Spezifikation und Test: Zusicherungen in Klassendiagrammen

Martin Wirsing

in Zusammenarbeit mit
Moritz Hammer und Axel Rauschmayer

Ziele

- OCL, die Object Constraint Language, kennen lernen
- Lernen in UML Klasseninvarianten und das Verhalten von Methoden zu spezifizieren

Spezifikation im UML

- Klassendiagramme legen nur die Signatur der Attribute und Methoden fest. Das reicht **NICHT** aus, um das Verhalten des Systems präzise und eindeutig zu spezifizieren.
- Die Sprache OCL („Object Constraint Language“) wird in UML verwendet, um Klasseninvarianten und Vor- und Nachbedingungen zu spezifizieren.

OCL: Geschichtliches

- OCL wurde ab 1997 von Steve Cook, Anneke Kleppe, Jos Warmer u.a. entwickelt.
- Vorläufer ist die Formale SW-Entwicklungsmethode Syntropy (von Steve Cook und John Daniels).
- Die Semantik von OCL basiert auf der Dissertation von Mark Richters (Uni Bremen, 2002).

Steve Cook
1994 Entw. Syntropy
1997 OCL
Jetzt: Chief Architect IBM

Anneke Kleppe
Dipl. 1988
Amsterdam,
Jetzt Uni Twente

Jos Warmer
Dipl. 1985
Amsterdam

Mark Richters
Diss. Semantik von OCL
Uni Bremen, 2002

OCL

OCL (Object Constraint Language) ist eine

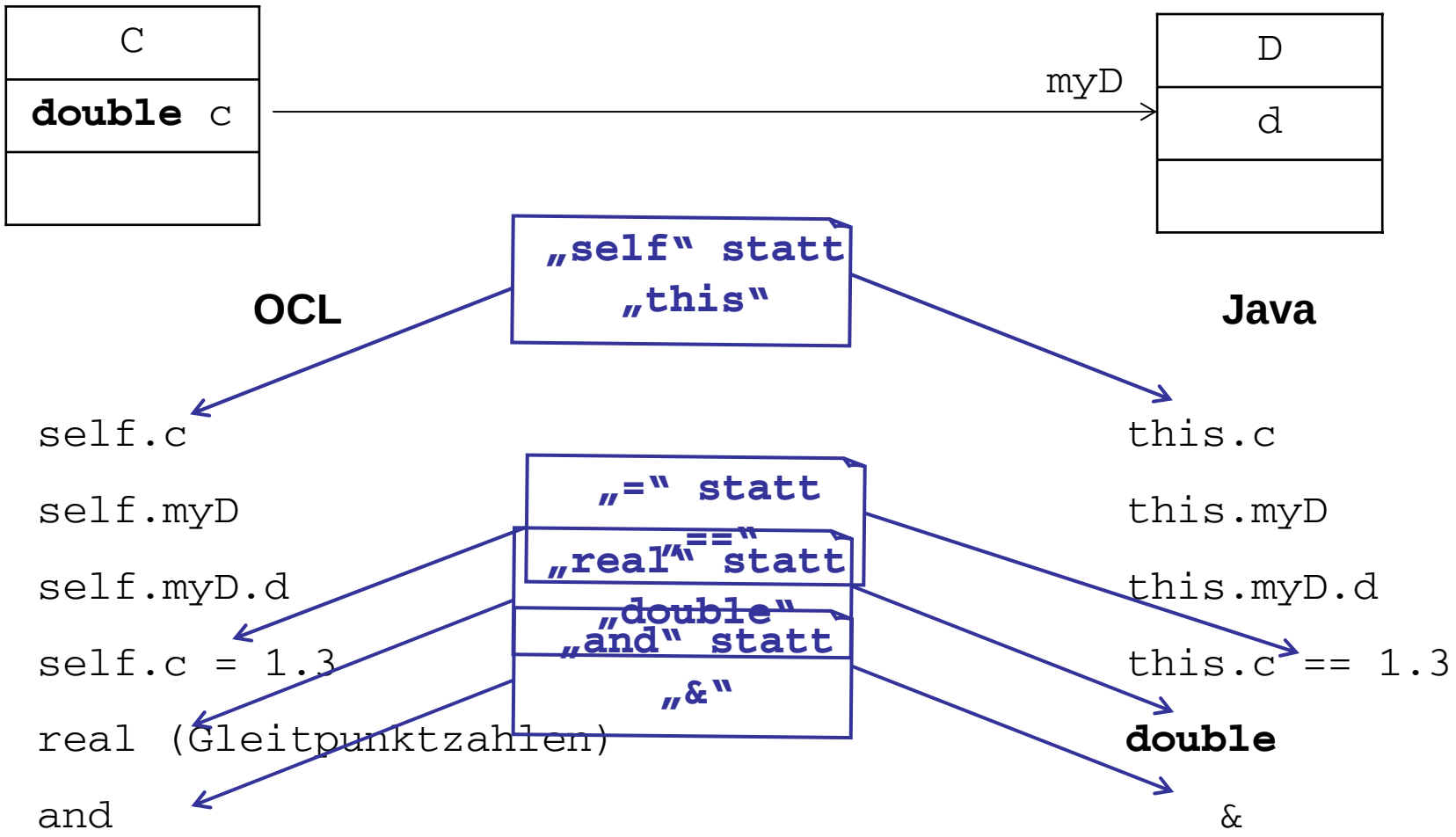
- **formale Sprache zur Spezifikation von Ausdrücken über Objekte**, d.h.
  - OCL ist **Teilsprache der Logik 1. Stufe** mit

    Ausdrücken zur Bezeichnung von Instanzvariablen

    (und Zugriffspfaden auf Instanzvariablen) und

    vordefinierten Datentypen,
- **Teil der UML-Spezifikation,**
- **Verwendung überall, wo Ausdrücke in UML Diagrammen auftauchen.**

OCL vs Java


C
double c
myD
D
d
„self" statt „this"
OCL
Java
self.c
self.myD
self.myD.d
self.c = 1.3
real (Gleitpunktzahlen)
and
„=" statt „=="
„real" statt „double"
„and" statt „&"
this.c
this.myD
this.myD.d
this.c == 1.3
double
&

Spezifikation von Invarianten

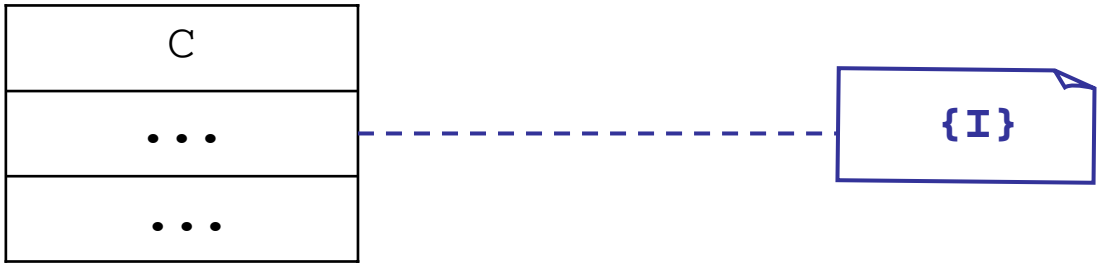
Beispiel: Bankkonto mit Überziehungsrahmen

Textuell:

```
context    BankAccountL
inv: bal >= limit
```

Spezifikation von Invarianten

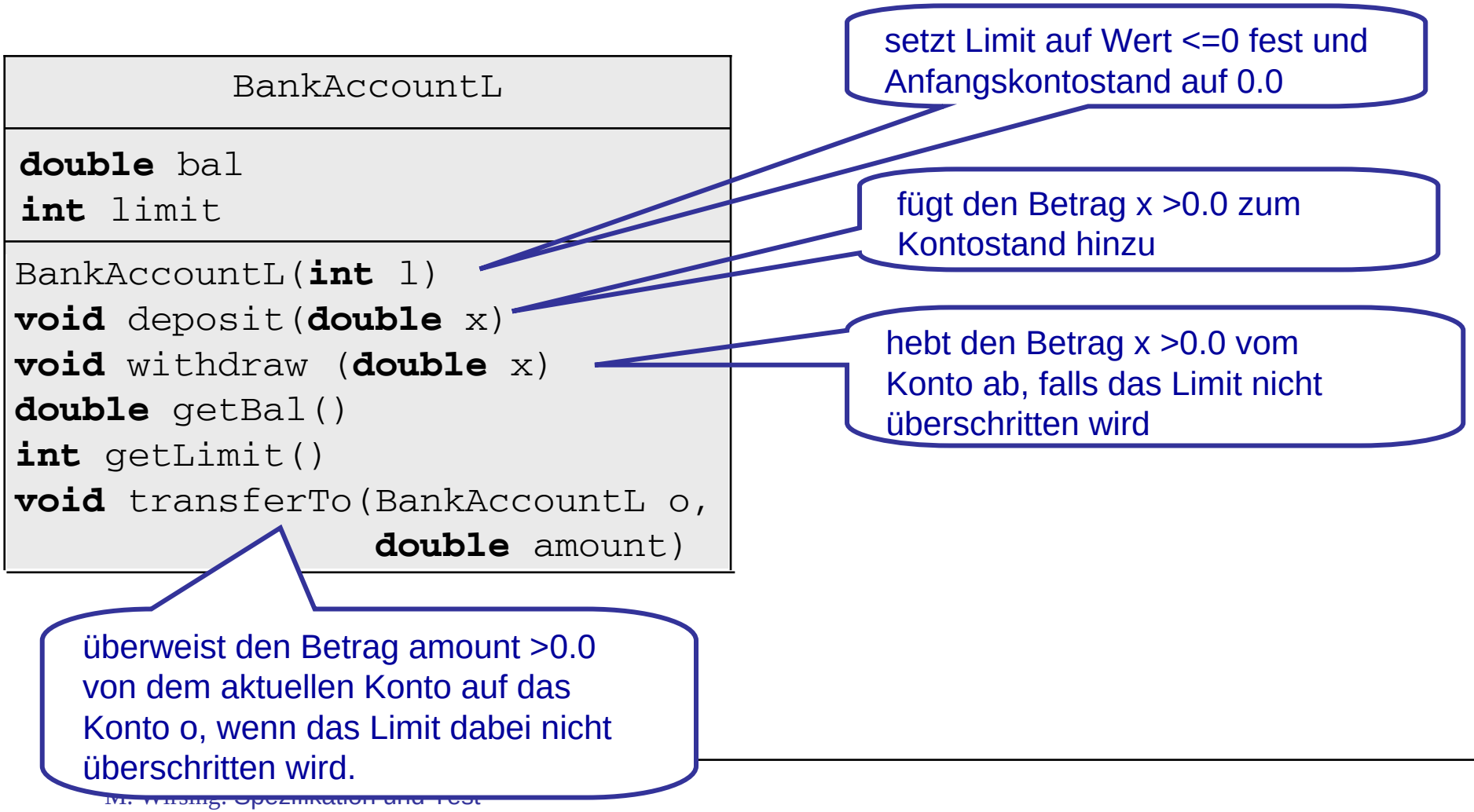
- Eine Klasseninvariante I der Klasse C ist eine Eigenschaft der Attribute von C, die für jede Instanz von C in jedem Zustand gilt.
- Eine Klasseninvariante `I` wird ausgedrückt als Notiz (in geschweiften Klammern)



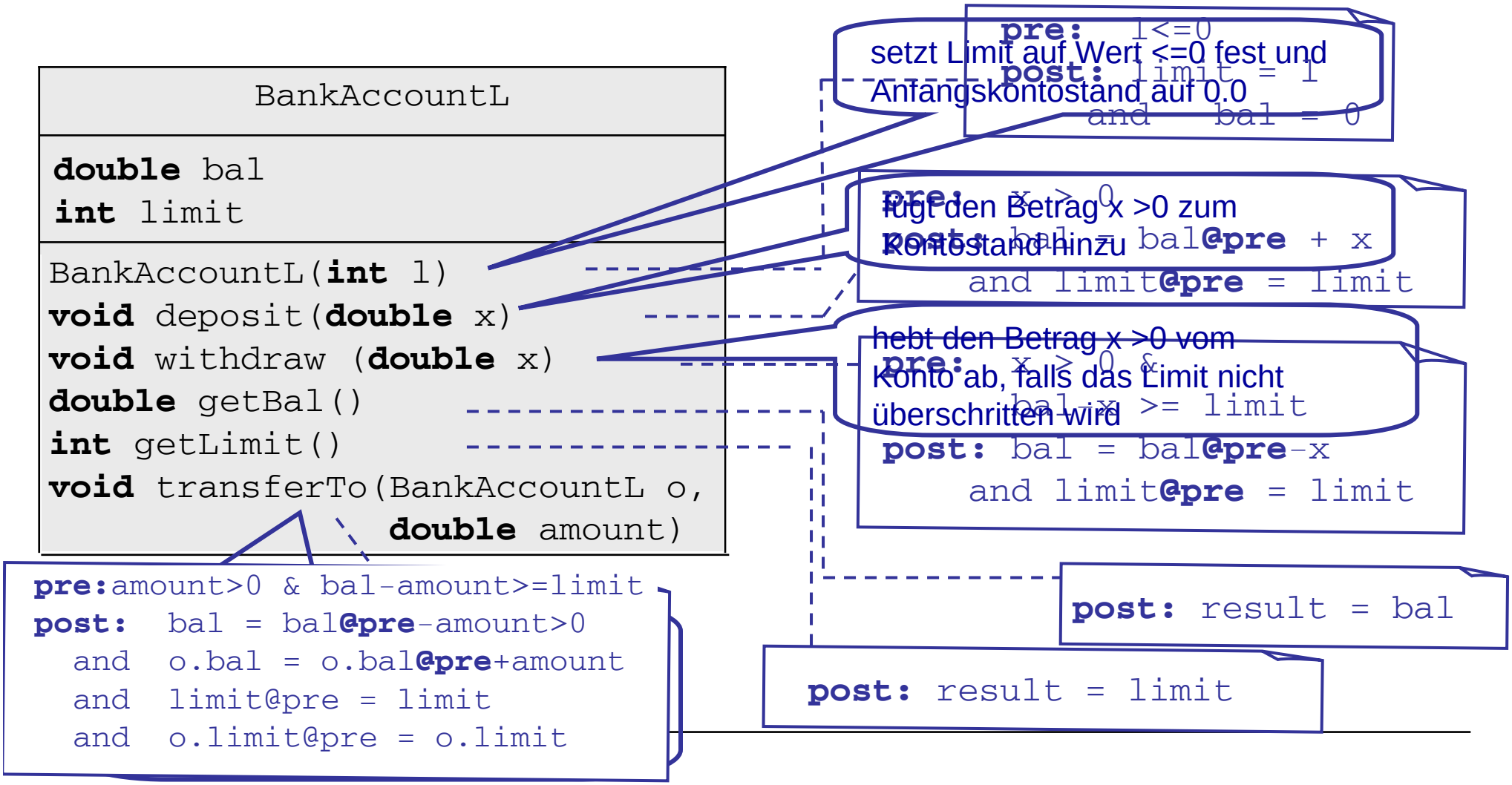
oder textuell in der Form

```
context C
inv: I
```

Beispiel: Bankkonto mit Überziehungsrahmen

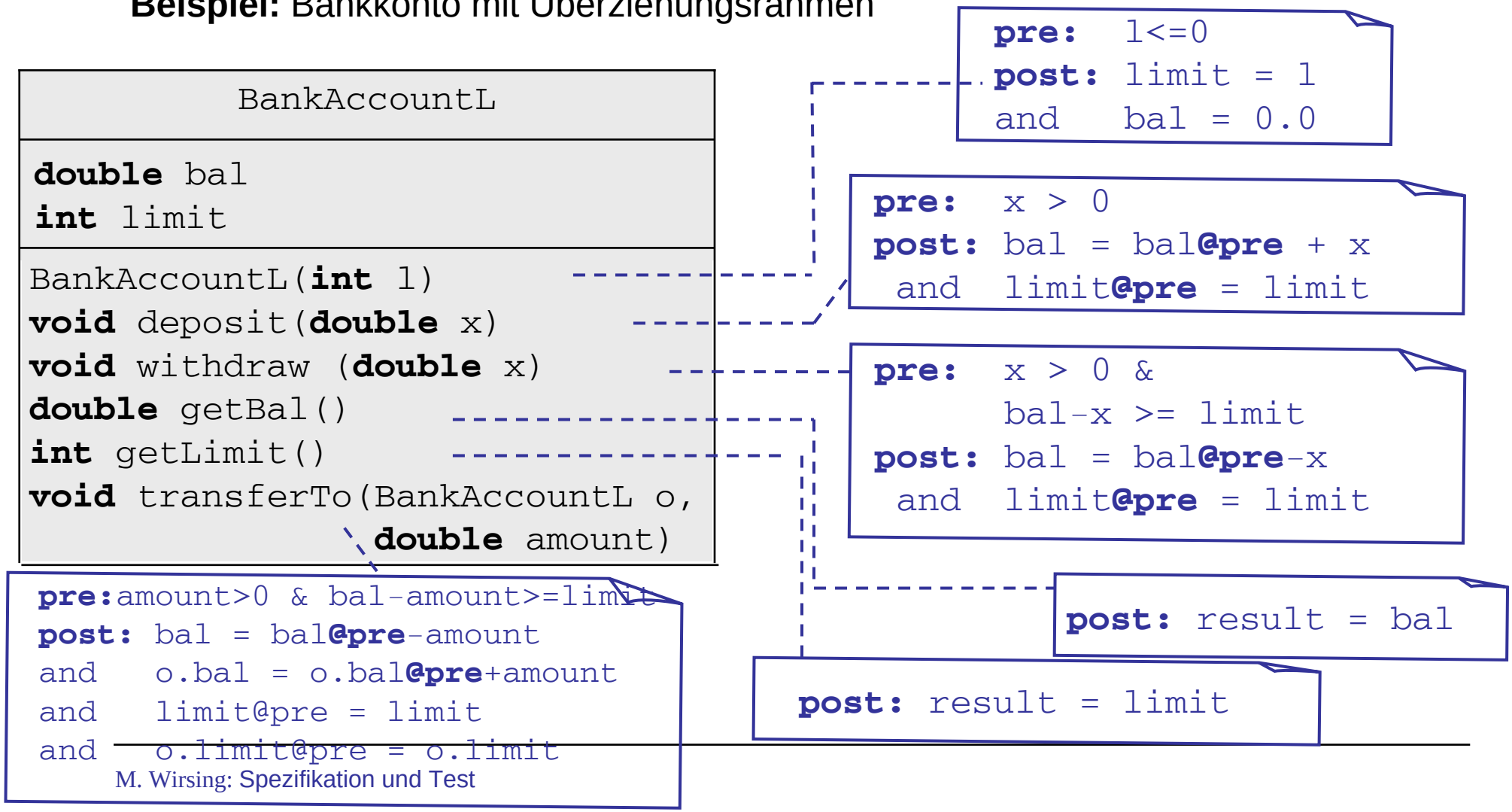


Beispiel: Bankkonto mit Überziehungsrahmen



Spezifikation von Vor- und Nachbedingungen

Beispiel: Bankkonto mit Überziehungsrahmen



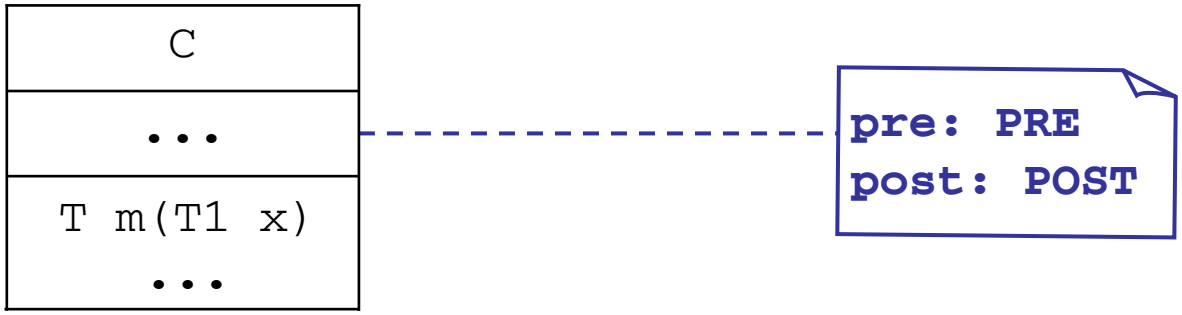
Spezifikation von Vor- und Nachbedingungen

```
context BankAccountL:: BankAccountL(int l)
pre:  l<=0
post: limit = l  and   bal = 0

context BankAccountL:: deposit(real x):void
pre:  x > 0
post: bal = bal@pre + x  and  limit@pre = limit

context BankAccountL:: withdraw (real x):void
pre:  x > 0  and  bal -x >= limit
post: bal = bal@pre-x  &  limit@pre = limit

context BankAccountL:: getBal(): real
post: result = bal

context BankAccountL:: getLimit(): int
post: result = limit

context BankAccountL:: transferTo (BankAccountL o, real amount): void
pre: amount > 0 and bal-amount >= limit
post: bal = bal@pre-amount  and limit@pre = limit
  and o.bal = o.bal@pre+amount  and o.limit@pre = o.limit
```

Spezifikation von Vor- und Nachbedingungen

Vor und Nachbedingungen von Methoden werden ausgedrückt

- als Notiz mit Schlüsselwörtern ***pre, post***:



wobei PRE und POST OCL-Formeln sind

- oder textuell

```
context C :: m(T1 x): T
pre: PRE
post: POST
```

Spezifikation von Vor- und Nachbedingungen

- PRE und POST dürfen als Variablen nur enthalten `self`, den formalen Parameter `x` und die Attribute von `C`;
- In POST kommt außerdem vor

`a@pre` (für jedes Attribut a von `C`)

`result` (zur Bezeichnung des Resultats)

Wert von a im Vorzustand (`a@pre` ersetzt den Gebrauch der logischen Variablen)

Vordefinierte lokale Variable zur Bezeichnung des Resultats

Kurzzusammenfassung: Typen und Operationen von OCL

OCL-Syntax (vereinfacht)

Integer, Real, Boolean, String	Grundklassen
(int, real, boolean	in Info2: Datentypen klein)
C, Collection(C), Set(C)	Klassen C und Kollektionstypen
Sequence(C), OrderedSet(C)	Kollektionstypen für List(C), SortedSet(C)
x.bal	Instanzvariable
=	Gleichheit
not, and, implies,...	Junktoren
set → forAll(x | P)	beschränkte Quantifizierung
	≅ ∀ x∈ set. P
set → select(x | P)	≅ {x∈ set | P}
C.allInstances()	„alle existierenden Objekte der Klasse C“

Zusätzlich, in Nachbedingungen

x.bal@pre	„vorheriger“ Wert von x.bal
x.oclIsNew()	x bezeichnet neues Objekt

Partielle Korrektheit

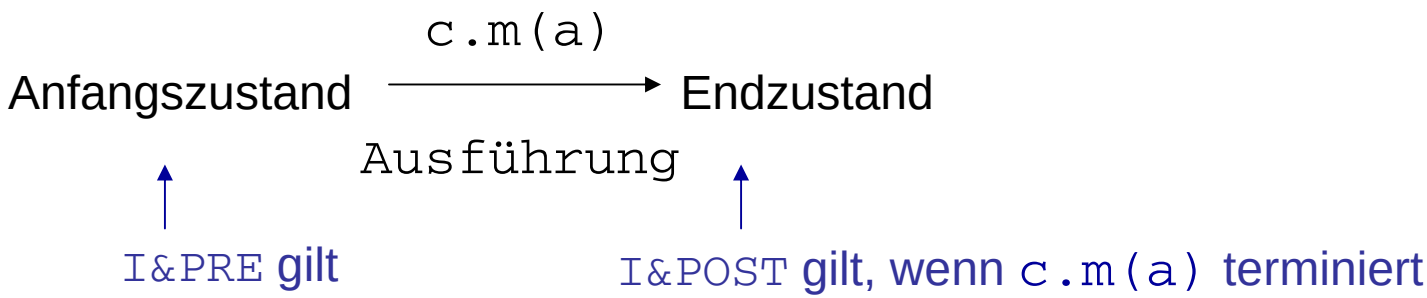
- Eine Methode der Klasse `C`

```
T m(T1 x) {body}
```

heißt **partiell korrekt** bzgl. der Vorbedingung `PRE`, der Nachbedingung `POST` und der Invariante `I`, wenn

`m` partiell korrekt bzgl. `PRE` und `POST` ist und die Invariante `I` erhält;

d.h. für **alle** Instanzen `c` von `C` und **alle** aktuellen Parameter `a`,



wenn `I&PRE` im Anfangszustand von `c.m(a)` gilt und,

wenn `c.m(a)` terminiert, dann gilt `I and POST` nach Ausführung von `c.m(a)`

Totale Korrektheit

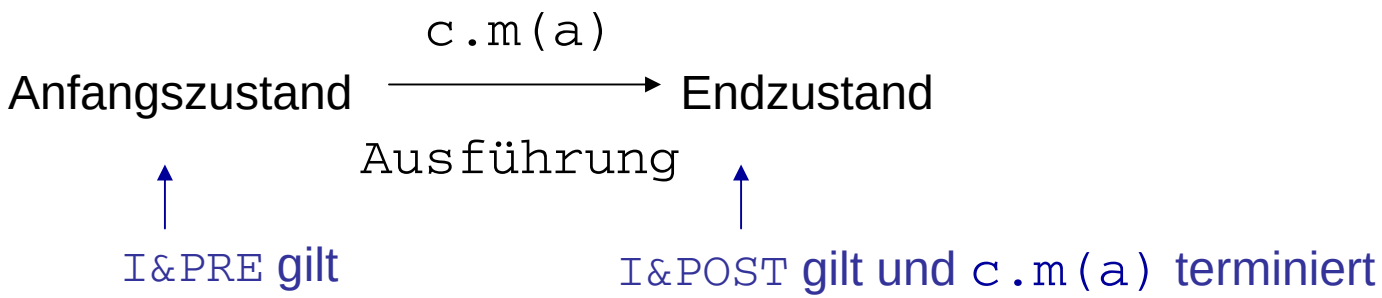
- Eine Methode der Klasse `C`

```
T m(T1 x) {body}
```

heißt **total korrekt** bzgl. `PRE`, `POST` und der Invariante `I`,
wenn

`m` total korrekt bzgl. `PRE` und `POST` ist und die Invariante `I` erhält;

wenn für alle Instanzen `c` von `C` und **alle** aktuellen Parameter `a`,



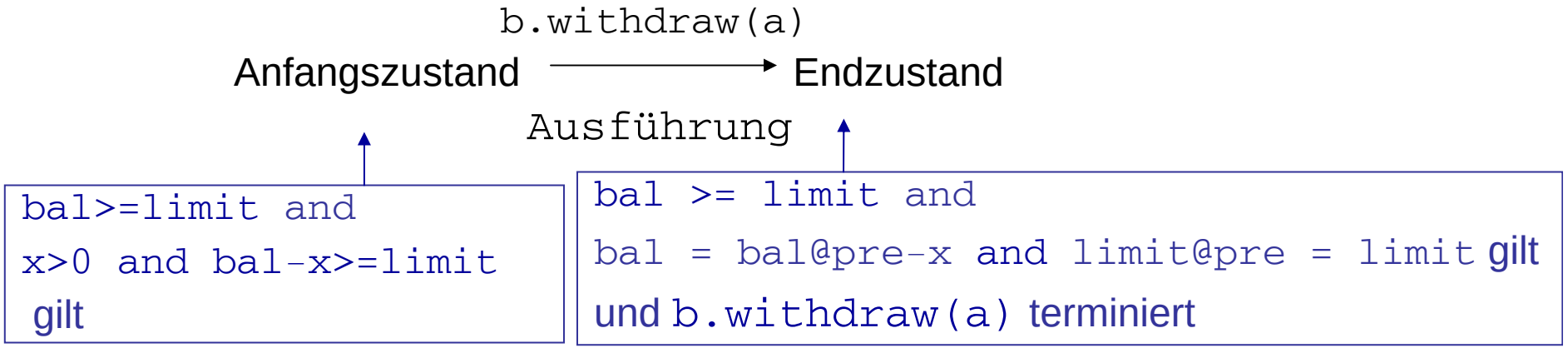
wenn `I&PRE` im Anfangszustand von `c.m(a)` gilt,

dann terminiert `c.m(a)` und `I and POST` gilt nach Ausführung von `c.m(a)`

Beispiel Totale Korrektheit

- Die Methode `withdraw` der Klasse `BankAccountL` ist total korrekt bzgl
  - der Invariante `bal >= limit`
  - der Vorbedingung `x > 0 and bal -x >= limit`
  - der Nachbedingung `bal = bal@pre-x and limit@pre = limit`

d.h. für **alle** Instanzen `b` von `BankAccountL` und **alle** aktuellen Parameter `a` gilt:



Korrekte Implementierung

- Eine Javaklasse C heißt **partiell / total korrekte Implementierung** einer UML Spezifikation von C, wenn
  - alle Methoden von C **partiell / total korrekt bzgl. ihrer Vor- und Nachbedingung**,
  - der **Invarianten von C** und
  - der **Invarianten der Klassen der formalen Parameter** sind.

Bemerkung:

Dabei wird vorausgesetzt, dass durch Methodenaufrufe nur die explizit in Vor- und Nachbedingung erwähnten Attribute geändert werden.

Korrekte Implementierung von `BankAccountL`: 1. Möglichkeit

Die folgende Implementierung von `BankAccount` ist total korrekt bzgl. der UML Spezifikation (aber problematisch beim Produktionslauf, siehe später):

```
public class BankAccountL
 { private double bal;
   private int limit;

   public BankAccount(int l)
        {       assert l<=0; bal = 0.0; limit = l;
        }
   public void deposit(double amount)
   {        assert amount>0;
            bal = bal + amount;
   }
   public void withdraw(double amount)
   {        assert (amount>0 & bal-amount >= limit);
            bal = bal - amount;
   }
```

setzt Limit auf Wert <=0 fest und Anfangskontostand auf 0.0

Problematisch, da nicht geprüft bei Produktionslauf

fügt den Betrag amount >0.0 zum Kontostand hinzu

hebt den Betrag amount >0.0 vom Konto ab, falls das Limit nicht überschritten wird

Korrekte Implementierung von Spezifikationen

Da bei der Auslieferung (Produktionslauf) eines Programms die Zusicherungen ausgeblendet werden, ist es besser,

Vorbedingungen
durch kontrollierte Ausnahmen

zu prüfen.

Das entspricht dem Grundsatz der **defensiven Programmierung!**

Beispiel BankAccountL:

```
public void transferTo(BankAccount other,double amount)
{       if (!(amount>0)) throw new
                IllegalArgumentException(„amount ist nicht positiv");
        if (!(bal-amount >= limit)) throw new
                IllegalArgumentException(„Kontolimit ueberschritten");
        if (!(other.getBalance()>= other.getLimit())) throw new
                IllegalArgumentException(other + „verletzt Invariante");
        withdraw(amount);
        other.deposit(amount);
}
```

Ausnahme bei Verletzung der Vorbedingung amount >0.

Ausnahme bei Verletzung der Vorbedingung bal-amount >= limit.

Ausnahme bei Verletzung der Invariante für other .

Korrekte Implementierung von `BankAccountL` mit Ausnahmen

Eine defensive Implementierung von `BankAccountL` mit Ausnahmen:

```
public class BankAccountL
 { private double bal;
   private int limit;

   public BankAccount(int l)
   {    if (l>0) throw new
            IllegalArgumentException(„limit ist nicht negativ“);
        bal = 0.0; limit = l;
   }

    public void deposit(double amount)
    {      if(amount<=0) throw new
             IllegalArgumentException(„amount ist nicht positiv“);
           bal = bal + amount;
    }
```

Ausnahme, falls limit nicht negativ

Ausnahme, falls amount nicht positiv

Nachweis der Korrektheit

Beispiel `BankAccountL`

Zum Beweis der totalen Korrektheit von `BankAccountL` ist zu zeigen, dass

1. alle Methoden von `BankAccountL` terminieren und dass
2. unter der Annahme der Invariante `bal>=limit,` der Invarianten der Klassen der formalen Parameter und der Vorbedingung

   nach Ausführung jeder Methode

   die Nachbedingung, die Invariante `bal>=limit` und die Invarianten der Klassen der formalen Parameter gelten.

Nachweis der Korrektheit

- Zum **Beweis der Korrektheit** kann man den **Hoare-Kalkül** verwenden (mit zusätzlichen Regeln für Instanzvariablen, **`new`**, Methodenaufruf)

$\Rightarrow$ Dies werden wir hier **nicht** untersuchen.

Siehe Vorlesung „Formale Objekt-orientierte Software-Entwicklung“

- Unabhängig von dem Beweis der Korrektheit sind **Spezifikationen** von Invarianten, Vor- und Nachbedingungen aber **wichtige Hilfsmittel**, die es erlauben, die **Qualität von Java-Programmen zu verbessern**.

Test der Korrektheit

- Man kann die Sprache **JML** verwenden, die es ermöglicht,

  Invarianten, Vor- und Nachbedingungen als formale Kommentare

  zum Programm hinzuzufügen und **automatisch zu testen**.

  (Leider ist JML bisher nur für Java 1.4 verfügbar, deshalb hier nicht eingesetzt.)
- In Java können wir **Assertions** verwenden, um die **Gültigkeit der Invarianten und Nachbedingungen zur Laufzeit zu überprüfen.**

! Beide Möglichkeiten sind aber **keine Beweise**, sondern nur Tests an endlich vielen Beispielen.

Nachbedingungen als „asserts“

- Um Nachbedingungen als „asserts“ darstellen zu können, müssen die @pre-Variablen durch logische Variablen ersetzt werden:

  Für jedes `c.a@pre` vom Typ `C` in einer Nachbedingung wird eine logische Variable `A` mittels

  ```
  final C A = c.a;
  ```

  als (neue) lokale Konstante eingeführt und mit dem Wert von `c.a` im Vorzustand initialisiert.

Korrektheitszusicherungen in Java

Beispiel `transferTo`

```
public void transferTo(BankAccount other, double amount)
{       final double THISBAL = bal;
        final double OTHERBAL = other.getBalance();
        final int THISLIMIT = limit;
        final int OTHERLIMIT = other.getLimit();

        if (!(amount>0)) throw new
        IllegalArgumentException(„amount ist nicht positiv“);
        if (!(bal-amount >= limit)) throw new
       IllegalArgumentException(„Kontolimit ueberschritten“);
        if (!(other.getBalance()>= other.getLimit())) throw new
        IllegalArgumentException(other + „verletzt Invariante“);

        withdraw(amount);
        other.deposit(amount);
```

Logische Variablen zur Kodierung der „@pre-Werte“

Vorbedingungen von transferTo

Invarianten für other; Invar. für this schon geprüft in Vor-bedingung.

Korrektheitszusicherungen in Java

Fortsetzung `transferTo:`

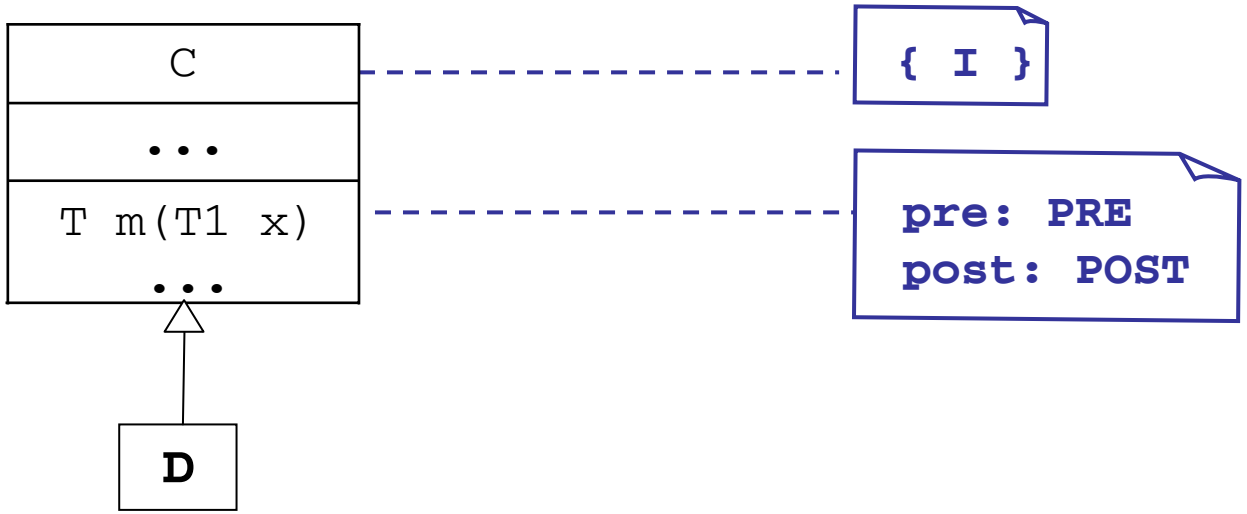
```
            assert (bal>=limit &
                    other.getBalance() >= other.getLimit());
            assert (bal == THISBAL-amount &
                    other.getBalance() == OTHERBAL+amount &
                    limit == THISLIMIT &
                    other.getLimit()== OTHERLIMIT);
    }
```

Invariante für this und other

Nachbedingung von transferTo

Vererbung und Spezifikation

Die Vererbungsbeziehung erhält auch die spezifischen Eigenschaften einer Oberklasse. Man nennt dies „**Spezifikationsvererbung**“ (specification inheritance, behavioral subtyping).



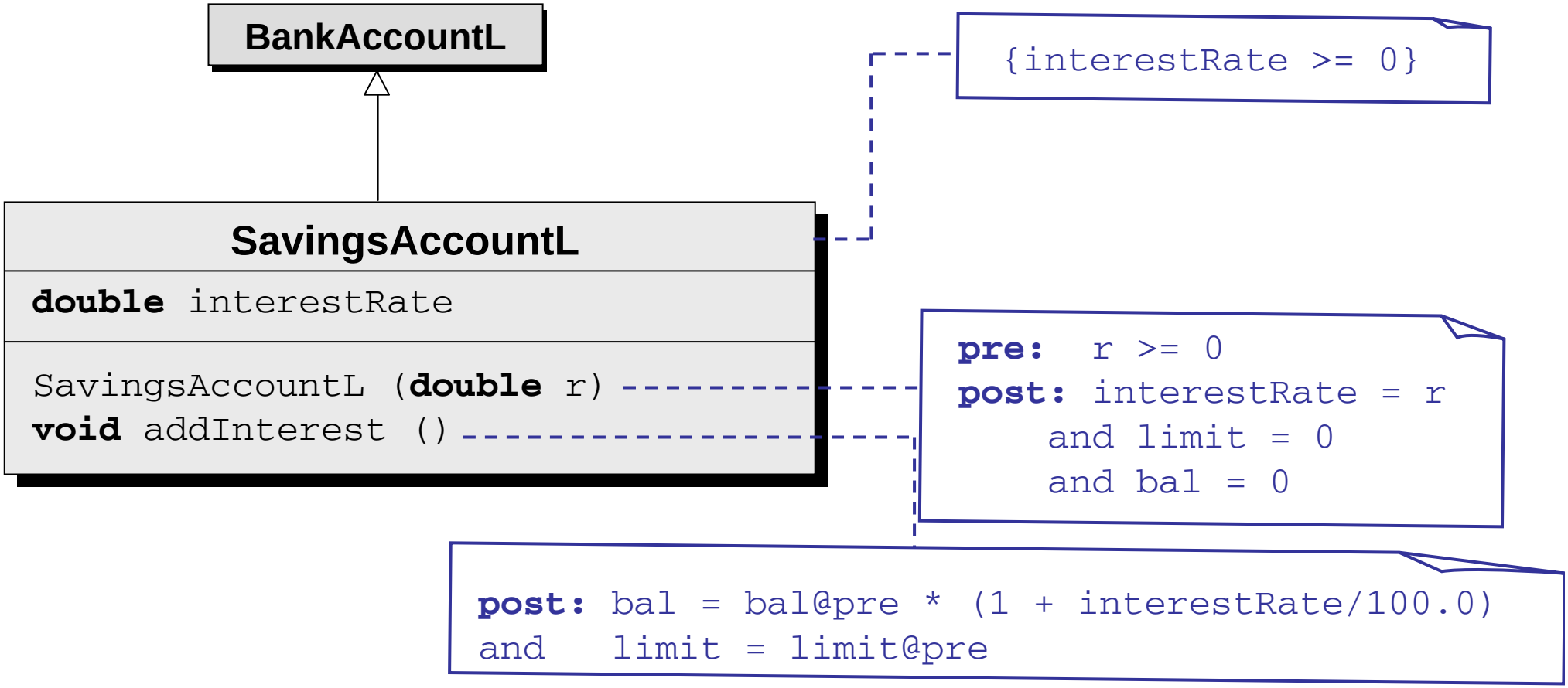
Ist `D` Erbe von `C`, so gilt

- die Invariante `I` von `C` gilt auch für **`D`**
- jede Methode `T m(T1 x)` von `C` vererbt die Vor- und Nachbedingungen an `D`

```
context D :: T m(T1 x)
pre: PRE
post: POST
```

Vererbung und Spezifikation

Beispiel: Sparkonto



Vererbung von Invarianten und Vor-/Nachbedingungen

Beispiel: Sparkonto

- Ein Sparkonto erfüllt alle eigenen Invarianten, Vor- und Nachbedingungen und die der Oberklasse `BankAccountL` z.B.
- Die Invariante von `SavingsAccountL` erbt die Invariante von `BankAccountL` und lautet

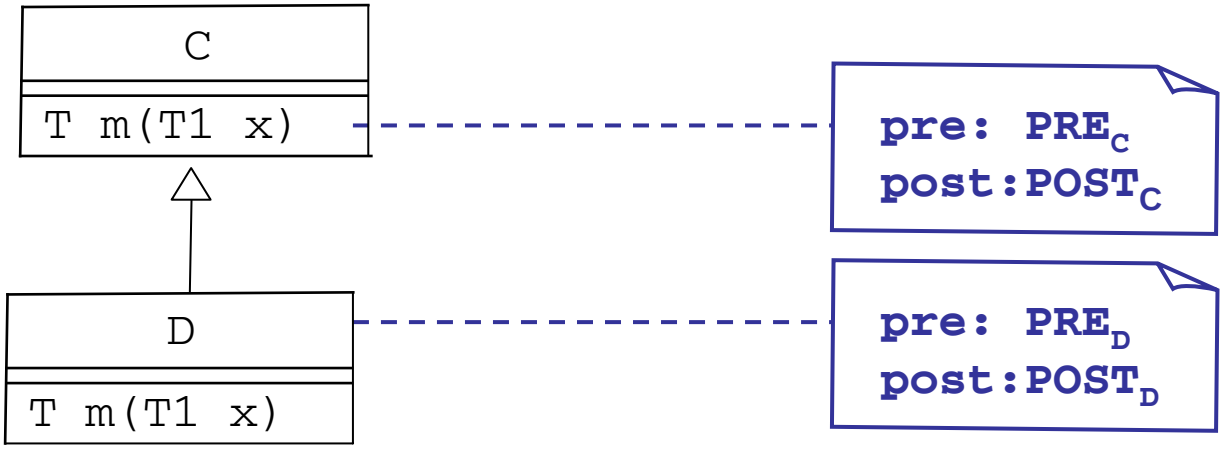
```
context SavingsAccountL
inv: bal >= limit & interestRate >= 0
```

- Die ererbte Vor- und Nachbedingung von `deposit` lautet

```
context SavingsAccountL:: deposit(double x): void
    pre:  x > 0
    post: bal = bal@pre + x  and  limit@pre == limit
```

Redefinition und Spezifikation

Wird m in der Erbenklasse D **redefiniert** und besitzt selbst eine Vor- und Nachbedingung, **müssen** für m die **Vor- und Nachbedingungen sowohl von C und als auch von D gelten**:



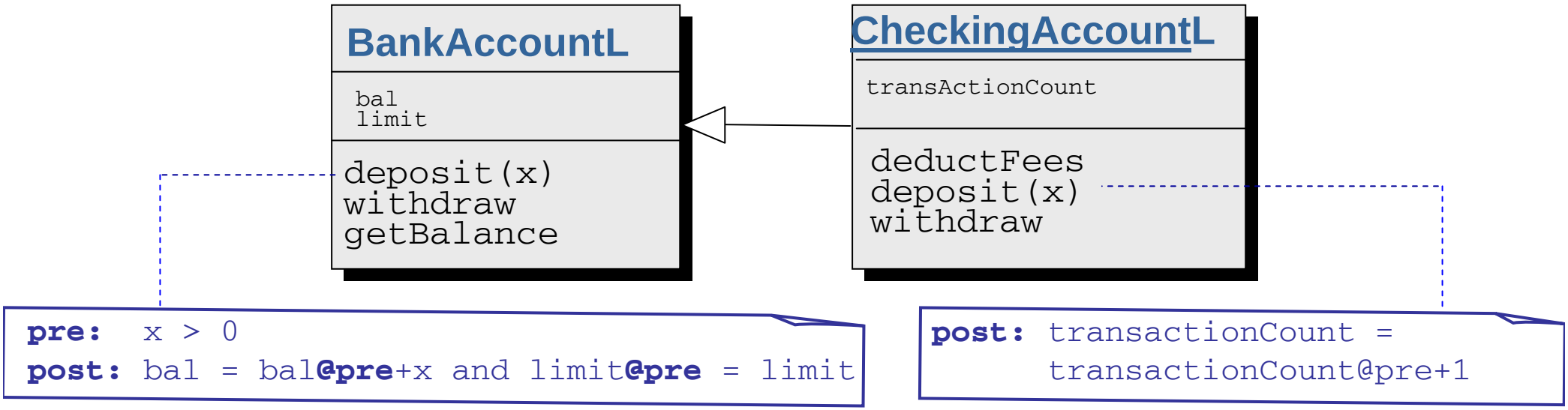
Wird m in D redefiniert, so gelten

- **context D** :: m(T1 x): T **pre**: PRE_C **post**: $POST_C$ und
- **context** D :: m(T1 x): T **pre**: PRE_D **post**: $POST_D$

Dies ist äquivalent zu

- **context D** :: m(T1 x): T
  pre: PRE_C or PRE_D
  post: (Pre_C@pre implies $POST_C$) and (Pre_D@pre implies $POST_D$)

Spezifikation von Redefinition: Beispiel CheckingAccount



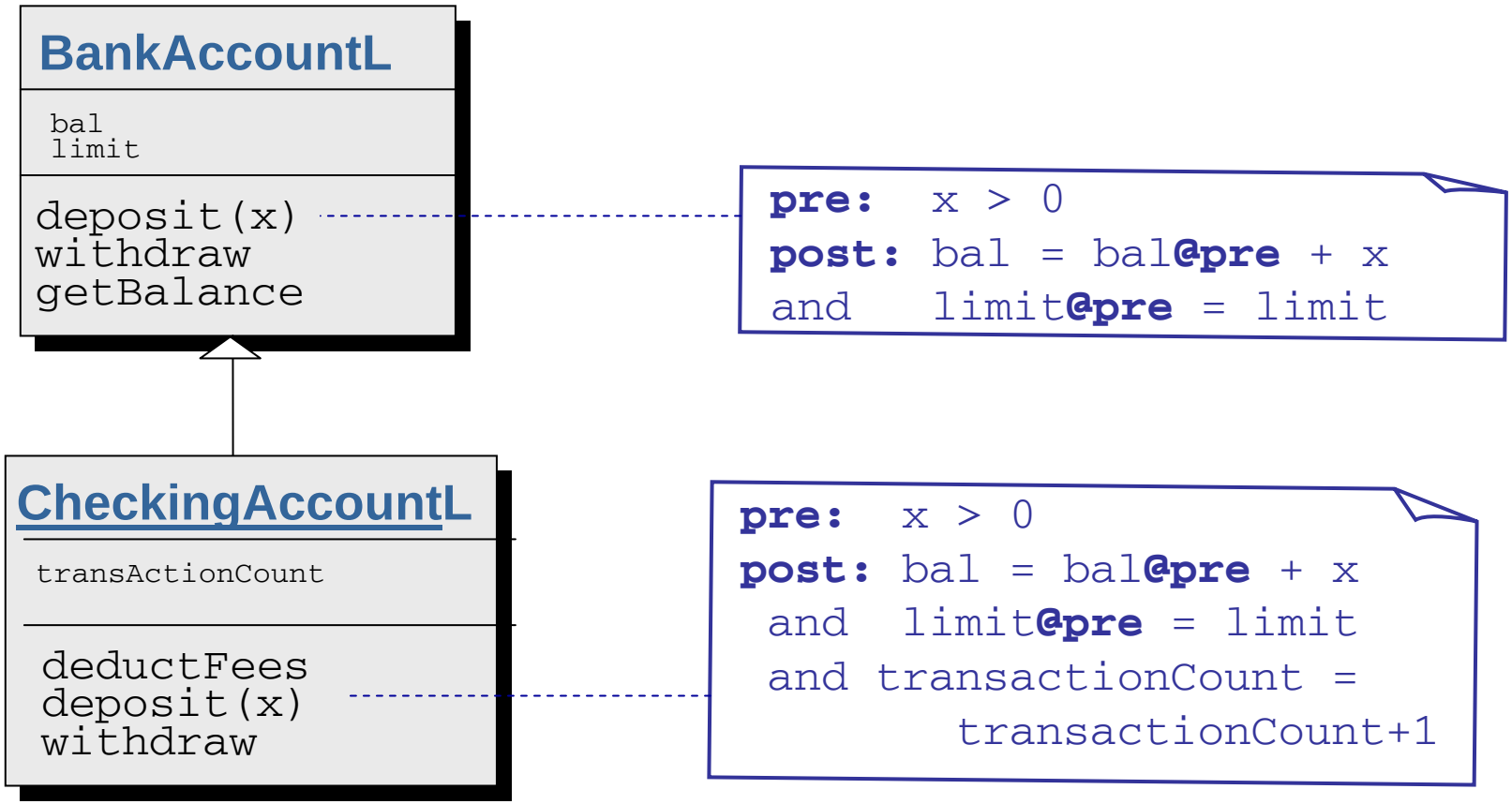
Es gilt:

- **context CheckingAccount** :: deposit(double x): void
  pre: x>0 **post**: bal = bal@pre+x and limit = limit@pre und
- **context** CheckingAccount :: deposit(double x): void
  post: transactionCount = transactionCount@pre +1

Dies ist (nach logischen Umformungen) äquivalent zu

```
context CheckingAccount :: deposit(double x): void
  pre: x>0
  post: bal = bal@pre+x and limit = limit@pre and
    transactionCount=transactionCount@pre+1
```

Spezifikation von Redefinition: Beispiel CheckingAccount

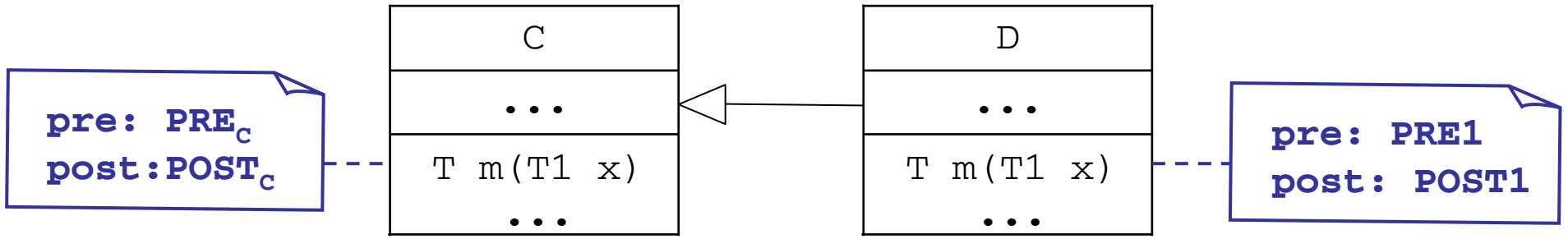


Es gilt: Pre(BankAccountL) implies Pre(CheckingAccountL) und
Post(CheckingAccountL) implies Post(BankAccountL)

Spezifikation von Redefinition: „Substitutionsprinzip“

- **Substitutionsprinzip:**

Wird eine vererbte Methode m in D redefiniert, so muss die Erbenmethode das **Verhalten der „Vatermethode“ spezialisieren** und an jeder Stelle aufgerufen werden können, an der die „Vatermethode“ aufgerufen werden kann.



d.h. das Substitutionsprinzip verlangt:

- **PRE_C implies PRE1**
- **POST1 implies $POST_C$**

Spezifikation von Redefinition: Substitutionsprinzip

- Das „Substitutionsprinzip“ bei Vererbung verlangt, dass eine Erbenmethode an jeder Stelle aufgerufen werden kann, an der die „Vatermethode“ aufgerufen werden kann.
- Deshalb muss die Vorbedingung **PRE1** der Erbenmethode **schwächer** sein **als** die Vorbedingung **PRE** der Vatermethode (**Kontravarianz**):

  PRE implies PRE1
- Die Nachbedingung POST1 der Erbenmethode muss **spezieller (stärker)** sein **als** die Nachbedingung **POST** der Vatermethode (**Kovarianz**):

  POST1 implies POST
- Spezifikationsvererbung impliziert das Substitutionsprinzip!

Zusammenfassung

- In UML werden **Zusicherungen** in der Sprache **OCL** spezifiziert.
- Eine Invariante beschreibt eine **Eigenschaft der Attribute** (und Assoziationen). Die Invarianten sollen vor und nach jedem Aufruf einer (public) Methode gelten.
- **Vor- und Nachbedingungen** spezifizieren das **Verhalten von Methoden**.
- Erbenklassen erhalten das spezifizierte Verhalten der Oberklasse („**behavioral subtyping**“):
  - Invarianten und Vor- und Nachbedingungen werden vererbt.
  - Auch bei Redefinition gilt das **Substitutionsprinzip**, aus dem folgt:
    - Die Vorbedingung der Vaterklasse impliziert die Vorbedingung des Erben,
    - die Nachbedingung des Erben impliziert die Nachbedingung der Vaterklasse.

Zusammenfassung

- Die Sprache **OCL** („Object Constraint Language“) ist eine **Teilsprache der Logik 1.Stufe** zur Spezifikation von Ausdrücken über Objekten.
- OCL wird in UML verwendet, um **Klasseninvarianten und Vor- und Nachbedingungen** zu spezifizieren.
- Eine Java-Implementierung einer **Methode** ist **partiell/total korrekt** bzgl. ihrer Spezifikation in UML, wenn sie partiell/total korrekt ist bzgl der Vor- und Nachbedingungen und wenn sie alle Invarianten erhält.
- **OCL-Vorbedingungen und Klasseninvarianten** werden in Java durch **kontrollierte Ausnahmen** implementiert;
  interne Invarianten (z.B. Schleifeninvarianten) und **Nachbedingungen** werden mittels **„assert“** implementiert und getestet.