ viele generische Typen
- Jeder generische Typ ist eigenständig, gleichrangig zu anderen Javatypen