Martin Glinz

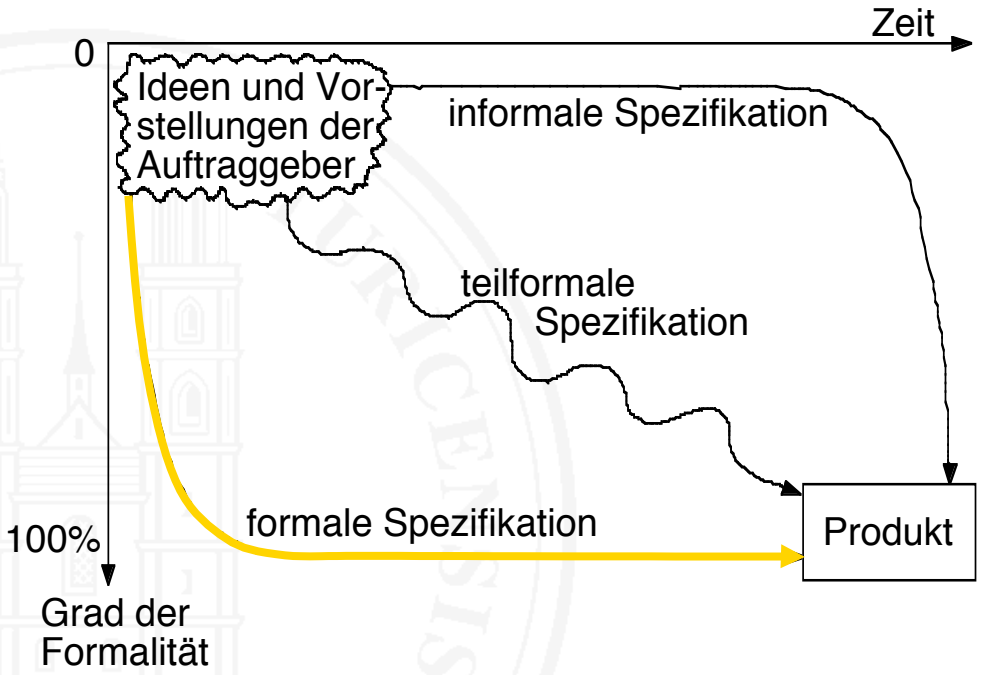
Requirements Engineering I

Kapitel 10

Formale Spezifikation

Universität Zürich
Institut für Informatik

10.1 Grundlagen



Die Vision

- Das Problem analysieren
- Anforderungen formal spezifizieren
- Implementierung durch korrektheitserhaltende Transformationen
- Pflege der Anforderungsspezifikation, nicht des Codes

Mittel und Formen

Was bedeutet „formal“?

- Formaler Kalkül, d.h. Verwendung einer Spezifikationssprache mit
  - formal definierter Syntax
    und
  - formal definierter Semantik
- Primär zur Spezifikation funktionaler Anforderungen

Welche Arten?

- Rein deskriptiv, zum Beispiel Algebraische Spezifikation
- Rein konstruktiv, zum Beispiel Petrinetze
- Modellbasierte Mischformen, zum Beispiel OCL, VDM und Z

10.2 Algebraische Spezifikation

- Deskriptive, formale Methode
- Primär für die formale Spezifikation komplexer Datentypen
- Syntax durch Signaturen (Definitions- und Wertebereiche) der Operationen
- Semantik durch Axiome (Ausdrücke, die immer wahr sein müssen)
- Axiome beschreiben im Wesentlichen Invarianten unter der Anwendung von Funktionen
- Eines der ältesten formalen Spezifikationsverfahren (seit ca. 1977)
- Schwer lesbar
- Unter- und Überspezifikation schwer erkennbar
- Hat den Sprung aus der Forschung in die Praxis nie geschafft

Algebraische Spezifikation: Beispiel

Spezifikation eines Kellers (Stack)

Sei bool der Datentyp mit dem Wertebereich {false, true} und der Booleschen Algebra als Operationen. Sei ferner elem der Datentyp für die Datenelemente, die im spezifizierten Keller zu speichern sind.

```
TYPE Stack
FUNCTIONS
new:    ()              →  Stack;  -- neuen (leeren) Keller anlegen
push:   (Stack, elem)   →  Stack;  -- Element hinzufügen
pop:    Stack           →  Stack;  -- zuletzt hinzugefügtes Element entfernen
top:    Stack           →  elem;   -- liefert zuletzt hinzugefügtes Element
empty:  Stack           →  bool;   -- wahr, wenn Keller kein Element enthält
full:   Stack           →  bool;   -- wahr, wenn Keller voll ist
```

Algebraische Spezifikation: Beispiel – 2

AXIOMS

$\forall s \in Stack, e \in elem$

(1) $\neg$ full(s) $\rightarrow$ pop(push(s,e)) = s	-- Pop hebt den Effekt von Push auf
(2) $\neg$ full(s) $\rightarrow$ top(push(s,e)) = e	-- Top liefert das zuletzt gespeicherte Element
(3) empty(new) = true	-- ein neuer Keller ist leer
(4) $\neg$ full(s) $\rightarrow$ empty(push(s,e)) = false	-- nach Push ist ein Keller nicht mehr leer
(5) full(new) = false	-- ein neuer Keller ist nicht voll
(6) $\neg$ emtpy(s) $\rightarrow$ full(pop(s)) = false	-- nach Pop ist ein Keller niemals voll

10.3 Modellbasierte formale Spezifikation

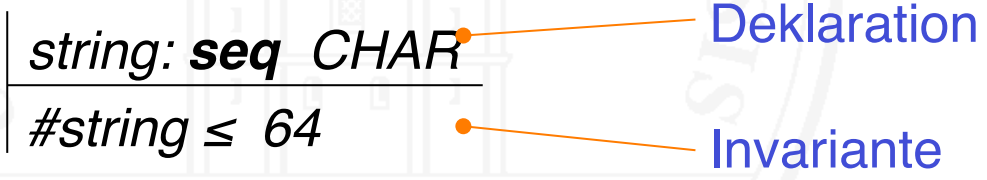
- Mathematisches Modell des Systemzustands und seiner Veränderungen
- Basierend auf Mengen, Relationen und logischen Ausdrücken
- Beschreibung von
  - Grundmengen
  - Zusammenhängen zwischen Mengen (Relationen, Funktionen)
  - Invarianten (Prädikate)
  - Zustandsveränderungen (Relationen, Funktionen)
  - Zusicherungen für Zustände
- Bekannte Vertreter:
  - VDM (Vienna Development Method, Björner und Jones 1978)
  - Z (Spivey 1992)
  - OCL (ab 1997; OMG 2006)
  - Alloy (Jackson 2002), B (Abrial 2009)

10.3.1 Die Spezifikationssprache Z

- Nur grober Überblick und einige Beispiele
- Mehr in einschlägiger Literatur, zum Beispiel Jacky (1997)
- Heute wahrscheinlich die in der Praxis am häufigsten verwendete formale Spezifikationssprache

Die Grundelemente von Z

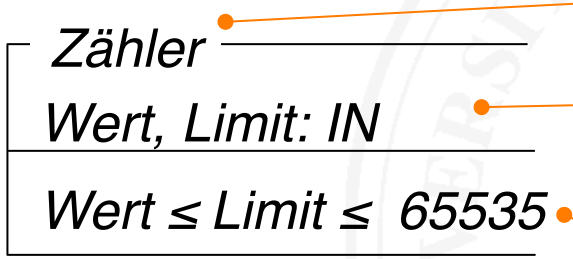
- Z basiert auf Mengen
- Eine Spezifikation besteht aus Mengen, Typen, Axiomen und Schemata
- Typen sind Grundmengen: *[Name]* *[Datum]* *IN*
- Mengen haben einen Typ: *Person: ℙ Name* *Zähler: IN*
- Axiome definieren globale Variablen und deren (invariante) Eigenschaften:



IN	Menge der natürlichen Zahlen
ℙ M	Menge aller Teilmengen von *M*
seq	Sequenz von Elementen
#M	Anzahl Elemente der Menge *M*

Die Grundelemente von Z – 2

- Schemata gliedern eine Z-Spezifikation und bilden einen eigenen Namensraum:



Name

Deklarationsteil:
Deklaration von Zustandsvariablen

Prädikatsteil:
- Restriktionen
- Invarianten
- Beziehungen
- Zustandsveränderungen

Relationen, Funktionen und Operationen

- Relationen und Funktionen sind Mengen geordneter Tupel:

  Bestellung: ℙ (Teil x Lieferant x Datum)

  Geburtstag: Person → Datum

Eine Teilmenge aller geordneten Tripel (t, l, d) mit t ∈ *Teil*, l ∈ *Lieferant* und d ∈ *Datum*

eine Funktion, die jeder Person genau ein Datum als Geburtstag zuordnet

- Zustandsveränderung durch Operationen:

Inkrementieren

Δ Zähler

Wert < Limit
Wert' = Wert + 1
Limit' = Limit

Δ S	Die in S definierten Mengen werden verändert
M'	Zustand der Menge M *nach* Ausführung der Operation

Mathematische Gleichheit; keine Zuweisung!

Beispiel: Spezifikation eines Bibliothekssystems

Die Bibliothek hat einen Bestand an Büchern und eine Menge von Personen als Benutzer.

Bücher aus dem Bestand können an Benutzer ausgeliehen sein.

Bibliothek

$$Bestand: \mathbb{P}\ Buch$$
$$Benutzer: \mathbb{P}\ Person$$
$$ausgeliehen: Buch \pfun Person$$

$$\mathbf{dom}\ ausgeliehen \subseteq Bestand$$
$$\mathbf{ran}\ ausgeliehen \subseteq Benutzer$$

$\pfun$	partielle Funktion
dom	Definitionsbereich...
ran	Wertebereich...
	...einer Relation

Spezifikation eines Bibliothekssystems – 2

Nicht ausgeliehene Bücher aus dem Bestand können von Benutzern ausgeliehen werden.

Ausleihen

Δ *Bibliothek*
auszuleihendesBuch?: Buch
Ausleiher?: Person

$auszuleihendesBuch? \in Bestand \setminus \mathbf{dom}\ ausgeliehen$
$Ausleiher? \in Benutzer$
$ausgeliehen' = ausgeliehen \cup \{(auszuleihendesBuch?, Ausleiher?)\}$
$Bestand' = Bestand$
$Benutzer' = Benutzer$

x?	*x* ist Eingabevariable
$a \in X$	*a* ist Element der Menge *X*
$\setminus$	Mengendifferenzoperator
$\cup$	Vereinigungsoperator

Spezifikation eines Bibliothekssystems – 3

Es kann erfragt werden, ob ein bestimmtes Buch ausgeliehen ist.

AnfrageObAusleihbar

Ξ *Bibliothek*
angefragtesBuch?: Buch
istAusleihbar!: {ja, nein}

$angefragtesBuch? \in Bestand$
$istAusleihbar! =$ ***if*** $angefragtesBuch? \notin$ ***dom*** *ausgeliehen*
then *ja* ***else*** *nein*

x! x ist Ausgabevariable

Aufgabe 10.1

Zu erstellen ist ein System zur Erteilung und Verwaltung von Autorisierungen für Dokumente.

Gegeben seien folgende Mengen:

Autorisierung

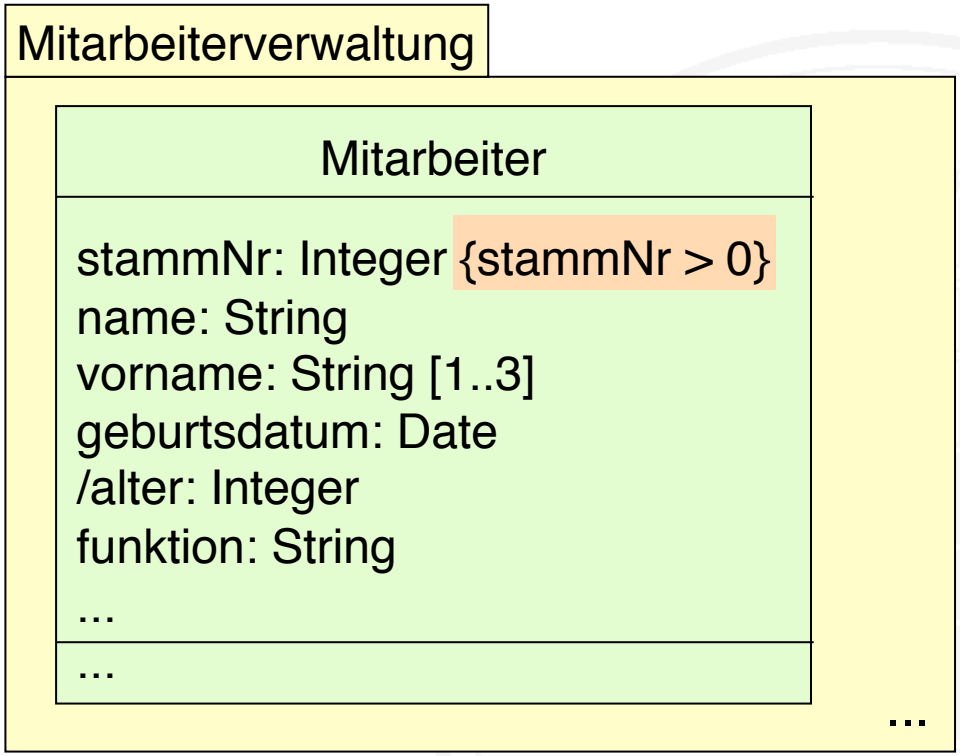
$Bestand: \mathbb{P}\ Dokument$
$Mitarbeiter: \mathbb{P}\ Person$
$autorisiert: \mathbb{P}\ (Dokument \times Person)$
$gesperrt: \mathbb{P}\ (Dokument \times Datum)$

Spezifizieren Sie eine Operation, welche einem Mitarbeiter oder einer Mitarbeiterin die Berechtigung für den Zugang zu einem nicht gesperrten Dokument gibt, in einem Z-Schema.

10.3.2 OCL (Object Constraint Language)

- Was ist OCL?
  - Eine textuelle formale Sprache
  - Dient zur Präzisierung von UML Modellen
  - Jeder OCL-Ausdruck steht im Kontext eines UML Modellelements
  - Ursprünglich von IBM als Sprache zur formalen Formulierung von Integritätsbedingungen entwickelt
  - 1997 in UML 1.1 integriert
  - Liegt aktuell in Version 2.0 vor
- Verwendung von OCL
  - Spezifikation von Invarianten (i.e. zusätzliche Restriktionen) auf UML Modellen
  - Spezifikation der Semantik von Operationen in UML Modellen
  - Auch verwendbar als Anfragesprache auf UML Modellen

OCL-Ausdrücke: Invarianten

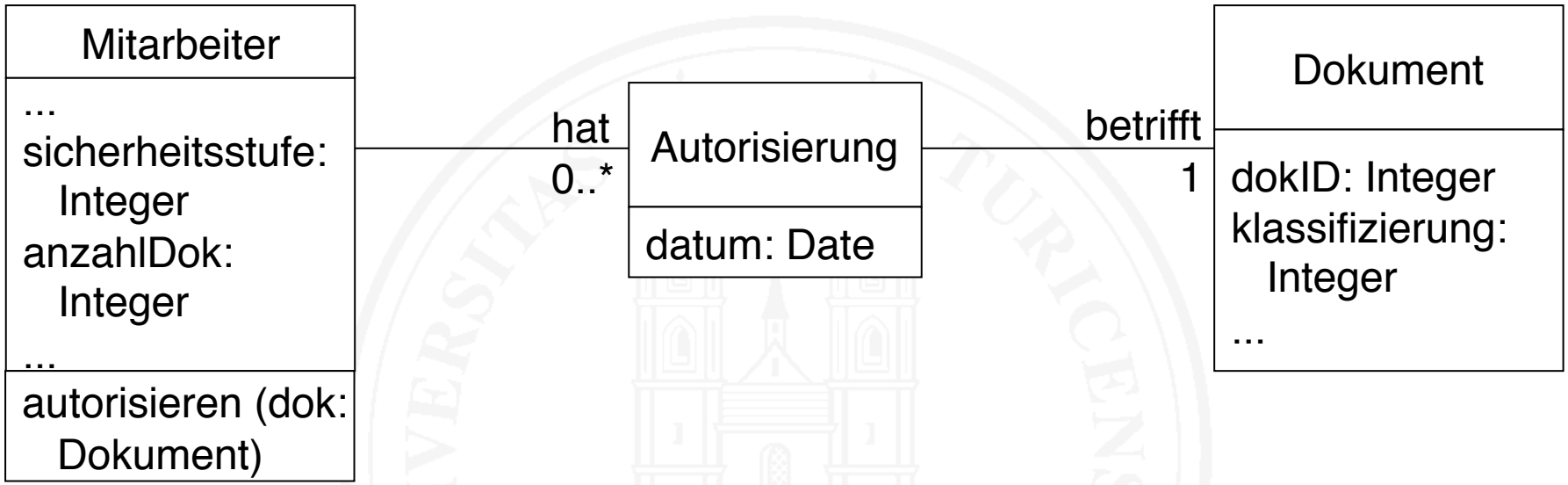


- OCL-Ausdruck ist Bestandteil eines UML Modellelements
- Kontext für OCL-Ausdruck ist implizit gegeben

context Mitarbeiterverwaltung::Mitarbeiter **inv**:
self.funktion = "Fahrer" **implies** self.alter ≥ 18

- OCL Ausdruck wird separat aufgeschrieben
- Kontext muss explizit spezifiziert werden

OCL Ausdrücke: Semantik von Operationen



context Mitarbeiter::autorisieren (dok: Dokument)
pre: self.sicherheitsstufe ≥ dok.klassifizierung
post: anzahlDok = anzahlDok@pre + 1
and
self.hat->**exists** (a: Autorisierung | a.betrifft = dok)

Navigation, Aussagen über Mengen in OCL

- Personen mit Sicherheitsstufe 0 können für kein Dokument autorisiert werden:

  context Mitarbeiter **inv**: self.sicherheitsstufe = 0 **implies**
  self.hat->isEmpty()

Navigation vom aktuellen Objekt zu einer Menge assoziierter Objekte

Anwendung einer Funktion auf eine Resultatmenge

Navigation, Aussagen über Mengen in OCL – 2

Weitere Beispiele:

- Die Anzahl der Dokumente für jeden Mitarbeiter muss mit der Menge der bestehenden Autorisierungen übereinstimmen:

  context Mitarbeiter **inv**: self.hat->size() = self.anzahlDok

- Die für eine Person autorisierten Dokumente sind alle voneinander verschieden

  context Mitarbeiter **inv**: self.hat->**forAll** (a1, a2: Autorisierung |
  a1 <> a2 **implies** a1.betrifft.dokID <> a2.betrifft.dokID)

- Es gibt maximal 1000 Dokumente:

  context Dokument **inv**: Dokument.allInstances()->size() ≤ 1000

Elemente von OCL (Auszug)

- Art und Kontext: **context**, **inv**, **pre**, **post**
- Prädikatenlogische Ausdrücke: **and**, **or**, **not**, **implies**, **exists**, **forAll**
- Fallunterscheidung: **if then else**
- Operationen auf Resultatmengen: size(), isEmpty(), notEmpty(), sum()
- Funktionen zur Modellreflexion, zum Beispiel liefert die Funktion *self.oclIsTypeOf (Mitarbeiter)* im Kontext von Mitarbeiter immer den Wert WAHR
- Aussagen über alle Instanzen einer Klasse: allInstances()
- Navigation: übliche Punktnotation — self.hat.datum = ...
- Anwendung auf Mengen: Pfeilnotation — self.hat->size()
- Zustandsveränderung: @pre-Notation — anzahlDok = anzahlDok@pre + 1

10.4 Nachweis geforderter Eigenschaften

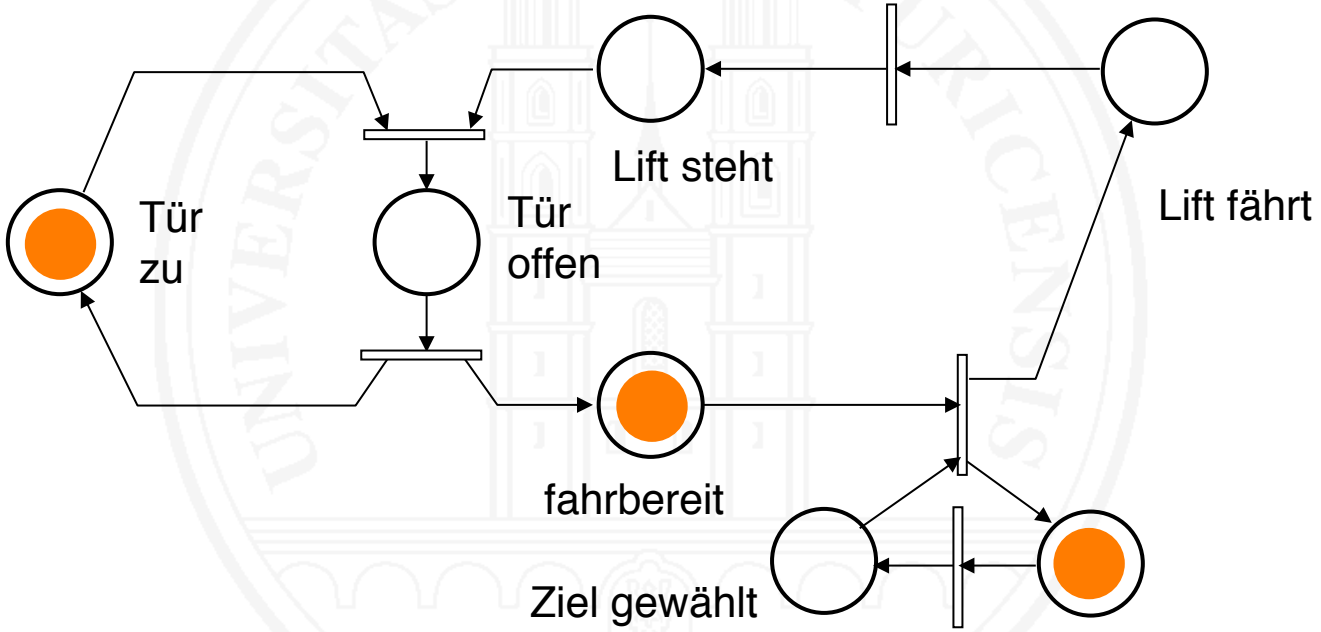
- Werden Anforderungen durch Modelle beschrieben, so möchte man wissen, ob das Modell gewisse geforderte Eigenschaften aufweist.
- Formale Spezifikationen erlauben
  - die Gültigkeit von Eigenschaften zu beweisen

    Verfahren: mathematisch-logisches Schließen, unterstützt durch Theorembeweiser-Software
  - die Gültigkeit von Invarianten automatisiert zu testen und ggf. Gegenbeispiele zu finden

    Verfahren: Systematisches, automatisiertes Explorieren des gesamten Zustandsraums der Spezifikation und Prüfen der gewünschten Eigenschaft in jedem Zustand (Model Checking)
- Eigenschaften, deren Gültigkeit man beweisen oder testen möchte, sind zum Beispiel sicherheitskritische Invarianten

Beispiel: Beweis einer Sicherheitseigenschaft

Eine stark vereinfachte Liftsteuerung sei mit einem einfachen Petrinetz modelliert (vgl. Vorlesung Informatik IIa: Modellierung):



Zu beweisen sei die Sicherheitseigenschaft, dass der Lift nur mit geschlossenen Türen fahren kann

Beispiel: Beweis einer Sicherheitseigenschaft – 2

Beweis:

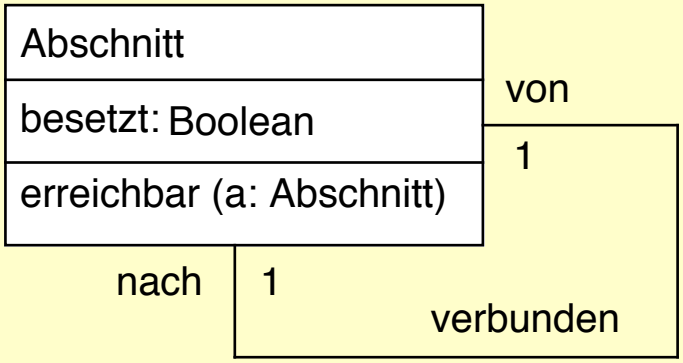
Zu beweisen ist, dass die Transition von *fahrbereit* nach *Lift fährt* nur feuern kann, wenn *Tür zu* markiert ist

- Aufgrund der Definition einfacher Petrinetze gilt
  - Die Transition von *fahrbereit* nach *Lift fährt* kann nur feuern, wenn *fahrbereit* markiert ist (1)
  - Wenn *fahrbereit* markiert ist, kann *Tür offen* nicht markiert sein, da im Zyklus *fahrbereit* - *Lift fährt* - *Lift steht* - *Tür offen* genau eine Marke zirkuliert (2)
  - Wenn *Tür offen* nicht markiert ist, muss *Tür zu* markiert sein (3)
- (1), (2), (3) $\Rightarrow$ Die Transition von *fahrbereit nach Lift fährt* kann nur feuern, wenn *Tür zu* markiert ist

□

Aufgabe 10.2 Modell einer Ringbahnlinie

Eine ringförmige S-Bahn-Strecke mit 10 aufeinander folgenden Streckenabschnitten sei mit UML und OCL wie folgt modelliert:



context Abschnitt::erreichbar (a: Abschnitt): Boolean
post:
result = (self.nach = a) **or** (self.nach.erreichbar (a))

context Abschnitt **inv**:
Abschnitt.allInstances->size = 10

In einem Ring muss jeder Abschnitt von jedem anderen Abschnitt und von sich selbst aus erreichbar sein. Es muss also gelten:

context Abschnitt **inv** (1)
Abschnitt.allInstances->forAll (x, y | x.erreichbar (y))

a) Falsifizieren Sie diese Invariante, indem Sie ein Gegenbeispiel finden

Aufgabe 10.2 Modell einer Ringbahnlinie – 2

Lediglich folgende triviale Invariante ist beweisbar:

context Abschnitt **inv**:
Abschnitt.allInstances->forAll (x | x.erreichbar (x))

b) Führen Sie den Beweis mit Hilfe der Definition der Operation erreichbar

Das Modell der S-Bahn-Strecke ist offensichtlich falsch. Es bildet die Eigenschaft, ringförmig zu sein nicht korrekt ab.

c) Wie müsste das Modell verändert werden, damit die Erreichbarkeits-Invariante (1) korrekt wird?

10.5 Bewertung formaler Spezifikation

Stärken

+ Immer eindeutig (da Semantik formal definiert)
+ Widerspruchsfreiheit formal prüfbar
+ Erfüllung wichtiger Eigenschaften beweisbar / automatisiert testbar
+ Lösungsneutral
+ Formale Verifikation von Programmen möglich
+ Modelle simulierbar/animierbar, z.B. Petrinetze

Bewertung formaler Spezifikation – 2

Schwächen

- Erstellung sehr aufwendig
- Prüfung/Nachweis der Vollständigkeit wird nicht einfacher
- Nicht ohne profunde Ausbildung lesbar → Prüfung auf Adäquatheit schwierig
- Große Spezifikationen auch für Fachleute schwer zu verstehen
- Aspekte wie Benutzerschnittstellen sind praktisch nicht modellierbar
- Beschreibung von Ausnahmefällen schwierig
- Zum Teil muss perfekte Technologie angenommen werden

Machbarkeit/Wirtschaftlichkeit formaler Spezifikation

- Marginale Rolle in der Praxis
  - trotz theoretischer Vorteile
  - trotz intensiver Forschung (zum Beispiel Algebraische Spezifikation seit ca. 1977)
- Einsatz heute
  - Punktuell sinnvoll und möglich
  - Vor allem für sicherheitskritische Komponenten
  - Einsatz in der Breite
    - nicht möglich (Prüfung auf Adäquatheit!)
    - nicht sinnvoll (unwirtschaftlich)
- Auch möglich: Teilformale Spezifikation mit gezielter Formalisierung kritischer Teile

Literatur

Abrial, J.-R. (2009). *Modelling in Event-B: System and Software Engineering*. Cambridge: Cambridge University Press.

Björner, D., C. Jones (1978). *The Vienna Development Method*. Berlin, etc.: Springer.

Jackson, D. (2002). Alloy: A Lightweight Object Modelling Notation. *ACM Transactions on Software Engineering and Methodology* **11** , 2. 256-290.

Jacky, J. (1997). *The Way of Z: Practical Programming With Formal Methods*. Cambridge: Cambridge University Press.

OMG (2005). *UML Superstructure Specification, v2.0*. OMG document formal/05-07-04. http://www.omg.org/cgi-bin/doc?formal/05-07-04

OMG (2006). *Object Constraint Language, v2.0*. OMG document formal/06-05-0 http://www.omg.org/cgi-bin/doc?formal/06-05-01

Pepper, P. et al. (1982). Abstrakte Datentypen: Die algebraische Spezifikation von Rechenstrukturen. *Informatik-Spektrum* **5**, (1982). 107-119.

Spivey, J.M. (1992). *The Z Notation: A Reference Manual*. Second Edition. Hemel Hempstead: Prentice Hall International.

Wordsworth, J.B. (1992). *Software Development with Z: A Practical Approach to Formal Methods in Software Engineering*. Wokingham, etc.: Addison-Wesley.